

การกำจัดเชื้อพยาธิยาโนโคบอลเตตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการออกซิเดชันเฟอร์เรต



นางสาวศินี กิตติสาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEXACYANOCOBALTATE IN SYNTHETIC WASTEWATER  
BY FERRATE OXIDATION



Miss Wasinee Kittisarn

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดในน้ำเสียสังเคราะห์โดย  
วิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

โดย

นางสาววศินี กิตติสาร


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจมรัฐ โอสถาพันธุ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาลิต รัตนธรรมสกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจมรัฐ โอสถาพันธุ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ชมสุรินทร์)


วทีนึ กิตติสาร : การกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการออกซิเดชันเฟอร์เรต. (REMOVAL OF HEXACYANOCOBALTATE IN SYNTHETIC WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ, 117 หน้า.

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอันตรายที่มักพบอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะ วิธีการกำจัดไซยาไนด์โดยทั่วไปคือ การกำจัดโดยการออกซิเดชัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบวนการออกซิเดชันของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์ ไซยาไนด์ในรูปโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต การวิจัยจะทำการศึกษาผลของพีเอช (9 10 และ 11) และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ในการทดลองแรก ทดลองที่ความเข้มข้นเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ ช่วงความเข้มข้นของไซยาไนด์ (500 250 100 50 25 20 12.5 และ 10 ไมโครโมลาร์) ผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 50:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูงที่สุดเท่ากับ 100% โดยผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต คือไนไตรท์ และไนเตรท

ในส่วนที่สอง ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 5:1 พบว่าที่พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด

ในส่วนสุดท้าย ทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 20 ไมโครโมลาร์ ช่วงความเข้มข้นของเฟอร์เรต (20 40 100 200 400 และ 500 ไมโครโมลาร์) ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เดียวกัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแรก โดยผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต คือไนไตรท์ และไนเตรท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....      ลายมือชื่อนิสิต..... วศิณี กิตติสาร.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....      ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....   
 ปีการศึกษา.....2552

## 5070609121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CYANIDE / HEXACYANOCOBALTATE / FERRATE / OXIDATION

WASINEE KITIISARN : REMOVAL OF HEXACYANOCOBALTATE IN SYNTHETIC WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION. ADVISOR : THESIS ADVISOR: KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., 117 pp.

Cyanide is a highly toxic substance that is found in the metal plating industrial wastewater. Oxidation technique is generally applied for cyanide treatment technologies. The objective of this research in order to the oxidation process of cobalt cyanide complex which in a potassium hexacyanocobaltate ( $K_3Co(CN)_6$ ] by ferrate(VI) ( $Fe^{VI}O_4^{2-}$ , Fe(VI)). and To study the effect of pH (9 10 and 11) and the increased mole fractions of ferrate per cyanide to performance in cyanide removal and all obtain products.

The first experiment was concentration of 500 $\mu$ M ferrate, concentration of (500 250 100 50 25 20 12.5 and 10 $\mu$ M) cyanide. The result, shown the highest efficiency of cyanide removal at pH 10 and mole fractions of 50:1 ferrate per cyanide at 100%.

The second experiment was reaction rate at pH 9 10 and 11 mole fraction of 5:1 ferrate per cyanide. The result, shown the fast rate at pH 10

The final experiment was concentration of 20 $\mu$ M cyanide, concentration of (20 40 100 200 400 and 500 $\mu$ M) ferrate. This result is consistent with the first results of experiment. Nitrite and Nitrate that occur from removed hexacyanocobaltate complex.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2009 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่ง ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณ Virender K. Sharma สำหรับการแนะนำ สารเคมีโพแทสเซียมเฟอร์เรต และเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ชมสุรินทร์ และ อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย ได้แก่ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณพี่เอิธ ศิลาวุธ คำรงค์ศิริ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและสอนการใช้เครื่องมือ และขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและสอนใช้เครื่องมือ ตลอดการทำวิจัยนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชาย เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้สามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้ตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.1 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.2.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	5
2.1.2.2 การล้างไขมัน.....	5
2.1.2.3 การล้างสนิม.....	5
2.1.2.4 การชุบโลหะ.....	5
2.1.2.5 การล้างชิ้นงาน.....	6
2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสียจากการชุบโลหะ.....	6
2.2 ไชยาไนต์.....	8
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ไชยาไนต์.....	8
2.2.2 การแบ่งประเภทของ ไชยาไนต์.....	8
2.2.2.1 ไชยาไนต์อิสระ.....	8
2.2.2.2 สารประกอบ ไชยาไนต์เชิงซ้อน.....	9
2.2.2.3 สารประกอบ ไชยาไนต์อื่นๆ.....	10
2.2.3 ความเป็นพิษของ ไชยาไนต์.....	11

2.2.4	ค่ามาตรฐานต่างๆ ของไซยาไนด์ในประเทศไทย.....	12
2.2.5	การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย.....	13
2.2.5.1	การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนหรืออัลคาไลน์คลอรีนชั้น.....	13
2.2.5.2	การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	14
2.2.5.3	การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfer Dioxide / Air.....	14
2.2.5.4	การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid.....	15
2.2.5.5	การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์มังกานต.....	15
2.2.5.6	การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน.....	15
2.2.5.7	การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.....	16
2.2.5.8	การออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	16
2.2.5.9	การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์.....	17
2.2.5.10	การตกตะกอน โดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของ ไซยาไนด์กับเหล็ก.....	17
2.2.5.11	การสลายตัวด้วยไฟฟ้า.....	17
2.2.5.12	การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ.....	18
2.2.5.13	การออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต.....	19
2.2.6	ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์.....	19
2.3	โลหะผสมโคบอลต์.....	24
2.4	เฟอร์เรต.....	25
2.4.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	25
2.4.1.1	การแตกตัวของเฟอร์เรต.....	25
2.4.1.2	กำลังในการออกซิไดซ์.....	26
2.4.1.3	ความเสถียรของเฟอร์เรต.....	26
2.4.2	การเตรียมเฟอร์เรต.....	28
2.3.2.1	วิธีการ Dry Oxidation.....	28
2.3.2.2	วิธีการ Wet Oxidation.....	28
2.3.2.3	วิธีการ Electro-Chemical.....	28
2.4.3	ประโยชน์ของเฟอร์เรตในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	29
2.4.3.1	การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	29
2.4.3.2	การฆ่าเชื้อโรค.....	30



2.4.3.3 การโคแอกกูเลชัน.....	32
2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต.....	33
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>36</b>
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	36
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
3.1.2 สารเคมี.....	36
3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต.....	37
3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ.....	37
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	37
3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต.....	38
3.3 ตัวแปรในการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	42
3.4.1 ศึกษาผลของพีเอชและอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์.....	42
3.4.2 ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	46
3.4.3 ศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอชเหมาะสม....	48
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>46</b>
4.1 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต.....	50
4.4.1 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 .....	50
4.4.2 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ .....	53
4.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	59
4.3 ผลของอัตราส่วน โดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอชเหมาะสม.....	63
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>69</b>
5.1 สรุปผลวิจัย.....	69
5.1.1 ของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	69

5.1.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	69
5.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	70
5.1.4 การประยุกต์ใช้น้ำเสียจริง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	79
ภาคผนวก ข. การเก็บรักษาตัวอย่าง.....	85
ภาคผนวก ค. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์.....	86
ภาคผนวก ง. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท.....	89
ภาคผนวก จ. ผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต....	91
ภาคผนวก ฉ. ผลอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	100
ภาคผนวก ช. ผลผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอช 10 ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	104
ภาคผนวก ซ. การคำนวณสมมูลมวล	111
ภาคผนวก ฌ. ความผิดพลาดในการทดลอง และค่าความแม่นยำของอุปกรณ์.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.....	7
2.2	แหล่งกำเนิดและสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	7
2.3	ค่าคงที่ของค่าความคงตัว ( $\beta$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	10
2.4	ค่าคงที่ของความคงตัว (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	10
2.5	ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ.....	11
2.6	ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆ ในประเทศไทย.....	12
2.7	ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์และสารมาเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	26
2.8	ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต.....	30
2.9	อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์กับสารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ.....	33
3.1	การผสมน้ำเสียสังเคราะห์เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในการทดลองปริมาตร 50 มล.....	38
3.2	ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง.....	39
3.3	ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต .....	39
3.4	แปรในการศึกษาผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	40
3.5	ตัวแปรในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	40
3.6	ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอชเหมาะสม ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต.....	41
4.1	ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์.....	54
4.2	%ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อน เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรต	

	เริ่มต้นครั้งที่ 500 ไมโครโมลาร์.....	54
4.3	%สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นครั้งที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9.....	57
4.4	%สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นครั้งที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10.....	57
4.5	%สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นครั้งที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 11.....	58
4.6	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาทิจ)	62
4.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดด้วยเฟอร์เรต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดในรูปไซยาไนด์เริ่มต้นครั้งที่ 20 ไมโครโมลาร์.....	64
4.8	%ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อน เฮกซะไซยาโนโคบอลเตดที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นครั้งที่ 500 ไมโครโมลาร์.....	64
จ	ผลการศึกษาผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพ.....	92
ฉ.1	ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช9 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์1:5	101
ฉ.2	ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช10 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์1:5	102
ฉ.3	ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช11 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์1:5	103
ช.1	ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่างๆ ที่พีเอช 10 ต่อประสิทธิภาพ.....	105
ช.1	วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	112
ฅ.1	ค่าความจำจุของไมโครปิเปตกับความแม่นยำ.....	115
ฅ.2	Accuracy Standard Nitrite and Nitrate ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	116
ฅ.3	ค่า Detection Limit ของ Anion ต่างๆ.....	116

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.2	ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.3	ปริมาณไซยาไนด์ไอออน (CN <sup>-</sup> ) กับกรดไซยานิค (HCN) ที่พีเอชต่างๆ.....	9
2.4	รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่มีพีเอชต่างๆ.....	25
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตลงเหลือ.....	27
2.6	ลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอิดีทีเอ.....	35
3.1	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.1.....	43
3.2	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.2.....	45
3.3	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.2.....	47
3.4	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.3.....	49
4.1	ไอออนก่อนทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์ เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์.....	50
4.2	ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ความเข้มข้นเฮกซะไซยา โนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1.....	51
4.3	ไอออนหลังทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์ เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1	51
4.4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิ เกิล สังกะสี ไซยาไนด์ และน้ำเสียของสารประกอบโคบอลไซยาไนด์.....	52
4.5	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอช 9 10 และ 11 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต เท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 25:1 40:1 และ 50:1 .....	55
4.6	ไซยาไนด์คงเหลือกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (%) กับเวลา 0 ถึง 420 นาที ที่พีเอช 9 10 และ 11.....	60
4.7	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (%) กับเวลา 0 ถึง 420 นาที ที่พีเอช 9 10 และ 11.....	61
4.8	ไซยาไนด์คงเหลือ (%) กับเวลา 0 ถึง 420 นาที ที่พีเอช 9 10 และ 11.....	61
4.9	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอช 10	

	ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต เท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1.....	65
4.10	%ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต เท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1.....	65
4.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตเดียวกัน.....	66
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 20 ไมโคร โมลาร์.....	67
ก.1	การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V) (Bielski และ Thomas, 1987).....	80
ก.2	ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับตัวกลางชนิดต่างๆที่เวลา 60 นาที.....	82
ก.3	ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 60 นาที.....	83
ค.1	สัญญาณของไซยาไนด์ และซัลไฟด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	87
ง.1	สัญญาณของ ไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	90

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการชุบโลหะ เป็นอุตสาหกรรมอย่างหนึ่งที่กระจายตัวอยู่ในประเทศไทย น้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ จะมีการปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิด เช่น โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี หรือโลหะอื่นๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของการชุบ ในกระบวนการชุบโลหะจะมีการใช้ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอย่างหนึ่งที่นิยมใช้เป็นสารช่วยในการทำความสะอาดผิวโลหะที่จะชุบและใช้เป็นสารเคลือบเพื่อให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ดี น้ำเสียเหล่านี้จึงมีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการกิน การหายใจ และการซึมผ่านผิวหนัง อาการที่เกิดขึ้นมีทั้งอาการระคายเคืองและเฉียบพลัน ซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิต ผลจากการตรวจสอบน้ำเสียขึ้นต้นจากโรงงานชุบโลหะขนาดกลางและเล็กหลายแห่งพบว่า มีความเข้มข้นของไซยาไนด์และโลหะหนักอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และหลายแห่งมีการจัดเก็บน้ำเสียที่ไม่เหมาะสม

วิธีการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยคือ การออกซิเดชันด้วยไฮโปคลอไรต์ (Alkali Chlorine Method) นอกจากนี้ยังมี การทดลองกำจัดด้วยวิธีอื่นๆ อีก เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต การใช้โอโซน และการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า แต่ละวิธีที่กล่าวมาสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดี แต่จะมีข้อเสียต่างกันไป เช่น การออกซิเดชันด้วยคลอรีนจะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเนื่องจากคลอรีนและทำให้น้ำเกิดความเป็นกรด การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตต้องมีเครื่องมือในการผลิตรังสี และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง และการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก

เฟอร์เรต ( $\text{FeO}_4^{2-}$ ) เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แทนสารออกซิไดซ์อื่นๆ เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ มีกำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) สูง ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ เป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา ทำให้ประหยัดกว่าสารที่ไม่เลือกทำปฏิกิริยา และ ปัจจุบันการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่โรงงานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย เฟอร์เรตจึงเป็นสารเคมีที่น่าสนใจศึกษา

การศึกษการใช้เฟอร์เรต ในการกำจัดไซยาไนด์ที่เคยมีการศึกษามา คือ การใช้เฟอร์เรตในการกำจัด ไซยาไนด์อิสระ ซึ่งได้ผลในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงได้ประมาณ 90% ซึ่งคาดว่าที่เหลืออีก 10% คือสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ ซึ่งมีความคงทนต่อการออกซิไดซ์

การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกที่จะศึกษการใช้เฟอร์เรต ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ที่เกิดกับโคบอลต์ที่จะมีในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ ในส่วนที่ศึกษาจะเป็นการศึกษาถึงผลของสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไซยาไนด์ และสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อหาพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลพีเอช ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1 ต่อประสิทธิภาพและผลิตภัณฑ์ในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิโดซ์ด้วยเฟอร์เรต
2. เพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่างๆ
3. เพื่อศึกษาผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต
4. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอชเหมาะสม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยไว้ดังนี้ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ เพื่อศึกษาผลของสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตโดยวิธีการออกซิโดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยศึกษาถึงผลกระทบของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุด 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นเฟอร์เรตสูงสุด 500 ไมโครโมลาร์ และในการควบคุมพีเอชจะใช้ความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่น้อยที่สุดเพื่อให้รบกวนปฏิกิริยาน้อยที่สุด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต
2. ทราบถึงพีเอช ระยะเวลา และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเป็นส่วนประกอบหลัก



## บทที่ 2

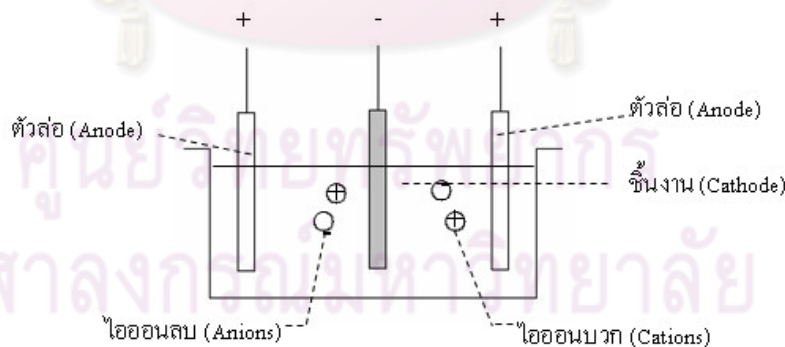
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

อุตสาหกรรมการชุบโลหะจะกระทำด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น การชุบเพื่อความสวยงาม การชุบเพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน และการชุบเพื่อรองพื้นหรือเพิ่มความหนาของชิ้นงาน โลหะที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ ทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี และ ทองคำ เป็นต้น

##### 2.1.1 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การนำชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการนำเอาชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วลบ(Cathode) และนำโลหะที่จะนำไปเคลือบชิ้นงานหรือไม่ใช้ก็ได้ ไปต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) ที่เรียกว่าตัวล่อ จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มลงในน้ำยาที่มีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ ปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสม ก็จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบเกิดปฏิกิริยา (อนันต์ ทองมอย, 2527) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สาโรช, 2535)

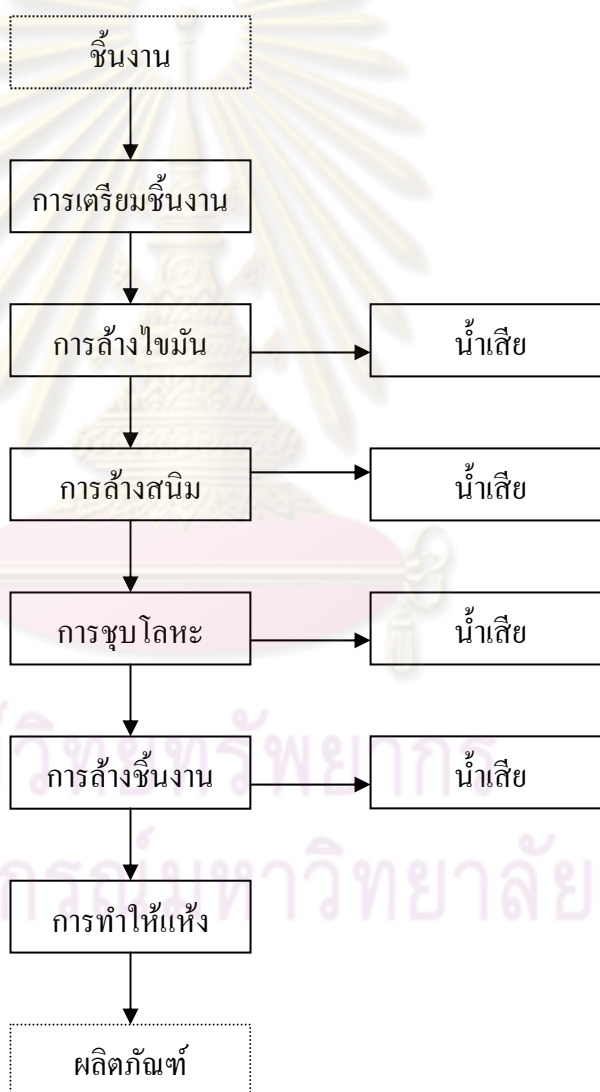
ที่ขั้วลบ ไอออนบวกของโลหะจะวิ่งไปปรับอิเล็กตรอน ที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงานดังสมการที่ (2-1)



ที่ขั้วบวก ถ้าโลหะเป็นชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบชิ้นงาน ก็ จะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอน และกลายเป็นไอออนบวกละลายลงในสารละลายดังสมการที่ (2-2)



### 2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะเริ่มจาก การขัดผิวงานให้ได้ขนาดและความเรียบตามที่ต้องการ การทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน การจุ่มกรดเพื่อล้างสนิม การนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยาชุบ การล้างน้ำ การนำไปอบแห้ง และจะได้ชิ้นงานออกมา ดังรูปที่ 2.2 น้ำเสียจากโรงชุบโลหะจะมีจากขั้นตอนการล้างไขมัน ล้างสนิม การชุบโลหะ และ การล้างชิ้นงาน

### 2.1.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

เป็นการขัดชิ้นงานก่อนชุบ แบ่งออกเป็น การขัดหยาบ และการขัดละเอียด การขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรกเพื่อเป็นการขัดเอารอยขูดขีดๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายละเอียด และถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กมากๆ อาจขัดโดยใช้ถ่มหนูที่มีหินขัดบรรจุอยู่ภายใน

### 2.1.2.2 การล้างไขมัน

เป็นขั้นตอนการล้างไขมัน และ น้ำมันด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้ตัวทำละลาย (Solvent Degreasing) การใช้สารละลายด่าง (Alkaline Degreasing) และการใช้อิเล็กโทรไลต์ในสารละลายด่าง (Electrolyzing in Alkaline Liquid)

### 2.1.2.3 การล้างสนิม

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยกรด เพื่อกำจัดออกไซด์ต่างๆ ที่ผิวชิ้นงานออก โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดอื่นๆ ที่มีการใช้กัน กรดอินทรีย์ เช่น กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และ กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดฟอร์มิก และ อีดีทีเอป็นต้น และยังมี การล้างด้วยโซดาไฟเพื่อกันสนิมขึ้นซ้ำหลังการล้าง

### 2.1.2.4 การชุบโลหะ

เป็นขั้นตอนการชุบผิวชิ้นงาน โดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะแต่ละแบบมีขั้นตอนแตกต่างกัน และการชุบโลหะบางชนิดต้องมีการรองพื้นด้วยโลหะอีกชนิดก่อนด้วย

#### - การชุบโครเมียม

1. การชุบโครเมียมแบบบาง เป็นการชุบเพื่อความสวยงาม(Decorative Chromium) เนื่องจากโครเมียมมีความแข็งและเปราะ การชุบแบบบางบนผิวเหล็กที่มีความพรุนจึงหลุดร่อนง่าย จึงต้องมีการรองพื้นด้วยทองแดง และ นิกเกิล แล้วจึงชุบด้วยโครเมียม

2. การชุบโครเมียมแบบหนา(Hard Chromium) สามารถชุบได้โดยไม่ต้องรองพื้น

#### - การชุบนิกเกิล ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานที่มีสังกะสี นิยมชุบเพื่อความสวยงาม

และความสะอาดในการทำทำความสะอาด มักจะตามด้วยการชุบโครเมียม

- การซบดั่งกะสี สามารถซบได้โดยไม่ต้องรองพื้น นิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เพื่อกันสนิม

#### - การซบทองแดง

1. การซบทองแดงแบบกรด ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานที่มีสังกะสี มีความเงางาม นิยมใช้ซบเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนนำไปชุบนิกเกิลเงา

2. การซบทองแดงแบบด่าง สามารถซบได้โดยไม่ต้องรองพื้น มีความสามารถในการเกาะจับติดแน่น นิยมใช้ซบเพื่อรองพื้นก่อนนำไปชุบแบบอื่นต่อไป เช่น ชุบงานที่มีสังกะสีก่อนแล้วนำไปชุบนิกเกิล

#### 2.1.2.5 การล้างชิ้นงาน

ขั้นตอนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดหลังจากการซบเพื่อล้างสารต่างๆ ในน้ำยาซบออก

#### 2.1.3 แหล่งที่มา และลักษณะน้ำเสียจากการชุบโลหะ

น้ำเสียที่มาจากขั้นตอนต่างๆ จะมีลักษณะ ปริมาณ และความเข้มข้นของมลพิษ ต่างๆกัน ในโรงงานที่ไม่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมน้ำเสียจากทุกแหล่งจะถูกนำมารวมกัน เป็นน้ำทิ้งรวม ส่วนในโรงงานที่มีการจัดการน้ำเสียจะมีการแยกน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ไว้เป็นประเภท น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Nemerrow, 1978)

1. น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
3. น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา
4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมา โดยอุบัติเหตุ
5. น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่ปฏิบัติงาน

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในปริมาณสูงที่ถูกปล่อยออกนั้น ส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนการล้าง ไขมันหรือน้ำมันซึ่งจะเป็นน้ำเสียที่เป็นด่าง ส่วนน้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และการกำจัดสนิมใน ส่วนนี้จะเป็นน้ำเสียกรด น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยาจะเป็นน้ำเสียที่มีโลหะหนัก และ ไชยาไนต์เป็นส่วนประกอบ น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต ส่วน น้ำเสียที่เกิดจากน้ำยาเสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีพิษสูง แต่นานๆ จะ เกิดขึ้นสักครั้ง น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่ปฏิบัติงานจะมีความเข้มข้นของ สารพิษต่ำ และปริมาณไม่มากนัก ตัวอย่างการศึกษาลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (ประยูร, 2542)

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า
Temperature	°C	27-29
pH (Cyanide Contaminated WW)		11.1-12.5
CN	ppm	316-442
Suspended Solids	ppm	290-430
Total Dissolve Solid	ppm	4,490-6,170
COD	ppm	299-473
	ppm	120-190

ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดและสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (วลัยรัตน์, 2542)

สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด	วิธีการบำบัด
น้ำมัน	สารประกอบไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ	การแยกไขมัน
ของแข็ง	ยาขัด, ทราย	การขัด	ตกตะกอน
กรด	กรดกำมะถัน กรดเกลือ กรดไนตริก กรดกัดแก้ว กรดฟอสฟอริก กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดกระตุ้นผิว การขัดเงาด้วยสารเคมี	ทำให้เป็นกลาง
ด่าง	โซดาไฟ โซดาคาร์บอเนต โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมฟอสเฟต	การต้มล้างไขมัน ทำให้เป็นกลาง กัดผิว อะลูมิเนียม	ทำให้เป็นกลาง
ไซยาไนด์	สารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ	ล้างด้วยไฟฟ้าหรือจากถังชุบ	ทำการออกซิเดชันโดยใช้สารประเภทคลอรีน
โลหะหนักในรูปของไอออน	โลหะหนักที่มีค่า ทองแดง นิกเกิล เหล็ก แคดเมียม สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นต้น	อยู่ในน้ำยาจากการเตรียมก่อนชุบ	ใช้ด่าง
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบการทำโครเมต	การทำรีดักชันและการตกตะกอน
ไอออนเชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของทองแดงและนิกเกิล	น้ำยาชุบ	ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเกิดการแตกตัว

กระบวนการในการชุบโลหะจะพบว่ามีการใช้กรด ต่าง และสารเคมีต่างๆในน้ำ ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะแตกต่างกันไป ทำให้เกิดคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถที่จะแบ่งประเภทของน้ำเสียที่เกิดขึ้นได้ 3 ประเภท ดังนี้ น้ำทิ้งประเภทกรดและด่าง น้ำทิ้งประเภทไซยาไนด์ (น้ำยาชุบทองแดง น้ำยาชุบสังกะสี น้ำยาชุบทอง) น้ำทิ้งประเภทโครเมียม (น้ำยาชุบโครเมียมหรือน้ำยาโครเมต) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (วลัยรัตน์, 2542)

## 2.2 ไซยาไนด์

### 2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์

ไซยาไนด์ (Cyanide) หมายถึง กลุ่มของ CN ทั้งหมดที่สามารถวิเคราะห์หาได้ในรูปของไซยาไนด์ไอออน โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาไซยาไนด์จะวัดเป็นปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดโดยใช้วิธีการกลั่น (Distillation Measurement)

### 2.2.2 การแบ่งประเภทของไซยาไนด์

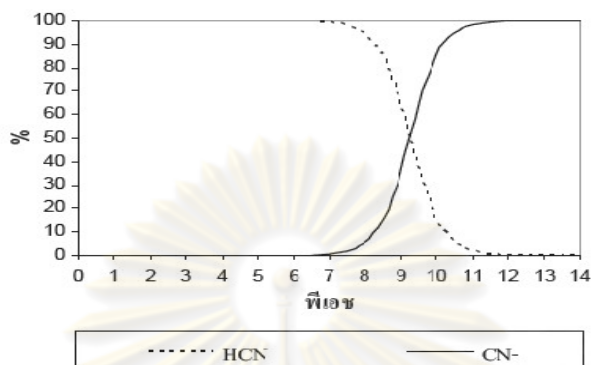
สารประกอบไซยาไนด์จะสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ โดยใช้ลักษณะของโมเลกุลซึ่งจะแบ่งออกเป็น 1. สารประกอบไซยาไนด์เชิงเดี่ยว (simple Cyanide) หมายถึง ไซยาไนด์อิสระ และ สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลน์ 2. สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนักทุกประเภท (Zheng และคณะ ,2003)

สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน จะแบ่งย่อยออกไปอีกโดยใช้ความแข็งแรงของพันธะซึ่งแบ่งได้เป็น 1. Strong Metal-Cyanide Complexes หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะแข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ทองคำ โคบอล 2. Weak Metal-Cyanide Complexes หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะไม่แข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของ เงิน แคดเมียม ทองแดง โปรท นิกเกิล และสังกะสี ทั้งหมดนี้เรียกอีกอย่างว่า Weak Acid Dissociable (WAD) (Botz, 2001)

#### 2.2.2.1 ไซยาไนด์อิสระ

ไซยาไนด์อิสระ (Free Cyanide) หมายถึง ไซยาไนด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ หรือ กรดไซยานิก (HCN) และไซยาไนด์ไอออน (CN<sup>-</sup>) สัดส่วนของกรดไซยานิกต่อไซยาไนด์

ไอออนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและค่าคงที่การแตกตัวของกรดตั้งรูปที่ 2.3 ไชยาไนต์ไอออนและไชยานิก มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2-3) ดังนั้น ในธรรมชาติจึงมักพบอยู่ในรูปไฮโดรเจนไชยาไนต์



รูปที่ 2.3 ปริมาณไชยาไนต์ไอออน (CN<sup>-</sup>) กับกรดไชยานิก (HCN) ที่พีเอชต่างๆ

#### 2.2.2.2 สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน

สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบของ ไชยาไนต์กับโลหะหนัก ส่วนมากจะละลายน้ำได้ดี แต่จะมีบางรูปที่ตกตะกอนได้เช่นกัน โลหะแต่ละชนิดสามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายแบบ และสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดมีความเสถียรต่างกันดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของโมเลกุลดังกล่าวอย่างในตารางที่ 2.4

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์เกิดขึ้นจากการจับตัวกันของไชยาไนต์ไอออนกับโลหะหนัก (M) ที่ละลายอยู่ในน้ำดังสมการที่ (2-4)



สารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์กับโลหะหนักมักพบมากในอุตสาหกรรมชุบโลหะ เช่น การชุบสังกะสี จะพบสารประกอบเชิงซ้อนกับสังกะสี และการชุบโครเมียมก็จะพบสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียม กับทองแดง และ นิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้รองพื้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์กับเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการล้างเหล็กด้วยไชยาไนต์เพื่อป้องกันสนิม

สารประกอบไซยาไนด์แต่ละชนิดมีเสถียรภาพแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของค่าคงตัว ( $\beta$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ (Benjamin, 2002)(Gherrou และ Kerdjoudj, 2002) ดังตารางที่ 2.3 ส่วนของค่าคงที่ของคงตัว (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์จะบ่งบอกความแข็งแรงของโมเลกุล (Dionex, 2003) ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของค่าความคงตัว ( $\beta$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ (Benjamin, 2002) (Gherrou และ Kerdjoudj, 2002)

โลหะหนัก	log $\beta$					
	Fe <sup>2+</sup>		Fe <sup>3+</sup>		Cu <sup>+</sup>	
เหล็ก (Fe <sup>2+</sup> )	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>	52.44	FeH(CN) <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	50	FeH(CN) <sub>6</sub> <sup>-</sup>	45.61
เหล็ก (Fe <sup>3+</sup> )	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	52.63	-	-	-	-
ทองแดง (Cu <sup>+</sup> )	Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	24.0	Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	28.6	Cu(CN) <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	30.3
นิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> )	Ni(CN) <sub>2</sub>	14.59	Ni(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	22.64	NiH <sub>3</sub> (CN) <sub>3</sub> <sup>2+</sup>	43.95
สังกะสี (Zn <sup>2+</sup> )	Zn(CN) <sub>2</sub>	11.07	Zn(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	16.50	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	16.72

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของค่าความคงตัว (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ (Dionex, 2003)

สารประกอบเชิงซ้อน	ค่าคงที่ (log K ที่ 25 °C)	ชนิดของสารประกอบเชิงซ้อน
[Co(CN) <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup>	64	Strong
[Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup>	43.6	Strong
[Pd(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	42.4	Strong
[Pt(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	40.0	Strong
[Hg(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	39.0	Strong
[Au(CN) <sub>2</sub> ] <sup>-</sup>	37.0	Strong
[Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup>	35.4	Strong
[Ni(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	30.2	Weak
[Cu(CN) <sub>4</sub> ] <sup>3-</sup>	23.1	Weak
[Ag(CN) <sub>2</sub> ] <sup>-</sup>	20.5	Weak
[Zn(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	19.6	Weak
[Cd(CN) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	17.9	Weak



### 2.2.2.3 สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ

สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ เช่น ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride, CNCl) เกิดจากการบำบัดด้วยคลอรีน ไซยาเนต (Cyanate, CNO<sup>-</sup>) เกิดจากการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ในระหว่างการบำบัด และ ไธโอไซยาเนต (Thiocyanate, SCN<sup>-</sup>) ที่ใช้ในการชุบโลหะบางประเภท

### 2.2.3 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับโปรตีนและเอนไซม์หลายชนิดในร่างกาย เอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดสที่จำเป็นต่อการหายใจในระดับเซลล์ในร่างกายสิ่งมีชีวิต และ ฮีโมโกลบิน ซึ่งจะมีผลทำให้เซลล์ขาดออกซิเจน เลื่อม หรือตายได้ (ประยูร ฟองสถิตย์กุล และคณะ, 2542) ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก ทางการหายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนังและลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณน้อย จะเกิดอาการพิษสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมองอาจปรากฏอาการทางโรคจิต ประสาทเลื่อมหรือฝ่อไปได้ ส่วนผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างมากจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยจะมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงชีวิต (Rania และ Roldah, 2004) ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้มีการทดลองและกำหนดเป็นค่าระดับอันตรายไว้ดังตารางที่ 2.5 โดย TLV หมายถึง Threshold Limit Value คือ ความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสทางอากาศหลาย ๆ วันต่อเนื่องกัน โดยไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อสุขภาพ และ LD<sub>50</sub> หมายถึง Median Lethal Dose คือ ปริมาณสารที่เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วจะทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่มตายลงครึ่งหนึ่ง

ตารางที่ 2.5 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ (U.S. EPA, 2000)

สารประกอบ	สูตรเคมี	TLV	LD <sub>50</sub>
ไฮโดรเจนไซยาไนด์	HCN(g)	5 มก. /ลบ.ม.	1 มก. /กก.(มนุษย์)
โพแทสเซียมไซยาไนด์	KCN(s)	5 มก. /ลบ.ม.	2.85 มก. /กก.(มนุษย์)
โซเดียมไซยาไนด์	NaCN(s)	5 มก. /ลบ.ม.	2.85 มก. /กก.(มนุษย์)
ไซยาโนเจนคลอไรด์	CNCl(g)	0.3 พีพีเอ็ม	
โซเดียมไซยาเนต	NaCNO(s)	-	260 มก. /กก.(หนู)
โพแทสเซียมไซยาเนต	KCNO(s)	-	320 มก. /กก.(หนู)
โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์	K <sub>3</sub> (Fe(CN) <sub>6</sub> (s)	-	1600 มก. /กก.(หนู)

สำหรับไซยาเนต มักพบเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการกำจัด ไซยาไนต์และมีความเสถียรสูงกว่า ไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนต์มาก โดยการสัมผัสภายนอกจะเกิดอาการระคายเคือง การรับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยจะส่งผลกระทบต่อร่างกายทำให้เกิดอาการระคายเคือง การได้รับในปริมาณมากจะเกิดอาการอาเจียน อ่อนเพลีย ส่งผลกระทบต่อระบบประสาท และทำให้ระบบการหายใจหยุดทำงานได้เมื่อได้รับในปริมาณสูงมาก โดยมีค่า LD<sub>50</sub> เท่ากับ 841 มก./กก. (หนู) (Mallinckrodt Baker, 2004)

## 2.2.4 ค่ามาตรฐานต่างๆ ของไซยาไนต์ในประเทศไทย

ค่ามาตรฐานเกี่ยวกับการปนเปื้อนไซยาไนต์ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นในกฎหมายหลายฉบับซึ่งได้รวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นไซยาไนต์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆ ในประเทศไทย

มาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	ที่มา
1. มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน	ไม่เกิน 200 ไมโครกรัม/ลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)
2. มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง	ไม่เกิน 7 ไมโครกรัม/ลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (พ.ศ. 2549)
3. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ไม่เกิน 0.2 มก./ล. (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)
4. มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ไม่เกิน 0.1 มก./ล. (เกณฑ์อนุโลมสูงสุด)	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 (พ.ศ. 2524)
5. มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ไม่เกิน 0.1มก./ล. (เกณฑ์อนุโลมสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542)
6. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)
7. มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521)
8. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)

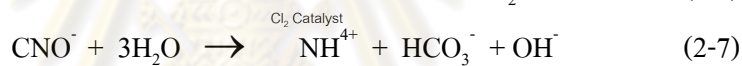
## 2.2.5 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

ในปัจจุบันวิธีการกำจัดไซยาไนด์มีอยู่หลายวิธี ทั้งวิธีการที่มีการใช้งานกันและวิธีที่มีการศึกษากันอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

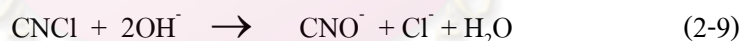
### 2.2.5.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนหรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน(Alkaline chlorination)

เป็นการกำจัดไซยาไนด์ด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือก๊าซคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นที่ 1 ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-5) ถึง (2-7) (Botz, 2001) และสมการที่ (2-8) ถึง (2-10) (Parga, Shukla และ Carrillo Pedroza, 2003)

เมื่อใช้ก๊าซคลอรีน



เมื่อใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์



ก๊าซไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) เป็นก๊าซพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และจะรวมกับไฮดรอกไซด์กลายเป็นไซยาเนตดังสมการที่ (2-6) และ (2-9) ซึ่งเกิดขึ้นได้เร็วที่พีเอชสูง ดังนั้นปฏิกิริยาทั้งหมดในขั้นที่ 1 จึงควรทำที่พีเอชประมาณ 9-10 เพื่อให้ปฏิกิริยาการเกิดไซยาเนต เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ต่อมาในขั้นที่ 2 กรณีการใช้ก๊าซคลอรีน ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และ แอมโมเนีย (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) โดยมีคลอรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Botz, 2001) ดังสมการที่ (2-7)

ส่วนกรณีการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนตและก๊าซไนโตรเจนดังสมการที่ (2-10) (Parga, Shukla และ Carrillo Pedroza, 2003)

วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี ตามทฤษฎีใช้คลอรีนประมาณ 2.73 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้คลอรีน 3-8 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม

### 2.2.5.2 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

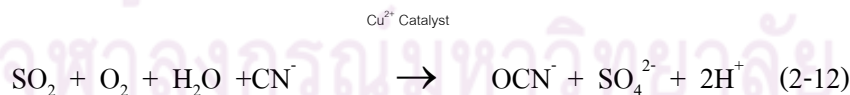
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็น ไซยาเนต ดังสมการที่ (2-11)



วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้โดยการตกตะกอนของ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ทองแดง และ เหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.13 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3-8 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม ควรมีค่าประมาณ 9.0-9.5 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes แต่จะกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้น้อย เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และเหล็กจะเกิดขึ้นและตกตะกอนได้มากกว่าพีเอชต่ำกว่านี้

### 2.2.5.3 การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfer Dioxide / Air

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยการออกซิเจนร่วมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็น ไซยาเนต ดังสมการที่ (2-12)



วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น (Slurry) สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้ โดยการตกตะกอนของ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และเหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 2.46 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3.5-4.5 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม 8 -9 และควรเติมปูนขาวเพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

#### 2.2.5.4 การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid

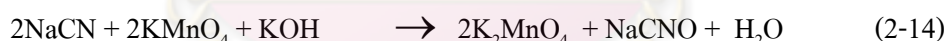
เป็นการออกซิไดซ์ด้วยกรดเพอร์รอกซีโมโนซัลฟูริก (Peroxymonosulfuric Acid) ( $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) หรือ Caro's Acid ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็น ไซยานต ดังสมการที่ (2-13)



Caro's Acid เป็นสารที่สลายตัวเร็วการใช้งานจึงต้องผลิตขึ้นที่จุดใช้งาน (on-site) โดยการผสมกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ Caro's Acid ประมาณ 4.39 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ Caro's Acid 5-15 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม และควรเติมปูนขาวเพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

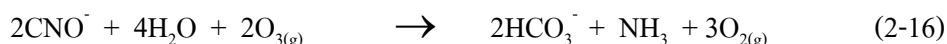
#### 2.2.5.5 การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์มังกานต

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยการเติมโพแทสเซียมเปอร์มังกานต ( $\text{KMnO}_4$ ) ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็น ไซยานต ดังสมการที่ (2-14) (อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539)

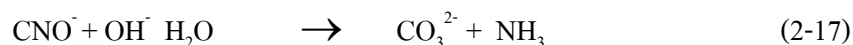


#### 2.2.5.6 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

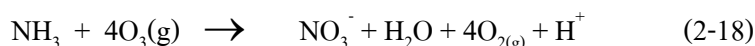
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยานต ดังสมการที่ (2-15) และ (2-16) (Parga, Shukla และ Carrillo Pedroza, 2003)



ในสารละลายที่มีพีเอชสูง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยานตได้ดังสมการที่ (2-17)



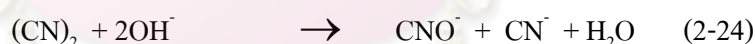
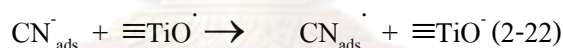
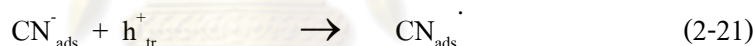
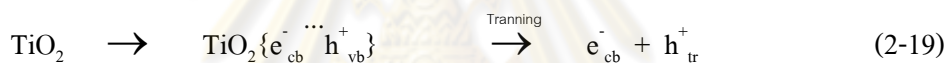
และจากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนเตรตดังสมการที่ (2-18)



วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ และยังสามารถใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ แต่สำหรับ Strong Metal-Cyanide Complexes จะทำลายได้น้อยแม้จะเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปก็ตาม (Botz, 2001) ปฏิกิริยาของไซยาเนต (สมการที่ 2-16) จะเกิดขึ้นช้าเมื่อเทียบกับไซยาไนด์ (สมการที่ 2-15) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณไซยาไนด์แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซนเท่านั้น (Parga, Shukla และ Carrillo Pedroza, 2003)

### 2.2.5.7 การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เป็นการออกซิไดซ์โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กแตกตัวได้บางส่วน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะเกิดการออกซิไดซ์โดยเรดิคอลที่พื้นผิวไทเทเนียม ( $\equiv\text{TiO}^\cdot$ ) (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ดังสมการที่ (2-19) ถึง (2-24)

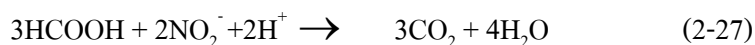


### 2.2.5.8 การออกซิเดชันด้วยความร้อน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ระหว่าง 140-200 °C และพีเอช 8 แรงดันที่ใช้ต้องสูงถึง 100 บาร์ ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอร์มेट ( $\text{HCOO}^-$ ) และแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) (Hartinger, 1994) ดังสมการที่ (2-25)



และหากมีไนไตรท์เข้ามาด้วย ฟอร์มेटและแอมโมเนียจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิ 150 °C ดังสมการที่ (2-26) และ (2-27)



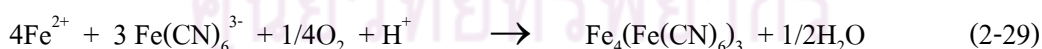
วิธีการนี้สามารถบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง และสามารถใช้น้ำล้างชิ้นงานที่เข้มข้นได้ด้วย

### 2.2.5.9 การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ปกติ และถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับแต่งพื้นผิว เช่นปรับแต่งถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิว (Modified Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) และการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยโลหะหนักบางชนิด (Impregnate Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) วิธีนี้ใช้ได้ดี และมีราคาถูก มักใช้เป็นระบบสุดท้ายเพื่อลดปริมาณไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมักเหลือจากการบำบัดด้วยวิธีอื่น (Botz, 2001)

### 2.2.5.10 การตกตะกอนโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก

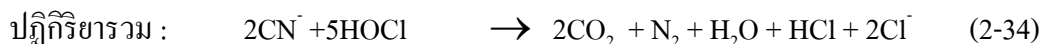
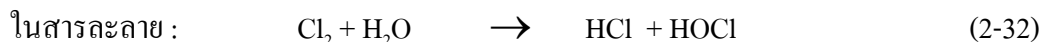
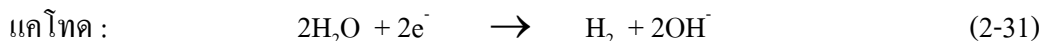
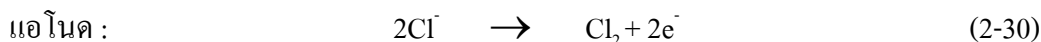
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติม  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เพื่อให้ไซยาไนด์เปลี่ยนมาอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กและเกิดการตกตะกอน (Botz, 2001) ดังสมการที่ (2-28) และ (2-29)



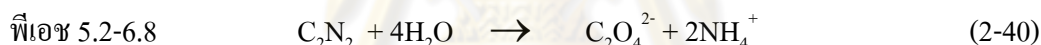
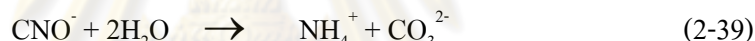
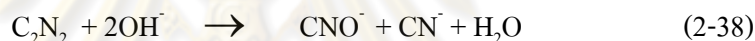
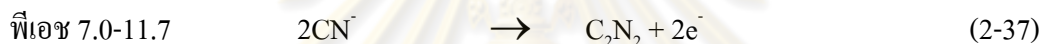
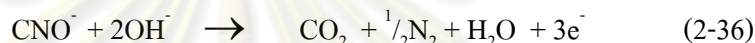
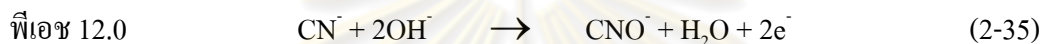
วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน ค่าพีเอชที่เหมาะสม 5-6 ปริมาณ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้ประมาณ 0.5-5 โมลต่อไซยาไนด์ 1 โมล

### 2.2.5.11 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า

1. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ ( $\text{OCI}^-$ ) จากโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ที่เติมลงไป และไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นสารที่ไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2-30) ถึง (2-34)



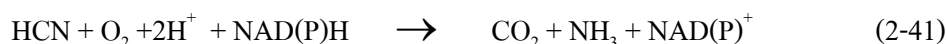
2. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยตรง ไซยาไนต์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไซยาเนตที่ขั้วแอนไอออนโดยตรง และจะถูกสลายต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือ ออกซาเลตไอออนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย (Ogutveren, Toru และ Kopalal, 1999) ดังสมการที่ (2-35) ถึง (2-40)



สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนต์กับโลหะหนักได้มีการศึกษาไว้หลายราย (Dart และคณะ, 1963)(EI-Ghuaoui และคณะ, 1982)(Hine และคณะ, 1986)(Ho และคณะ, 1990) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีนี้สามารถใช้บำบัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดีแต่กับสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กจะไม่ได้ผลนัก

#### 2.2.5.12 การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ

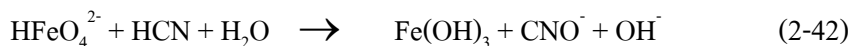
ระบบบำบัดทางชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนต์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนต์ไม่มากนัก (White, Pilon และ Woolard, 2000) มีการใช้กันในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดี (Botz, 2001) การย่อยสลายไซยาไนต์โดยกระบวนการทางชีวภาพมีอยู่หลายวิถีทาง (Pathway) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาออกซิเดทีฟ (Oxidative Reaction) ไซยาไนต์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย (Ebbs, 2004) ดังสมการที่ (2-41)





### 2.2.5.13 การออกซิเดชันเฟอร์เรต

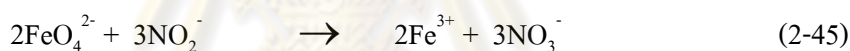
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต ( $\text{HFeO}_4^-$ ) ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต (Sharma, Rivera, Smith และ Brien, 1998) ดังสมการที่ (2-42)



ไซยาเนตจะถูกออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไนไตรท์ ดังสมการที่ (2-43) สมการรวม (2-42) กับ (2-43) ไซยาไนด์ถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ ดังสมการที่ (2-44)



ไนไตรท์จะถูกออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรตเป็นไนเตรท ดังสมการที่ (2-45)



### 2.2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์

ภัทรวรรณ ดิยานนท์ (2549) ศึกษาถึงผลของนิเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต พบว่า ที่พีเอช 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ประมาณ 58% ที่พีเอช 9 และ 10 ประมาณ 50% ที่พีเอช 11 ประมาณ 38% นิเกิลมีผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ในทุกพีเอช สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ยังคงเป็นไซยาเนต

การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ อีดีทีเอ และนิเกิล พบว่า ที่พีเอช 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ประมาณ 61% ที่พีเอช 9 และ 10 ประมาณ 95% ที่พีเอช 11 ประมาณ 80% ในสารละลายที่มีอีดีทีเออยู่ จะทำให้นิเกิลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์ คือไซยาเนต

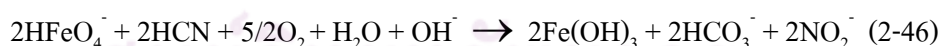
ศิวาฐ คำรังศิริ (2548) ศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต พบว่า ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์

เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 85-100% ที่พีเอช 9 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็ว และมีแนวโน้มถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น คือไซยาเนต สังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลง

ผลการทดลองกับน้ำเสียโรงงานชุบสังกะสี พบว่า ตัวอย่างน้ำเสียความเข้มข้นไซยาไนด์ 108,622 ไมโครโมลาร์ เจือจางตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 104.78 ไมโครโมลาร์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 100% ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1.37:1

Rader, W. S. และคณะ (1995) ศึกษาการบำบัดน้ำจากเหมืองแร่ (Precious-Metal Mill Tailing) โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในการทดลองที่พีเอช 11 ที่พื้นผิวน้ำ 350 ตารางเซนติเมตร ลึก 3 เซนติเมตร และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัด สารประกอบไซยาไนด์ทุกชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดย ไซยาไนด์อิสระ และ สารประกอบเชิงซ้อนส่วนหนึ่ง ถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก ทองแดง สังกะสี พรอท และสารหนู จะถูกทำให้เสถียรในรูปของตะกอน

Sharma, V.K. และคณะ (1998) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเฟอร์เรต ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆกัน พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น มีค่า Energy of activation  $38.9 \pm 1.0$  กิโลจูลต่อโมลที่พีเอช 9.0 และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-46)



การทดลองที่พีเอช 7.5 9.0 และ 12.0 พบว่า ที่พีเอช 9.0 มีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณโดยโมลของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่พีเอช 7.5 จะพบไซยาเนตและไนไตรท์เป็นสารผลิตภัณฑ์และที่พีเอช 9.0 และ 12.0 จะพบเพียงไนไตรท์โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ ที่ถูกออกซิไดซ์ต่อไนไตรท์เป็น 1 ต่อ 1 สำหรับการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงชุบโลหะพบว่า มีประสิทธิภาพดีจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ

Dursun, A.Y. Calik, A. และ Aksu, Z. (1999) ศึกษาการย่อยสลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก (II) หรือ เฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanide) โดยใช้จุลินทรีย์ Pseudomonas Fluorescens ในสภาวะที่มีกลูโคส และ ออกซิเจน โดยเป็นการทดลองผลกระทบนี้อาจมาจากพีเอช

ความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ ความเข้มข้นของกลูโคส และอัตราการเติมอากาศ ทดลองในถังหมักแบบ batch ผลการทดลองโดยใช้เฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดี่ยวพบว่าไม่เกิดการเติบโตของจุลินทรีย์ ส่วนการทดลองโดยใช้กลูโคสร่วมกับเฟอร์โรไซยาไนด์โดยมีเฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดี่ยวพบว่าจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้และเกิดการย่อยสลายของเฟอร์โรไซยาไนด์ โดยที่สภาวะที่มีพีเอช 5 อัตราการกวน 150 รอบต่อนาที อัตราการเกิดอากาศ 0.15 vvm และพบว่ามีอัตราการย่อยสลายสูงสุด 30.7 มิลลิกรัมต่อกรัมกลูโคสต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลูโคส 465 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจุลินทรีย์จะใช้กลูโคสเป็นอาหารหลัก การขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์ จะเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โมเดลทางคณิตศาสตร์แบบ Non-competitive substrate inhibition ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่พอดีที่สุดคำนวณ โดยการใช้วิธี Non-linear regression

Lukey, G. C. และคณะ (1999) ศึกษาหาชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับทองแดง(I) ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลของไซยาไนด์ต่อโมลของทองแดง สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งหากมีสัดส่วนโมลของไซยาไนด์ต่อโมลของทองแดง เท่ากับ 2.2 ถึง 2.5 จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดงในรูปของ  $[Cu(CN)_3]^{2-}$  แต่สำหรับสารละลายที่ไม่มี ความเข้มข้น จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดงในรูป  $[Cu(CN)_2]^-$  และ  $[Cu(CN)_3]^{2-}$  มากที่สุด แต่หากมีปริมาณไซยาไนด์อยู่มากกว่าปกติ คือ ปริมาณ 200 มก./ล. จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนทองแดงไซยาไนด์ในรูปของ  $[Cu(CN)_4]^{3-}$  อย่างเดียวเท่านั้น

Kurama, H. และ Catalarik, T (2000) ศึกษาการใช้เรซิน Lewatit MP62 กำจัดสารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีออกจากน้ำยาชะแร่ การทดลองทำโดยใช้คอลัมน์แก้ว และใช้น้ำตัวอย่างจากบริษัท 100<sup>th</sup> Year Silver Cyanidation Plant ประเทศตุรกี น้ำตัวอย่างมีปริมาณสังกะสี 474 มิลลิกรัมต่อลิตร และไซยาไนด์ 720 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความจุของเรซินและผลกระทบเนื่องจากพีเอชที่มีต่อ Loading capacity ได้ศึกษาโดยใช้ Breakthrough curve ผลการทดลองพบว่า สารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์จนกว่าระบบจะถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough point)

Adhoum, N. และ Monser, L. (2002) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยเงิน และ นิกเกิล พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับเงินได้ 45.7 มก./ก. และ นิกเกิล 4.3 มก./ก. และได้นำถ่านที่ดูดซับเงิน และนิกเกิลแล้วไปทำการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยระบบแบบคอลัมน์

พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเงินมีความจุมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับนิกเกิล 2 เท่า และมากกว่าถ่านเปล่าๆ ถึง 4 เท่า ซึ่งคาดว่า การกำจัดไซยาไนด์เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูป  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  และ  $\text{Ni}(\text{CN})_4$  ผลการทดลองกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผา (Calcinations) ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

Adhoum, N. และ Monser, L. (2002) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ ทองแดง สังกะสี และโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดย Tetrabutyl Ammonium (TBA-Carbon) และ Sodium Diethyl Dithiocarbamate (SDDC-Carcon) โดยใช้ TBA-Carbon ในการดูดซับไซยาไนด์ และใช้ SDDC-Carbon ในการดูดซับทองแดง สังกะสี และโครเมียม และระบบเป็นแบบคอลัมน์แบบแยกชนิด พบว่า TBA-Carbon สามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ 29.2 มก./ก. ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์เปล่าๆ 5 เท่า ส่วน SDDC-Carbon สามารถดูดซับทองแดง สังกะสี และแคดเมียมได้ 38.0 9.9 และ 6.84 มก./ก. ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์เปล่าๆ 4 เท่า 4 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ

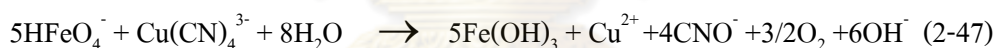
Aksu, Z. และ Gulen, H. (2002) ศึกษาการกำจัดเหล็ก (III) และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) โดยวิธี Biosorption ด้วยเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* ในระบบแบบทีละเท ที่มีค่าพีเอช 2 เพื่อดูความสามารถในการดูดซับสารทั้ง 2 ชนิดนี้ในลักษณะการดูดซับสารเดี่ยว (Single Component) และการดูดซับสองสาร (Dual Component) ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารสูงขึ้นถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับเหล็ก(III) และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) ในการทดลองการดูดซับสารเดี่ยวพบว่า ค่า Biosorption rate และค่า Equilibrium uptake เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นและผลการทดลองที่ได้เข้ากันพอดีกับ Langmuir Model และ Redlich-Peterson Model และในการทดลองการดูดซับสองสารพบว่าค่า Equilibrium uptake ของเหล็ก(III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) เพิ่มขึ้น และค่า Equilibrium uptake ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเหล็ก(III) เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาแบบเสริมกัน (Synergistic Interaction)

Chiang, K. Amal, R. และ Tran, T. (2003) ได้ศึกษาถึงกลไกในออกซิไดซ์ไซยาไนด์โดยการใช้ออร์แกนิกไฮดรอกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการทดลองการแทนกลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวไทเทเนียมด้วยฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ทราบว่า การออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ไม่ได้เกิดขึ้นโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $\text{OH}^\cdot$ ) เกิดขึ้นโดยเรดิคัลของพื้นผิวไทเทเนียม ( $\equiv\text{TiO}^\cdot$ ) และที่ความเร็วในการลดของไซยาไนด์ต่ำเนื่องจาก 1. การดูดซับของไซยาไนด์ที่พื้นผิวของ

ไทเทเนียมต่ำ 2. ไม่มีปฏิกิริยาที่เกิดจากไซยาไนด์กับไฮดรอกซิลเรดิคอล 3. เกิดการรวมตัวกันใหม่ของเรดิคอลของพื้นผิวไทเทเนียมอย่างรวดเร็ว

Parga, J. R. Shukla, S. S. และ Carrillo-Pedroza, F. R. (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้วิธีการออกซิไดซ์โดยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO<sub>2</sub>) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และการออกซิไดซ์ด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า การใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ทุกพีเอช ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง การใช้โอโซนสามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ดี และอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราเติมโอโซนเท่านั้น และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี โดยเฉพาะเมื่อใช้แสงอาทิตย์

Sharma, V.K. และคณะ (2005) ศึกษาการใช้เฟอร์เรตกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง(I) หรือ คอปเปอร์(I) ไซยาไนด์ ซึ่งพบได้มากในน้ำเสียจากเหมืองแร่ทองคำซึ่งมีความเสถียรสูงกว่าไซยาไนด์อิสระ และมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-47) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์(I) ไซยาไนด์ 5:1



ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของเหมืองแร่ทองคำที่สังเคราะห์จาก โซโอไซยานेटไซยาไนด์ และ คอปเปอร์(I)ไซยาไนด์ พบว่า เฟอร์เรตทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(I)ไซยาไนด์ในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์(I)ไซยาไนด์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ผลการทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ ที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด 17.2 มก./ล. พบว่า สามารถกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดได้ประมาณ 70% ที่เฟอร์เรต 10 มก.ล. และต้องใช้เฟอร์เรตถึง 1200 มก./ล. เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99%

Sharma, V.K. และคณะ (2007) ศึกษาผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยศึกษาจากสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn(CN)<sub>4</sub><sup>2-</sup>) และสารละลายผสมของไซยาไนด์ และสังกะสี ผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และครึ่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มพีเอช ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง เมื่อเพิ่มสังกะสี อัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ลดลง ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 สังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือไซยานेट

## 2.3 โลหะผสมโคบอลต์

โลหะผสมโคบอลต์ได้ถูกนำมาใช้งานเป็นเวลานานแล้ว คือตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 เป็นต้นมา สำหรับนำมาทำชิ้นส่วนที่ใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงมากที่ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะชิ้นส่วนในเครื่องยนต์เครื่องบิน โลหะผสมโคบอลต์ที่ใช้งานทั่วไปในทางพาณิชย์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทที่มีความแข็งแรงแบบการตกตะกอนของแข็ง โดยมีการเติมธาตุโลหะทนไฟต่างๆ ลงไป เช่น โมลิบดีนัม ทังสเตน และแทนทาลัม นอกจากนี้โลหะผสมโคบอลต์พวกที่ถูกผลิตขึ้นมาจากกรรมวิธีแบบหล่อ จะเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงไปผสมเพื่อให้ได้สารประกอบประเภทคาร์ไบด์ซึ่งเป็นการรวมตัวระหว่างธาตุโลหะหนึ่งชนิดหรือมากกว่ากับธาตุคาร์บอน

เฟสคาร์ไบด์นี้จะให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปแล้ว การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน มากกว่าการทำให้เกิดขึ้นโดยกรรมวิธีอบชุบทางความร้อน อย่างไรก็ตามความแข็งแรงที่ได้จากคาร์ไบด์เหล่านี้โดยการเพิ่มความต้านทานต่อการเลื่อนไถล ของระนาบในผลึกและที่ขอบผลึกที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเฟสของสารประกอบของโลหะแกมมาไพร์มในโลหะผสมนิกเกิลไม่ได้ เพราะฉะนั้น โดยทั่วไปแล้วโลหะผสมนิกเกิลจะแข็งแรงกว่าโลหะผสมโคบอลต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสโดยประมาณ แต่ที่อุณหภูมิสูงเกิน 1000 องศาเซลเซียส โลหะผสมโคบอลต์จะมีความแข็งแรงกว่าเนื่องจากเฟสที่ให้ความแข็งแรงในโลหะผสมชนิดนี้จะไม่ละลายในเนื้อผลึกเหมือนกับเฟสแกมมาไพร์มในโลหะผสมนิกเกิล การเติมธาตุโครเมียมผสมลงไปในโลหะผสมโคบอลต์ที่ปริมาณ 20-30% จะช่วยป้องกันการช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรยากาศที่มีการเผาไหม้ของกำมะถัน เช่น ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซของเครื่องบินหรือโรงไฟฟ้า การเติมธาตุโครเมียมผสมลงไปนี้จะทำให้เกิดการฟอร์มหรือก่อตัวขึ้นของแผ่นฟิล์มบางๆ ของโครเมียมออกไซด์ ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันถึงแม้จะ ดีไม่เทียบเท่ากับของโลหะผสมนิกเกิลที่ฟอร์มแผ่นฟิล์มบางของอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยทั่วไปแล้วในโลหะผสมโคบอลต์รุ่นหลังๆ จะเติมธาตุทังสเตนเพิ่มผสมลงไปแทนที่ธาตุโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้การเติมธาตุนิกเกิลผสมลงไปก็สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นได้อีกด้วย

### 2.3.1 การใช้ประโยชน์

3.4.3.1 ประมาณ 80 % ของ Co ทั้งหมดใช้ในการผลิตโลหะเจือ และที่สำคัญได้แก่การผลิตแม่เหล็กถาวร และแม่เหล็กอ่อน เช่น

- เหล็กกล้าที่มี Co 30 - 50 % และมี W, Cr, V และ Ni
- "Perminvars" เป็นโลหะเจือที่มีโลหะ 3 ชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Ni 45 %, Co 25 %, เหล็ก 30 %

- "Alnico" มี Ni 14 – 30 %, Al 6 – 12 %, Co 5 – 35 % ที่เหลือเป็นหลัก
- "Supermedur" ประกอบด้วย Co 49 %, เหล็ก 49 % และ V 2 % เป็นต้น

### 2.3.2 ความเป็นพิษ

ปกติ ในปริมาณน้อยไม่เป็นพิษทั้งคนและสัตว์

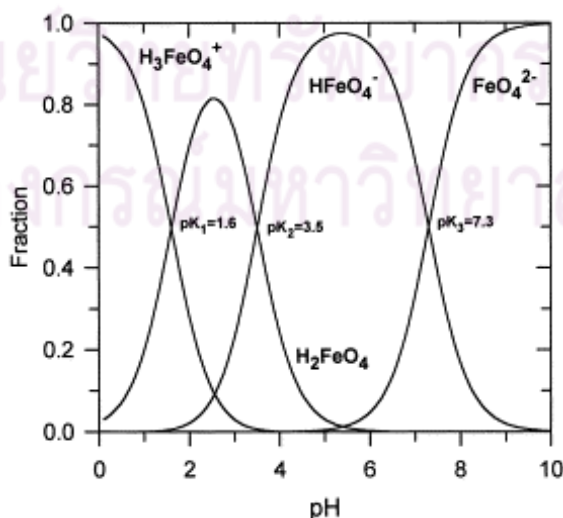
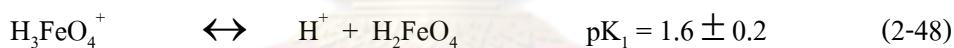
## 2.4 เฟอร์เรต

### 2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต

เมื่อโพแทสเซียมเฟอร์เรตถูกเติมลงในน้ำจะแตกตัวออกได้เฟอร์เรต ( $\text{Fe}^{6+}$ ) มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ และเป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา และปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่หน้างานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เพราะทำให้ใช้งานได้สะดวก และมีข้อจำกัดน้อยกว่า

#### 2.4.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต

จากการศึกษารูปแบบของเฟอร์เรตไอออนในสารละลายที่มีพีเอชต่างๆ พบว่ามี 4 รูปแบบ ดังสมการที่ (2-48) ถึง (2-50) (Sharma,2002)



รูปที่ 2.4 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่มีพีเอชต่างๆ

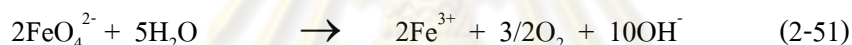
เมื่อนำค่าคงที่การแตกตัว (pK) มาคำนวณจะได้กราฟการแตกตัวของเฟอร์เรตดังรูปที่ 2.4 จากกราฟจะเห็นว่าในน้ำธรรมชาติและน้ำที่เป็นด่างจะพบเฟอร์เรตอยู่ในรูป  $\text{HFeO}_4^-$  และ  $\text{FeO}_4^{2-}$  เป็นต้น

### 2.4.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์

กำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของเฟอร์เรตมีค่าสูงโดยมีค่าระหว่าง  $\pm 0.7$  V ถึง  $+2.2$  V ในสารละลายเบสและกรดตามลำดับ ซึ่งนับว่าแรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 2.7

### 2.4.1.3 ความเสถียรของเฟอร์เรต

ความเสถียรของเฟอร์เรต คือความคงทนต่อการสลายตัวตามธรรมชาติ การสลายตัวของเฟอร์เรตเกิดจากการที่เฟอร์เรต ( $\text{Fe}^{6+}$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ดังสมการที่ (2-51) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน



ตารางที่ 2.7 ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Jiang และ Lloyd, 2002)

สารเคมี	ปฏิกิริยา	$E^\circ$ (V)
Chlorine	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{Cl}^-$	1.358
	$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0.841
Hypochlorite	$\text{HClO} + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	1.482
Chlorine dioxide	$\text{ClO}_2(\text{aq}) + \text{e}^- \leftrightarrow \text{ClO}_2^-$	0.954
Perchlorate	$\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	1.389
Ozone	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.076
Hydrogen peroxide	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
Dissolved oxygen	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
Permanganate	$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.679
	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.507
Ferrate	$\text{FeO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$	2.200

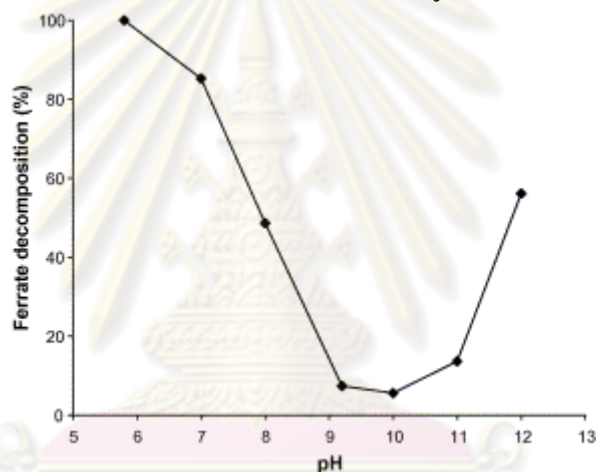


### 2.4.1.3.1 ผลของความเข้มข้นต่อความเสถียร

เฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงในสารละลายที่เจือจาง มีรายงานว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.025 โมลาร์ จะพบเฟอร์เรตเหลืออยู่ประมาณ 90% เมื่อที่เวลา 1 ชั่วโมง แต่ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.03 โมลาร์ เฟอร์เรตจะสลายตัวไปทั้งหมดในเวลา 1 ชั่วโมง (Jiang และ Lloyd, 2002)

### 2.4.1.3.2 ผลของพีเอชต่อความเสถียร

มีรายงานว่าเฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9.4-9.7 (Sharma, 2002) แต่ยังไม่มีการรายงานถึงกลไก หรือเหตุผลที่เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงสุดในช่วงพีเอชนี้ จากการทดลองของ Graham, N. และคณะ (Graham, N. และคณะ, 2004) ได้ผลดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ (Graham, N. และคณะ)

### 2.4.1.3.3 ผลของไอออนต่อความเสถียร

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ KOH ในสารละลายมีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต โดยเมื่อความเข้มข้น KOH สูงขึ้นค่าความเสถียรจะมีค่ามากขึ้น สำหรับสารอื่นๆ เช่น เกลือของไนเตรท กับ ทองแดง เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แบริยม เซอริเนียม แคลเซียม และแมกนีเซียม และเกลืออื่นๆ เช่น  $K_2Zn(OH)_4$   $KIO_4$   $K_2B_4O_7$   $K_3PO_4$   $Na_4P_2O_7$   $Na_2SiF_6$   $Na_2SiO_3$   $Na_2MoO_4$  และ  $Na_2WO_4$  ไม่มีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

## 2.4.2 การเตรียมเฟอร์เรต

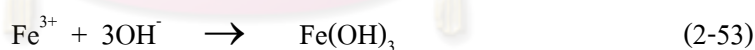
### 2.4.2.1 วิธีการ Dry Oxidation

เป็นวิธีการเก่าที่ยากและอันตรายเพราะสามารถเกิดการระเบิดได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเตรียมเฟอร์เรตด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการผสมเฟอร์ริกออกไซด์กับโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 350-370 °C ภายใต้สภาวะที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $\text{FeO}^{5+}$  และจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น  $\text{FeO}_4^{2-}$  ดังสมการที่ (2-52)



### 2.4.2.2 วิธีการ Wet Oxidation

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยการออกซิไดซ์เฟอร์ริกให้กลายเป็นเฟอร์เรตภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง โดยเฟอร์เรตที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการล้างและทำให้แห้งอีกครั้งเพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความเสถียรสูง ในระยะแรกเป็นการเตรียมในรูปของ โซเดียมเฟอร์เรต ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากโซเดียมเฟอร์เรตมีความสามารถในการละลายสูง ต่อมาจึงได้พัฒนาเป็นรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรต ที่เตรียมได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่า การเตรียมโพแทสเซียมเฟอร์เรตทำได้ตามสมการที่ (2-53) ถึง (2-54)



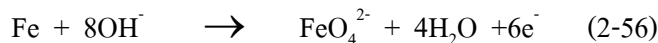
ภายหลังได้มีการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ (2-55) ทำให้ได้เฟอร์เรตในปริมาณที่มากขึ้น

### 2.4.2.3 วิธีการ Electro-Chemical

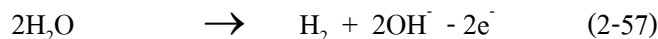
เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยใช้กระแสไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนด และใช้ KOH เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังสมการที่ (2-56) ถึง (2-59) ปริมาณเฟอร์เรตที่ได้มี

ความสัมพันธ์กับกระแสไฟและชนิดของขั้วแอโนดเป็นอย่างมาก

ปฏิกิริยาแอโนด (Anode reaction)



ปฏิกิริยาแคโทด (Cathode reaction)



ปฏิกิริยารวม (Overall reaction)



การเตรียมเฟอร์เรตในรูปของโซเดียมเฟอร์เรตทำได้ยากเนื่องจากความสามารถในการละลายสูง ซึ่งการเตรียมในรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรตทำได้ง่ายกว่า การเตรียมเฟอร์เรตในปริมาณมากทำได้ยาก เนื่องจากความต้องการความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นสูงและยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่างเช่น ชนิดขั้วแอโนดในวิธีการ Electrochemical เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ การแยกส่วนของตะกอน (Isolation process) ในวิธีการ Wet Oxidation นอกจากนี้การใช้วิธีนี้ ยังเกิดก๊าซคลอรีนเนื่องจากไฮโปคลอไรต์ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ดังนั้นการเตรียมเฟอร์เรตจึงต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวัง

## 2.4.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรตในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

### 2.4.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิด ดังตารางที่ 2.8 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับพีเอชเป็นอย่างมาก และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้

เฟอร์เรตมีความสามารถในการกำจัดสารพิษได้หลายชนิดและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย นอกจากนี้เฟอร์เรตยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้คลอรีนคือ การใช้คลอรีนจะเกิด สารผลิตภัณฑ์ของคลอรีน (Chlorinated by-products) เช่น THM (Trihalomethanes) มีรายงานว่าการใช้เฟอร์เรตในการบำบัดน้ำจะมีค่า THM formation potential (THMFP, 4-h) น้อยกว่าการใช้คลอรีนถึง 75% (Jiang และ Lloyd, 2002)

### 2.4.3.2 การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีน เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ มีการทดลองการใช้สารอื่นๆ ในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไอโอดีน และ โอโซน พบว่ามีสารผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน

มีรายงานการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการฆ่าเชื้อโรคพบว่า สำหรับแบคทีเรีย เฟอร์เรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียโดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในอีกการทดลองหนึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้น 8 มก./ล. (as  $\text{FeO}_4^{2-}$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัด Total Coliform ได้ 99.9% และกำจัด Total Viable Bacteria ได้ 97.0% (Jiang และ Lloyd, 2002)

สำหรับไวรัส ได้มีการทดลองการกำจัด (Inactivate) f2 Coliphage (Jiang และ Lloyd, 2002) ซึ่งเป็นไวรัสที่พบได้ทั่วไปในท่อระบายน้ำและมีความคงทนต่อคลอรีน พบว่า 1 มก./ล. (as  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัดไวรัสได้ถึง 99% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งคือ เฟอร์เรตจะไม่มีสารตกค้าง (Residual) เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

Contaminant	pH	$K, \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	$t_{1/2}$	Reference
Hydrogen sulfide	9.0	$7.4 \times 10^5$	2.7 ms	Sharma et al., 1997
<i>p</i> -Hydroquinone	9.0	$2.0 \times 10^5$	10 ms	Bielski, 1991
2-Mercaptoethanesulfonic acid	9.0	$3.0 \times 10^4$	66.7 ms	Read et al., 1998b
2-Mercaptobenzoic acid	10.0	$2.5 \times 10^4$	89.0 ms	Read et al., 1998b
3-Mercaptopropionic acid	9.0	$1.3 \times 10^4$	0.15 s	Read and Wyand, 1998c
Methylhydrazine	9.0	$9.8 \times 10^3$	0.20 s	Johnson and Homstein, 1994
Aniline	9.0	$6.2 \times 10^3$	0.32 s	Sharma and Hollyfield, 1995b
Hydrazine	9.0	$5.6 \times 10^3$	0.35 s	Johnson and Homstein, 1994
Thioacetamide	9.0	$5.5 \times 10^3$	0.36 s	Sharma et al., 2000
Ferrocyanide	9.0	$4.7 \times 10^3$	0.42 s	Johnson and Sharma, 1999
Thiourea	9.0	$3.4 \times 10^3$	0.59 s	Sharma et al., 1999
<i>p</i> -Toluidine	9.0	$1.3 \times 10^3$	1.5 s	Sharma and Hollyfield, 1995b
Cysteine	12.4	$7.6 \times 10^2$	2.6 s	Sharma and Bielski, 1991

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

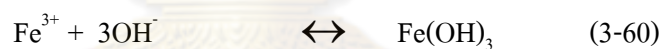
Contaminant	pH	$K, M^{-1} s^{-1}$	$t_{1/2}$	Reference
Thiosulfate	9.0	$7.2 \times 10^2$	2.8 s	Johnson and Read, 1996
Glyoxylic acid	8.0	$7.0 \times 10^2$	2.9 s	Carr et al., 1998a
Cyanide	9.0	$6.2 \times 10^2$	3.2 s	Sharma et al., 1998a
Glyoxal	8.0	$3.0 \times 10^2$	6.7 s	Carr et al., 1985
Dimethylamine	8.0	$2.0 \times 10^2$	10.0 s	Carr et al., 1985
Benzenesulfinate	9.0	$1.4 \times 10^2$	14.3 s	Johnson and Read, 1996
Methionine	9.0	$1.3 \times 10^2$	15.4 s	Sharma and Bielski, 1991
Cystine	12.4	$1.2 \times 10^2$	15.4 s	Sharma and Bielski, 1991
Sarcosine	8.0	$1.2 \times 10^2$	16.7 s	Carr et al., 1985
Iminodiacetic acid	8.0	$1.0 \times 10^2$	20.0 s	Carr et al., 1981
Glycine	8.0	$1.0 \times 10^2$	20.0 s	Sharma and Bielski, 1991
Diethylsulfide	8.0	$1.0 \times 10^2$	20.0 s	Carr et al., 1985
Thiodiethanol	8.0	$1.0 \times 10^2$	20.0 s	Carr et al., 1985
Phenol	9.0	$8.0 \times 10^1$	25.0 s	Carr et al., 1985
Thioxane	9.0	$5.8 \times 10^1$	34.5 s	Read et al., 1998a
<i>p</i> -Aminobenzoic acid	9.0	$4.3 \times 10^1$	46.9 s	Sharma and Hollyfield, 1995
Methylamine	8.0	$4.0 \times 10^1$	50.0 s	Carr et al., 1985
<i>p</i> -Nitroaniline	9.0	$3.0 \times 10^1$	1.10 min	Sharma and Hollyfield,
Chloral	8.0	$6.0 \times 10^0$	5.55 min	1995b
Glycolaldehyde	8.0	$3.0 \times 10^0$	11.1 min	Carr et al., 1985
Dimethylglycine	8.0	$2.5 \times 10^0$	13.3 min	Carr et al., 1985
Trimethylaldehyde	8.0	$2.0 \times 10^0$	16.7 min	Carr et al., 1985
Nitriloacetic acid	8.0	$2.0 \times 10^0$	16.7 min	Carr et al., 1985
N-methyliminodiacetic Acid	8.0	$2.0 \times 10^0$	16.7 min	Carr et al., 1985
Dimethylsulfoxide	8.0	$1.0 \times 10^0$	33.3 min	Carr et al., 1985
Nitrite	9.0	$6.2 \times 10^{-1}$	37 min	Carr et al., 1985
Diethylamine	8.0	$7.0 \times 10^{-1}$	47.6 min	Sharma et al., 1998a
Fomaldehyde	8.0	$5.0 \times 10^{-1}$	1.11 h	Carr et al., 1985
Acetaldehyde	8.0	$4.0 \times 10^{-1}$	1.39 h	Carr et al., 1985
Fomic acid	8.0	$4.0 \times 10^{-1}$	1.39 h	Carr et al., 1985

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

Contaminant	pH	$K, M^{-1} s^{-1}$	$f_{1/2}$	Reference
Glycolic acid	8.0	$4.0 \times 10^{-1}$	1.39 h	Carr et al., 1985
Ammonia	9.0	$1.7 \times 10^{-1}$	3.27 h	Carr et al., 1985
Oxalic acid	8.0	$1.0 \times 10^{-1}$	5.55 h	Carr et al., 1985
Neopentyl alcohol	8.0	$1.0 \times 10^{-1}$	5.55 h	Carr et al., 1985
Ethyl alcohol	8.0	$8.0 \times 10^{-2}$	6.94 h	Carr et al., 1985
Isopropyl alcohol	8.0	$6.0 \times 10^{-2}$	9.26 h	Carr et al., 1985
Ethylene glycol	8.0	$4.0 \times 10^{-2}$	13.9 h	Carr et al., 1985
Methyl alcohol	8.0	$3.0 \times 10^{-2}$	18.5 h	Carr et al., 1985

### 2.4.3.3 การโคแอกกูเลชัน

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อกำจัดความขุ่นได้โดยเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ที่เกิดขึ้นจากเฟอร์เรต ซึ่งตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ (3-60)



มีรายงานว่า เฟอร์เรตสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ในเวลาเพียง 1 นาที ในขณะที่เกลือของเฟอร์ริกใช้เวลาถึง 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถใช้ในการกำจัดโลหะในน้ำได้หลายชนิด เช่น เฟอร์เรตสามารถใช้ในการบำบัดสารกัมมันตรังสี เช่น อะเมริซิยม (Americium) และ พลูโตเนียม (Plutonium) ในน้ำได้อีกด้วย (Jiang และ Lloyd, 2002)

การใช้เฟอร์เรตในการพรีออกซิเดชัน (Preoxidation) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม (Ma และ Liu, 2002) และใช้ในการกำจัดสาหร่ายในน้ำที่มาจากแหล่งน้ำที่เกิด Eutrophication (Ma และ Liu, 2002) ได้อีกด้วย

### 2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต

Yangard, R.A. Sharma, V.K. Filip, J. และ Zboril, R. (2008) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ออกซิเดชันเฟอร์เรตกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะไม่แข็งแรง (Weak-Acid Dissociable Cyanide) พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่สามารถกำจัดไฮโดรเจนไซยาไนด์ และสารประกอบไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์เท่ากับ 1:1 4:1 4:1 และ 5:1 ไฮโดรเจนไซยาไนด์ แคลเมียม (II) ไซยาไนด์ ซิงค์ (II) ไซยาไนด์ และคอปเปอร์ (II) ไซยาไนด์ ตามลำดับซึ่งได้เปรียบเทียบกับอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 2.9 พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะหนักนั้นเฟอร์เรตต้องไปทำปฏิกิริยาในการสลายพันธะระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักก่อน หลังจากนั้นเฟอร์เรตที่เหลือจึงจะมาทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์อิสระต่อไป ดังนั้นในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะหนักจะใช้ปริมาณเฟอร์เรตมากกว่าน้ำเสียที่มีไซยาไนด์อิสระเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ กับสารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ

ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์	อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์
HCN	1:1
$\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$	4:1
$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$	4:1
$\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$	4:1
$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	5:1

Ma, J. และ Liu, W. (2002) ได้ทำการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สารต่างๆ ในน้ำก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา โดยใช้ตัวอย่างน้ำ 3 ชนิดพบว่า การเติมเฟอร์เรตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และการกรอง (Filtration) โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพียง 0.5-1.0 มก./ล. และยังเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อน้ำดิบมีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ที่มากขึ้น

Ma, J. และ Liu, W. (2002) ได้ทำการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สาหร่ายในน้ำก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีโคแอกกูเลชัน การทดลองโดยใช้น้ำตัวอย่าง 2 ชนิดคือ น้ำดิบจริงจากทะเลสาบซึ่งมีสาหร่ายอยู่มาก และ น้ำดิบสังเคราะห์ที่มีสาหร่าย 2 ชนิด คือ Chlorococoum และ

Scenedesmus ซึ่งเป็นสาหร่ายที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติพบว่า การออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรตในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยใช้สารส้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในน้ำดิบจริง นอกจากนี้ การเติมเฟอร์เรตจะทำให้เซลล์สาหร่ายตาย (Inactivate) และปล่อยสารไบโอโพลีเมอร์ออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดกลไก Bridging ช่วยในการโคแอกกูเลชัน และการเติมเฟอร์เรต จะทำให้เกิดตะกอนของ  $Fe(OH)_3$  เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Yuan, B.L. Qu, J.H. และ Fu, M.L. (2002) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารไมโครไซสทิน (Microcystin) ที่เกิดจากไซยาโนแบคทีเรีย โดยการใช้เฟอร์เรตพบว่า สามารถกำจัดสารไมโครไซสทินได้อย่างดี โดยประสิทธิภาพจะแปรตามความเข้มข้นเฟอร์เรต พีเอช และเวลาสัมผัส นอกจากนี้ยังได้สารผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ที่ไม่เป็นพิษและยังช่วยเพิ่มตะกอนได้อีกด้วย

Qu, J.H. และคณะ (2003) ได้ทำการทดลองการกำจัดกรดฟุลวิก (Fulvic Acid) โดยใช้เฟอร์เรต พบว่าที่ ความเข้มข้นของกรดฟุลวิก 2 มก./ล. สามารถกำจัดถึง 90% โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์เรตต่อกรดฟุลวิกเท่ากับ 12 ต่อ 1 และยังพบว่าปริมาณกรดสามารถลดลงได้อีกเนื่องจากการดูดติดในการตกตะกอนของเฟอร์ริก และเมื่อใช้ร่วมกับการตกตะกอนโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ โปโรนคลอไรด์ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 100

Sharma, V. K. และคณะ (2000) ได้ทำการทดลองการกำจัด ไธโออะเซตามายด์ (Thioacetamide) โดยใช้เฟอร์เรต ทำการทดลองที่พีเอช 9.14-12.0 อุณหภูมิ 15-35 °C ใน 0.01M ฟอสเฟต พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่ 1 ทั้ง 2 สาร อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยไธโออะเซตามายด์ จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น ซัลฟีนิล (Sulfenyl) ซัลฟีนิก (Sulfinic) และ กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) และสุดท้ายกลายเป็นซัลเฟต (Sulfate) และ อะเซตามายด์ (acetamind)

Graham, N. และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟีนอลและคลอโรฟีนอล 3 ชนิด คือ 4-Chlorophenol (CP) 2,4-Dichlophenol (DCP) และ 2,4,6-Trichlorophenaol (TCP) ด้วยเฟอร์เรต เนื่องจากคาร์บอกซ์โฟเทนเซียล ความเสถียรของเฟอร์เรต และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวได้จะขึ้นอยู่กับพีเอช จึงทำการทดลองในช่วงพีเอช 5.8-11.0 และอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อสารประกอบในช่วง 1 ต่อ 1 ถึง 8 ต่อ 1 และใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนสำหรับสารที่ไม่แตกตัว ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสารประกอบต่างๆด้วยเฟอร์เรตจะขึ้นอยู่กับพีเอชเป็นอย่างมาก โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมลดลงจากฟีนอลและคลอโรฟีนอล CP DCP และ TCP ตามลำดับ และมีค่าอัตราการสลายตัวที่พีเอชเหมาะสมใกล้เคียงกัน ผลการทดลองกับฟีนอลและ



คลอโรฟีนอลซึ่งให้เห็นว่า จำนวนอะตอมของคลอรีนโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ไม่แตกตัวเพิ่มขึ้น และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวลดลง

Sharma, V.K. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเฟอร์เรตพบว่า เฟอร์เรตที่ได้จากการแตกตัวของโพแทสเซียมเฟอร์เรตมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรสูง มีกำลังในการออกซิไดซ์สูง มีความเลือกทำปฏิกิริยา และได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้โพแทสเซียมเฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ ที่ปลอดภัยสำหรับน้ำธรรมชาติ ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรม เฟอร์เรตมีกำลังในการออกซิไดซ์ +2.2 ถึง +0.7 โวลต์ ในสารละลายกรดและเบสตามลำดับ การสลายตัวของเฟอร์เรตเป็นเฟอร์ริกและออกซิเจนเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรดและสลายตัวได้ช้าที่พีเอช 10 และในสารละลายเจือจาง การสลายตัวจะเกิดได้ช้าที่สุดที่พีเอช 9.4-9.7 เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่เลือกทำปฏิกิริยาและสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารอินทรีย์หลายชนิดโดยที่ยังคงได้เฟอร์ริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ เฟอร์เรตเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเทคโนโลยีสะอาด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำ Super-iron Batteries และการบำบัดน้ำเสีย สารปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียสามารถกำจัดได้โดยใช้เฟอร์เรตโดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาทีโดยที่ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ยังเป็นสารฆ่าเชื้อโรค Antifulant และ สารรวมตะกอน จึงนับได้ว่าเป็นสารที่สามารถใช้งานในทางบำบัดน้ำเสียได้อย่างอเนกประสงค์

Jiang, J.Q. และ Lloyd, B. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเตรียม และการใช้เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ และสารรวมตะกอน ในงานด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า จากคุณสมบัติที่พิเศษ (กำลังในการออกซิไดซ์สูง และ การเกิดเฟอร์ริกที่เป็นสารรวมตะกอน ทำให้เฟอร์เรตสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ลดรูป (Degrade) หรือกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้โดยการทำงานเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามยังไม่พบการใช้งานเฟอร์เรตในแบบเต็มสัดส่วน ในงานเกี่ยวกับน้ำ เนื่องจาก ความยุ่งยากในการเตรียม อัตราการเกิด (Yield) ต่ำ การเกิด ความไม่เสถียรที่เป็นผลจากเทคนิคการเตรียม และการศึกษาที่จะชี้แนะถึงความสามารถและข้อดีของมันในงานด้านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาขั้นพื้นฐานจำเป็นต่อการค้นหาวិธีการผลิตแบบใหม่ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดและความเสถียรสูง และการหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรต์และคลอรีนในการผลิต ทั้งนี้ประโยชน์ของเฟอร์เรตในงานด้านการผลิตน้ำดื่มยังไม่มี การศึกษาอย่างเป็นระบบและงานด้านนี้เป็นส่วนที่น่าสนใจในอนาคต

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digit Balance) รุ่น Mettler –Toledo, Dragon 204
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter): Denver Instrument, model 215
3. เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph, IC): Dionex
4. เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer): Thermo electron corporation, Helios Alpha
5. เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (DI water 18.2 mΩ): ELGA, Purelab Maxima
6. Hyperclean Syringe Filter: Target, Nylon 0.45 μm 17mm
7. กระดาษกรองใยแก้ว (Glass Microfiber Filter): Whatman, GF/C
8. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว
9. ภาชนะพลาสติกคุณภาพสูง

##### 3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (Potassium hexacyanocobaltate(III),  $K_3Co(CN)_6$ ): Sigma-aldich, 97%
2. โซเดียมเมตาอาร์เซไนต์ (Sodium meta Arsenite,  $NaAsO_2$ ): Fluka, purum 99%
3. โซเดียมอะซิเตต (Sodium Acetate,  $CH_3COONa$ ): BDH, AR 99%
4. เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine,  $C_2H_8N_2$ ): Panreac, 99%
5. กรดไนตริก (Nitric Acid,  $HNO_3$ ): Carlo ERBA, 65%
6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl): Carlo ERBA, 37%
7. กรดฟอสฟอริก (Orthophosphoric Acid,  $H_3PO_4$ ): Carlo ERBA, 85%
8. โซเดียมเตตระโบรไรต์ (Sodium Tetraborate,  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ): BDH, 99.5%
9. โพแทสเซียมเฟอร์เรต (Potassium Ferrate,  $K_2FeO_4$ ): Dr.Sharma, 89%
10. โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide, KCN): Ajax, 98%
11. โพแทสเซียมไซยาเนต (Potassium Cyanate, KCNO): Aldrich, 96%
12. โพแทสเซียมไนไตรต์ (Potassium Nitrite,  $KNO_2$ ): Sigma-Aldrich, 96%

### 3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต

#### 3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ

เตรียมสารละลายไว้เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ และ การหยุดปฏิกิริยา โดยสารละลายที่เตรียมไว้มีดังนี้

##### 1) สารละลายโซดาไฟ

สารละลายโซดาไฟในรูปแบบเฮกซะโซดาโนโคบอลเตต เตรียมสารละลายโดยนำโพแทสเซียมเฮกซะโซดาโนโคบอลเตตมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (พีเอชประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ และ 1.2 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างในสถานะที่เป็นเบส มีพีเอชมากกว่า 12

##### 3) สารละลายอาร์เซไนต์

สารละลายอาร์เซไนต์ความเข้มข้น 7500 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมอาร์เซไนต์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา

##### 4) สารละลายบัพเฟอร์

สารละลายบอร์เรต ความเข้มข้น 0.010 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรต มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดลอง การผสมน้ำเสียสังเคราะห์กับสารละลายเฟอร์เรตจะทำโดยการผสมสารละลายทั้ง 2 ในปริมาณ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีที่มากความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และสารละลายเฟอร์เรตในแต่ละครั้งจึงต้องเตรียมที่ความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการเพื่อให้มีความเข้มข้นเท่าที่ต้องการเมื่อมีผสมกัน การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะเตรียมขึ้นจากสารละลายเข้มข้นและสารละลายบัพเฟอร์ที่เตรียมไว้ โดยจะเตรียมก่อนการใช้งานแต่ละครั้งและปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย โดยการผสมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การผสมน้ำเสียดังเคราะห์เสกชะไซยาโนโคบอลต์ในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.

ความเข้มข้นที่กำหนด	สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า				
	สารละลายไซยาไนด์		น้ำปราศจาก	สารละลายบัฟเฟอร์	
ไซยาไนด์	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มล.	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.
5	100	5	5	0.005	40
10	200	5	5	0.005	40
12.5	250	5	5	0.005	40
20	400	5	5	0.005	40
25	500	5	5	0.005	40
50	1,000	5	5	0.005	40
100	2,000	5	5	0.005	40
250	5,000	5	5	0.005	40
500	10,000	5	5	0.01	40

### 3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรด

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรดจากเอกสารในบทที่ 2 พบว่าเฟอร์เรดจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9 ถึง 11 และ บัฟเฟอร์หรือ ไอออนต่างๆ มีผลทำให้ความเสถียรของเฟอร์เรดลดลง ดังนั้นวิธีการเตรียมสารละลายที่ดีที่สุด คือ การเตรียมในน้ำปราศจากไอออน และไม่ต้องปรับพีเอช เพื่อให้เฟอร์เรดมีความเสถียรสูงที่สุด และจะเตรียมสารละลายก่อนใช้งานเท่านั้นเพราะเฟอร์เรดมีการสลายตัวเร็วและสลายตัวไปตลอดเวลา โดยเตรียมด้วยความเข้มข้น 2 เท่า เมื่อผสมกับน้ำเสียดังเคราะห์จะ ได้ความเข้มข้นเท่าที่ต้องการศึกษา

ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรดตรวจวัดได้ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จะแสดงเป็นค่าการดูดซับแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังในภาคผนวก ก. โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับสารละลายเฟอร์เรดที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 ไมโครโมลาร์ ค่าการดูดซับแสงที่เทียบเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรดที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง

ความเข้มข้นที่กำหนด	ค่าการดูดซับแสง
ไมโครโมลาร์	ไม่มีหน่วย
50	0.115
75	0.172
100	0.230
150	0.345
200	0.460
250	0.575
375	0.862
500	1.150

### 3.3 ตัวแปรในการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพ

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอช ที่อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นเฟอร์เรต 2. เวลา	1. 500 ไมโครโมลาร์ 2. สิ้นสุดปฏิกิริยา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	1. พีเอช 9 10 และ 11 2. 1:1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์และไนเตรท

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นเฟอร์เรต 2. เวลา	1. 500 ไมโครโมลาร์ 2. สิ้นสุดปฏิกิริยา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	1. พีเอช 9 10 และ 11 2. 2:1 5:1 10:1 20:1 25:1 40:1 และ 50:1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์และไนเตรท

### 3.3.2 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 2. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	1. 5:1 2. 100 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. เวลา	1. พีเอช 9 10 และ 11 2. 0 30 60 90 120 180 240 300 360 และ 420 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราการเกิดปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์และไนเตรท

### 3.3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอชเหมาะสม ต่อประสิทธิภาพ

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอชเหมาะสม ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์ 2. เวลา	1. 20 ไมโครโมลาร์ 2. สิ้นสุดปฏิกิริยา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นเฟอร์เรต	1. พีเอชที่เหมาะสม 2. 20 40 100 200 400 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์และไนเตรท

ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คืออุณหภูมิ โดยจะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 ศึกษาผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์

##### 3.4.1.1 ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ 1:1

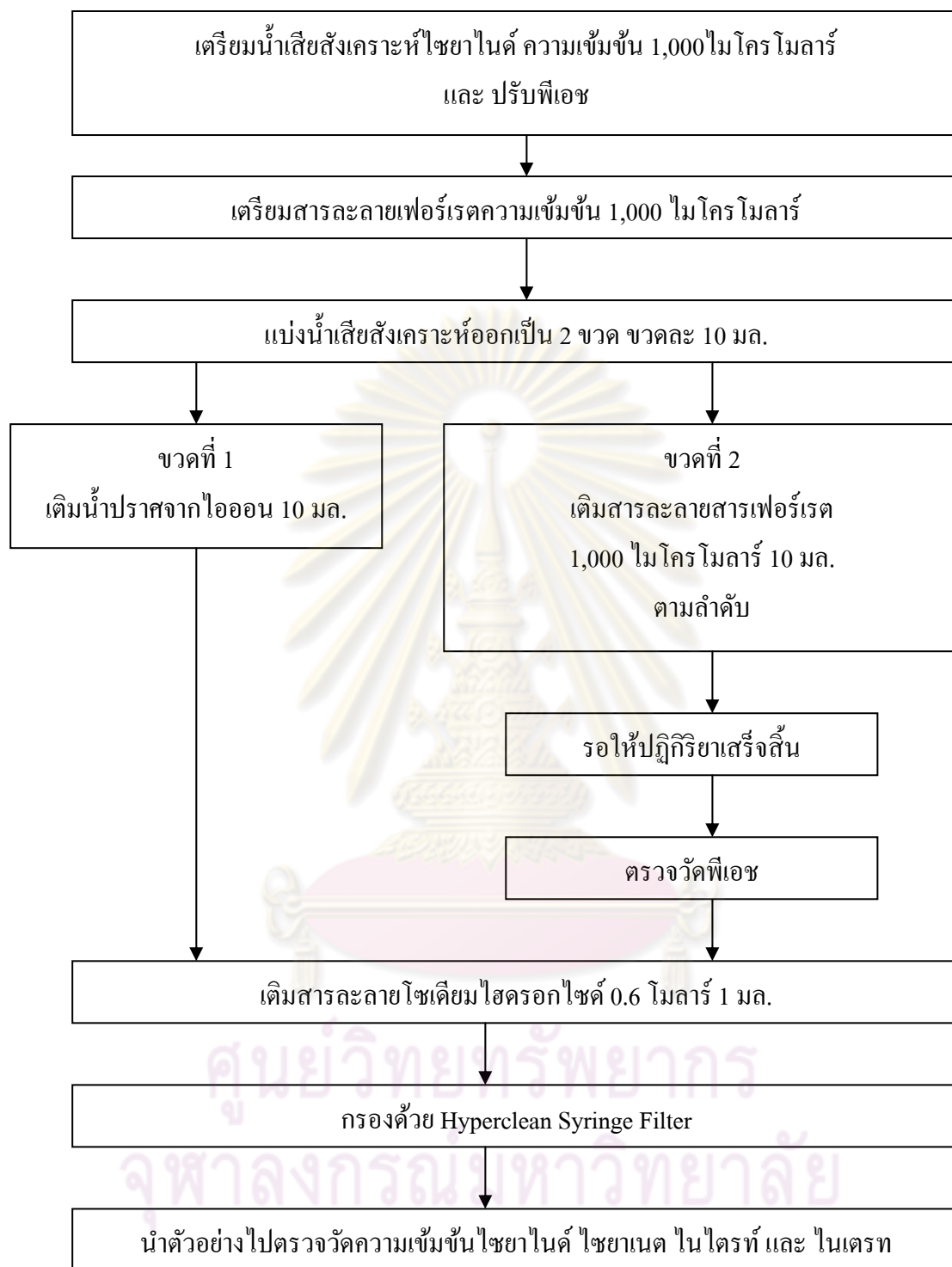
เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ ที่แต่ละพีเอช เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนต์ในรูปของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นค่าเฟอร์เรตสูงสุดที่สามารถวัดได้ ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ จะได้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์เป็น 1:1 แปรค่าพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

การทดลองที่ 3.4.1.1 มีวิธีการทดลอง และแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากโทแทสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตให้มีความเข้มข้นไซยาไนต์ 1,000 ไมโครโมลาร์ 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 90 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 2 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนต์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยาเนตไนไตรท์ ไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนต์ สารผลิตภัณฑ์กับความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ และ สารผลิตภัณฑ์





รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.1

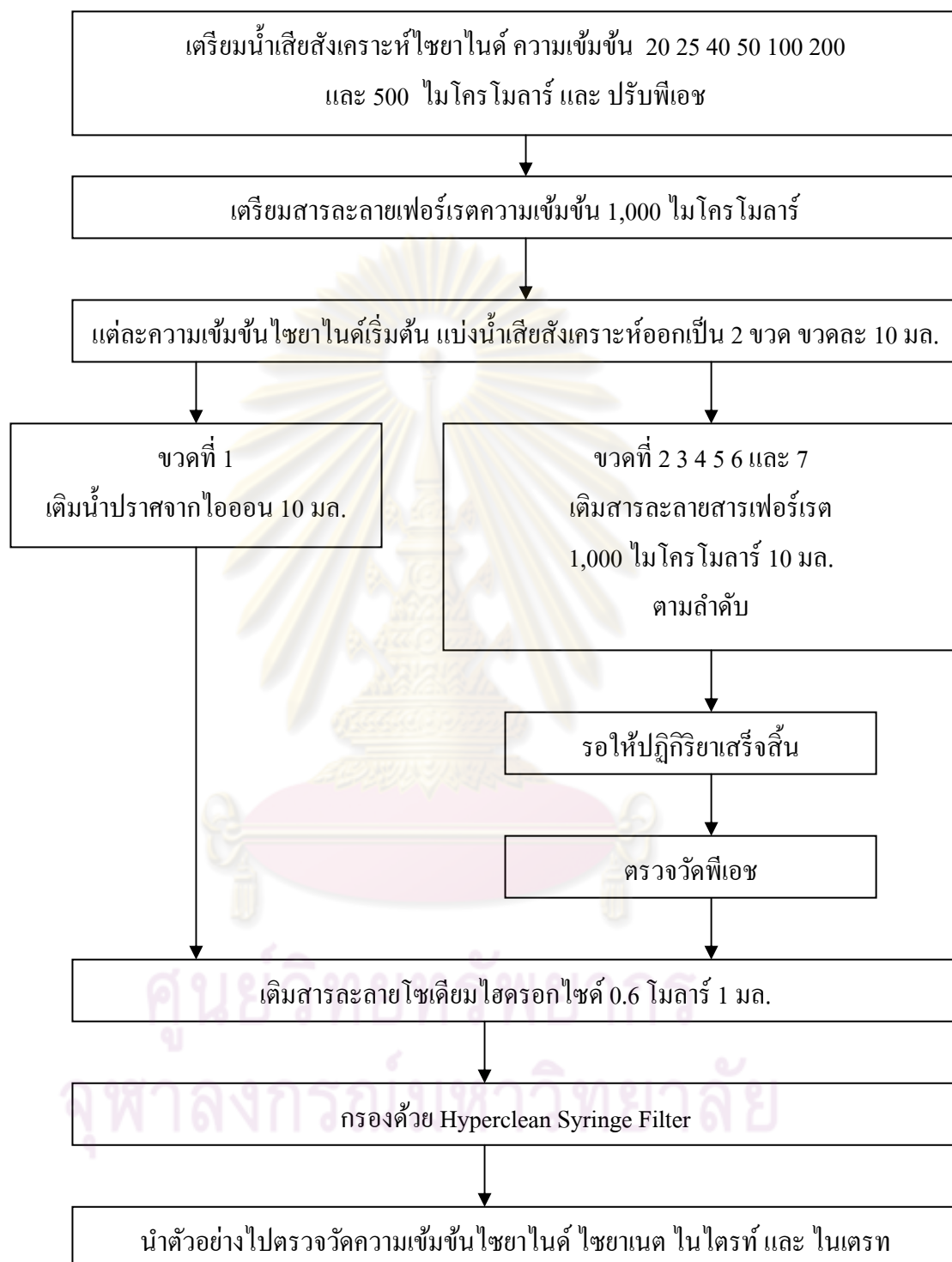
### 3.4.1.2 ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่แต่ละพีเอช แต่ละอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นค่าเฟอร์เรตสูงสุดที่สามารถวัดได้ แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ได้เป็น 250 100 50 25 20 12.5 10 และ 5 ไมโครโมลาร์ จะได้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เป็น 2:1 5:1 10:1 20:1 25:1 40:1 และ 50:1 แต่ละความเข้มข้นแปรค่าพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

การทดลองที่ 3.4.1.2 มีวิธีการทดลอง และแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.2

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 200 100 50 40 25 และ 20 ไมโครโมลาร์ 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 80 มล.
3. น้ำเสียสังเคราะห์แต่ละความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 2 ขวดขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์กับความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และ สารผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.2

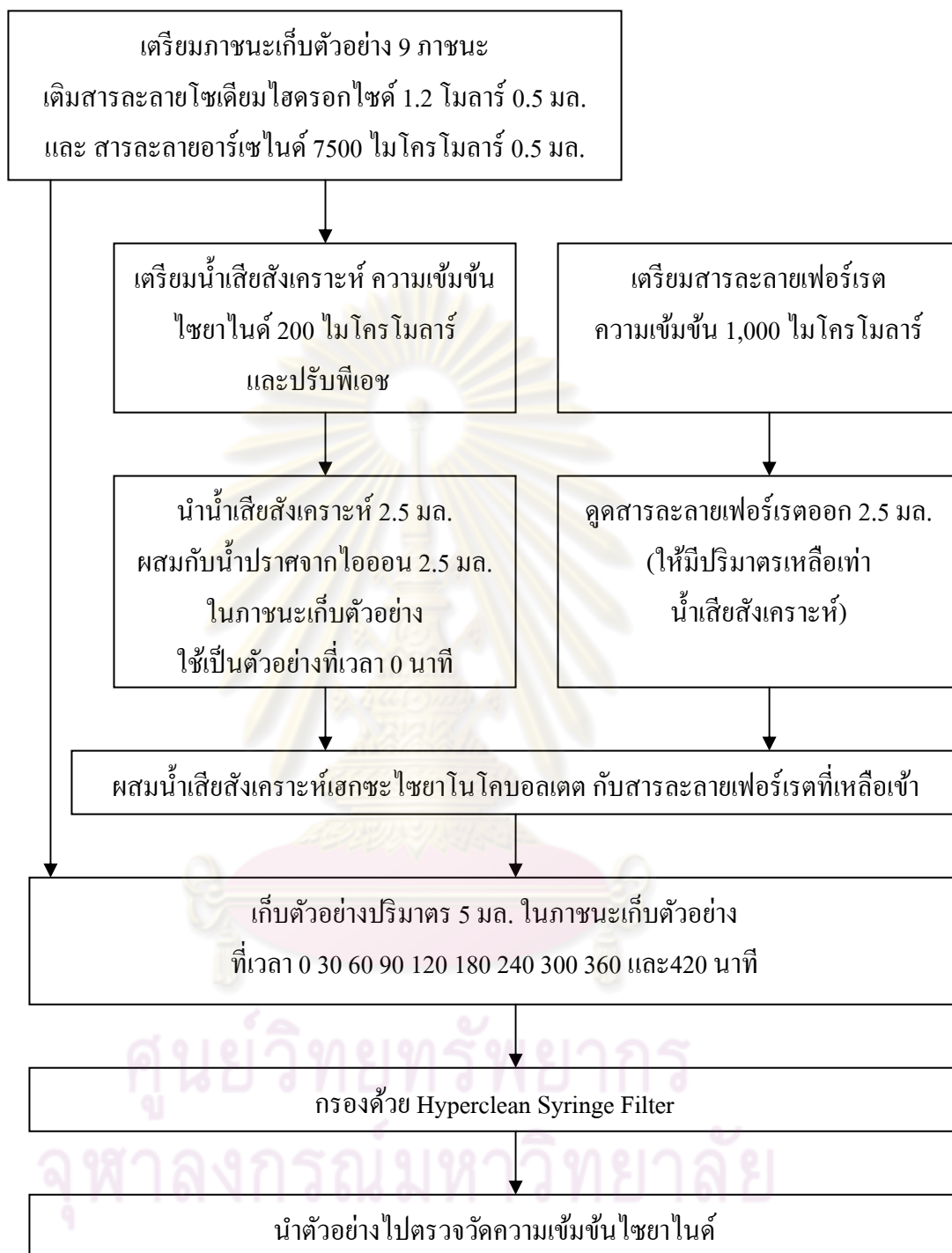
### 3.4.2 ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลตเตต

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลตเตตเทียบกับเวลา ที่แต่ละพีเอช

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 5:1 แปรค่าพีเอชที่ 9 10 และ 11 เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 30 60 90 120 180 240 300 360 และ 420 นาที

การทดลองที่ 3.4.2 มีวิธีการทดลอง และแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3

1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 โมลาร์ 0.5 มล. และสารละลายอาร์เซนไนด์ 7500 ไมโครโมลาร์ 0.5 มล. ไว้ในภาชนะ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 200 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9 10 และ 11 ปริมาณ 50 มล.
3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ 2.5 มล. ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 2.5 มล. ในภาชนะเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างนี้ใช้เป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที
4. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาณ 50 มล.
5. คูดสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มล. เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เขย่าและเก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 0 30 60 90 120 180 240 300 360 และ 420 นาที
6. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.2

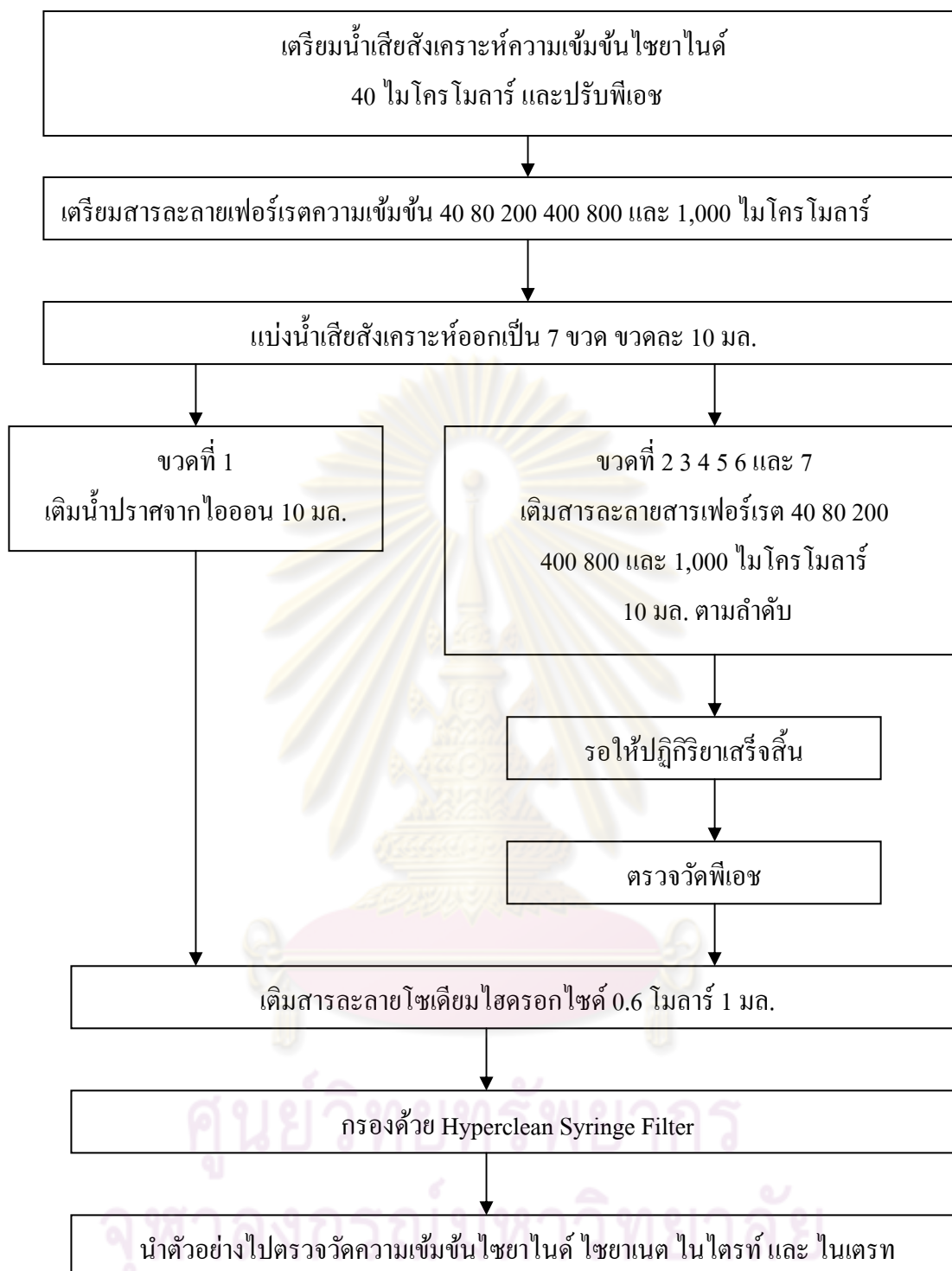
### 3.4.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พีเอชเหมาะสม

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่พีเอชเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1 อัตราส่วนโดยโมลต่อเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 20 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์เรต 20 40 100 200 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอชเหมาะสม ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

การทดลองที่ 3.4.3 มีวิธีการทดลอง และแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.4

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 40 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 40 80 200 400 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร ความเข้มข้นละ 10 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 7 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 3 4 5 6 และ 7 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 40 80 200 400 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์กับความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และ สารผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.3

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

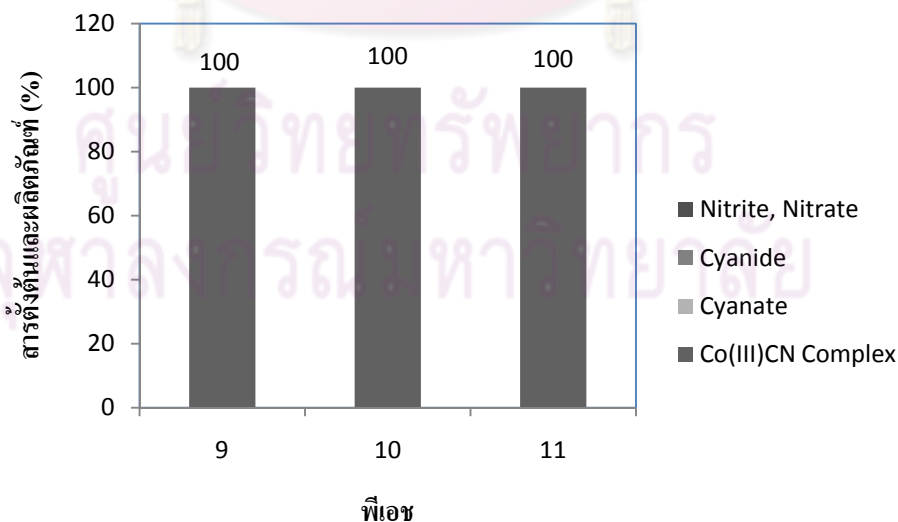
#### 4.1 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต

##### 4.1.1 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปของไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ จะได้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 โดยแปรค่าพีเอชเป็น พีเอช 9 10 และ 11 และใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ ซึ่งเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ที่ส่งผลต่อการสลายตัวของเฟอร์เรตน้อยที่สุด (ศิลาวุธ, 2548)

โดยพีเอชที่ใช้ในการทดลอง เลือกมาจากความเสถียรของเฟอร์เรต ตามรูปที่ 2.5 พบว่าที่พีเอช 9 10 และ 11 เฟอร์เรตจะสลายตัวไปได้น้อยกว่าและช้ากว่าที่พีเอชอื่น จึงได้เลือกค่า พีเอช 9 10 และ 11 มาทดลองหาพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ผลการทดลอง ก่อนเติมสารละลายเฟอร์เรต ทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ (CN<sup>-</sup>) ไซยาเนต (CNO<sup>-</sup>) ไนเตรท (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และไนไตรท์ (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ซึ่งตรวจไม่พบไอออนทั้งสิ้น จึงสรุปได้ว่า ไซยาไนด์ก่อนเกิดปฏิกิริยาอยู่ในรูปไซยาไนด์เชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทุกค่าพีเอช โดยรายละเอียดหลักการในการคำนวณสมมูลมวลอยู่ในภาคผนวกที่ ๕

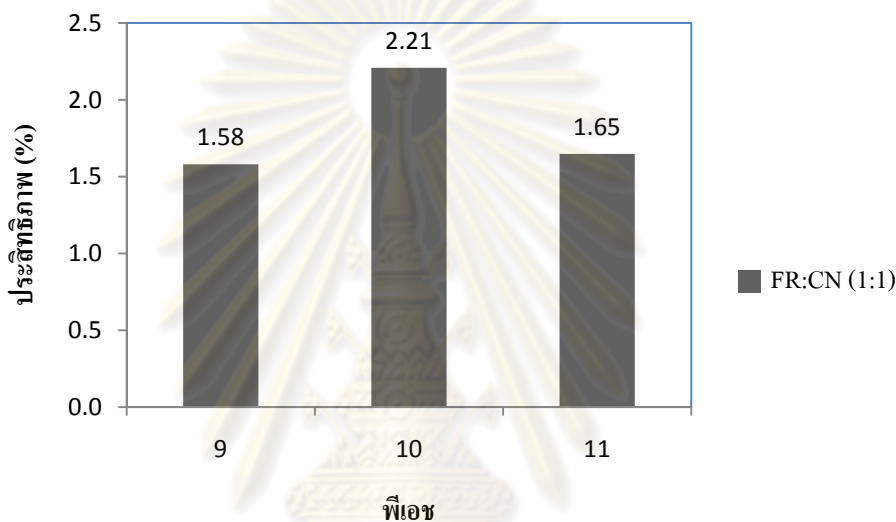


รูปที่ 4.1 ไอออนก่อนทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

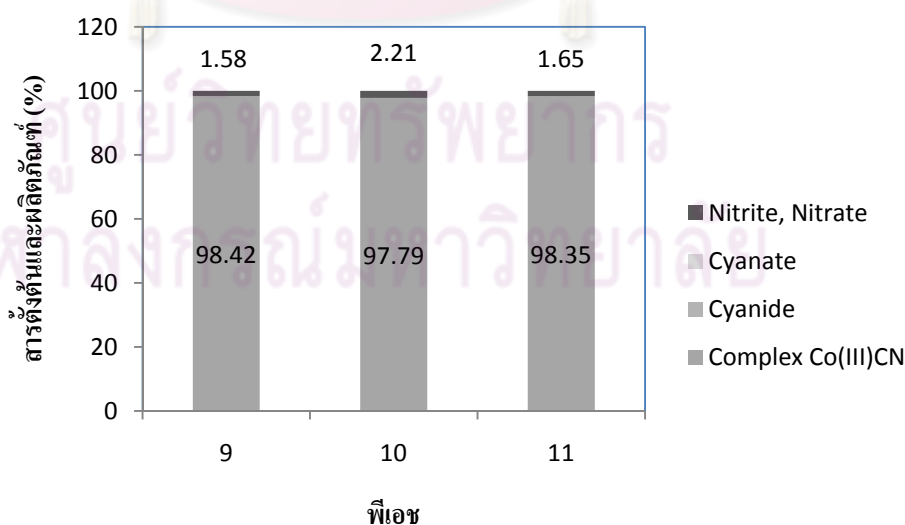


เมื่อเติมสารละลายเฟอร์เรต เพื่อไปทำการออกซิไดซ์สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน ในน้ำเสียสังเคราะห์ รอนจนปฏิกิริยาสิ้นสุด และทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ ไซยาเนต ไนเตรท และไนไตรท์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยตรวจพบไอออนไนเตรท และไนเตรทเป็นสารผลิตภัณฑ์ โดยไม่พบไซยาไนด์และไซยาเนต

ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (%) กำหนดจากสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 1.58% ที่พีเอช 10 มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 2.21% ที่พีเอช 11 มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 1.65% ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตสูงสุด โดยรายละเอียดหลักการในการคำนวณสมมูลมวลอยู่ในภาคผนวกที่ ๕



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1

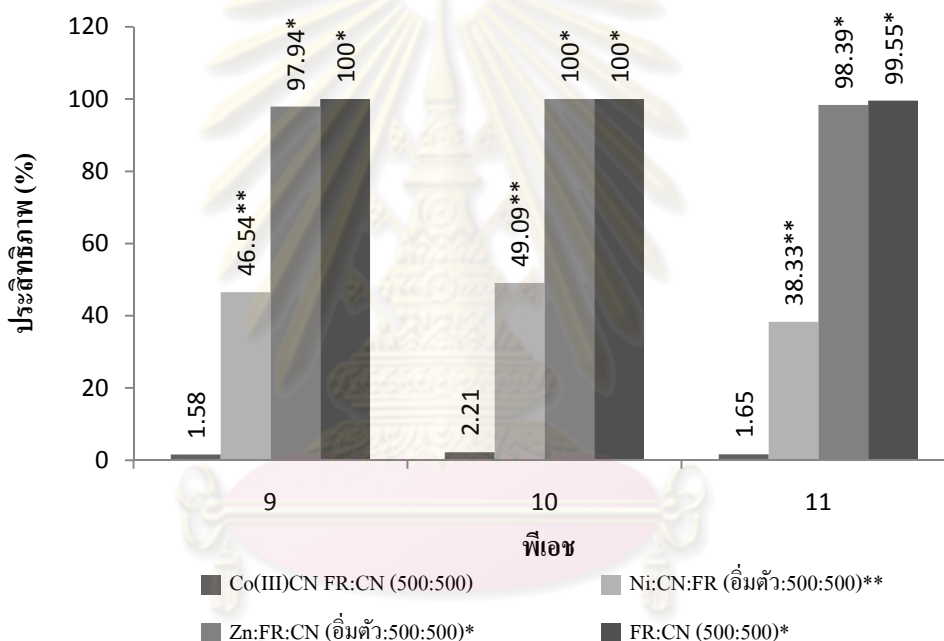


รูปที่ 4.3 ไอออนหลังทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1

จากการคำนวณสมมูลมวล สามารถคำนวณหาค่าไชยาไนต์เชิงซ้อนได้ ดังนี้ ที่พีเอช 9 มีค่าไชยาไนต์เชิงซ้อนเท่ากับ 98.42% พีเอช 10 มีค่าเท่ากับ 97.79% พีเอช 11 มีค่าเท่ากับ 98.35% ดังรูปที่ 4.3

จากการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ เท่ากับ 1:1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไชยาโนโคบอลเตต สูงสุดที่พีเอช 10 มีค่าประมาณ 2% ซึ่งถือว่ากำจัดได้น้อยมาก และไม่แตกต่างจากอีก 2 พีเอชมากนัก

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ สารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ สำหรับการทดลองกับไชยาไนต์อิสระ (ศิลาวุธ, 2548) การทดลองกับสังกะสีอิมิตัวด้วยไชยาไนต์ (ศิลาวุธ, 2548) และการทดลองกับนิกเกิลอิมิตัวด้วยไชยาไนต์ (ภัทรวรรณ, 2549)



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล สังกะสีไชยาไนต์ และน้ำเสียของสารประกอบโคบอลไชยาไนต์

การกำจัดไชยาไนต์อิสระด้วยเฟอร์เรตและไชยาไนต์ในสารละลายสังกะสีอิมิตัวด้วยเฟอร์เรต พบว่า ที่พีเอช 9 10 และ 11 มีประสิทธิภาพเท่ากับ 100 100 และ 99.55 เปอร์เซ็นต์สำหรับไชยาไนต์อิสระ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 97.94 100 และ 98.39 เปอร์เซ็นต์สำหรับสังกะสีอิมิตัวด้วยไชยาไนต์ ตามลำดับ

สำหรับการกำจัดไซยาไนด์ในสารละลายนิกเกิลด้วยเฟอร์เรต ที่พีเอช 9 10 และ 11 มีประสิทธิภาพเท่ากับ 46.54 49.90 และ 38.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพการกำจัดที่อัตราส่วน 1:1 ก่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกันทุกพีเอช จึงได้ทำการทดลองเพิ่ม โดยเพิ่มค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตหากเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่พีเอชทั้งสาม

#### 4.1.2 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของเฟอร์เรตคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์ โดยกำหนดความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้นที่ 250 100 50 20 25 12.5 และ 10 ไมโครโมลาร์ ซึ่งจะได้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 2:1 5:1 10:1 20:1 25:1 40:1 และ 50:1 และแปรค่าพีเอชในทุกอัตราส่วน 3 ค่าคือ 9 10 และ 11 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นสารละลายบัฟเฟอร์

ผลการทดลอง ก่อนเติมสารละลายเฟอร์เรต ในทุกอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ ไซยานิด ไนเตรท และไนไตรท์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ซึ่งตรวจไม่พบไอออนทั้งสี่ จึงสรุปได้ว่า ไซยาไนด์ก่อนเกิดปฏิกิริยาอยู่ในรูปไซยาไนด์เชิงซ้อน เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตทั้งหมดในทุกอัตราส่วน

หลังเติมสารละลายเฟอร์เรตเพื่อทำปฏิกิริยาในทุกอัตราส่วน รอจนปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ ไซยานิด ไนเตรท และไนไตรท์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ในแต่ละอัตราส่วน โดยตรวจพบไอออนของไนเตรท และไนไตรท์ เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ในแต่ละอัตราส่วน และในแต่ละพีเอช โดยใช้หลักการสมมูลมวล โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 และสามารถหาค่าสมมูลมวลคำนวณหา % ไอออนเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต คงเหลือหลังทำปฏิกิริยา ตามตาราง 4.2 โดยรูปที่ 4.5 สรุปประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอชและอัตราส่วนโดยโมลต่าง ๆ

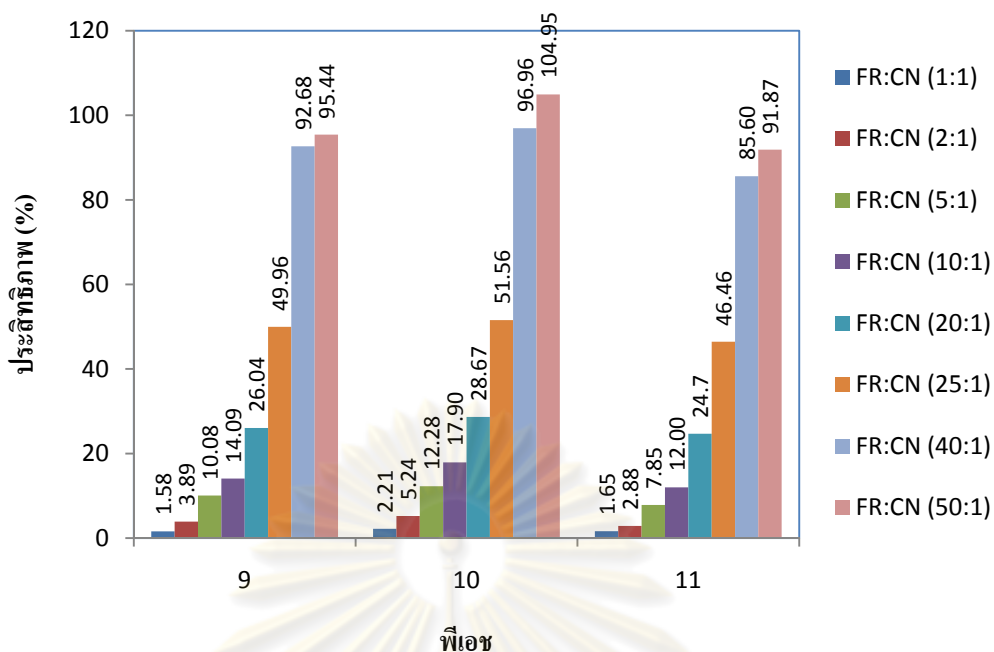
ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดเสกชะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต ที่อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์

ความเข้มข้นเริ่มต้นเสกชะไซยาโนโคบอลเตต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% ประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอชต่าง ๆ		
		พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11
500	1:1	1.58	2.21	1.65
250	2:1	3.89	5.24	2.88
100	5:1	10.08	12.28	7.85
50	10:1	14.09	17.90	12.00
25	20:1	26.04	28.67	24.70
20	25:1	49.95	51.56	46.45
12.5	40:1	92.68	96.96	85.60
10	50:1	95.44	100* (104.95)	91.87

\*ตรวจพบเกิน 100% จึงปัดเป็น 100%

ตารางที่ 4.2 %ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อน เสกชะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์

ความเข้มข้นเริ่มต้นเสกชะไซยาโนโคบอลเตต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% ไอออนเชิงซ้อน เสกชะไซยาโนโคบอลเตต คงเหลือหลังทำปฏิกิริยา		
		พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11
500	1:1	98.42	97.79	98.35
250	2:1	96.11	94.76	97.12
100	5:1	89.92	87.72	92.16
50	10:1	85.91	82.10	88.00
25	25:1	73.96	71.33	75.30
20	20:1	50.05	48.45	53.55
12.5	40:1	7.32	3.04	14.40
10	50:1	4.56	0	8.12



**รูปที่ 4.5** ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ที่พืเอช 9 10 และ 11 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต เท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 25:1 40:1 และ 50:1

จากผลการทดลอง พบว่าที่พืเอช 10 เฟอร์เรตสามารถกำจัดไอออนเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้สูงที่สุดในทุกอัตราส่วน และโดยที่พืเอช 9 เฟอร์เรตสามารถกำจัดไอออนเชิงซ้อนได้มากกว่าพืเอช 11 และที่พืเอช 10 ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่ 50:1 สามารถกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้อย่างสมบูรณ์

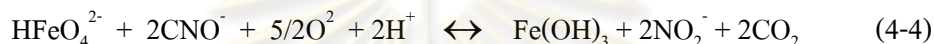
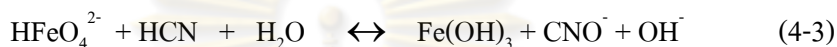
จากผลการทดลองที่พืเอช 10 กำจัดไอออนเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้สูงที่สุดเป็นผลมาจาก ที่พืเอช 9.4 - 9.7 เฟอร์เรตจะสลายตัวไปได้น้อยกว่าที่พืเอชอื่น แสดงว่าเฟอร์เรตเสถียรมากที่สุดในช่วงพืเอชนี้ (Graham, N. และคณะ) และยังคงสอดคล้องกับผลการทดลองผลของพืเอชต่อความคงตัวของเฟอร์เรต (ศิลาวุธ, 2548) พบว่าที่พืเอช 10 เฟอร์เรตจะมีความคงตัวสูงสุด

พืเอช 10 เฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับไอออนเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้นานกว่าที่พืเอช 9 และ 11 ตามลำดับ เป็นผลให้กำจัดไอออนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้สูงสุด

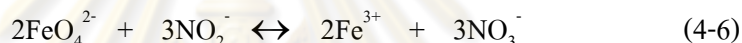
ตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 แสดง % ของสารผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับสารตั้งต้นที่การทดลองการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรตที่อัตราส่วนโดยโมลต่าง ๆ ที่พืเอช 9 10 และ 11 พบว่าสารผลิตภัณฑ์พบเพียงไนเตรท และไนไตรท์ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่างสารผลิตภัณฑ์ไนเตรทต่อไนไตรท์สูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

ส่วนเกิน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากขึ้นดังสมการที่ 4-1 ถึง 4-6 สามารถออกซิไดซ์ไนไตรท์ได้เป็นไนเตรทได้มากขึ้น และที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์สูง ๆ ตั้งแต่ 40 : 1 ขึ้นไป ผลรวมระหว่างไนเตรทและไนไตรท์ จะมีค่าประมาณเท่ากับสารตั้งต้นก่อนเริ่มทำปฏิกิริยา ซึ่งหมายความว่าสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตได้เกือบหมด โดยมีไนเตรทและไนไตรท์เป็นสารผลิตภัณฑ์

การทดลองของ Sharma V.K. (1998) ที่พีเอช 7.5 พบไอออนของไซยาไนด์ และไนไตรท์เป็นผลิตภัณฑ์ และพบกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเฟอร์ริกกับไฮโดรเจนไซยาไนด์ ดังนี้



ได้ทำการทดลองใช้เฟอร์เรตออกซิไดซ์ไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) เป็นไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ได้ดังสมการ 4-6



จากผลการทดลอง ยังพบว่าไม่พบไอออนไซยาไนด์และไอออนไซยานเนตก่อนและหลังจากการทำปฏิกิริยา พบเพียงไอออนไนเตรทและไนเตรทหลังทำปฏิกิริยา ดังตาราง 4.3 – 4.5 นั้น คาดว่าเป็นเพราะไอออนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต  $[\text{Co(CN)}_6]^{3-}$  มีพันธะที่แข็งแรงมาก (Strong Acid Dissociable Cyanide) จากค่าคงที่  $\log K$  (Dionex, 2003) พบว่า  $[\text{Co(CN)}_6]^{3-}$  มีค่า  $\log K$  สูงที่สุดในบรรดาไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อนทั้งหมด เท่ากับ 64 ฉะนั้น เมื่ออยู่ในรูปของสารละลายจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เสถียรกว่า และไม่เกิดเป็นไซยาไนด์อิสระ ( $\text{CN}^-$ ) จึงวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟีไม่พบ ในช่วงก่อนเกิดปฏิกิริยา สำหรับไอออนเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะตัวอื่น เช่น สังกะสี หรือ นิกเกิล พบว่าเมื่ออยู่ในรูปสารละลายที่พีเอชสูง จะมีการปลดปล่อยไซยาไนด์อิสระบางส่วนออกมา เนื่องจากพันธะระหว่างโลหะและไซยาไนด์ไม่แข็งแรง และตรวจพบไซยาไนด์อิสระในสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา (ศิลาวุธ, 2548; ประภาพร, 2552)

สำหรับกรณีหลังเกิดปฏิกิริยา ไม่พบไอออนของไซยาไนด์ ไซยานเนต พบเฉพาะไนเตรทและไนไตรท์ คาดว่าเป็นเพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเฟอร์เรตออกซิไดซ์ไซยาไนด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการสลายพันธะของไอออนเชิงซ้อนไปเป็นไซยานเนต และไซยานเนตถูกออกซิไดซ์ต่อกลายเป็นไนไตรท์และไนเตรท เนื่องจากอัตราส่วนโมลของเฟอร์เรตที่ทำปฏิกิริยาในทุกอัตราส่วนต่อไซยาไนด์ที่ถูกปล่อยออกมาเนื่องจากปฏิกิริยาสลายพันธะมีค่าสูง มากกว่า 50:1 ในทุกอัตราส่วน การทดลอง ทำให้เฟอร์เรตส่วนเกินสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ เป็นไซยานเนตหมด และไซยานเนตที่เกิดขึ้นก็ถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไนไตรท์และไนเตรท ตามสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 จนไม่เหลือไซยานเนต

โดยอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยาระหว่างไซยาไนด์อิสระกับเฟอร์เรตที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1 (ศิลาวุธ 2548 และ Sharma, 2005) และอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยาระหว่างไซยานเนต หรือ ไนไตรท์ หรือ ไนเตรท กับเฟอร์เรตที่เหมาะสม ก็เท่ากับ 1:1 เช่นกัน (Sharma, 2005)

**ตารางที่ 4.3** %สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น			
		CN <sup>-</sup>	CNO <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
500	1:1	0	0	1.28	0.30
250	2:1	0	0	2.84	1.04
100	5:1	0	0	7.25	2.83
50	10:1	0	0	12.29	0.99
25	25:1	0	0	24.09	1.95
20	20:1	0	0	44.48	5.47
12.5	40:1	0	0	85.70	6.92
10	50:1	0	0	79.30	16.14

**ตารางที่ 4.4** %สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น			
		CN <sup>-</sup>	CNO <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
500	1:1	0	0	1.48	0.73
250	2:1	0	0	3.49	1.75
100	5:1	0	0	9.12	3.16
50	10:1	0	0	14.67	3.23
25	25:1	0	0	26.72	1.94
20	20:1	0	0	37.40	7.08
12.5	40:1	0	0	88.32	8.64
10	50:1	0	0	94.16	10.79

ตารางที่ 4.5 %สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 11

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตด (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% สารผลิตภัณฑ์ เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น			
		CN <sup>-</sup>	CNO <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
500	1:1	0	0	1.30	0.35
250	2:1	0	0	1.62	1.26
100	5:1	0	0	5.71	2.14
50	10:1	0	0	8.47	3.53
25	25:1	0	0	22.78	1.91
20	20:1	0	0	43.95	2.50
12.5	40:1	0	0	80.54	5.06
10	50:1	0	0	87.11	4.77

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยา คาดว่าประกอบด้วยสองปฏิกิริยาหลัก คือปฏิกิริยาแรกในการที่เฟอร์เรตเข้าไปทำปฏิกิริยาสลายพันธะระหว่างโคบอลต์และไซยาไนด์ และปลดปล่อยไซยาไนด์อิสระออกมา และปฏิกิริยาหลังที่เฟอร์เรตทำลายไซยาไนด์อิสระให้กลายเป็นไซยาเนตและไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ

ในปฏิกิริยาหลัง อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตที่เหมาะสมทุกปฏิกิริยาย่อยคือ 1:1 สำหรับในปฏิกิริยาแรก ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถบอกอัตราส่วนได้อย่างชัดเจน

แต่หากใช้ผลการทดลองที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่ 40:1 ที่พีเอช 10 พบว่าทำลายได้ถึงประมาณ 97% โดยประมาณว่าสำหรับปฏิกิริยาหลังเฟอร์เรตทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นไนเตรททั้งหมด จะต้องใช้อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์อิสระเท่ากับ 3:1 อย่างน้อยอัตราส่วนที่เหลือ 37:1 น่าจะใช้สำหรับปฏิกิริยาแรกในการทำลายพันธะระหว่างโคบอลต์และไซยาไนด์

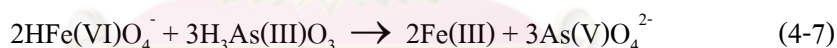


#### 4.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเฟอร์เรตกับเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต

ทำการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต เทียบกับเวลาที่ผ่านไป จนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยศึกษาที่พีเอช 9 10 และ 11 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในแต่ละพีเอช

ทดลองมีความเข้มข้นเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตในรูปไฮยาโนด์ 100 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นของเฟอร์เรต เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ 5:1 แปรค่าพีเอชที่ 9 10 และ 11 เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 30 60 90 120 180 240 300 360 และ 420 นาที โดยใช้ อาร์เซไนต์ ( $As^{3+}$ ) ความเข้มข้น 7500 ไมโครโมลาร์ เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา

การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดย หารสารอื่นๆ ที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าไฮยาโนด์อย่างมาก เติมลงในน้ำตัวอย่างที่ต้องการ เพื่อให้เฟอร์เรตหายไปจากน้ำตัวอย่าง อาร์เซไนต์ ( $As^{3+}$ ) มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.54 \cdot 10^5$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 8.4 และลดลงประมาณ  $1.23 \cdot 10^3$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 12.9 (Lee Um และ Yoon, 2003) ในขณะที่ไฮยาโนด์มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.76 \cdot 10^2$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 9 และจะมีความคงที่ในปฏิกิริยาลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Sharma, 1998) จึงคาดว่าในช่วงพีเอช 9 10 และ 11 อาร์เซไนต์จะมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าเฟอร์เรตอย่างน้อย 100 เท่า อาร์เซไนต์มีอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนต์เท่ากับ 2:3 สมการที่ 4-7 (Lee Um และ Yoon, 2003)



ในการทดลองที่ความเข้มข้นเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ จะใช้ความเข้มข้นอาร์เซไนต์ในการหยุดปฏิกิริยา 750 ไมโครโมลาร์

โดยในการทดลองนี้ จะเติมสารละลายอาร์เซไนต์ 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มล. ต่อ น้ำตัวอย่าง 10 มล. สารละลายหลังผสมจะมีเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนต์ 2:3 พอดี

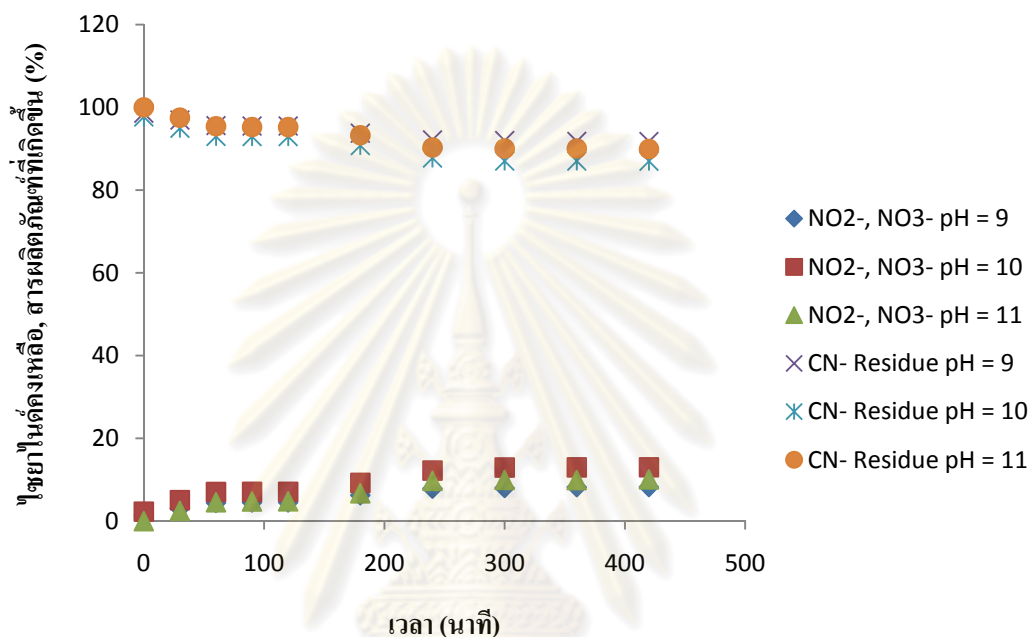
จากการทดลอง เมื่อเติมสารละลายอาร์เซไนต์ สารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซไนต์หมดทันทีโดยสังเกตจากสีม่วงของสารละลายจะหายไปทันที

เมื่อเติมสารละลายเฟอร์เรต เพื่อไปทำการออกซิไดซ์สารประกอบไฮยาโนด์เชิงซ้อน ในน้ำเสียดังเคราะห์ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 30 60 90 120 180 240 300 360 และ 420 นาที

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ตรวจไม่พบไฮยาโนด์อิสระ และไฮยาเนต แต่ตรวจพบ ไนไตรท์ และไนเตรท ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (4-4) และ (4-6) โดยการที่ตรวจพบแต่ไนไตรท์ และไนเตรท โดยสาเหตุ

นั้น คงจะเกี่ยวกับการที่มีปริมาณเฟอร์เรตส่วนเกินที่สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันไซยาไนด์และไซยานเนตให้กลายเป็นไนไตรท์และไนเตรทได้หมด เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 4.1

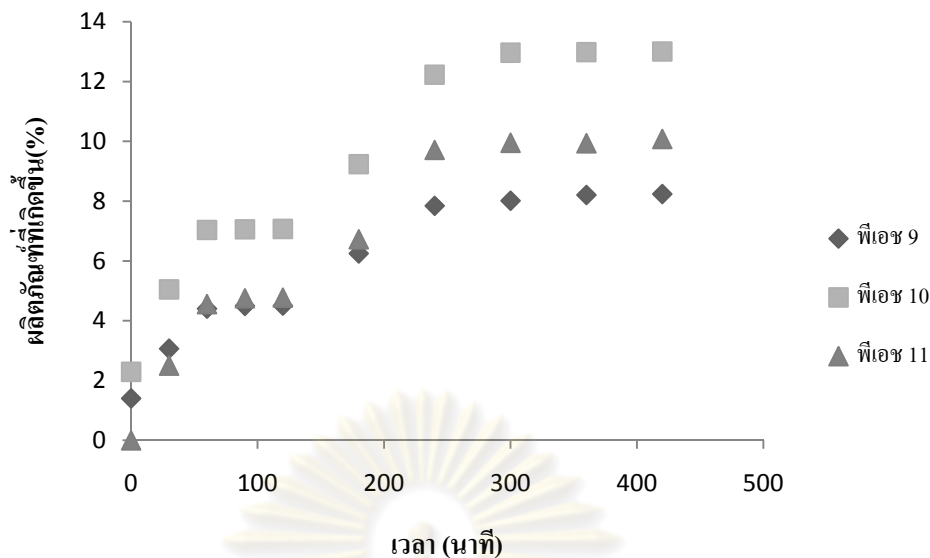
โดยนำ %ผลิตภัณฑ์ที่ตรวจวัดได้ และ %สารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่คำนวณได้จากสมมูลมวลตามภาคผนวก ข ที่เวลาต่าง ๆ กัน และที่พีเอชทั้งสามพีเอช ดังแสดงในรูป 4.6



รูปที่ 4.6 %สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและ %สารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ในระยะเวลาต่าง ๆ ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 5:1

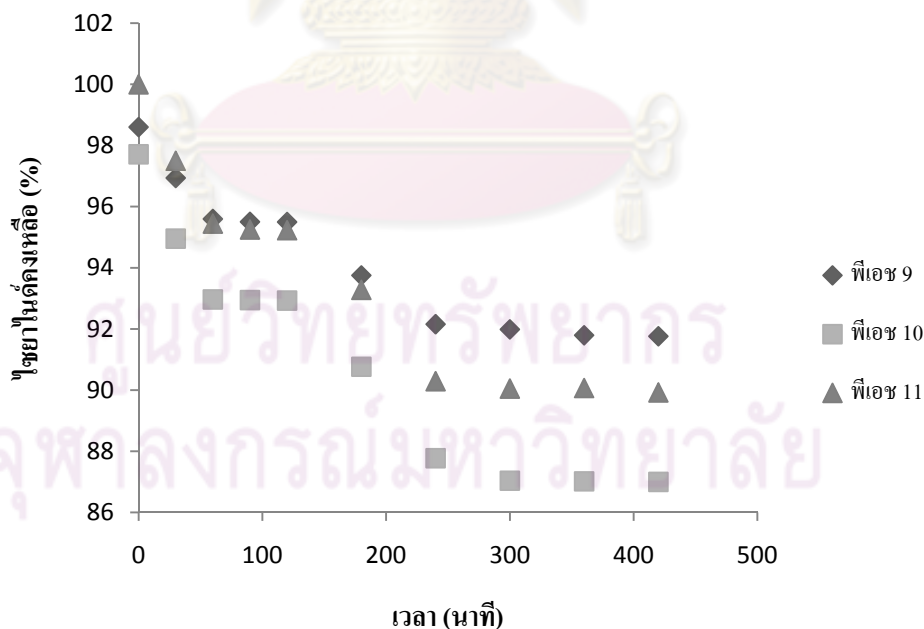
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่ทุกพีเอช มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน และหากนำผลการทดลอง % สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตาม เวลา แสดงดังรูปที่ 4.7 จะพบว่าที่พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด และที่พีเอช 11 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าพีเอช 9

ตามรูปที่ 4.7 จะพบว่าที่ พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 300 นาที โดยที่เวลาที่ได้ 300 นาทีนี้จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเวลาอย่างน้อยที่สุดที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต



รูปที่ 4.7 %สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาต่าง ๆ ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 5:1

และสามารถนำ %สารประกอบเชิงซ้อน เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาแสดงในรูปที่ 4.8 และจะพบว่า พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด และปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 300 นาที เช่นเดียวกับ %สารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 %สารประกอบเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ในระยะเวลาต่าง ๆ ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 5:1

จากผลการทดลองที่ 4.2 พบว่าพีเอชมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดย มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดที่พีเอช 10 และช้าลงที่พีเอช 11 และ พีเอช 9 ตามลำดับ และปฏิกิริยาเริ่มคงที่เวลา 300 นาที

สาเหตุน่าจะมาจากความเสถียรของเฟอร์เรตที่พีเอชประมาณ 9.4-9.7 ซึ่งใกล้เคียงพีเอช 10 ทำให้เฟอร์เรตทำปฏิกิริยาได้มากกว่าพีเอช 9 และ 11

จากผลการทดลองการศึกษาผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (ศิลาวุธ, 2548) พบว่าสังกะสีมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ผลของพีเอช พบว่า ที่พีเอช 9 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากการทดลองที่ 4.2 พบว่าที่พีเอช 10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ข้อมูลเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที) ดังตารางที่ 4.6 (ศิลาวุธ, 2548)

ตารางที่ 4.6 เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)

น้ำเสียสังเคราะห์	ที่ประสิทธิภาพ 90%		สิ้นสุดปฏิกิริยา	
	ไซยาไนด์อิสระ	มีสังกะสีอมตัว	ไซยาไนด์อิสระ	มีสังกะสีอมตัว
พีเอช 9	1	2	10	30
พีเอช 10	2	5	30	120
พีเอช 11	60	90	300	มากกว่า 300

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีโลหะหนัก สังกะสีอมตัวในน้ำ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับไซยาไนด์มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดูได้จากเวลาที่ไม่มีสังกะสีจะใช้เวลาน้อยกว่าที่มีโลหะหนักสังกะสี

สอดคล้องกับผลการทดลอง 4.2 นี้ สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะหนัก จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ผลการทดลอง 4.2 ใช้เวลามากถึง 300 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต

ทำทดลองที่ความเข้มข้นของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตในรูปของไซยาไนด์เท่ากับ 20 ไมโครโมลาร์ และแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์เรตเป็น 20 40 100 200 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ ทำให้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 1:2 1:5 1:10 1:20 และ 1:25 ตามลำดับ โดยพีเอชที่ใช้ คือ พีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 4.1 คือพีเอช 10โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

การที่เลือกใช้ความเข้มข้นของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่ 20 ไมโครโมลาร์ นั้นเนื่องจากถ้าเลือกให้ความเข้มข้นต่ำกว่านี้ หลังเกิดปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วงต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับค่า Detection Limit ของเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ จะทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ หรือค่าความเข้มข้นที่ได้ไม่เป็นที่น่าเชื่อถือ Detection Limit ของ ไอออนต่างๆ คูได้ที่ภาคผนวก ฉ

พีเอชเหมาะสม เป็นพีเอชที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ดีที่สุด จากการทดลองที่ 4.1 พีเอช 10 จึงเป็นพีเอชเหมาะสมที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้

ผลการทดลอง ก่อนเติมสารละลายเฟอร์เรต ทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ (CN<sup>-</sup>) ไซยาเนต (CNO<sup>-</sup>) ไนเตรท (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และไนไตรท์ (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ซึ่งตรวจไม่พบไอออนทั้งสี่ จึงสรุปได้ว่า ไซยาไนด์ก่อนเกิดปฏิกิริยาอยู่ในรูปไซยาไนด์เชิงซ้อน เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตทั้งหมด ทุกค่าพีเอช โดยรายละเอียดหลักการในการคำนวณสมมูลมวลอยู่ในภาคผนวกที่ ช

หลังเติมสารละลายเฟอร์เรตเพื่อทำปฏิกิริยาในทุกอัตราส่วน รอจนปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์อิสระ ไซยาเนต ไนเตรท และไนไตรท์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ในแต่ละอัตราส่วน โดยตรวจพบไอออนของไนเตรท และไนไตรท์ เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ในแต่ละอัตราส่วน และในแต่ละพีเอช โดยใช้หลักการสมมูลมวล โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 และสามารถหาค่าสมมูลมวลคำนวณหา % ไอออนเชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต คงเหลือหลังทำปฏิกิริยา ตามตาราง 4.8 โดยรูปที่ 4.9 สรุปประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอชและอัตราส่วนโดยโมลต่าง ๆ และรูปที่ 4.10 สรุป % ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยา

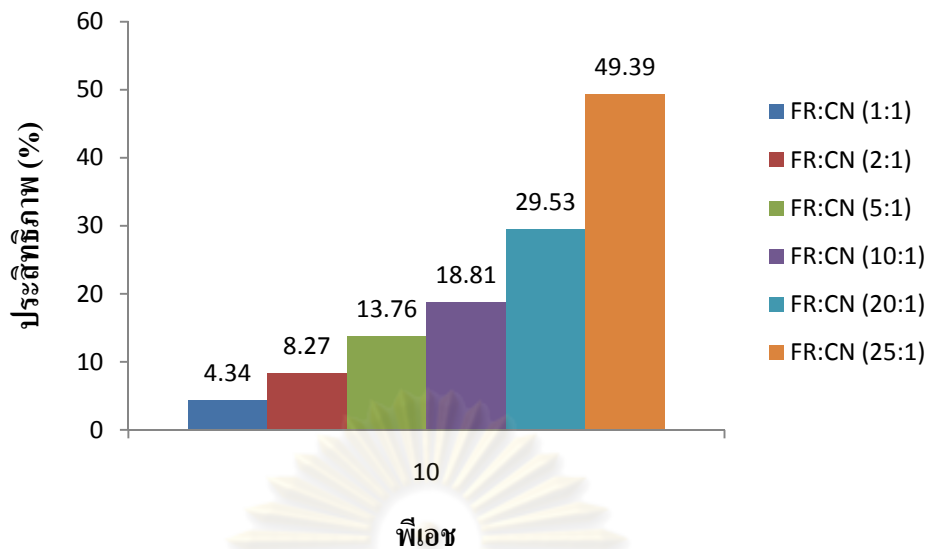
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดเสกชะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต ที่อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเสกชะไซยาโนโคบอลเตตในรูปไซยาไนด์เริ่มต้น คงที่ที่ 20 ไมโครโมลาร์

ความเข้มข้นเริ่มต้น สารละลายเฟอร์เรต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% ประสิทธิภาพในการกำจัด ที่พีเอชต่าง ๆ
		พีเอช 10
20	1:1	4.34
40	2:1	8.27
100	5:1	13.67
200	10:1	18.81
400	20:1	29.53
500	25:1	49.39

ตารางที่ 4.8 % ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อน เสกชะไซยาโนโคบอลเตตที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่าง ๆ โดยใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้นคงที่ที่ 500 ไมโครโมลาร์

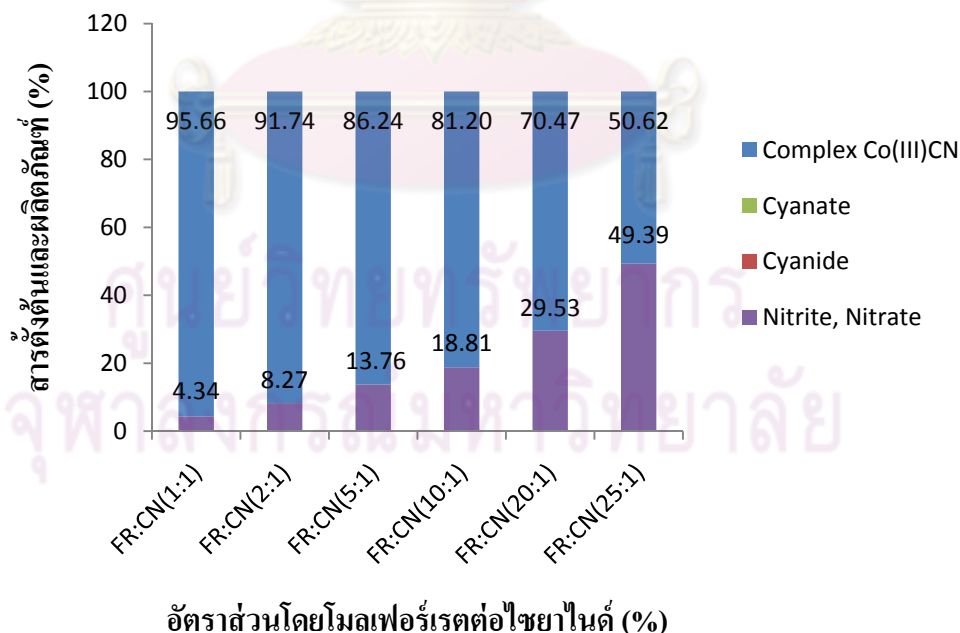
ความเข้มข้นเริ่มต้น สารละลายเฟอร์เรต (ไมโครโมลาร์)	อัตราส่วนโดยมวล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	% ไอออนเชิงซ้อน เสกชะไซยาโน โคบอลเตต คงเหลือหลังทำปฏิกิริยา
		พีเอช 10
20	1:1	95.66
40	2:1	91.74
100	5:1	86.24
200	10:1	81.20
400	20:1	70.47
500	25:1	50.62

ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (%) คำนวณจากสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พีเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 4.34 8.27 13.67 18.81 29.53 และ 49.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9



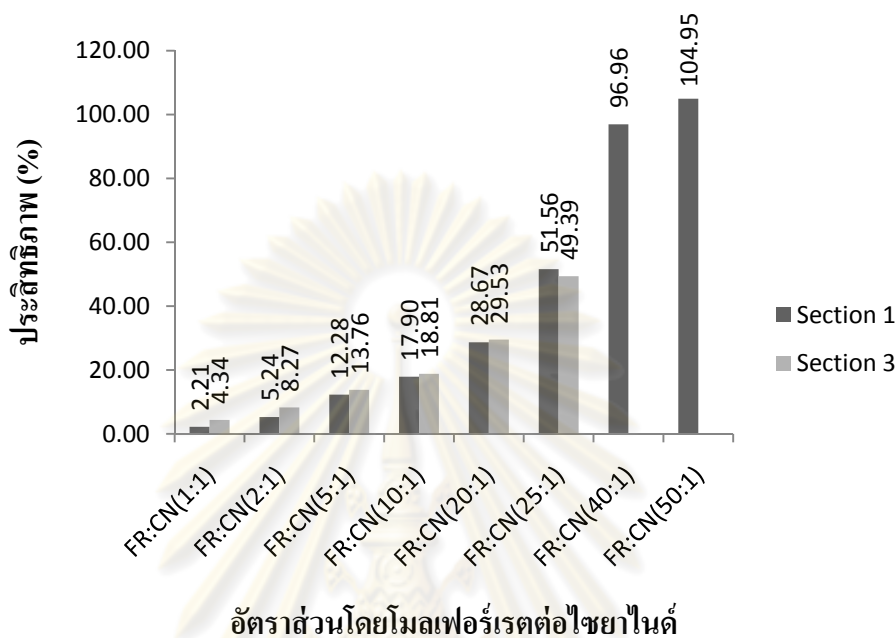
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตด ที่ฟิเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตเท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1

จากสมมูลมวล ตามภาคผนวก ซ ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1 สามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดที่คงเหลือหลังทำปฏิกิริยาเท่ากับ 95.66 91.74 86.24 81.20 70.47 และ 50.62 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 %ไอออนไซยาไนด์เชิงซ้อนเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดที่เหลืออยู่ หลังทำปฏิกิริยา ที่ฟิเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตเท่ากับ 1:1 2:1 5:1 10:1 20:1 และ 25:1

เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่พีเอช 10 ของการทดลองที่ 4.1 กับ 4.3 ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เดียวกันจะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.11** เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตด ที่พีเอช 10 ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตเดียวกัน

และเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดคงเหลือหลังทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยให้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็นแกน X และให้ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดที่คงเหลือและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (ไนไตรท์และไนเตรท) เป็นแกน Y และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ความชันของกราฟทั้งสองจะเป็นอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูป 4.12 โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นดังนี้

การจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดด้วยเฟอร์เรต (หน่วยไมโครโมลาร์)

$$\text{ความเข้มข้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดคงเหลือ} = -0.0158 \times \text{ความเข้มข้นเฟอร์เรต} + 19.6$$

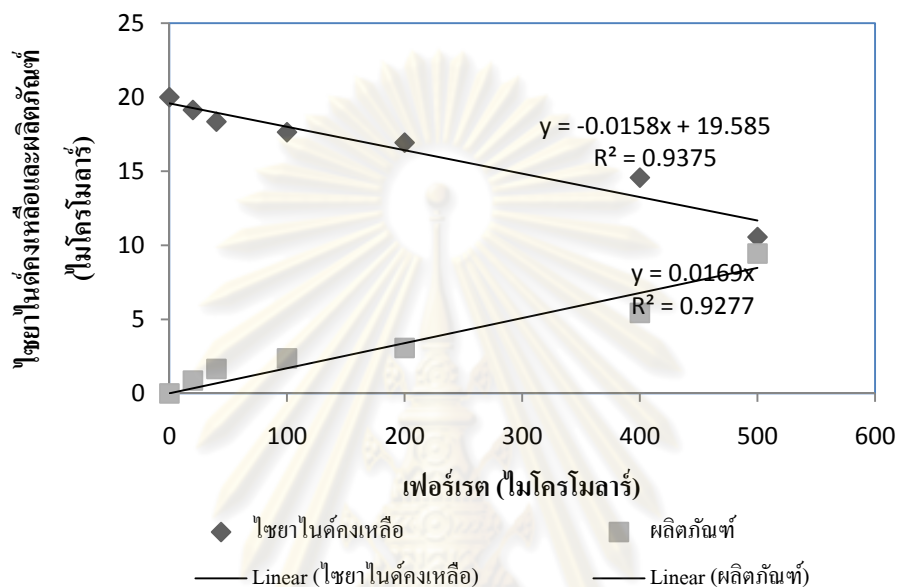
ความชันที่เท่ากับ 0.0158 บ่งบอกว่า เฟอร์เรต 1 ไมโครโมลาร์สามารถกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดในรูปไซยาไนด์ได้ 0.0158 ไมโครโมลาร์ หรือหากจะกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตดในรูปของไซยาไนด์ 1 ไมโครโมลาร์ จะต้องใช้เฟอร์เรตถึง 63.3 ไมโครโมลาร์ ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองที่ 4.1 ที่ได้ประมาณ 50 ไมโครโมลาร์



การเกิดขึ้นของสารผลิตภัณฑ์จากการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยเฟอร์เรต (หน่วย ไมโครโมลาร์)

ความเข้มข้นสารผลิตภัณฑ์ =  $0.0169 \times$  ความเข้มข้นเฟอร์เรต

ความเข้มข้นที่เท่ากับ 0.0169 บ่งบอกว่า เฟอร์เรต 1 ไมโครโมลาร์ในการกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตจะสร้างสารผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.0169 ไมโครโมลาร์ หรือหากเกิดสารผลิตภัณฑ์รวม 1 ไมโครโมลาร์ จะต้องใช้เฟอร์เรตถึง 59.2 ไมโครโมลาร์



**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตคงเหลือและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 20 ไมโครโมลาร์

จากผลการทดลอง 4.3 เปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (ศิลาวุธ, 2548) และเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ของนิกเกิลอิมิตัว (ภัทรวรรณ, 2549)

การทดลองที่ 4.3

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{CN}^-$  เท่ากับ 1:0.0169

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  เท่ากับ 1:0.0158

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ยเท่ากับ 1:0.0164

การทดลองของศิลาวุธ (2548)

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{CN}^-$  เท่ากับ 1:1.17

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{CNO}^-$  เท่ากับ 1:1.14

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ยเท่ากับ 1:1.16

การทดลองของภัทรวรรณ (2549)

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{CN}^-$  เท่ากับ 1:0.98

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย Ferrate :  $\text{CNO}^-$  เท่ากับ 1:0.99

อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ยเท่ากับ 1:0.99

จะเห็นได้ว่าสารประกอบเชิงซ้อนที่มีพันธะแข็งแรงอย่างโคบอล(III)ไซยาไนด์ ต้องใช้ปริมาณโมลของเฟอร์เรตมากกว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่มีพันธะไม่แข็งแรง นิกเกิล(II)ไซยาไนด์ และต้องใช้ปริมาณโมลของเฟอร์เรตมากกว่า ไซยาไนด์อิสระ ที่ต้องใช้ปริมาณโมลเฟอร์เรตมากกว่าขนาดนี้ อาจเพราะ สารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนักกับไซยาไนด์ ต้องใช้โมลของเฟอร์เรตเข้าไปทำลายพันธะของสารประกอบเชิงซ้อนก่อน แล้วโมลของเฟอร์เรตจึงเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระที่หลุดออกมาให้กลายเป็น ไนไตรท์ และไนเตรท ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของการกำจัดไซยาไนด์ในรูปของสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต ต่อประสิทธิภาพ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 ใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

##### 5.1.1 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

5.1.1.1 ผลของพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

- ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไนไตรท์ และไนเตรท
- ที่พีเอช 10 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

สูงสุด

- ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1 จะกำจัดไซยาไนด์ได้ประมาณ 2%

5.1.1.2 ผลของพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

- ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไนไตรท์ และไนเตรท
- ที่พีเอช 10 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

สูงสุด

- ที่พีเอช 10 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 5:1 สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้

อย่างสมบูรณ์

##### 5.1.2 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

- ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไนไตรท์ และไนเตรท
- ทุกพีเอช จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน
- พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด
- เวลาในการทำปฏิกิริยา มากกว่า 300 นาที

### 5.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

- ผลกระทบที่เกิดขึ้น คือ ไนไตรท์ และไนเตรท
- ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 25:1 จะกำจัดไซยาไนด์ได้มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 49.39%
- เปรียบเทียบการทดลองที่ 4.1.1 กับการทดลองที่ 4.1.3 นั้นที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เดียวกัน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ใกล้เคียงกัน
- อัตราส่วน โดยโมลเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 1:0.0164
- จากค่าอัตราส่วน โดยโมลเฉลี่ย พบว่าจะกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต 1 โมล ต้องใช้เฟอร์เรตถึง 61 โมล

### 5.1.4 การประยุกต์ใช้น้ำเสียจริง

ในการออกแบบบำบัดน้ำเสียเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตโดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตที่ได้จากการทดลอง ลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (ประยูร, 2542) พบว่ามีไซยาไนด์ 316-442 ppm น้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงคาดว่าจะเกิดพันธะระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนัก( $\text{Co}^{3+}$ ) เป็นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตทั้งหมดถ้ามีปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียเกินพอ จากค่าอัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย พบว่าจะกำจัดเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต 1 โมล ต้องใช้เฟอร์เรตถึง 61 โมล เมื่อคำนวณเป็นหน่วยกรัม พบว่า ถ้าจะกำจัดน้ำเสียไซยาไนด์ 442 ppm (442 มก./ล.) ต้องใช้เฟอร์เรต( $\text{FeO}_4^{2-}$ ) ถึง 124.23 กรัม หรือในรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรต( $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ) 205.11 กรัม จะกำจัดหมด 100% จากการคำนวณ

การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงงานชุบสังกะสีด้วยเฟอร์เรต (ศิลาวุธ, 2548) มีประสิทธิภาพถึง 100% โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1.37:1 ซึ่งคิดเป็น 1.56 เท่าจากผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำที่อาจส่งผลโดยการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตโดยตรง หรือส่งผลให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง หรือมีผลทำให้ปฏิกิริยาช้าลง ทำให้เฟอร์เรตบางส่วนสลายตัวไป ซึ่งต้องการเฟอร์เรตในปริมาณมากขึ้น

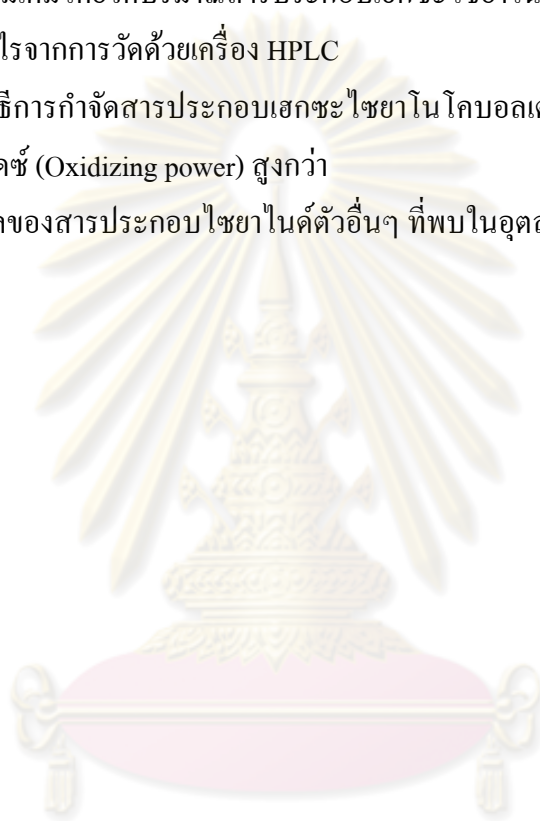
จากผลข้างต้น การออกแบบใช้น้ำเสียจริง จึงออกแบบให้ปริมาณเฟอร์เรตเป็น 2 เท่าของเฟอร์เรตที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 9.5 ถึง 10.5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 6-7 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลจากการบำบัดผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีค่าน้อยกว่า 0.2 มก./ล. หรือน้อยกว่า 7.6 ไมโครโมลาร์ เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเสร็จสิ้น จากการคำนวณ คาดว่าถ้าบำบัดน้ำเสียไซยาไนด์ 442 มก./ล. จะ

เกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )ประมาณ 221.50 กรัม ต้องทำการบำบัดตะกอนของโลหะและตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )ในขั้นต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยถึงการกำจัดไซยาไนด์ในรูปสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตโดยการออกซิเดชันเฟอร์เรตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาเพิ่มเติมโดยวัดปริมาณสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตที่ใช้เป็นสารตั้งต้น มีค่าเท่าไรจากการวัดด้วยเครื่อง HPLC
2. ศึกษาวิธีการกำจัดสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตด้วยสารอื่นที่มีกำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) สูงกว่า
3. ศึกษาผลของสารประกอบไซยาไนด์ตัวอื่นๆ ที่พบในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/info\\_act.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/info_act.html) [14 สิงหาคม 2551]

ประยูร ฟองสถิตย์กุล, ชลาศัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และวิสิทธิ์ สุขป้อม. การบำบัด  
ไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วย  
โพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต. วารสารสารานุกรมวิทยาศาสตร์ 29,2 (2542): 38-47

ภัทรวรรณ ตียนนท. 2549. ผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วย  
เฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตันจุลเวศน์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2546.

วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระ  
นครเหนือ 9, 2:4-8.

สาโรช พันธุ์เทพ และอภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์

ศิวารุช ดำรงศิริ. 2548. ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะ-ชุบโครเมียม. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 2527

อรอนงค์ ทรงกิตติ. ไซยาไนด์ (Cyanide). วารสารโรงงาน 14,3 (2539): 45-51.

## ภาษาอังกฤษ

- Adhoum, N.; and Monser, L. Removal of Cyanide from Aqueous Solution Using Impregnated Activated Carbon. Chemical Engineering and Processing, 41 (2002): 17-21.
- Adhoum, N.; and Monser, L. Modified Activated Carbon for the Removal of Copper, Zinc, Chromium and Cyanide from Wastewater. Separation and Purification Technology, 26 (2002): 137-146
- Aksu, Z.; and Gulen, H. Binary Biosorption of Iron(III) and Iron(III)-Cyanide Complex Ion On *Rhizopus arrhizus*: Modelling of Synergistic Interaction. Process Biochemistry, 38 (2002): 161-173
- Benjamin, M.; Water chemistry. NY: McGraw-Hill, 2002.
- Bielski, B.; and Thomas, M. J. Studies of hypervalent iron in aqueous solutions. I: Radiation-induced reduction of iron(VI) to iron(V) by CO<sub>2</sub>. J. Am. Chem. Soc. 109(1987): 7761-7764
- Botz, M. M. Overview of Cyanide Treatment Methods. Mining Environmental Management. UK: Mining Journal, 2001.
- Chao, A.C.; Luca, S.J.; and Idlea, C. N. Quality Improvement of Biosolids by Ferrate(VI) Oxidation of Offensive Odour Compounds. Water Science and Technology, 33(1996): 119-130.
- Chiang, K.; Amal, R.; and Tran, T. Photocatalytic Oxidation of Cyanide: Kinetic and Mechanistic studies. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 193 (2003): 285-297.
- Dart, M. C.; Gentles, J. D.; and Renton, D.G. Electrolytic Oxidation of Strong Cyanide Waste. J. Appl. Chem. 17 (1963): 55-64.

- Dionex Corporation. Direct Determination of Metal Cyanides by Ion Chromatography with UV Absorbance Detection. Application Update. 147 (2003).
- Dursun, A.Y.; Calik, A.; and Aksu,Z. Degradation of Ferrous(II) Cyanide Complex Ion By Pseudomonas Fluorescens. Process Biochemistry. 34(1999): 901-908.
- Ebbs, S. Biological degradation of Cyanide Compounds. Current option in biotechnology. 15 (2004): 1-6
- El-Ghaoui, E.A.; Jansson, R. E. W.; and Moreland, C. Application of the Trickle Tower to Poblema of Pollution Control.II. The Direction and Indirect Oxidation of Cyanide. J.Appl.Electrochem. 12 (1982): 669-673.
- Gherrou, A.; and Kerdjoudj, H. Specific Membrane Transport of Silver and Copper as  $\text{Ag}(\text{CN})_3^{2-}$  and  $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$  Ions through a Supported Liquid Membrane Using  $\text{K}^+$ -crown Ether as a Carrier. Desalination 151 (2002): 87-94.
- Graham, N.; Jiang, C. C.; Li, X.Z.; Jiang, J.Q.; and Ma, J. The Influence of pH on The Degradation of Phenol and Chlorophenols by Potassium Ferrate. Chemosphere. 56 (2004): 949-956.
- Hatinger,L. Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry. 2<sup>nd</sup> ed. Finishing Publications, 1994
- Hine, F.; Yasuda, M.; Lida, T.; and Ogata, Y. On the Oxidation of Cyanide Solution with Lead Oxide Coated Anode. Electrochimical Acta. 31 (1986): 1389-1395.
- Ho, S. P.; Wang, Y. Y.; and Wan, C. C. Electrolyticdecomposition of Cyanide Effluent with an Electrochemical Reactor Packed with Stainless Fiber. Water Research. 24 (1990): 1317-1321.



- Jiang, Q.J.; and Lloyd, B Progress in the Development and Use of Ferrate(VI)salt as an Oxidant and Coagulant for Water and Wastewater Treatment. Water Research. 36(2002): 1397-1408.
- Khemarath, O.; Bundhit, C.; Pichaya, R.; and Sharma, V. K. 2008. Effect of ethylenediaminetetraacetate on the oxidation of cyanide in an electrochemical process. Journal of Environmental Science and Health. 43: 295-299.
- Kurama, H.; and Catalsarik, T. Removal of Zinc Cyanide From a Leach Solution By An Anionic Ion-Exchange Resin. Desalination. 129 (2000): 1-6.
- Lee, Y.; Um, I. H.; and Yoon, J. Arsenic(III) Oxidation by Iron(VI)(Ferrate) and Subsequent Removal of Arsenic(V) by Iron(III) Coagulation. Environ. Sci. Technol. 37 (2003): 5750-7556.
- Lukey, G. C.; Van Deventer J. S. J.; Huntington, S. T.; Chowdhury, R.L.; and Shallcross, D. C. Raman Study on the Speciation of Copper Cyanide Complexes in Highly Saline Solutions. Hydrometallurgy. 53 (1999): 233-244.
- Ma, J.; and Liu, W. Effectiveness of Ferrate (VI) Preoxidation in Enhancing the Coagulation of Surface Waters. Water Research. 36 (2002): 4959-4962.
- Ma, J.; and Liu, W. Effectiveness and Mechanism of Potassium Ferrate(VI) Preoxidation for Algae Removal by Coagulation. Water Research. 36 (2002): 871-878.
- Mallinckrodt Baker. 2004. MSDS: Potassium Cyanate[online]. Available from:  
<http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/p5697.html>[2005, September 14]
- Nemerow, N. L. 1978. Industry Water Pollution, original, characteristics and Treatment. USA: Addison-Wesley Publishing.

- Ogutveren, U. B.; Toru, E.; and Koparal, S. Removal of Cyanide by Anodic Oxidation for Wastewater Treatment. Water Research. 33(1999): 1851-1856.
- Parga, J. R.; Shukla, S. S.; and Carrillo-Pedroza, F. R. Destruction of Cyanide Waste Solutions using Chlorine Dioxide, Ozone and Titania sol. Waste Management. 23(2003): 183-191.
- Qu, J. H.; Liu, H. J.; Liu, S. X.; and Lei, P. J. Reduction of Fulvic Acid in Drinking Water by Ferrate. Journal of Environmental Engineering. 129,1(2003): 17-24.
- Rania, H.; and Roldan, C. J. Toxicity Cyanide[online].2003.Availablefrom:<http://www.emedicine.com/cgi-bin/foxweb.exe/screen@d:/em/ga?book=med&authored=2689&topicid=487>  
[2007, June 10]
- Rader, W. S.; Solujic, L.; Milosavljevic, E. B.; Hendrix, J. L.; and Nelson, J. H. Photocatalytic Detoxification of Cyanide and Metal Cyano-Species From Precious-Metal Mill Effluents. Environmental Pollution. 90,3 (1995): 331-334.
- Schreyer, J. M.; and Ockerman, L. T. Stability of the ferrate(VI) ion in aqueous solution. Anal. Chem. 23(1951): 1312-1314.
- Sharma, V.K.; Burnett, C. R.; Yngard, R. A.; and Cabelli, D.E. Iron(VI) and Iron(V) Oxidation of Copper(I) Cyanide. Environ. Sci. Technol. 39(2005): 3849-3854.
- Sharma, V.K. Potassium Ferrate(VI): an Environmentally Friendly Oxidant. Advance in environmental research. 6 (2002): 143-156.
- Sharma, V.K.; Rendon, R. A.; Millero, F. J.; and Vazquez, F. G. Oxidation of Thioacetamide by Ferrate(VI). Marine Chemistry. 70(2000): 235-242.
- Sharma, V.K.; Rivera, W.; Smith, J. O.; and Brien, B. Ferrate(VI) Oxidation of Aqueous Cyanide. Environ. Sci. Technol. 32(1998): 2608-2613.

Sharma, V.K.; Yngard, R. A.; Damrongsiri, S.; and Osathaphan, K. Ferrate(VI) oxidation of zinc-cyanide complex. Chemosphere. 69 (2007): 729-735.

U.S. EPA. Office of Research and Development. Capsule Report Managing Cyanide in Metal Finishing. EPA625/R-99/009. Cincinnati Ohio; 2000.

White, D.M.; Pilon, T.A.; and Woolard, C. Biological Treatment of Cyanide Containing Wastewater. Water Research. 34,7(2000): 2105-2109.

Yangard, R.A.; Sharma, V.K.; Filip, J.; and Zboril, R. Ferrate(VI) Oxidation of Weak-Acid Dissociable Cyanide. Environ. Sci. Technol. 42(2008): 3005-3010.

Yuan, B. L.; Qu, J. H.; and Fu, M. L. Removal of Cyanobacterial Microcystin-LR by Ferrate Oxidation-Coagulation. Toxicon. 40 (2002): 1129-1134.

Zheng, A.; Dzombak, D. A.; Luthy, R. G.; Sawyer, B.; Lazouskas, W.; Tata, P.; Delaney, M. F.; Zilitinkevitch, L.; Sebroski, J. R.; Swartling, R. S.; Drop, S. M.; and Flaherty, J. M. Evaluation and Testing of Analytical Methods for Cyanide Species in Municipal and Industrial Contaminated Water. Environ. Sci. Technol. 37 (2003): 107-115.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

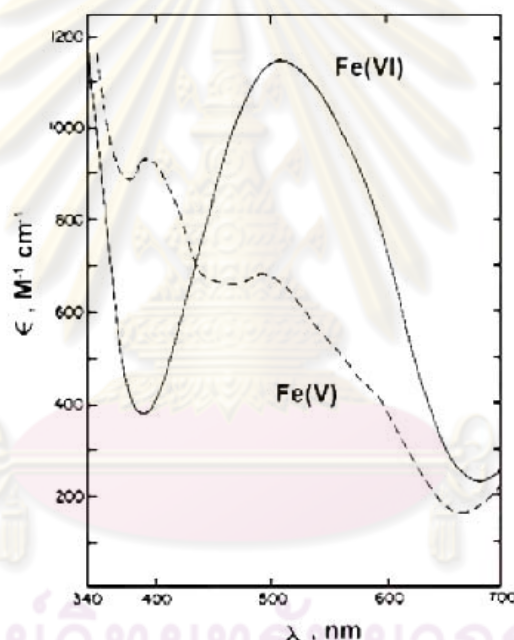
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

## ก.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตมีเป็นสารละลายที่มีสีม่วงและสามารถตรวจวัดได้โดย Spectroscopy Method โดยเฟอร์ค่าการดูดซับแสงของเฟอร์เรต มีค่าสูงสุดที่ 510 นาโนเมตร (nm) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ  $\epsilon = 1150 \pm 25$  โมลาร์<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup> ( $M^{-1}cm^{-1}$ ) ดังรูปที่ ก.1 (Bielski และ Thomas, 1987)



รูปที่ ก.1 การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V) (Bielski และ Thomas, 1987)

การตรวจวัดความเข้มข้นของเฟอร์เรตทำได้โดยการตรวจค่าการดูดซับแสงที่ 510 นาโนเมตร (nm) และคำนวณเป็นความเข้มข้นของเฟอร์เรตได้จากสมการของ beer's law ดังสมการที่ ก-1

$$A = \epsilon \cdot C \cdot l \quad (ก-1)$$

เมื่อ

A = ค่าการดูดซับแสง ที่ตรวจวัดได้ ไม่มีหน่วย

$\epsilon$  = สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง มีค่าเท่ากับ  $1150 \text{ โมลาร์}^{-1} \text{ เซนติเมตร}^{-1}$  ที่ความยาวคลื่น  $510 \text{ นาโนเมตร}$

$C$  = ความเข้มข้นของเฟอร์เรต หน่วย โมลาร์

$L$  = ระยะทางที่แสงผ่านตัวกลาง มีค่าเท่ากับ  $1 \text{ เซนติเมตร}$  สำหรับเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

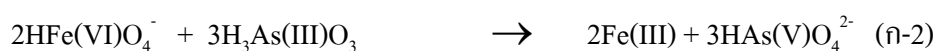
### ก.2 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตมีการสลายตัวไปตลอดเวลา การเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลองจึงควรเตรียมก่อนใช้งานเท่านั้น และการเตรียมในสภาวะที่สารละลายมีความคงตัวสูงที่สุด จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า การเตรียมสารละลายที่เหมาะสมที่สุดคือ การเตรียมโดยใช้ตัวกลางเป็นน้ำปราศจากไอออน และไม่ต้องปรับพีเอชเพิ่มเติม เนื่องจากไอออนในน้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความคงตัวของสารละลายลดลง (Schreyer และ Ockerman, 1951) นอกจากนี้การเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนจะทำให้ได้สารละลายเฟอร์เรตที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 9 ถึง 11 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเสถียรสูงด้วย

### ก.3 การหยุดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์

ในการทดลองเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะหยุดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไซยาไนด์ การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยการทำให้เฟอร์เรตหายไปจากน้ำตัวอย่างในเวลาที่ต้องการ โดยวิธีการหยุดปฏิกิริยาวิธีหนึ่ง คือการหาสารอื่นๆ ที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าไซยาไนด์อย่างมาก เดิมลงในน้ำตัวอย่างที่ต้องการ

อาร์เซไนท์ ( $\text{As}^{3+}$ ) มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.54 \times 10^5 \text{ โมล}^{-1} \text{ วินาที}^{-1}$  ที่พีเอช 8.4 และลดลงเป็นประมาณ  $1.23 \times 10^3 \text{ โมล}^{-1} \text{ วินาที}^{-1}$  ที่พีเอช 12.9 (Lee Um และ Yoon, 2003) ในขณะที่ไซยาไนด์มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.76 \times 10^2 \text{ โมล}^{-1} \text{ วินาที}^{-1}$  ที่พีเอช 9 และจะมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาช้าลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Sharma, 1998) ดังนั้นจึงคาดว่าในช่วงพีเอช 8 ถึง 12 อาร์เซไนท์จะมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าเฟอร์เรตอย่างน้อย 100 เท่า อาร์เซไนท์มีอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนท์เท่ากับ 2:3 สมการที่ ก-2 (Lee Um และ Yoon, 2003)



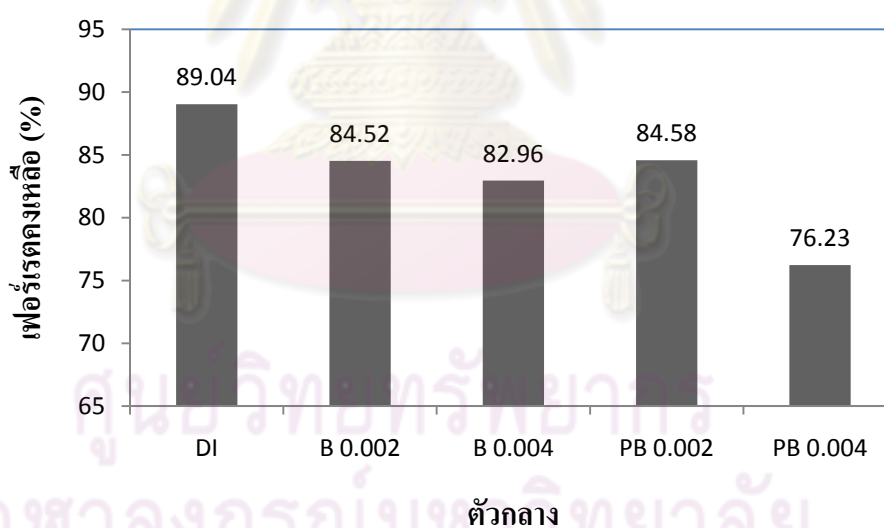
ในการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ จะใช้ความเข้มข้นอาร์เซไนต์ในการหยุดปฏิกิริยา 750 ไมโครโมลาร์ ซึ่งกระทำโดยเติมสารละลายอาร์เซไนต์ 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มล. ต่อน้ำตัวอย่าง 10 มล. สารละลายหลังผสมจะมีเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนต์เท่ากับ 2:3 พอดี

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายอาร์เซไนต์ลงในสารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 พบว่าสารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซไนต์หมดทันทีโดยสังเกตจากสีม่วงของสารละลายที่หายไปทันที ซึ่งเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับไซยาไนด์มาก

#### ก.4 ความคงตัวของสารละลายเฟอร์เรต

##### ก.4.1 ผลของสารละลายบัฟเฟอร์

ผลการทดลองของ ศีลาวัฐ คำรังสีรี (2548) พบว่าความคงตัวของสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนมีค่าสูงสุด และเมื่อความเข้มข้นของบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความคงตัวลดลง ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับตัวกลางชนิดต่างๆที่เวลา 60 นาที

ทดลองโดยผสมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ด้วยตัวกลางต่างๆ คือ น้ำปราศจากไอออนไม่ปรับพีเอช สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเข้มข้น 0.004 และ 0.002 โมลาร์ และสารละลายบอร์เรตเข้มข้น 0.004 และ 0.002 โมลาร์ นำสารละลายไปตรวจวัดที่เวลา 60 นาที และนำผลมาวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือในสารละลาย



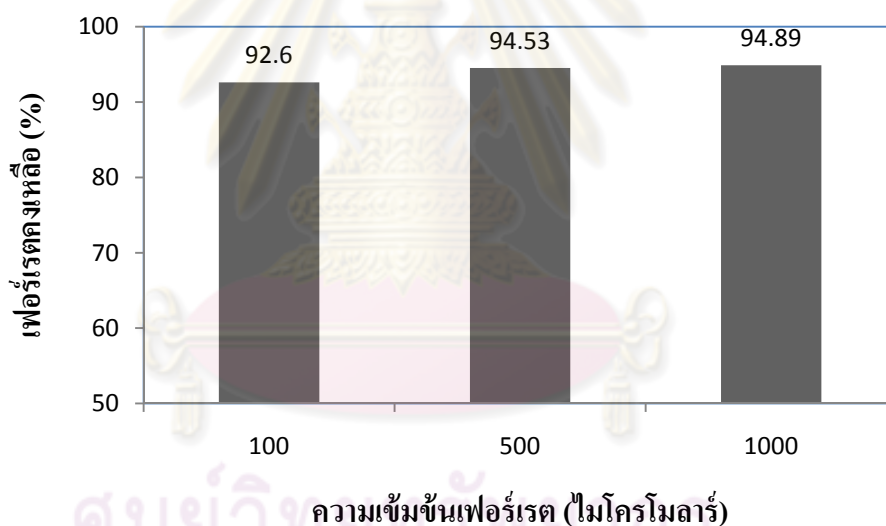
#### ก.4.2 ผลของพีเอช

ผลการทดลองของ ศิวารุช คำรังศิริ (2548) พบว่าที่เวลา 10 นาที สารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 12 ได้สลายตัวไปจนหมดโดยสังเกตจากสีของสารละลาย ในขณะที่สารละลายที่พีเอช 8 9 10 และ 11 สลายตัวไปเล็กน้อย และที่เวลา 20 นาทีปริมาณการสลายตัวของเฟอร์เรตแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าที่พีเอช 9 ถึง 11 สารละลายเฟอร์เรตมีความคงตัวสูง และมีความคงตัวสูงสุดที่พีเอช 10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Graham และคณะ (2004)

#### ก.4.3 ผลของความเข้มข้น

ผลการทดลองของ ศิวารุช คำรังศิริ (2548) พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เฟอร์เรตสลายตัวในปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะมีค่าไม่ต่างกันมาก

ทดลองโดยผสมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนโดยแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรต 100 500 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เวลา 60 นาที ดังรูป ก.4



รูปที่ ก.3 ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรต  
ในน้ำปราศจากไอออน ที่เวลา 60 นาที



ภาคผนวก ข

การเก็บรักษาตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

### การเก็บรักษาตัวอย่าง

#### ข.1 ข้อควรระวังในการเก็บรักษาไซยาไนด์ ในไตรท์ และไนเตรท

ข้อควรระวังในการเก็บรักษาตัวอย่างมีดังนี้

##### ข.1.1 การระเหย

เป็นข้อควรระวังที่สำคัญที่สุดสำหรับไซยาไนด์ การระเหยจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อสารละลายมีพีเอช ต่ำกว่า 12

##### ข.1.2 การเกิดการออกซิไดซ์

การเกิดการออกซิไดซ์ เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารที่มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับ ไซยาไนด์ ไซยาเนต และไนไตรท์

##### ข.1.3 การเกิดปฏิกิริยากับสารเจือปนอื่นๆ

เป็นข้อควรระวังอีกข้อหนึ่งสำหรับไซยาไนด์ เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ ( $S^{2-}$ ) กลายเป็นไซโอไซยาเนต (SCN<sup>-</sup>) (มันส์ตัน ทัลลิวเวสม์, 2546)

##### ข.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ

ไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

#### ข.2 การเก็บรักษาตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ไซยาไนด์ ในไตรท์ และไนเตรท

จากผลการศึกษาข้างต้น การเก็บรักษาตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรทั้งหมดคือ การเก็บรักษาในสภาวะที่เป็นเบส มีพีเอชมากกว่า 12 ในที่นี้จะใช้วิธีผสมตัวอย่างในอัตราส่วน น้ำตัวอย่างต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ เท่ากับ 5 ต่อ 1 เพื่อให้ตัวอย่างถูกเก็บรักษาในสภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ซึ่งจะมีพีเอชมากกว่า 12.5 และรักษาตัวอย่างในที่มืด และ อุณหภูมิต่ำ



ภาคผนวก ค

ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

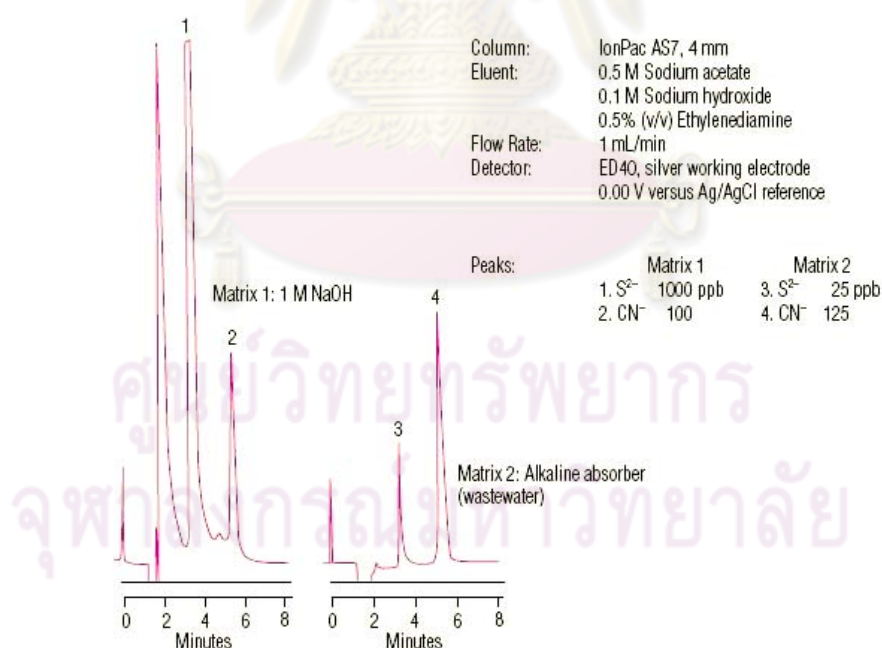
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค.

### ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

#### ค.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

ไซยาไนด์สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสารคือ คอลัมน์ AS7 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Electrochemical cell โดยใช้ Silver working Electrode ที่ 0.00 V และใช้ Ag/AgCl reference Mobile phase ที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate) 0.5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) 0.1 โมลาร์ และ เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) 5% v/v ที่อัตราการไหล 1 มล./นาที ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของไซยาไนด์จะปรากฏ สัญญาณที่เวลาประมาณ 6.4 ถึง 7.0 นาที



รูปที่ ค.1 สัญญาณของไซยาไนด์ และซัลไฟด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ

## ค.2 การเตรียมสารละลายไซยาไนด์

สารละลายไซยาไนด์จะเตรียมโดยผสมโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต 0.596 กรัม มาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ เพื่อให้สารละลายมีพีเอชมากกว่า 12 ปริมาตร 1 ลิตร ซึ่งจะได้ สารละลายไซยาไนด์เข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับสารละลายไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นอื่นให้เจือจางลงมาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ สารละลายที่เตรียมแต่ละครั้งไม่ควรเก็บไว้ใช้งานเกิน 1 สัปดาห์ เนื่องจากสารละลายนี้ใช้ในการทำสารละลายมาตรฐานในการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟด้วย

## ค.3 การระเหยของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถระเหยได้เมื่ออยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ดังนั้นจึงควรทราบถึงลักษณะในการระเหยของไซยาไนด์เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถทำการทดลองได้อย่างเหมาะสม

การทดลองของศิลาวุธ ดำรงศิริ (2548) พบว่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลต่ออัตราการระเหยที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การระเหยได้ใกล้เคียงกัน และการระเหยมีค่าลดลงจากพีเอช 8 ถึง 12

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง.

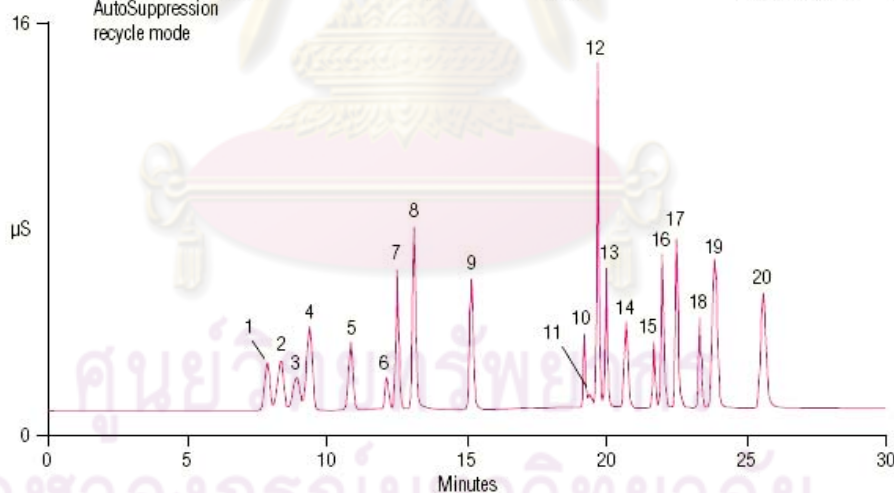
ศึกษาเกี่ยวกับไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ง.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

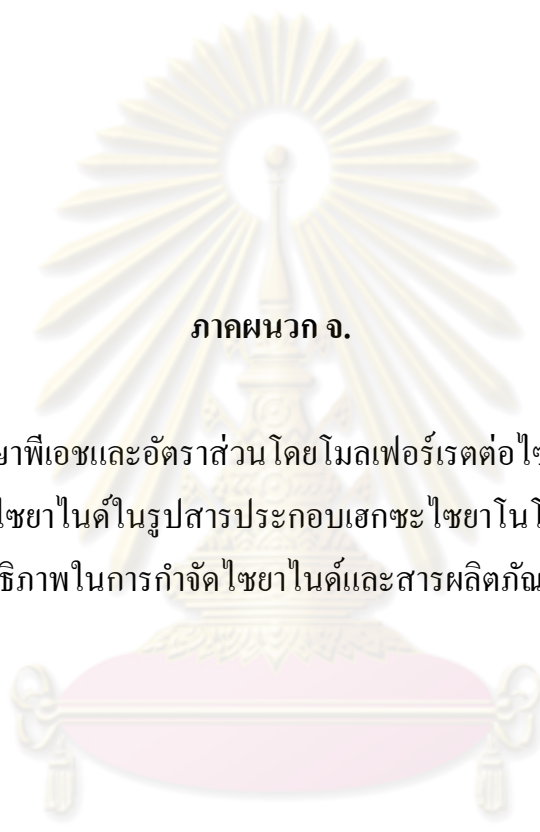
ไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟโดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสารคือ คอลัมน์ AS16 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Suppressor รุ่น ASRS 4 mm โดยใช้ Mode : Conductivity SRS current เท่ากับ 137 mA อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส Mobile phase ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยผลิตจาก RFC โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นสารตั้งต้น อัตราการไหล 1.5 มล./นาที ที่เครื่อง RFC กำหนดความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.8 มิลลิโมลาร์ ถึง 55 มิลลิโมลาร์ ใช้ระยะเวลากระเดียน 5 นาที ที่โปรแกรมกำหนดเริ่มทำการกระเดียนที่เวลา 12 นาที สิ้นสุดที่เวลา 25 นาที และเว้นช่วงให้ความเข้มข้นของ Mobile phase คงที่อีก 5 นาที ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท ดังรูปที่ ง.1

Column:	IonPac AG16, AS16, 4 mm	Peaks:	1. Fluoride	2.0 mg/L (ppm)	11. Carbonate	20.0
Eluent:	Potassium hydroxide, 1.5 mM from 0 to 7 min to 10 mM at 13 min		2. Acetate	10.0	12. Sulfate	10.0
Eluent Source:	EGC II KOH cartridge with CR-ATC		3. Propionate	10.0	13. Selenate	10.0
Temperature:	30 °C		4. Formate	10.0	14. Iodide	20.0
Flow Rate:	1.5 mL/min		5. Chlorite	10.0	15. Thiosulfate	20.0
Inj. Volume:	10 µL		6. Bromate	10.0	16. Chromate	20.0
Detection:	Suppressed conductivity, ASRS ULTRA II, 4 mm, AutoSuppression recycle mode		7. Chloride	5.0	17. Phosphate	20.0
			8. Nitrite	10.0	18. Arsenate	20.0
			9. Nitrate	10.0	19. Thiocyanate	20.0
			10. Selenite	20.0	20. Perchlorate	20.0



รูปที่ ง.1 สัญญาณของ ไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ





**ภาคผนวก จ.**

ผลการศึกษาพิเศษและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ใน  
การกำจัดไซยาไนด์ในรูปสารประกอบเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต  
ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. ผลการศึกษาผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ จ.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ค่าพีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไนไตรท์		ไซยาเนต	ไซยาเนต		ไนเตรท	ไนเตรท	
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.59	9.12	0.00			1.45			0.00			6.40		
	504.01	10.59	9.12	0.00	0.00	0.00	1.39	1.49	0.09	0.00	0.00	0.00	6.40	6.42	0.02
	504.01	10.59	9.12	0.00			1.63			0.00			6.45		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	511.34	10.64	10.09	0.00			3.61			0.00			7.40		
	511.34	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	3.62	3.66	0.05	0.00	0.00	0.00	7.39	7.39	0.01
	511.34	10.64	10.09	0.00			3.74			0.00			7.37		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.59	11.03	0.00			1.74			0.00			6.51		
	504.01	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	1.79	1.77	0.02	0.00	0.00	0.00	6.47	6.48	0.02
	504.01	10.59	11.03	0.00			1.77			0.00			6.46		
ค่าพีเอช	สารผลิตภัณฑ์						ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์								
	ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย					
	%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย					
9	0.30			0.00			1.28			1.58					
10	0.73			0.00			1.48			2.21					
11	0.35			0.00			1.30			1.65					

ตารางที่ จ.2 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 250 ไมโคร โมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโคร โมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	503.78	10.59	9.12	0.00			2.59			0.00			7.19		
	503.78	10.59	9.12	0.00	0.00	0.00	2.62	2.611	0.01	0.00	0.00	0.00	7.01	7.10	0.06
	503.78	10.59	9.12	0.00			2.62			0.00			7.11		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.64	10.09	0.00			4.25			0.00			8.70		
	501.34	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	4.39	4.386	0.09	0.00	0.00	0.00	8.75	8.72	0.02
	501.34	10.64	10.09	0.00			4.52			0.00			8.71		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.59	11.03	0.00			3.25			0.00			3.86		
	504.01	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	3.12	3.156	0.06	0.00	0.00	0.00	4.14	4.05	0.13
	504.01	10.59	11.03	0.00			3.10			0.00			4.16		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย					
	%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย					
9	1.04			0.00			2.84			3.89					
10	1.75			0.00			3.49			5.24					
11	1.26			0.00			1.62			2.88					

ตารางที่ ๑.3 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยานต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไนไตรท์		ไซยานต	ไซยานต		ไนเตรท	ไนเตรท	
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	503.78	10.45	9.12	0.00			2.86			0.00			7.19		
	503.78	10.45	9.12	0.00	0.00	0.00	2.80	2.83	0.02	0.00	0.00	0.00	7.26	7.25	0.04
	503.78	10.45	9.12	0.00			2.82			0.00			7.30		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.64	10.09	0.00			3.25			0.00			9.01		
	501.34	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	3.12	3.16	0.06	0.00	0.00	0.00	9.20	9.12	0.08
	501.34	10.64	10.09	0.00			3.10			0.00			9.18		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.59	11.03	0.00			2.10			0.00			5.71		
	504.01	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	2.17	2.14	0.03	0.00	0.00	0.00	5.69	5.71	0.01
	504.01	10.59	11.03	0.00			2.15			0.00			5.72		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์						ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์								
	ไนไตรท์			ไซยานต			ไนเตรท			% เฉลี่ย					
	% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย					
9	2.83			0.00			7.25			10.08					
10	3.16			0.00			9.12			12.28					
11	2.14			0.00			5.71			7.85					

ตารางที่ ๑.4 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยานต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยานต		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	503.78	10.59	9.12	0.00			0.50			0.42			6.15		
	503.78	10.59	9.12	0.00	0.00	0.00	0.49	0.50	0.01	0.40	0.41	0.01	6.07	6.14	0.07
	503.78	10.59	9.12	0.00			0.49			0.40			6.21		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.64	10.09	0.00			1.64			0.00			7.31		
	501.34	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	1.59	1.62	0.02	0.00	0.00	0.00	7.30	7.33	0.05
	501.34	10.64	10.09	0.00			1.62			0.00			7.39		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.59	11.03	0.00			1.74			0.00			4.28		
	504.01	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	1.79	1.77	0.03	0.00	0.00	0.00	4.20	4.24	0.04
	504.01	10.59	11.03	0.00			1.77			0.00			4.23		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยานต			ไนเตรท			% เฉลี่ย					
	% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย					
9	0.99			0.81			12.29			14.09					
10	3.23			0.00			14.67			17.90					
11	3.53			0.00			8.47			12.00					

ตารางที่ ๖.5 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 25 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	500.49	10.54	9.12	0.00			0.47			0.00			5.91		
	500.49	10.54	9.12	0.00	0.00	0.00	0.49	0.49	0.01	0.00	0.00	0.00	6.02	6.02	0.11
	500.49	10.54	9.12	0.00			0.51			0.00			6.13		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.64	10.09	0.00			0.50			0.00			6.64		
	504.01	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	0.49	0.49	0.02	0.00	0.00	0.00	6.73	6.68	0.05
	504.01	10.64	10.08	0.00			0.47			0.00			6.68		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.59	11.03	0.00			0.49			0.00			5.73		
	501.34	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	0.46	0.48	0.02	0.00	0.00	0.00	5.66	5.70	0.04
	501.34	10.59	11.03	0.00			0.50			0.00			5.71		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย					
	%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย					
9	1.95			0.00			24.09			26.04					
10	1.94			0.00			26.72			28.67					
11	1.91			0.00			22.78			24.70					

ตารางที่ ๖.6 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 20 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	503.78	10.54	9.12	0.00	0.00	0.00	1.08	1.09	0.03	0.00	0.00	0.00	8.81	8.90	0.10
	503.78	10.54	9.12	0.00			1.13			0.00			9.01		
	503.78	10.54	9.12	0.00			1.06			0.00			8.87		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.64	10.09	0.00	0.00	0.00	1.39	1.42	0.03	0.00	0.00	0.00	8.94	8.89	0.05
	504.01	10.64	10.08	0.00			1.44			0.00			8.89		
	504.01	10.64	10.08	0.00			1.42			0.00			8.85		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	0.55	0.50	0.05	0.00	0.00	0.00	8.78	8.79	0.15
	501.34	10.59	11.03	0.00			0.49			0.00			8.65		
	501.34	10.59	11.03	0.00			0.46			0.00			8.94		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย					
	%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย					
9	5.47			0.00			44.48			49.95					
10	7.09			0.00			44.47			51.56					
11	2.50			0.00			43.95			46.45					

ตารางที่ จ.7 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 12.5 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยานิด	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยานิด		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	504.01	10.54	9.12	0.00			0.96			0.00			10.73		
	504.01	10.54	9.12	0.00	0.00	0.00	0.89	0.87	0.04	0.00	0.00	0.00	10.81	10.71	0.11
	504.01	10.54	9.12	0.00			0.76			0.00			10.59		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.64	10.09	0.00			1.07			0.00			10.93		
	501.34	10.64	10.08	0.00	0.00	0.00	1.12	1.08	0.04	0.00	0.00	0.00	11.07	11.04	0.10
	501.34	10.64	10.08	0.00			1.05			0.00			11.12		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	502.11	10.59	11.03	0.00			0.56			0.00			10.21		
	502.11	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	0.70	0.63	0.07	0.00	0.00	0.00	10.03	10.07	0.12
	502.11	10.59	11.03	0.00			0.62			0.00			9.97		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยานิด			ไนเตรท			% เฉลี่ย					
	% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย					
9	6.92			0.00			85.70			92.68					
10	8.64			0.00			88.32			96.96					
11	5.06			0.00			80.54			85.60					



ตารางที่ ๖.8 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 10 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
9	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
	500.78	10.54	9.12	0.00	0.00	0.00	1.65	1.61	0.05	0.00	0.00	0.00	7.91	7.93	0.08
	500.78	10.54	9.12	0.00			1.57			0.00			8.02		
	500.78	10.54	9.12	0.00			1.62			0.00			7.86		
10	0.00		10.02	0.00			0.00			0.00			0.00		
	501.34	10.64	10.09	0.00	0.00	0.00	1.11	1.08	0.10	0.00	0.00	0.00	9.51	9.42	0.10
	501.34	10.64	10.08	0.00			0.97			0.00			9.43		
	501.34	10.64	10.08	0.00			1.16			0.00			9.32		
11	0.00		11.00	0.00			0.00			0.00			0.00		
	502.11	10.59	11.03	0.00	0.00	0.00	0.49	0.48	0.06	0.00	0.00	0.00	8.71	8.71	0.06
	502.11	10.59	11.03	0.00			0.53			0.00			8.77		
	502.11	10.59	11.03	0.00			0.42			0.00			8.65		
ค่า พีเอช	สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์					
	ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย					
	%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย					
9	16.14			0.00			79.30			95.44					
10	10.79			0.00			94.16			104.95					
11	4.77			0.00			87.11			91.87					



ภาคผนวก จ.

ผลอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 9 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:5

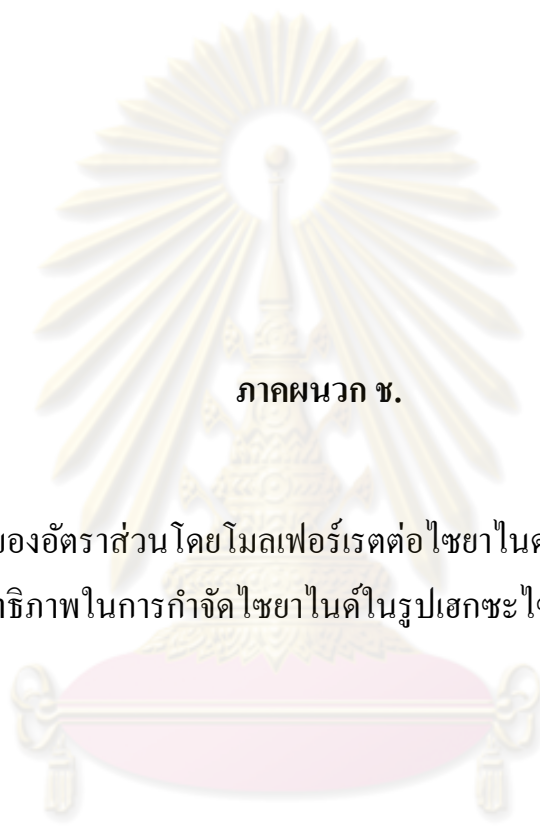
เวลา (นาที)	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย ไซยาไนด์	SD.	สารผลิตภัณฑ์									
				ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย ไนไตรท์	SD.	ไซยานต	ค่าเฉลี่ย ไซยานต	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย ไนเตรท	SD.	
				ไมโครโมลาร์			ไมโครโมลาร์			ไมโครโมลาร์			
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00			0.00			0.00			0.00			
	0.00			0.00			0.00			0.00			
30	0.00	0.00	0.00	2.86	2.74	0.16	0.00	0.00	0.00	0.32	0.23	0.11	
	0.00			2.80			0.00			0.25			
	0.00			2.56			0.00			0.11			
60	0.00	0.00	0.00	2.61	2.56	0.05	0.00	0.00	0.00	1.91	1.85	0.05	
	0.00			2.50			0.00			1.84			
	0.00			2.56			0.00			1.80			
90	0.00	0.00	0.00	3.51	3.55	0.08	0.00	0.00	0.00	1.06	0.94	0.12	
	0.00			3.65			0.00			0.95			
	0.00			3.50			0.00			0.82			
120	0.00	0.00	0.00	2.07	2.09	0.04	0.00	0.00	0.00	2.33	2.42	0.10	
	0.00			2.06			0.00			2.53			
	0.00			2.13			0.00			2.39			
180	0.00	0.00	0.00	2.48	2.36	0.11	0.00	0.00	0.00	3.87	3.89	0.04	
	0.00			2.30			0.00			3.87			
	0.00			2.29			0.00			3.94			
240	0.00	0.00	0.00	2.52	2.42	0.15	0.00	0.00	0.00	5.35	5.43	0.08	
	0.00			2.25			0.00			5.51			
	0.00			2.49			0.00			5.42			
300	0.00	0.00	0.00	2.31	2.16	0.14	0.00	0.00	0.00	5.82	5.86	0.05	
	0.00			2.04			0.00			5.85			
	0.00			2.11			0.00			5.91			
360	0.00	0.00	0.00	2.79	2.86	0.07	0.00	0.00	0.00	5.38	5.35	0.08	
	0.00			2.93			0.00			5.26			
	0.00			2.85			0.00			5.42			
420	0.00	0.00	0.00	3.23	3.10	0.14	0.00	0.00	0.00	5.00	5.15	0.13	
	0.00			2.96			0.00			5.25			
	0.00			3.11			0.00			5.20			

ตารางที่ ๑.๒ ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 10 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:5

เวลา (นาที)	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย ไซยาไนด์	SD.	สารผลิตภัณฑ์								
				ไนไตรท์			ไซยานต			ไนเตรท		
				ค่าเฉลี่ย ไนไตรท์	SD.	ไม่โครโมลาร์	ค่าเฉลี่ย ไซยานต	SD.	ไม่โครโมลาร์	ค่าเฉลี่ย ไนเตรท	SD.	ไม่โครโมลาร์
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00			0.00			0.00			0.00		
	0.00			0.00			0.00			0.00		
30	0.00	0.00	0.00	3.15	3.08	0.07	0.00	0.00	0.00	2.02	1.97	0.04
	0.00			3.02			0.00			1.96		
	0.00			3.07			0.00			1.94		
60	0.00	0.00	0.00	3.14	3.24	0.11	0.00	0.00	0.00	3.81	3.80	0.02
	0.00			3.35			0.00			3.78		
	0.00			3.23			0.00			3.81		
90	0.00	0.00	0.00	4.01	4.02	0.10	0.00	0.00	0.00	3.12	3.04	0.07
	0.00			3.92			0.00			2.98		
	0.00			4.12			0.00			3.02		
120	0.00	0.00	0.00	3.75	3.84	0.08	0.00	0.00	0.00	3.19	3.24	0.04
	0.00			3.91			0.00			3.25		
	0.00			3.85			0.00			3.27		
180	0.00	0.00	0.00	4.24	4.23	0.08	0.00	0.00	0.00	5.06	5.00	0.10
	0.00			4.31			0.00			4.89		
	0.00			4.15			0.00			5.06		
240	0.00	0.00	0.00	4.56	4.56	0.07	0.00	0.00	0.00	7.78	7.67	0.10
	0.00			4.49			0.00			7.65		
	0.00			4.62			0.00			7.58		
300	0.00	0.00	0.00	5.61	5.55	0.05	0.00	0.00	0.00	7.41	7.41	0.01
	0.00			5.50			0.00			7.40		
	0.00			5.55			0.00			7.42		
360	0.00	0.00	0.00	5.95	5.98	0.03	0.00	0.00	0.00	6.99	7.01	0.09
	0.00			6.01			0.00			7.10		
	0.00			5.97			0.00			6.93		
420	0.00	0.00	0.00	6.12	6.09	0.03	0.00	0.00	0.00	7.01	6.92	0.09
	0.00			6.08			0.00			6.85		
	0.00			6.06			0.00			6.89		

ตารางที่ ๓.3 ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 11 อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:5

เวลา (นาที)	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย ไซยาไนด์	SD.	สารผลิตภัณฑ์									
				ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย ไนไตรท์	SD.	ไซยานต	ค่าเฉลี่ย ไซยานต	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย ไนเตรท	SD.	
				ไมโครโมลาร์			ไมโครโมลาร์			ไมโครโมลาร์			
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00			0.00			0.00			0.00			
	0.00			0.00			0.00			0.00			
30	0.00	0.00	0.00	1.70	1.72	0.03	0.00	0.00	0.00	0.81	0.77	0.03	
	0.00			1.72			0.00			0.75			
	0.00			1.75			0.00			0.75			
60	0.00	0.00	0.00	2.51	2.47	0.05	0.00	0.00	0.00	2.17	2.08	0.09	
	0.00			2.49			0.00			1.99			
	0.00			2.42			0.00			2.09			
90	0.00	0.00	0.00	1.99	2.01	0.01	0.00	0.00	0.00	2.70	2.75	0.05	
	0.00			2.02			0.00			2.74			
	0.00			2.01			0.00			2.80			
120	0.00	0.00	0.00	4.30	4.36	0.06	0.00	0.00	0.00	0.51	0.41	0.09	
	0.00			4.36			0.00			0.41			
	0.00			4.42			0.00			0.32			
180	0.00	0.00	0.00	4.13	4.21	0.07	0.00	0.00	0.00	2.57	2.52	0.05	
	0.00			4.27			0.00			2.47			
	0.00			4.22			0.00			2.51			
240	0.00	0.00	0.00	4.98	5.00	0.11	0.00	0.00	0.00	4.72	4.71	0.04	
	0.00			5.11			0.00			4.75			
	0.00			4.90			0.00			4.67			
300	0.00	0.00	0.00	5.55	5.53	0.02	0.00	0.00	0.00	4.48	4.42	0.12	
	0.00			5.51			0.00			4.50			
	0.00			5.53			0.00			4.28			
360	0.00	0.00	0.00	8.69	8.74	0.06	0.00	0.00	0.00	1.20	1.19	0.02	
	0.00			8.74			0.00			1.20			
	0.00			8.80			0.00			1.17			
420	0.00	0.00	0.00	6.91	6.86	0.06	0.00	0.00	0.00	3.16	3.22	0.09	
	0.00			6.80			0.00			3.32			
	0.00			6.86			0.00			3.19			



ภาคผนวก ข.

ผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอช 10  
ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. ผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอช 10 ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในรูปเฮกซะไซยาโนโคบอลเตด

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 20 ไมโครโมลาร์

ค่าพีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	41.74	10.64	10.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.87	0.01
	41.74	10.64	10.08	0.00			0.00			0.00			0.86		
	41.74	10.64	10.09	0.00			0.00			0.00			0.88		
สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์						
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท									
% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย			% เฉลี่ย						
0.00			0.00			4.34			4.34						

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๒.2 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 40 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	78.26	10.53	10.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	1.65	0.05
	78.26	10.53	10.08	0.00			0.00			0.00			1.71		
	78.26	10.53	10.09	0.00			0.00			0.00			1.66		
สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์						
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย						
0.00			0.00			8.27			8.27						



ตารางที่ ๓.3 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	221.74	10.59	10.09	0.00	0.00	0.00	0.39	0.39	0.02	0.00	0.00	0.00	1.98	1.98	0.04
	221.74	10.61	10.08	0.00			0.37			0.00			2.02		
	221.74	10.60	10.09	0.00			0.40			0.00			1.94		
สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์						
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย						
%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย						
1.94			0.00			9.89			11.83						

ตารางที่ ๔.4 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 200 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	411.30	10.53	10.09	0.00	0.00	0.00	0.68	0.69	0.01	0.00	0.00	0.00	3.09	3.07	0.08
	411.30	10.53	10.08	0.00			0.70			0.00			3.14		
	411.30	10.53	10.09	0.00			0.70			0.00			2.98		
สารผลิตภัณฑ์									ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์						
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย						
%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย						
3.46			0.00			15.35			18.81						

ตารางที่ ๕.5 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 400 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	799.65	10.53	10.09	0.00	0.00	0.00	0.47	0.47	0.01	0.00	0.00	0.00	5.44	5.43	0.09
	799.65	10.53	10.08	0.00			0.48			0.00			5.34		
	799.65	10.53	10.09	0.00			0.46			0.00			5.52		
สารผลิตภัณฑ์							ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์								
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท			%เฉลี่ย						
%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย			%เฉลี่ย						
2.36			0.00			27.17			29.53						

ตารางที่ ๕.5 ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ค่า พีเอช	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง												
	ไมโคร โมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนไตรท์	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไซยาเนต	ค่าเฉลี่ย	SD.	ไนเตรท	ค่าเฉลี่ย	SD.
				ไมโครโมลาร์	ไซยาไนด์		ไนไตรท์	ไซยาเนต		ไนเตรท					
	0.00		9.01	0.00			0.00			0.00			0.00		
10	1023.04	10.53	10.09	0.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	9.35	9.45	0.10
	1023.04	10.53	10.08	0.00			0.43			0.00			9.45		
	1023.04	10.53	10.09	0.00			0.43			0.00			9.54		
สารผลิตภัณฑ์							ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์								
ไนไตรท์			ไซยาเนต			ไนเตรท									
% เหลือ			% เหลือ			% เหลือ			% เหลือ						
2.15			0.00			47.23			49.38						



ภาคผนวก ซ.

การคำนวณสมมูลมวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### สมการสมดุลมวล

ไซยาไนด์ทั้งหมด = ไซยาไนด์เชิงซ้อน + ไซยาไนด์อิสระ + ไซยานต + ไนไตรท์ + ไนเตรท

ตารางที่ ข.1 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ไซยาไนด์อิสระ	Ion Chromatography
ไซยานต	Ion Chromatography
ไนไตรท์	Ion Chromatography
ไนเตรท	Ion Chromatography
ไซยาไนด์เชิงซ้อน	สมการ mass blance
เฟอร์เรต	UV Spectrophotometer
พีเอช	pH meter

จากตาราง ข.1 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ค่าไซยาไนด์อิสระ ไซยานต ด้วยเครื่อง Ion Chromatography ระบบ AS-7 และสามารถวิเคราะห์ค่าไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่อง Ion Chromatography ระบบ AS-16

ค่าไซยาไนด์เชิงซ้อนไม่สามารถวิเคราะห์ ต้องทำการหาจากสมการสมดุลมวล ข้างต้น โดยค่าไซยาไนด์เชิงซ้อน จะเท่ากับค่าไซยาไนด์ทั้งหมด ลบด้วย ค่าที่วัดได้ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

วิธีการวิเคราะห์หาค่าไซยาไนด์เชิงซ้อน จากสมการสมดุลมวล

ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 5:1

### ก่อนเกิดปฏิกิริยา

ไอออนที่ละลายในน้ำ  $K^+$ ,  $[Co(CN)_6]^{3-}$ ,  $Na^+$ ,  $B_4O_7^{2-}$ ,  $H^+$ ,  $OH^-$  มีดังนี้ และไอออนเหล่านี้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกันเองได้

สมมติให้ ไซยาไนด์ทั้งหมด เท่ากับ 100%

วิเคราะห์ค่าไซยาไนด์อิสระ(CN<sup>-</sup>) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-7 พบ ไซยาไนด์อิสระ(CN<sup>-</sup>) = 0

วิเคราะห์ค่าไซยานต(OCN<sup>-</sup>) ไนไตรท์(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) และไนเตรท(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-16

พบ ไซยานต(OCN<sup>-</sup>) = 0 ไนไตรท์(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) = 0 ไนเตรท(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) = 0

ไซยาไนด์ทั้งหมด = ไซยาไนด์เชิงซ้อน + ไซยาไนด์อิสระ + ไซยานต + ไนไตรท์ + ไนเตรท

$$100\% = \text{ไซยาไนด์เชิงซ้อน} + 0 + 0 + 0 + 0$$

ไซยาไนด์เชิงซ้อน = 100%

### หลังเกิดปฏิกิริยา

เมื่อเติมสารละลายเฟอร์เรต เพื่อไปทำการออกซิไดซ์สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน ในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลของการแย่งทำปฏิกิริยาของโลหะหนัก( $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Co}^{+3}$ ) กับไซยาไนด์อิสระ จากค่าคงที่  $\log K$  (Dionex,2003) พบว่า  $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$  มีค่า  $\log K = 64$  และ  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$  มีค่า  $\log K = 43.6$  จะเห็นว่า  $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$  มีค่ามากกว่า  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$  ถึง  $10^{20.4}$  จากค่า  $K$  ที่มากกว่า จะทำให้ไซยาไนด์เกิดพันธะกับโลหะหนัก ( $\text{Co}^{+3}$ ) จะเสถียรกว่า จึงเกิดสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนชนิดเดียวคือ  $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$

### พีเอช 9

วิเคราะห์ค่าไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-7 พบ ไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) = 0

วิเคราะห์ค่าไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) ในไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-16

พบ ไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) = 0 ไนไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) = 2.83% ไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) = 7.25%

สมมติให้ ไซยาไนด์ทั้งหมด เท่ากับ 100%

ไซยาไนด์ทั้งหมด = ไซยาไนด์เชิงซ้อน + ไซยาไนด์อิสระ + ไซยานเนต + ไนไตรท์ + ไนเตรท

$$100\% = \text{ไซยาไนด์เชิงซ้อน} + 0 + 0 + 2.83\% + 7.25\%$$

ไซยาไนด์เชิงซ้อน = 89.92%

### พีเอช 10

วิเคราะห์ค่าไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-7 พบ ไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) = 0

วิเคราะห์ค่าไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) ในไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-16

พบ ไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) = 0 ไนไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) = 3.16% ไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) = 9.12%

สมมติให้ ไซยาไนด์ทั้งหมด เท่ากับ 100%

ไซยาไนด์ทั้งหมด = ไซยาไนด์เชิงซ้อน + ไซยาไนด์อิสระ + ไซยานเนต + ไนไตรท์ + ไนเตรท

$$100\% = \text{ไซยาไนด์เชิงซ้อน} + 0 + 0 + 3.16\% + 9.12\%$$

ไซยาไนด์เชิงซ้อน = 87.72%

### พีเอช 11

วิเคราะห์ค่าไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-7 พบ ไซยาไนด์อิสระ( $\text{CN}^-$ ) = 0

วิเคราะห์ค่าไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) ในไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) ด้วยเครื่อง IC ระบบ AS-16

พบ ไซยานเนต( $\text{OCN}^-$ ) = 0 ไนไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ) = 2.14% ไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ ) = 5.71%

สมมติให้ ไซยาไนด์ทั้งหมด เท่ากับ 100%

ไซยาไนด์ทั้งหมด = ไซยาไนด์เชิงซ้อน + ไซยาไนด์อิสระ + ไซยานเนต + ไนไตรท์ + ไนเตรท

$$100\% = \text{ไซยาไนด์เชิงซ้อน} + 0 + 0 + 2.14\% + 5.71\%$$

ไซยาไนด์เชิงซ้อน = 92.15 %



ภาคผนวก ฅ

ความคิดพลาดในการทดลอง และค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ความผิดพลาดในการทดลอง และค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

### 1. Micropipettes

ตารางที่ ๓.1 ค่าความจำของไมโครปิเปตกับความแม่นยำ

Capacity	Accuracy	Reproducibility (CV%)
5-50 $\mu$ L	$\pm 1.0\%$	0.5% @ 10 $\mu$ L
	$\pm 0.6\%$	0.3% @ 50 $\mu$ L
50-200 $\mu$ L	$\pm 1.0\%$	0.5% @ 50 $\mu$ L
	$\pm 0.2\%$	0.2% @ 200 $\mu$ L
200-1000 $\mu$ L	$\pm 0.7\%$	0.3% @ 200 $\mu$ L
	$\pm 0.7\%$	0.3% @ 1000 $\mu$ L

### 2. ค่าความแม่นยำต่างๆ ของเครื่อง IC (Ion chromatography)

#### 2.1 Flow accuracy

- 0.5% of setting

#### 2.2 Proportioning accuracy

- $\pm 1.0\%$  [2.0%]

#### 2.3 Temperature

- LC 10/20/25/30

Temperature stability (LC25) to  $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Temperature variance (LC25) to  $\pm 2^{\circ}\text{C}$

Temperature stability (LC30) to  $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Temperature accuracy (LC30) to  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  at  $40^{\circ}\text{C}$

#### 2.4 Accuracy จากการต่อระบบ

- ระบบ AS16 ตรวจวัด Anion ไนไตรท์( $\text{NO}_2^-$ ), ไซยาเนต( $\text{OCN}^-$ ), ไนเตรท( $\text{NO}_3^-$ )  
อุปกรณ์
  1. Eluent น้ำ DI 18.2 m $\Omega$
  2. Column : AS-16
  3. Guard Column : AG-16
  4. Suppressor

- ระบบ AS7 ตรวจวัดไซยาไนด์(CN<sup>-</sup>)

อุปกรณ์

1. Eluent : 0.5 M Sodium Acetate  
0.1 M Sodium Hydroxide  
0.5% v/v Ethylenediamine
2. Column : AS-7
3. Guard Column : AG-7
4. Electrochemical Cell

2.5 ค่า Accuracy ที่ได้จากการทำ Standard Nitrite and Nitrate

ตารางที่ ๓.2 Accuracy Standard Nitrite and Nitrate ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Vial (#)	Concentration (mg/L)
1	5.04 ±0.20
2	9.89 ±0.05
3	25.03 ±0.41
4	49.95 ±0.94
5	99.4 ±1
6	1007 ±5

3. ค่า Detection Limit เครื่อง IC (Ion chromatography)

ตารางที่ ๓.3 ค่า Detection Limit ของ Anion ต่างๆ

Anion	Detection Limit
Nitrate	0.06 ppb
Nitrite	0.06 ppb
Cyanate	0.5 ppb
Cyanide	0.1 ppb

4. ความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง

ความผิดพลาดในการเตรียมสารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศินี กิตติสาร เกิดเมื่อวันที่ 14 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา พ.ศ.2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2550



ศูนย์วิทยพักรพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย