

ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต



นายสีลาวัณย์ ดำรงศิริ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4081-6

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ZINC ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION



Mr. Seelawut Damrongsiri

สถาบันวิทยบริการ
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 2005


ISBN 974-17-4081-6

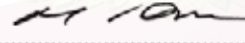
หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการ ออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
โดย	นายสีลาวุธ ดำรงศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศรีชัย เตชะเสน)

ทีลาวุธ คำรังศิริ : ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
(EFFECT OF ZINC ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION)
อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. เขมรรฐ โอสถาพันธุ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์, 129
หน้า. ISBN 974-17-4081-6.

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอันตรายที่มักพบอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะ วิธีการกำจัดไซยาไนด์ที่ใช้กันทั่วไปคือ การกำจัดโดยการออกซิเดชัน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยในส่วนตัวแรกได้ทำการศึกษาถึงผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทดลองในช่วงความเข้มข้นไซยาไนด์ไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 85-100% ที่พีเอช 9, 10 และ 11 โดยมีปฏิกริยารวดเร็วที่พีเอช 9 และมีแนวโน้มถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นในการทำปฏิกริยาเพิ่มขึ้น โดยสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการกำจัดไซยาไนด์คือ ไซยาเนต

ส่วนที่สองได้ทำการศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกริยา และ อัตราการเกิดปฏิกริยา โดยกำหนดให้ความเข้มข้นสังกะสีเท่ากับ 150 ไมโครโมลาร์ที่พีเอช 9 และ 200 ไมโครโมลาร์ที่พีเอช 10 และ 11 ซึ่งเป็นความเข้มข้นอิ่มตัวที่แต่ละพีเอช ผลการทดลองพบว่าสังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนการทำปฏิกริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาช้าลง โดยที่ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่สุดที่พีเอช 9 และมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 0.88 : 1

ในส่วนสุดท้าย เป็นการทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสี ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสีมีความเข้มข้นไซยาไนด์สูงถึง 108,622 ไมโครโมลาร์ ทำการทดลองโดยการเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 104.78 ไมโครโมลาร์ ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 100% ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1.37:1 ซึ่งมากกว่าผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ 1.56 เท่า คาดว่าเป็นผลจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....
ปีการศึกษา 2548.....

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4670526021: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: CYANIDE / ZINC / FERRATE / OXIDATION

SEELAWUT DAMRONGSIRI: EFFECT OF ZINC ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION. THESIS ADVISOR: KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: PICHAYA RACHADAWONG, Ph.D., 129 pp. ISBN 974-17-4081-6.

Cyanide is a highly toxic substance and most found in metal plating industrial wastewater. Oxidation technique is generally applied for cyanide treatment technologies. This research is investigated the effect of zinc on cyanide removal by ferrate oxidation. The first experiment was done on the synthetic wastewater that the maximum concentration of cyanide is 500 μM . It is to study the effect of pH and the increased mole fractions of ferrate per cyanide to both of by products and cyanide removal efficiency. The result, at the mole fraction of 1:1 ferrate per cyanide, approximately 85-100% of cyanide removal efficiency was found at pH 9, 10 and 11 with the fast rate at pH 9. The increasing initial concentration of cyanide in each reaction caused the trend of increasing cyanide removal efficiency. Cyanate was identified as the major product of the reaction.

The second experiment was conducted on 150 μM of zinc at pH 9 and 200 μM of zinc at pH 10 and 11 that considered as saturated concentration of zinc. It is to study the effect of zinc to cyanide removal efficiency, mole fraction of ferrate per cyanide during the reaction and the chemical reaction rate. The results indicated that zinc has no effect on both cyanide removal efficiency and any mole fractions of ferrate per cyanide, but it retarded the chemical reaction rate. The ferrate molar consumption per oxidized cyanide was 0.88:1.

The final experiment was done on the wastewater that collected from a zinc plating industry. The total cyanide of the sample was 108,622 μM . The experiment was done on 104.78 μM of total cyanide by dilution. The result show 100% of the total cyanide was removed. The mole fraction of ferrate consumption per oxidized cyanide was 1.37:1. The mole fraction is 1.57 time of the result in the experiment with synthetic wastewater that maybe the effect of the many substance in the wastewater.

Department Environmental Engineering...

Field of Study Environmental Engineering

Academic year 2005.....

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่ง ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณ Virender K. Sharma สำหรับการแนะนำ สารเคมีโปตัสเซียมเฟอร์เรต และ เอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มเสนีย์ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ และ อาจารย์ ดร. ศรีณย์ เตชะเสน ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยต่างๆ ได้แก่ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จันทวรรณ ดันเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำโครงร่างวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ พี่แก้ว พี่ไ้ พี่ไ้ ที่ให้คำแนะนำมากมาย และช่วยเหลือในการทำโครงร่างวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ พี่จา พี่จ้อ พี่ออน บีม แอน บิว ดี และ น้องต๋อง ที่ช่วยเหลือในการเขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ พี่ไอ้ดี ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ มากมาย และ ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคน

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และ ญาติพี่น้อง เป็นอย่างสูงที่ได้ช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้กระผมสามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้ตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 บทนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.1 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียจากการชุบโลหะ.....	7
2.2 ไซยาไนต์.....	8
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนต์.....	8
2.2.2 การแบ่งประเภทของไซยาไนต์.....	8
2.2.2.1 ไซยาไนต์อิสระ.....	8
2.2.2.2 สารประกอบไซยาไนต์เชิงซ้อน.....	9
2.2.2.3 สารประกอบไซยาไนต์อื่นๆ.....	10
2.2.3 ความเป็นพิษของไซยาไนต์.....	11
2.2.4 ค่ามาตรฐานต่างๆของไซยาไนต์ในประเทศไทย.....	12
2.2.5 การกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสีย.....	13

2.2.5.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน.....	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 การตกตะกอนโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน ของไซยาไนด์กับเหล็ก.....	17
2.2.5.11 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า.....	18
2.2.5.12 การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ.....	19
2.2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์.....	19
2.3 เฟอร์เรต.....	23
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	23
2.3.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต.....	23
2.3.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์.....	24
2.3.1.3 ความคงตัวของเฟอร์เรต.....	24
2.3.2 การเตรียมเฟอร์เรต.....	26
2.3.2.1 วิธีการ Dry Oxidation.....	26
2.3.2.2 วิธีการ Wet Oxidation.....	26
2.3.2.3 วิธีการ Electro-Chemical.....	26
2.3.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	27
2.3.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	27
2.3.3.2 การฆ่าเชื้อโรค.....	29
2.3.3.3 การโคแอกกูเลชัน.....	29
2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต.....	30

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และ สารเคมี.....	33
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	33
3.1.2 สารเคมี.....	33
3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และ สารละลายเฟอร์เรด.....	34
3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ.....	34
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	35
3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรด.....	36
3.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	37
3.4 ตัวแปรในการดำเนินการวิจัย.....	38
3.4.1 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	38
3.4.1.1 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	39
3.4.1.2 ตัวแปรในการทดลองผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	39
3.4.2 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง.....	41
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	42
3.5.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	42
3.5.1.1 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ ด้วยเฟอร์เรด.....	42
3.5.1.2 การทดลองผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการ ออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	46
3.5.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงชุบสังกะสี ที่ผ่านการเจือจาง.....	52
3.5.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบสังกะสี.....	52
3.5.2.2 ศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรดต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์.....	52
3.6 วิธีการวิเคราะห์.....	54

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์..... 55

4.1.1 ผลการทดลองการกำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต... 55

4.1.1.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของไชยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์..... 55

4.1.1.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8.9 10.11 และ 12 59

4.1.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์และความเข้มข้นของไชยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์ 61

4.1.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไชยาไนต์กับสังกะสี 65

4.1.2.1 ความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์..... 65

4.1.2.2 ความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มีไชยาไนต์ 66

4.1.2.3 ผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา..... 70

4.1.2.4 ผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา 73

4.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง 77

4.2.1 ผลการตรวจวัดน้ำเสียโรงชุบสังกะสี 77

4.2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ และ สารผลิตภัณฑ์ 77

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 79

5.1.1 การกำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต..... 79

5.1.2 ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต 79

5.1.3 การทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง..... 80

5.1.4 การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง..... 80

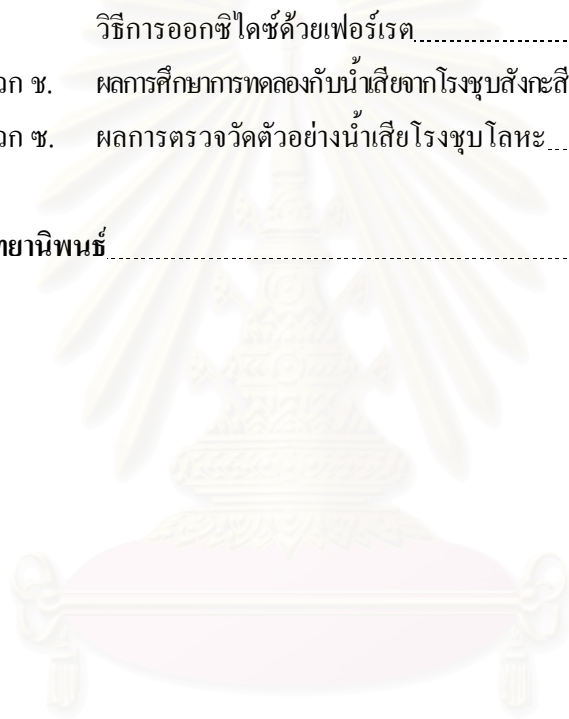
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมศาสตร์..... 81

5.3 ข้อเสนอแนะ..... 82

รายการอ้างอิง..... 83

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต	89
ภาคผนวก ข.	การเก็บรักษาตัวอย่าง	95
ภาคผนวก ค.	ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์	97
ภาคผนวก ง.	ศึกษาเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท	103
ภาคผนวก จ.	ผลการศึกษากำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ..	108
ภาคผนวก ฉ.	ผลการศึกษาผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดย วิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต	116
ภาคผนวก ช.	ผลการศึกษารทดลองกับน้ำเสียจากโรงสูบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง	128
ภาคผนวก ซ.	ผลการตรวจวัดตัวอย่างน้ำเสียโรงสูบโลหะ	130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		134



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการตรวจวัดลักษณะสมบัติของน้ำเสียเฉลี่ย.....	7
2.2 ค่าคงที่ของความคงตัว (β_i) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	10
2.3 ค่าคงที่ของความคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	10
2.4 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ.....	11
2.5 ค่ามาตรฐานต่างๆของไซยาไนด์.....	12
2.6 ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กัน ในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	24
2.7 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต	28
3.1 การผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.....	35
3.2 การผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสีในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.....	35
3.3 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง.....	36
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการ กำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	38
3.5 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12	38
3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และความเข้มข้น ของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์	39
3.7 ตัวแปรในการศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์	39
3.8 ตัวแปรในการศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มี ไซยาไนด์	40
3.9 ตัวแปรในการศึกษาผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา.....	40
3.10 ตัวแปรในการศึกษาผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	41
3.11 ตัวแปรในการศึกษาอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์	41
4.1 อัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองที่ 4.1.2.3.....	70
4.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) จากการทดลองที่ 4.1.2.4	73

ตารางที่	หน้า
ก.1 ความเข้มข้นของฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายบัฟเฟอร์.....	94
ก.2 ความเข้มข้นของฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.002 โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12	94
ก.3 ความเข้มข้นฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	94
ค.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่ตรวจวัดได้ในสารละลายที่มีสังกะสี 100 ไมโคร โมลาร์ และสารละลายที่มีเฟอร์ริก 500 ไมโคร โมลาร์	100
ค.2 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะเปิดฝา พีเอช 8 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ต่างๆ	102
จ.1 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	109
จ.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12	112
จ.3 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นของ ไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	113
ฉ.1 ความเข้มข้นสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรอง และ หลังการกรอง ใน สารละลายต่างๆ.....	117
ฉ.2 ความเข้มข้นของสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรองและหลังการกรองในตัวอย่างที่เป็น สารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12.....	117
ฉ.3 ความเข้มข้นของสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรองและหลังการกรอง ในตัวอย่างที่มี สารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ และไซยาไนด์ 500±10 ไมโคร โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12.....	117
ฉ.4 ตารางการคำนวณสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไฮดรอกไซด์ และ สังกะสีกับไซยาไนด์.....	118
ฉ.5 รูปแบบของสังกะสีที่จับอิมตัวในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโคร โมลาร์จากการ คำนวณตามทฤษฎี ในหน่วย %.....	118
ฉ.6 รูปแบบของสังกะสีที่จับอิมตัวในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโคร โมลาร์ จากการ คำนวณโดยใช้สัดส่วนตามทฤษฎี จากตารางที่ ฉ. 5 และค่าสารประกอบเชิงซ้อนของ สังกะสีกับไซยาไนด์ทั้งหมดจากการทดลอง จากตารางที่ ฉ.4 ในหน่วย %.....	118
ฉ.7 รูปแบบของไซยาไนด์ ในสารละลายที่มีสังกะสีที่จับอิมตัว ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโคร โมลาร์จากการคำนวณ ในหน่วย %.....	119

ตารางที่		หน้า
ฉ.8	ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	120
ฉ.9	ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1.....	122
ช.1	ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียโรงชุบสังกะสี (หน่วย ไมโครโมลาร์).....	129
ช.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	131



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.3 ปริมาณไซยาไนด์ไอออน (CN-) กับกรดไซยานิค (HCN) ที่พีเอชต่างๆ.....	9
2.4 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ	23
2.5 ผลของพีเอชต่อปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์	25
3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.1 และ 3.5.1.1.2.....	43
3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.2	45
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.1 และ 3.5.1.2.2.....	47
3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.3.....	49
3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.4.....	51
3.6 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.2.2.....	53
4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ กับ พีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1	56
4.2 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ1:1.57	
4.3 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์กับพีเอชอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ	58
4.4 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์กับพีเอช อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ.....	58
4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เฉลี่ยทั้ง 3 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นจากการทดลองที่ 4.1.1.1.....	59
4.6 เฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 200 ไมโครโมลาร์.....	59
4.7 ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.004 โมลาร์... 60	
4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอช 9 .. 62	
4.9 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ที่พีเอช 9	63

รูปที่	หน้า
4.10	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ พีเอช 9 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ 64
4.11	สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ พีเอช 9 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ 64
4.12	ความสามารถในการละลายของสังกะสีในตัวอย่างต่างๆ ที่พีเอช 9..... 65
4.13	ความสามารถในการละลายของสังกะสีที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12ในสารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ ที่ไม่มีไซยาไนด์ และมีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์..... 67
4.14	รูปแบบของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ในสารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์..... 67
4.15	รูปแบบของไซยาไนด์จากการคำนวณ ที่ความเข้มข้นสังกะสีอิ่มตัว ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์..... 68
4.16	รูปแบบของสังกะสีจากการคำนวณในสารละลายไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 69
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือและไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ 71
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือและไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิ่มตัว ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ 72
4.19	ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี..... 74
4.20	ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิ่มตัว..... 75
4.21	ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสีและมีสังกะสีที่ค่าอิ่มตัว อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 76
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่ลดลงและไซยาเนตที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียจริง 78
ก.1	การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V)..... 90
ก.2	ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับตัวอย่างชนิดต่างๆที่เวลา 60 นาที..... 91
ก.3	ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับพีเอช ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.002 โมลาร์ ที่เวลา 20 นาที..... 92

รูปที่	หน้า
ก.4 ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรต ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 60 นาที.....	92
ค.1 สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออน โครมาโตกราฟี.....	98
ค.2 รูปแบบของไซยาไนด์ในสารละลายที่มีเฟอร์ริกที่ค่าอิมิตัว ที่พีเอชต่างๆ ในสารละลายไซยาไนด์ 50 ไมโครโมลาร์ จากการคำนวณ.....	99
ค.3 รูปแบบของไซยาไนด์ในสารละลายที่มีสังกะสีที่ค่าอิมิตัว ที่พีเอชต่างๆ ในสารละลายไซยาไนด์ 50 ไมโครโมลาร์ จากการคำนวณ.....	99
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไซยาไนด์กับพีเอช	101
ง.1 สัญญาณของคลอไรด์ ไนไตรท์ ไซยานิต และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออน โครมาโตกราฟี.....	104
ง.2 ตำแหน่งสัญญาณของไนไตรท์ โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไนไตรท์ และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	105
ง.3 ตำแหน่งสัญญาณของไซยานิต โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไซยานิต และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	105
ง.4 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากตัวอย่างน้ำจริงกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน	106
ง.5 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เติมสารละลายมาตรฐานลงไป กับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้มคือสัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	106
ง.6 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เกิดการ โอเวอร์ โหลด กับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้มคือสัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
ภาษาอังกฤษ Effect of Zinc on Cyanide Removal by Ferrate Oxidation

1.2 คำสำคัญ (Key word)

ไซยาไนด์	(Cyanide)
สังกะสี	(Zinc)
เฟอร์เรต	(Ferrate)
การออกซิไดซ์	(Oxidation)

1.3 บทนำ

อุตสาหกรรมการชุบโลหะ เป็นอุตสาหกรรมอย่างหนึ่งที่กระจายอยู่ทั่วไปในประเทศไทย เช่น โรงงานชุบโลหะขนาดกลางและขนาดเล็ก ในเขตชุมชนอุตสาหกรรมวงแหวนชัชวาลและแสงอาทิตย์ การชุบโลหะจะทำเพื่อรักษาเนื้อวัสดุ และเพื่อความสวยงาม ซึ่งจะประกอบด้วยกระบวนการต่างๆหลายอย่าง ทั้งกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และไฟฟ้าเคมี ในกระบวนการเหล่านี้ ก็จะมีเกิดของเสียต่าง ๆ ขึ้นมา ซึ่งจะต้องมีการบำบัดด้วยวิธีที่เหมาะสม

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอย่างหนึ่งที่นิยมใช้เป็นสารช่วยในการทำความสะอาดผิวโลหะที่จะชุบและใช้เป็นสารเคลือบ เพื่อทำให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ดี น้ำเสียเหล่านี้จึงมีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการกิน การหายใจ และการซึมผ่านผิวหนัง อาการที่เกิดขึ้นมีทั้งอาการระคายเคืองและเฉียบพลัน ซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิต ผลจากการตรวจสอบน้ำเสียขั้นต้นจากโรงงานชุบโลหะขนาดกลางและเล็กหลายแห่งพบว่า มีความเข้มข้นของไซยาไนด์และโลหะหนักอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และหลายแห่งมีการจัดเก็บน้ำเสียที่ไม่เหมาะสม

วิธีการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย คือ การออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์(Alkali Chlorine Method) นอกจากนี้ยังมี การทดลองกำจัดด้วยวิธีอื่นๆอีก เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต การใช้โอโซน และการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า แต่ละวิธีที่กล่าวมา

สามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดี แต่จะมีข้อเสียต่างกันไป เช่น การออกซิเดชันด้วยคลอรีน จะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเนื่องจากคลอรีนและทำให้น้ำเกิดความเค็ม การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตต้องมีเครื่องมือในการผลิตรังสี และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง และ การใช้โอโซนมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก

เฟอร์เรต (Fe^{6+}) เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งที่ดีควรนำมาใช้แทนสารออกซิไดซ์อื่นๆ เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ มีกำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) สูง ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ เป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา ทำให้ประหยัดกว่าสารที่ไม่เลือกทำปฏิกิริยา และ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่หน้างานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย เฟอร์เรตจึงเป็นสารเคมีที่น่าสนใจศึกษา

การศึกษาการใช้เฟอร์เรต ในการกำจัดไซยาไนด์ที่เคยมีการศึกษามา คือ การใช้เฟอร์เรตในการกำจัด ไซยาไนด์อิสระ ซึ่งได้ผลในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงได้ประมาณ 90% ซึ่งคาดว่าที่เหลืออีก 10% คือสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ซึ่งมีความคงทนต่อการออกซิไดซ์

การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกที่จะศึกษาการใช้เฟอร์เรต ในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ที่เกิดกับสังกะสีที่จะมีอยู่มากในอุตสาหกรรมการชุบสังกะสี ในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต เพื่อหาพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่มีไซยาไนด์และสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา โดยใช้วิธีการเจือจางและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
4. เพื่อนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีและนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่าย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดลองจะเริ่มจากการศึกษาการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ และ การศึกษาการใช้สารละลายเฟอร์เรต จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองในส่วนหลักโดยจะแบ่งการทดลองหลักออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อศึกษากำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยศึกษาถึงผลกระทบของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว โดยทดลองที่พีเอช 8 ถึง 12 ความเข้มข้นของเฟอร์เรตและไซยาไนด์สูงที่สุดไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นของสังกะสีไม่เกินความเข้มข้นอิมิตัวที่แต่ละพีเอช และในการควบคุมพีเอชจะใช้ความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่น้อยที่สุดเพื่อให้รับกวนปฏิกิริยาน้อยที่สุด

ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจางโดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1 และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพและอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา และอัตราในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตและไซยาไนด์
2. ทราบถึงผลกระทบของสังกะสีต่อประสิทธิภาพ อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา และอัตราในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตและไซยาไนด์
3. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในเชิงทฤษฎีในการบำบัดน้ำเสียที่มีไซยาไนด์และสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก
4. สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรมจริง

บทที่ 2

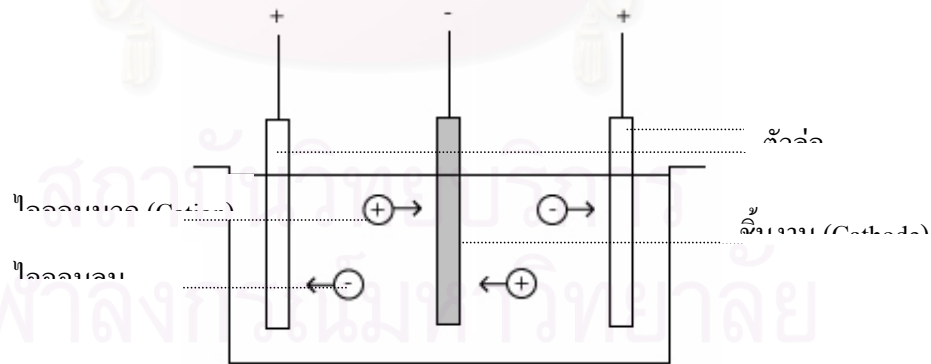
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

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

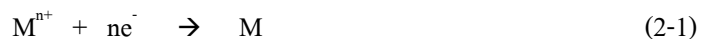
2.1.1 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

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



รูปที่ 2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

ที่ขั้วลบ ไอออนบวกของโลหะจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอน ที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงานดังสมการที่ (2-1)



ที่ขั้วบวก ถ้าโลหะเป็นชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบชิ้นงาน ก็จะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอน และกลายเป็นไอออนบวกละลายลงในสารละลายดังสมการที่ (2-2)



2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

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

2.1.2.1 การล้างไขมัน

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

2.1.2.2 การล้างสนิม

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยกรด เพื่อกำจัดออกไซด์บางๆที่ผิวชิ้นงานออก โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดอื่นๆ ที่มีการใช้กัน กรดอนินทรีย์ เช่น กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และ กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดฟอรั่มิก และ อีดีทีเอ เป็นต้น และยังมีการล้างด้วยโซดาไนต์เพื่อกันสนิมขึ้นซ้ำหลังการล้างด้วย

2.1.2.3 การชุบโลหะ

เป็นขั้นตอนการชุบผิวชิ้นงาน โดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะแต่ละแบบมีขั้นตอนแตกต่างกัน และการชุบโลหะบางชนิดต้องมีการรองพื้นด้วยโลหะอีกชนิดก่อนด้วย

- การชุบสังกะสี สามารถชุบได้โดยไม่ต้องรองพื้น นิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กเพื่อกันสนิม
- การชุบนิกเกิล ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานที่มีสังกะสี นิยมชุบเพื่อความสวยงามและความสะดวกในการทำสะอาด มักจะตามด้วยการชุบโครเมียม
- การชุบทองแดง แบ่งออกเป็น 1. การชุบทองแดงแบบกรด ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานที่มีสังกะสี มีความเงางาม นิยมใช้ชุบเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนนำไปชุบนิกเกิล 2. การชุบทองแดงแบบด่าง สามารถชุบได้โดยไม่ต้องรองพื้น มีความสามารถในการเกาะจับติดแน่น นิยมใช้ชุบเพื่อรองพื้นก่อนนำไปชุบแบบอื่นต่อไป เช่นชุบงานที่มีสังกะสีก่อนแล้วนำไปชุบนิกเกิล
- การชุบโครเมียม แบ่งออกเป็น 1. การชุบโครเมียมแบบบาง เนื่องจากโครเมียมมีความแข็งและเปราะ การชุบแบบบางบนผิวเหล็กที่มีความพรุนจึงหลุดร่อนง่าย จึงต้องมีการรองพื้นด้วยทองแดง และ นิกเกิล แล้วจึงชุบด้วยโครเมียม 2. การชุบโครเมียมแบบหนา สามารถชุบได้โดยไม่ต้องรองพื้น

2.1.2.4 การล้างชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดหลังจากการชุบเพื่อล้างสารต่างๆในน้ำยาชุบออก

2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียจากการชุบโลหะ

น้ำเสียที่มาจากขั้นตอนต่างๆ จะมีลักษณะ ปริมาณ และ ความเข้มข้นของมลพิษต่างกันในโรงงานที่ไม่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสม น้ำเสียจากทุกแหล่งจะถูกนำมารวมกันเป็นน้ำทิ้งรวม ส่วนในโรงงานที่มีการจัดการน้ำเสีย จะมีการแยกน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ไว้เป็นประเภท ผู้ทดลองได้ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 3 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างในปี พ.ศ. 2547 จำนวน 2 ครั้ง และ ในปีพ.ศ. 2548 จำนวน 1 ครั้ง

สำหรับการสำรวจในปี พ.ศ. 2547 ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานที่ไม่มีการแยกน้ำเสีย 8 แห่ง และโรงงานที่มีการแยกน้ำเสีย 1 แห่ง รวม 9 โรงงาน 11 ตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่าง 2 ครั้งในระยะเวลาห่างกันประมาณ 2 เดือน ผลการตรวจวัดค่าพีเอช ไชยาไนต์ และ โลหะหนักของน้ำตัวอย่างแสดงไว้ในภาคผนวก ข. จากผลการสำรวจพบว่า การชุบโลหะโดยทั่วไป ในบริเวณที่สำรวจ มี 2 ประเภท คือ การชุบสังกะสี และ การชุบโครเมียม และโรงงานส่วนใหญ่ไม่มีระบบบำบัด หรือเก็บน้ำเสียเพื่อส่งไปบำบัด แต่ปล่อยน้ำเสียทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่างพบว่า พีเอชของน้ำเสียเกือบทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 7 และค่าความเข้มข้นของ ไชยาไนต์ส่วนใหญ่มีค่าไม่สูงมาก หรือไม่มีเลย ซึ่งคาดว่า ไชยาไนต์ส่วนใหญ่ได้ระเหยไปแล้ว เนื่องจาก ไชยาไนต์ระเหยได้ที่พีเอชต่ำกว่า 12 โลหะหนักที่ตรวจวัดได้มีค่าต่างๆกันไปตามประเภทของการชุบ และ เหล็กปนเปื้อนมาจากการล้างชิ้นงานด้วย ไชยาไนต์เพื่อป้องกันสนิมของโรงงานบางแห่ง การเก็บตัวอย่างครั้งนี้มีโรงงานที่แยกน้ำเสียอยู่ 1 แห่ง โดยแยกน้ำเสียออกเป็น 3 ชนิด คือน้ำเสียล้าง ไชยาไนต์ น้ำเสียจากการชุบโครเมียม และ น้ำเสียทั่วไป ซึ่งพบว่า น้ำเสียล้าง ไชยาไนต์ และ น้ำเสียจากการชุบโครเมียม มี ไชยาไนต์อยู่มาก สำหรับการสำรวจในปี พ.ศ. 2548 พบว่า โรงงานส่วนหนึ่งได้ถูกปิดกิจการเนื่องจาก การควบคุมของกรมโรงงาน และ โรงงานที่เหลืออยู่จะมีระบบการเก็บน้ำเสียเพื่อส่งไปบำบัดอย่างถูกต้อง และบางโรงงานมีการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียที่พีเอช 12 ผลการตรวจวัดน้ำลักษณะสมบัติของน้ำเสียเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการตรวจวัดลักษณะสมบัติของน้ำเสียเฉลี่ย

ปี พ.ศ.	ประเภทการชุบ	พีเอช	ไชยาไนต์ มก./ล.	สังกะสี มก./ล.	ทองแดง มก./ล.	นิกเกิล มก./ล.	โครเมียม มก./ล.	เหล็ก มก./ล.
2547	นิกเกิล โครเมียม	4.10	14.21	19.24	6.00	30.95	19.68	84.01
	สังกะสี	4.00	23.90	638.87	2.22	4.84	72.54	508.97
2548	นิกเกิล โครเมียม	6.25	22.48	107.06	15.15	261.14	127.05	157.93
	สังกะสี	12.00	2824.17	631.78	30.78	9.43	2.47	710.28

2.2 ไชยาไนต์

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์

ไชยาไนต์ (Cyanide) หมายถึง กลุ่มของ CN ทั้งหมดที่สามารถวิเคราะห์หาได้ในรูปของ ไชยาไนต์ไอออน โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาไชยาไนต์จะวัดเป็นปริมาณไชยาไนต์ทั้งหมดโดยใช้วิธีการกลั่น (Distillation Measurement)

2.2.2 การแบ่งประเภทของไชยาไนต์

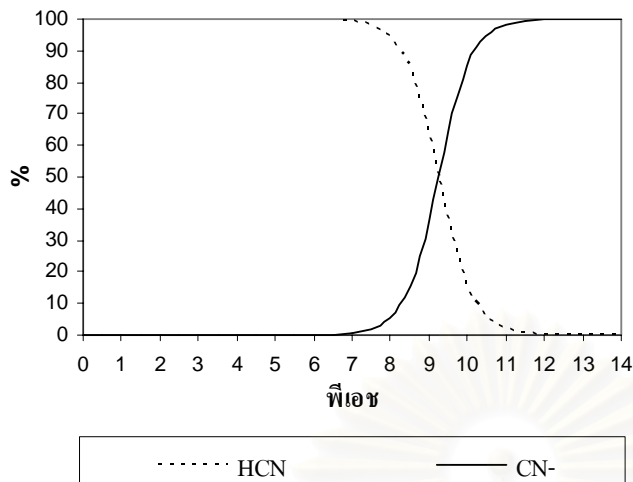
สารประกอบไชยาไนต์จะสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ โดยใช้ลักษณะของโมเลกุลซึ่งจะแบ่งเป็น 1. สารประกอบไชยาไนต์เชิงเดี่ยว (Simple Cyanide) หมายถึง ไชยาไนต์อิสระ และ สารประกอบไชยาไนต์กับโลหะอัลคาไลด์ 2. สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบไชยาไนต์กับโลหะหนักทุกประเภท (Zheng และคณะ ,2003)

สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน จะแบ่งย่อยออกไปอีกโดยใช้ความแข็งแรงของพันธะซึ่งแบ่งได้เป็น 1. Strong Metal-Cyanide Complexes หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์ที่มีพันธะแข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ทองคำ และโคบอล 2. Weak Metal-Cyanide Complexes หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนต์ที่มีพันธะไม่แข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของ เงิน แคดเมียม ทองแดง พรอท นิกเกิล และ สังกะสี ทั้งหมดนี้เรียกอีกอย่างว่า Weak Acid Dissociable Species (WAD) (Botz, 2001)

2.2.2.1 ไชยาไนต์อิสระ

ไชยาไนต์อิสระ (Free Cyanide) หมายถึง ไชยาไนต์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไชยาไนต์ หรือกรดไซยานิก (HCN) และ ไชยาไนต์ไอออน (CN⁻) สัดส่วนของกรดไซยานิกต่อไชยาไนต์ไอออน ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและค่าคงที่การแตกตัวของกรดดังรูปที่ 2.3 ไชยาไนต์ไอออนและไซยานิกมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2-3) ดังนั้น ในธรรมชาติจึงมักพบอยู่ในรูปไฮโดรเจนไชยาไนต์



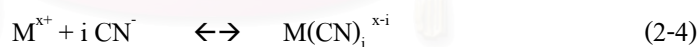


รูปที่ 2.3 ปริมาณไซยาไนด์ไอออน (CN⁻) กับกรดไซยานิก (HCN) ที่พีเอชต่างๆ

2.2.2.2 สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน

สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะหนัก ส่วนมากจะละลายน้ำได้ดี แต่จะมีบางรูปที่ตกตะกอนได้เช่นกัน โลหะแต่ละชนิดสามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายแบบ และ สารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดมีค่าความเสถียรต่างกันดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของโมเลกุลดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์เกิดขึ้นจากการจับตัวกันของไซยาไนด์ไอออนกับโลหะหนัก (M) ที่ละลายอยู่ในน้ำดังสมการที่ (2-4)



สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักมักพบมากในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เช่น การชุบสังกะสี จะพบสารประกอบเชิงซ้อนกับสังกะสี และการชุบโครเมียมก็จะพบสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมกับ ทองแดง และ นิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้รองพื้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการล้างเหล็กด้วยไซยาไนด์เพื่อป้องกันสนิม

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของค่าความคงตัว (β) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ (Benjamin, 2002) (Gherrou และ Kerdjoudj, 2002)

โลหะหนัก	$\log \beta$					
เหล็ก (Fe^{2+})	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	52.44	$\text{FeH}(\text{CN})_6^{2-}$	50	$\text{FeH}_2(\text{CN})_6^-$	45.61
เหล็ก (Fe^{3+})	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	52.63	-	-	-	-
ทองแดง (Cu^+)	$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$	24.0	$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$	28.6	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	30.3
นิกเกิล (Ni^{2+})	$\text{Ni}(\text{CN})_2$	14.59	$\text{Ni}(\text{CN})_3^-$	22.64	$\text{NiH}_3(\text{CN})_3^{2+}$	43.95
สังกะสี (Zn^{2+})	$\text{Zn}(\text{CN})_2$	11.07	$\text{Zn}(\text{CN})_3^-$	16.05	$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$	16.72

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของค่าความคงตัว (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ (Dionex, 2003)

สารประกอบเชิงซ้อน	ค่าคงที่ ($\log K$ ที่ 25°C)	ชนิดของสารประกอบเชิงซ้อน
$[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$	64.0	Strong
$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	43.6	Strong
$[\text{Pd}(\text{CN})_4]^{2-}$	42.4	Strong
$[\text{Pt}(\text{CN})_4]^{2-}$	40.0	Strong
$[\text{Hg}(\text{CN})_4]^{2-}$	39.0	Strong
$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$	37.0	Strong
$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	35.4	Strong
$[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$	30.2	Weak
$[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$	23.1	Weak
$[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$	20.5	Weak
$[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$	19.6	Weak
$[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$	17.9	Weak

2.2.2.3 สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ

สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆเช่นไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride, CNCl) เกิดจากการบำบัดด้วยคลอรีน ไซยาเนต (Cyanate , CNO^-) เกิดจากการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ในระหว่างการบำบัด และ ไธโอไซยาเนต (Thiocyanate, SCN^-) ที่ใช้ในการชุบโลหะบางประเภท

2.2.3 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับโปรตีนและเอนไซม์หลายชนิดในร่างกาย เช่น เอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส ที่จำเป็นต่อการหายใจในระดับเซลล์ในร่างกายสิ่งมีชีวิต และ ฮีโมโกลบิน ซึ่งจะมีผลทำให้เซลล์ขาดออกซิเจน เสื่อม หรือตายได้ (ประยูร ฟองสถิตย์กุล และคณะ, 2542) ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก ทางหายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนังและลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณน้อย จะเกิดอาการพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมองอาจปรากฏอาการทางโรคจิต ประสาทตาเสื่อม หรือฝ่อไปได้ ส่วนผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างมากจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงชีวิต (Rania และ Roldan, 2004) ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้มีการทดลองและกำหนดเป็นค่าระดับอันตรายไว้ดังตารางที่ 2.4 โดย TLV หมายถึง Threshold Limit Value คือ ความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสทางอากาศหลาย ๆ วัน ต่อเนื่องกันโดยไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อสุขภาพ และ LD₅₀ หมายถึง Median Lethal Dose คือ ปริมาณสารที่เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วจะทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่มตายลงครึ่งหนึ่ง

ตารางที่ 2.4 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ (U.S. EPA, 2000)

สารประกอบ	สูตรเคมี	TLV	LD ₅₀
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 ₃ (Fe(CN) ₆)(s)	-	1600 มก./กก.(หนู)

สำหรับไซยาเนต มักพบเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการกำจัดไซยาไนด์และมีความเสถียรสูงกว่า ไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์มาก โดยการสัมผัสภายนอกจะเกิดอาการระคายเคือง การรับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยจะส่งผลเรื้อรังทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรง น้ำหนักลด และหากได้รับในปริมาณมากจะเกิดอาการอาเจียน อ่อนเพลีย ส่งผลต่อระบบประสาท และทำให้ระบบการหายใจหยุดทำงานได้เมื่อได้รับในปริมาณสูงมาก โดยมีค่า LD₅₀ เท่ากับ 841 มก./กก.(หนู) (Mallinckrodt Baker, 2004)

2.2.4 ค่ามาตรฐานต่างๆของไซยาไนต์ในประเทศไทย

ค่ามาตรฐานเกี่ยวกับการปนเปื้อนไซยาไนต์ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นในกฎหมายหลายฉบับซึ่งได้รวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นไซยาไนต์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย

มาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	ที่มา
1. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน	ไม่เกิน 0.2	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)
2. ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง	แหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 ไม่เกิน 0.01	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537)
3. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	แหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 ไม่เกิน 0.005	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)
4. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำบริโภค	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)
5. มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ไม่เกิน 0.1 (เกณฑ์อนุโลมสูงสุด)	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534)
6. มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ต้องไม่มี (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542)
7. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)
8. มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521)

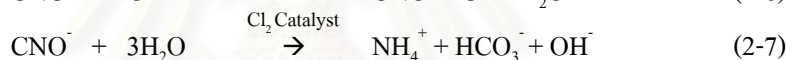
2.2.5 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

ในปัจจุบันวิธีการกำจัดไซยาไนด์มีอยู่หลายวิธี ทั้งวิธีการที่มีการใช้งานกันและวิธีที่มีการศึกษากันอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.5.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือ ก๊าซคลอรีน (Cl₂) 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 ดังนั้น ปฏิกิริยาทั้งหมดในขั้นที่ 1 จึงควรทำที่พีเอชประมาณ 9.0-10.0 เพื่อให้ปฏิกิริยาการเกิดไซยาเนต เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ต่อมาในขั้นที่ 2 กรณีการใช้ก๊าซคลอรีน ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) และ แอมโมเนียม (NH₄⁺) 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 สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง และ เหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.31 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3- 8 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม ควรมีค่าประมาณ 9.0-9.5 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes แต่จะกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้น้อย เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และ เหล็ก จะเกิดขึ้นและตกตะกอนได้มากที่พีเอชต่ำกว่านี้

2.2.5.3 การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfur Dioxide / Air

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนร่วมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็น ไซยาเนต ดังสมการที่ (2-12)



วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น (Slurry) สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้ โดยการตกตะกอนของ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และ เหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 2.46 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3.5-4.5 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม 8.0-9.0 และควรเติมปูนขาวเพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

2.2.5.4 การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid

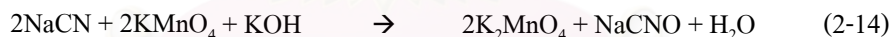
เป็นการออกซิไดซ์ด้วยกรดเพอร์ออกซีโมโนซัลฟูริก(Peroxymonosulfuric Acid) (H_2SO_5) หรือ Caro's Acid ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็น ไซยาเนต ดังสมการที่ (2-13)



Caro's Acid เป็นสารที่สลายตัวเร็วการใช้งานจึงต้องผลิตขึ้นที่จุดใช้งาน (on-site) โดยการผสมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_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

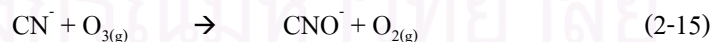
2.2.5.5 การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์มังกานेट

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยการเติมโปตัสเซียมเปอร์มังกานेट (KMnO_4) ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็น ไซยาเนต ดังสมการที่ (2-14) (อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539)

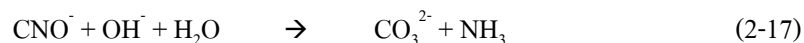


2.2.5.6 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

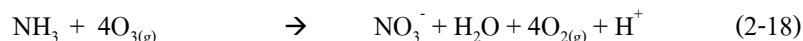
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-15) และ (2-16) (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003)



ในสารละลายที่มีพีเอชสูง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนตได้ดังสมการที่ (2-17)



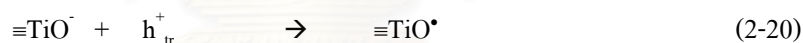
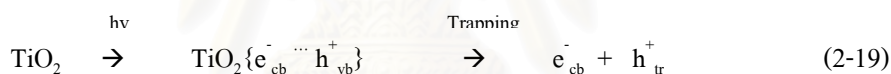
และจากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนเตรตดังสมการที่ (2-18)



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

2.2.5.7 การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

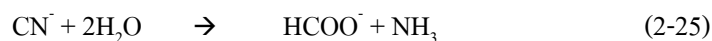
เป็นการออกซิไดซ์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กแตกตัวได้บางส่วน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ก็จะเกิดการออกซิไดซ์โดยเรดิคัลที่พื้นผิวไททาเนียม ($\equiv\text{TiO}^\bullet$) (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ดังสมการที่ (2-19) ถึง (2-24)



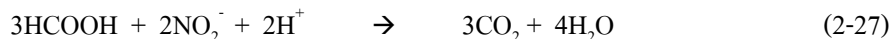
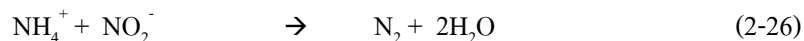
วิธีนี้สามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระ และ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์ (Rader และคณะ, 1995)

2.2.5.8 การออกซิเดชันด้วยความร้อน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ระหว่าง 140-200 °C และพีเอช 8 แรงดันที่ใช้ต้องสูงถึง 100 บาร์ ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอร์มเมต (HCOO^-) และ แอมโมเนีย (NH_3) (Hartinger, 1994) ดังสมการที่ (2-25)



และหากมีไนโตรเจนที่เข้ามาด้วย ฟอสมิตและแอมโมเนียจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิ 150 °C ดังสมการที่ (2-26) และ (2-27)



วิธีการนี้สามารถบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง และสามารถใช้น้ำล้างชิ้นงานที่เข้มข้นได้ด้วย

2.2.5.9 การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ปกติและถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับแต่งพื้นผิว เช่น ปรับแต่งถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิว (Modified Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) และการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยโลหะหนักบางชนิด (Impregnate Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) วิธีนี้ใช้ได้ดีและมีราคาถูก มักใช้เป็นระบบสุดท้ายเพื่อลดปริมาณไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมักเหลือจากการบำบัดด้วยวิธีอื่น (Botz, 2001)

2.2.5.10 การตกตะกอนโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก

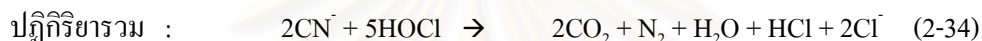
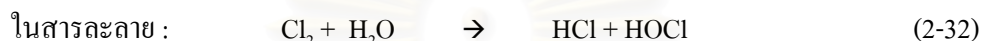
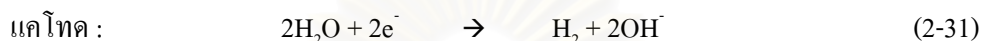
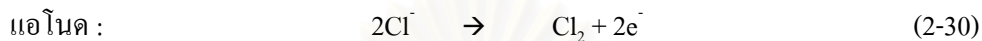
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เพื่อให้ไซยาไนด์เปลี่ยนมาอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กและเกิดการตกตะกอน (Botz, 2001) ดังสมการที่ (2-28) และ (2-29)



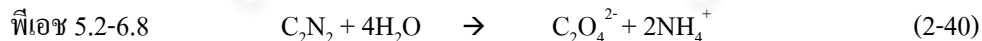
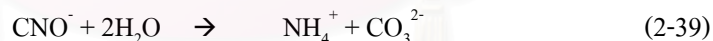
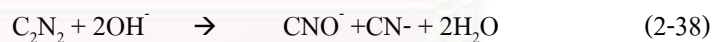
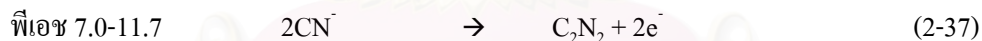
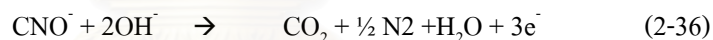
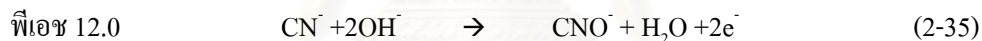
วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน ค่าพีเอชที่เหมาะสม 5-6 ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้ ประมาณ 0.5-5 โมลต่อไซยาไนด์ 1 โมล

2.2.5.11 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ 1. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ (OCI^-) จากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่เติมลงไป และไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นสารที่ไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2-30) ถึง (2-34)



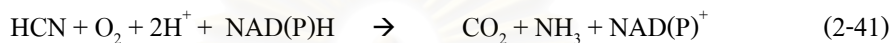
2. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยตรง ไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไซยาเนตที่ขั้วแอนอดโดยตรง และจะถูกสลายต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซาเลตไอออนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย (Ogutveren, Toru และ Kopalal, 1999) ดังสมการที่ (2-35) ถึง (2-40)



สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักได้มีการศึกษาไว้หลายราย (Dart และคณะ, 1963)(El-Ghaoui และคณะ, 1982)(Hine และคณะ, 1986)(Ho และคณะ, 1990) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีนี้สามารถใช้บำบัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี แต่กับสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กจะไม่ได้ผลนัก

2.2.5.12 การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ

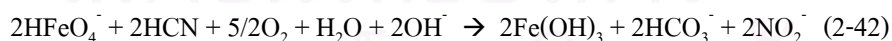
ระบบบำบัดทางชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่มากนัก (White, Pilon และ Woolard, 2000) มีการใช้กันในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดี (Botz, 2001) การย่อยสลายไซยาไนด์โดยกระบวนการทางชีวภาพมีอยู่หลายวิธีทาง (Pathway) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาออกซิเดทีฟ (Oxidative Reaction) ไซยาไนด์จะถูกย่อยสลาย กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย (Ebbs, 2004) ดังสมการที่ (2-41)



2.2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์

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

Sharma, V.K. และคณะ (1998) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์เรต ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆกัน พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น มีค่า Energy of activation 38.9 ± 1.0 กิโลจูลต่อโมลที่พีเอช 9.0 และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-42)



การทดลองที่พีเอช 7.5 9.0 และ 12.0 พบว่า ที่พีเอช 9.0 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ปริมาณโดยโมลของเปอร์เรตกับไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่พีเอช 7.5 จะพบไซยาเนตและไนไตรท์เป็นสารผลิตภัณฑ์และที่พีเอช 9.0 และ 12.0 จะพบเพียงไนไตรท์โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ ที่ถูกออกซิไดซ์ต่อไนไตรท์เป็น 1 ต่อ 1 สำหรับการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงชุบโลหะพบว่ามีประสิทธิภาพดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆได้

Dursun, A.Y. Calik, A. และ Aksu, Z. (1999) ศึกษาการย่อยสลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(II) หรือ เฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanide) โดยใช้จุลินทรีย์ *Pseudomonas Fluorescens* ในสภาวะที่มีกลูโคสและออกซิเจน โดยเป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากพีเอช ความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ ความเข้มข้นของกลูโคส และอัตราการเติมอากาศ ทดลองในถังหมักแบบbatch ผลการทดลองโดยใช้เฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดียวพบว่าไม่เกิดการเติบโตของจุลินทรีย์ ส่วนการทดลองโดยใช้กลูโคสร่วมกับเฟอร์โรไซยาไนด์โดยมีเฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดียวพบว่าจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้และเกิดการย่อยสลายของเฟอร์โรไซยาไนด์ โดยที่สภาวะที่มีพีเอช 5 อัตราการกวน 150 รอบต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.15 vvm พบว่ามีอัตราการย่อยสลายสูงสุด 30.7 มิลลิกรัมต่อกรัมกลูโคสต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลูโคส 465 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจุลินทรีย์จะใช้กลูโคสเป็นสารอาหารหลัก การขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์จะเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โมเดลทางคณิตศาสตร์แบบ Non-competitive substrate inhibition ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่พอดิที่สุคคำนวณโดยการใช้วิธี Non-linear regression

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

Kurama, H. และ Catalarik, T. (2000) ศึกษาการใช้เรซิน Lewatit MP62 กำจัดสารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีออกจากน้ำยาชะแร่ การทดลองทำโดยใช้คอลัมน์แก้ว และใช้น้ำตัวอย่างจากบริษัท 100th 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. และได้นำถ่านที่ดูดซับเงินและนิกเกิลแล้วไปทำการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยระบบแบบคอลัมน์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเงินมีความจุมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับนิกเกิล 2 เท่า และมากกว่าถ่านเปล่าๆถึง 4 เท่า ซึ่งคาดว่า การกำจัดไซยาไนด์เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูป $Ag(CN)_2^-$ และ $Ni(CN)_4$ ผลการทดลองกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ Calcinations ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

Adhoum, N. และ Monser, L. (2002) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ ทองแดง สังกะสี และ โครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดย Tetrabutyl Ammonium (TBA-Carbon) และ Sodium Diethyl Dithiocarbamate (SDDC-Carbon) โดยใช้ TBA-Carbon ในการดูดซับไซยาไนด์ และ ใช้ 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

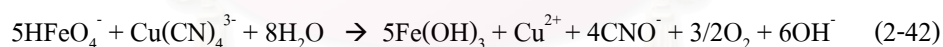
Aksu, Z. และ Gulen, H. (2002) ศึกษาการกำจัดเหล็ก(III) และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) โดยวิธี Biosorption ด้วยเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* ในระบบแบบที่ละเท ที่มีค่าพีเอช 2 เพื่อดูความสามารถในการดูดซับสารทั้ง 2 ชนิดนี้ในลักษณะการดูดซับสารเดี่ยว (Single Component) และ การดูดซับสองสาร (Dual Component) ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารสูงขึ้นไปถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับเหล็ก(III) และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) ในการทดลองการดูดซับสารเดี่ยวพบว่า ค่า Biosorption rate และ ค่า Equilibrium uptake เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นและผลการทดลองที่ได้เข้ากันได้พอดีกับ Langmuir Model และ Redlich-Peterson Model และในการทดลองการดูดซับสองสาร พบว่า ค่าequilibrium uptake ของเหล็ก(III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) เพิ่มขึ้น และ ค่า Equilibrium uptake ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก(III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเหล็ก(III)เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาแบบเสริมกัน (Synergistic Interaction)

Chiang, K. Amal, R. และ Tran, T. (2003) ได้ศึกษาถึงกลไกในออกซิไดซ์ไซยาไนด์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์โดยทดลองการแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวไททาเนียมด้วยฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ทราบว่า การออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ไม่ได้เกิดขึ้น

โดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH^{*}) แต่เกิดขึ้นโดยเรดิคัลของพื้นผิวไททาเนียม (≡TiO^{*}) และที่ความเร็วในการลดของไฮยาไนด์ต่ำเนื่องจาก 1.การดูดติดของไฮยาไนด์ที่พื้นผิวของไททาเนียมต่ำ 2.ไม่มีปฏิกิริยาที่เกิดจากไฮยาไนด์กับไฮดรอกซิลเรดิคัล 3.เกิดการรวมตัวกันใหม่ของเรดิคัลของพื้นผิวไททาเนียมอย่างรวดเร็ว

Parga, J. R. Shukla, S. S. และ Carrillo-Pedroza, F. R. (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดไฮยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้วิธีการออกซิไดซ์โดยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO₂) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และการออกซิไดซ์ด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า การใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดไฮยาไนด์อิสระได้ดีทุกพีเอช ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง การใช้โอโซนสามารถกำจัดไฮยาไนด์อิสระได้ดีและอัตราการเกิดปฏิกิริยารับขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซนเท่านั้น และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีโดยเฉพาะเมื่อใช้แสงอาทิตย์

Sharma, V.K. และคณะ (2005) ศึกษาการใช้เฟอร์เรตกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไฮยาไนด์กับทองแดง(I) หรือ คอปเปอร์(I)ไฮยาไนด์ ซึ่งพบได้มากในน้ำเสียจากเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งมีความเสถียรสูงกว่าไฮยาไนด์อิสระ และมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-42) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์(I)ไฮยาไนด์ 5:1



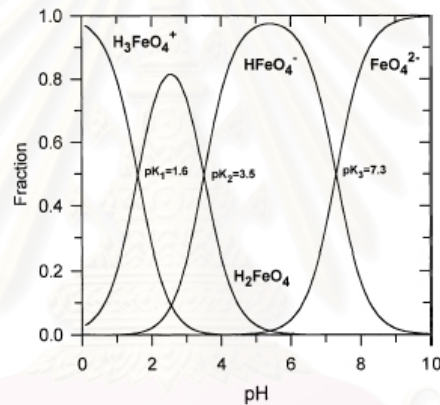
ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของเหมืองแร่ทองคำที่สังเคราะห์จาก โซโอไฮยาเนตไฮยาไนด์ และ คอปเปอร์(I)ไฮยาไนด์ พบว่า เฟอร์เรตทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์(I)ไฮยาไนด์ในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์(I)ไฮยาไนด์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ผลการทดลองกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ ที่มีความเข้มข้นไฮยาไนด์ทั้งหมด 17.2 มก./ล.พบว่า สามารถกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมดได้ประมาณ 70 % ที่เฟอร์เรต 10 มก./ล. และต้องใช้เฟอร์เรต ถึง 1200 มก./ล. เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99 %

2.3 เฟอร์เรต

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต

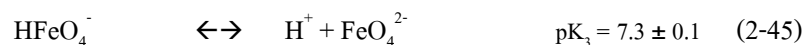
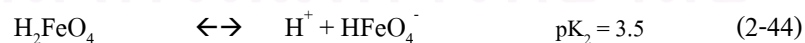
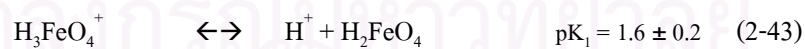
เมื่อ โปตัสเซียมเฟอร์เรตถูกเติมลงในน้ำจะแตกตัวออกได้เฟอร์เรต (Fe^{6+}) มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ และเป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา และ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่หน้างานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เพราะทำให้ใช้งานได้สะดวกและมีข้อจำกัดน้อยกว่า

2.3.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต



รูปที่ 2.4 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ

จากการศึกษารูปแบบของเฟอร์เรตไอออนในสารละลายที่พีเอชต่างๆ พบว่ามี 4 รูปแบบ ดังสมการที่ (2-43) ถึง (2-45) (Sharma, 2002)



เมื่อนำค่าคงที่การแตกตัว (pK) มาคำนวณจะได้กราฟการแตกตัวของเฟอร์เรตดังรูปที่ 2.4 จากกราฟจะเห็นว่าในน้ำธรรมชาติและน้ำที่เป็นด่างจะพบเฟอร์เรตอยู่ในรูป HFeO_4^- และ FeO_4^{2-} เป็นส่วนมาก

2.3.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์

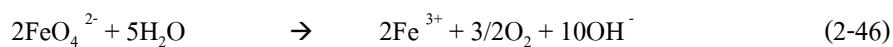
กำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของเฟอร์เรตมีค่าสูงโดยมีค่าระหว่าง +0.7 V ถึง +2.2 V ในสารละลายเบสและกรดตามลำดับ ซึ่งนับว่าแรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Jiang และ Lloyd, 2002)

สารเคมี	ปฏิกิริยา	E° (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	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	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

2.3.1.3 ความเสถียรของเฟอร์เรต

ความเสถียรของเฟอร์เรต คือความคงทนต่อการสลายตัวตามธรรมชาติ การสลายตัวของเฟอร์เรตเกิดจากการที่เฟอร์เรต (Fe^{6+}) ทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังสมการที่ (2-46) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

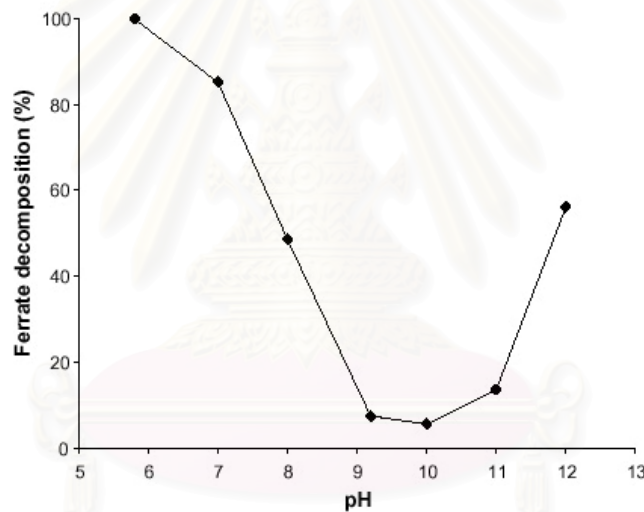


2.3.1.3.1 ผลของความเข้มข้นต่อความเสถียร

เฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงในสารละลายที่เจือจาง มีรายงานว่าที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.025 โมลาร์ จะพบเฟอร์เรตเหลืออยู่ประมาณ 90% เมื่อที่เวลา 1 ชั่วโมง แต่ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.030 โมลาร์ เฟอร์เรตจะสลายตัวไปทั้งหมดในเวลา 1 ชั่วโมง (Jiang และ Lloyd, 2002)

2.3.1.3.2 ผลของพีเอชต่อความเสถียร

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



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ (Graham และคณะ, 2004)

2.3.1.3.3 ผลของไอออนต่อความเสถียร

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ KOH ในสารละลายมีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต โดยเมื่อความเข้มข้นของ KOH สูงขึ้นค่าความเสถียรจะมีค่ามากขึ้น สำหรับสารอื่นๆ เช่น เกลือของไนเตรท กับ ทองแดง เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แบริยม เซอร์เนียม 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)

2.3.2 การเตรียมเฟอร์เรต

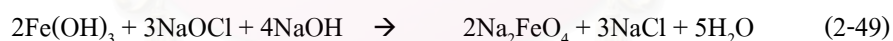
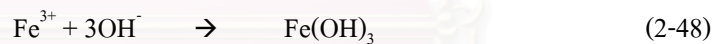
2.3.2.1 วิธีการ Dry Oxidation

เป็นวิธีการเก่าที่ยากและอันตรายเพราะสามารถเกิดการระเบิดได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเตรียมเฟอร์เรตด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการผสมเฟอร์ริกออกไซด์กับโปตัสเซียมเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 350-370 °C ภายใต้สภาวะที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น FeO_5^{4-} และจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น FeO_4^{2-} ดังสมการที่ (2-47)



2.3.2.2 วิธีการ Wet Oxidation

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยการออกซิไดซ์เฟอร์ริกให้กลายเป็นเฟอร์เรตภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง โดยเฟอร์เรตที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการล้างและทำให้แห้งอีกครั้งเพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความเสถียรสูง ในระยะแรกเป็นการเตรียมในรูปของ โซเดียมเฟอร์เรต ซึ่งทำได้ยากเนื่องจาก โซเดียมเฟอร์เรตมีความสามารถในการละลายสูง ต่อมาจึงได้พัฒนาเป็นรูปของโปตัสเซียมเฟอร์เรต ที่เตรียมได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่า การเตรียมโปตัสเซียมเฟอร์เรตทำได้ตามสมการที่ (2-48) ถึง (2-50)

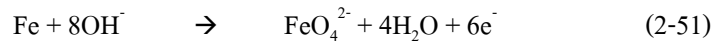


ภายหลังได้มีการใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ (2-49) ทำให้ได้เฟอร์เรตในปริมาณที่มากขึ้น

2.3.2.3 วิธีการ Electro-Chemical

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยใช้กระแสไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนด และใช้ KOH เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังสมการที่ (2-51) ถึง (2-54) ปริมาณเฟอร์เรตที่ได้มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟและชนิดของขั้วแอโนดเป็นอย่างมาก

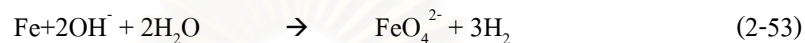
Anode reaction



Cathode reaction



Overall reaction



การเตรียมเฟอร์เรตในรูปของโซเดียมเฟอร์เรตทำได้ยากเนื่องจากความสามารถในการละลายสูง ซึ่งการเตรียมในรูปของโปตัสเซียมเฟอร์เรตทำได้ง่ายกว่า การเตรียมเฟอร์เรตในปริมาณมากทำได้ยากเนื่องจากความต้องการความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นสูงและยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่างเช่น ชนิดของขั้วแอโนดในวิธีการ Electrochemical เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ การแยกส่วนที่ตกตะกอน (Isolation process) ในวิธีการ Wet Oxidation นอกจากนี้การใช้วิธี ยังมี การเกิดก๊าซคลอรีนเนื่องจากไฮโปคลอไรต์ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ดังนั้นการเตรียมเฟอร์เรตจึงต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวัง

2.3.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

2.3.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิดดังตารางที่ 2.7 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับพีเอชเป็นอย่างมาก และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้

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

ตารางที่ 2.7 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

Contaminant	pH	$k, M^{-1} s^{-1}$	$t_{1/2}$	Reference
Hydrogen sulfide	9.0	7.4×10^5	2.7 ms	Sharma et al., 1997
<i>p</i> -Hydroquinone	9.0	2.0×10^5	10.0 ms	Bielski, 1991
2-Mercaptoethanesulfonic acid	9.0	3.0×10^4	66.7 ms	Read et al., 1998b
2-Mercaptobenzoic acid	10.0	2.5×10^4	89.0 ms	Read et al., 1998b
3-Mercaptopropionic acid	9.0	1.3×10^4	0.15 s	Read and Wyand, 1998c
Methylhydrazine	9.0	9.8×10^3	0.20 s	Johnson and Hornstein, 1994
Aniline	9.0	6.2×10^3	0.32 s	Sharma and Hollyfield, 1995b
Hydrazine	9.0	5.6×10^3	0.35 s	Johnson and Hornstein, 1994
Thioacetamide	9.0	5.5×10^3	0.36 s	Sharma et al., 2000
Ferrocyanide	9.0	4.7×10^3	0.42 s	Johnson and Sharma, 1999
Thiourea	9.0	3.4×10^3	0.59 s	Sharma et al., 1999
<i>p</i> -Toluidine	9.0	1.3×10^3	1.5 s	Sharma and Hollyfield, 1995b
Cysteine	12.4	7.6×10^2	2.6 s	Sharma and Bielski, 1991
Thiosulfate	9.0	7.2×10^2	2.8 s	Johnson and Read, 1996
Glyoxylic acid	8.0	7.0×10^2	2.9 s	Carr et al., 1985
Cyanide	9.0	6.2×10^2	3.2 s	Sharma et al., 1998a
Glyoxal	8.0	3.0×10^2	6.7 s	Carr et al., 1985
Dimethylamine	8.0	2.0×10^2	10.0 s	Carr et al., 1985
Benzenesulfinate	9.0	1.4×10^2	14.3 s	Johnson and Read, 1996
Methionine	9.0	1.3×10^2	15.4 s	Sharma and Bielski, 1991
Cystine	12.4	1.2×10^2	16.7 s	Sharma and Bielski, 1991
Sarcosine	8.0	1.2×10^2	16.7 s	Carr et al., 1985
Iminodiacetic acid	8.0	1.0×10^2	20.0 s	Carr et al., 1981
Glycine	8.0	1.0×10^2	20.0 s	Sharma and Bielski, 1991
Diethylsulfide	8.0	1.0×10^2	20.0 s	Carr et al., 1985
Thiodiethanol	8.0	1.0×10^2	20.0 s	Carr et al., 1985
Phenol	9.0	8.0×10^1	25.0 s	Carr et al., 1985
Thioxane	9.0	5.8×10^1	34.5 s	Read et al., 1998a
<i>p</i> -Aminobenzoic acid	9.0	4.3×10^1	46.9 s	Sharma and Hollyfield, 1995b
Methylamine	8.0	4.0×10^1	50.0 s	Carr et al., 1985
<i>p</i> -Nitroaniline	9.0	3.0×10^1	1.10 min	Sharma and Hollyfield, 1995b
Chloral	8.0	6.0×10^0	5.55 min	Carr et al., 1985
Glycolaldehyde	8.0	3.0×10^0	11.1 min	Carr et al., 1985
Dimethylglycine	8.0	2.5×10^0	13.3 min	Carr et al., 1985
Trimethylaldehyde	8.0	2.0×10^0	16.7 min	Carr et al., 1985
Nitriloacetic acid	8.0	2.0×10^0	16.7 min	Carr et al., 1985
<i>N</i> -methyliminodiacetic acid	8.0	2.0×10^0	16.7 min	Carr et al., 1985
Dimethylsulfoxide	8.0	1.0×10^0	33.3 min	Carr et al., 1985
Nitrite	9.0	6.2×10^{-1}	37 min	Sharma et al., 1998a
Diethylamine	8.0	7.0×10^{-1}	47.6 min	Carr et al., 1985
Formaldehyde	8.0	5.0×10^{-1}	1.11 h	Carr et al., 1985
Acetaldehyde	8.0	4.0×10^{-1}	1.39 h	Carr et al., 1985
Formic acid	8.0	4.0×10^{-1}	1.39 h	Carr et al., 1985
Glycolic acid	8.0	4.0×10^{-1}	1.39 h	Carr et al., 1985
Ammonia	9.0	1.7×10^{-1}	3.27 h	Carr et al., 1985
Oxalic acid	8.0	1.0×10^{-1}	5.55 h	Carr et al., 1985
Neopentyl alcohol	8.0	1.0×10^{-1}	5.55 h	Carr et al., 1985
Ethyl alcohol	8.0	8.0×10^{-2}	6.94 h	Carr et al., 1985
Isopropyl alcohol	8.0	6.0×10^{-2}	9.26 h	Carr et al., 1985
Ethylene glycol	8.0	4.0×10^{-2}	13.9 h	Carr et al., 1985
Methyl alcohol	8.0	3.0×10^{-2}	18.5 h	Carr et al., 1985

^aBased on five-fold higher concentration of Fe(VI) than contaminant (100 μ M).

2.3.3.2 การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีน เป็นวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ มีการทดลองการใช้สารอื่นๆในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไอโอดีน และ โอโซน พบว่ามีสารผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน

มีรายงานการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการฆ่าเชื้อโรคพบว่า สำหรับแบคทีเรีย เฟอร์เรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียโดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในอีกการทดลองหนึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้น 8 มก./ล. (as FeO_4^{2-}) เฟอร์เรตสามารถกำจัด Total Coli form 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 ที่ 1 มก./ล. (as K_2FeO_4) เฟอร์เรตสามารถกำจัดไวรัสได้ถึง 99% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งคือ เฟอร์เรตจะไม่มีสารตกค้าง (Residual) เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

2.3.3.3 การโคแอกกูเลชัน

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการ โคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อกำจัดความขุ่นได้โดยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่เกิดขึ้นจากเฟอร์เรต ซึ่งตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ (2-55)



มีรายงานว่า เฟอร์เรตสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ในเวลาเพียง 1 นาที ในขณะที่เกลือของเฟอร์ริกใช้เวลาถึง 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถใช้ในการกำจัดโลหะในน้ำได้หลายชนิด เช่น เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม และปรอท และยังมีการทดลองที่พบว่า เฟอร์เรตสามารถใช้ในการบำบัดสารกัมมันตรังสี เช่น อะเมริซิยม (Americium) และ พลูโตเนียม (Plutonium) ในน้ำได้อีกด้วย (Jiang และ Lloyd, 2002)

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

2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต

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

Ma, J. และ Liu, W. (2002) ได้ทำการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สาหร่ายในน้ำก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีโคแอกกูเลชัน การทดลองใช้น้ำตัวอย่าง 2 ชนิดคือ น้ำดิบจริงจากทะเลสาบซึ่งมีสาหร่ายอยู่มาก และ น้ำดิบสังเคราะห์ที่มีสาหร่าย 2 ชนิด คือ Chlorococoum และ Scenedesmus ซึ่งเป็นสาหร่ายที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติพบว่า การออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรตในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยใช้สารส้มเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในน้ำดิบจริง นอกจากนั้น การเติมเฟอร์เรตจะทำให้เซลล์สาหร่ายตาย (Inactivate) และปล่อยสารไปโอโพลิเมอร์ออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดกลไก Bridging ช่วยในการโคแอกกูเลชัน และการเติมเฟอร์เรต จะทำให้เกิดตะกอนของ $Fe(OH)_3$ เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Yuan, B.L. Qu, J.H. และ Fu, M.L. (2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารไมโครไซติน (Microcystin) ที่เกิดจากไซยาโนแบคทีเรีย โดยการใช้เฟอร์เรตพบว่า สามารถกำจัดสาร ไมโครไซตินได้อย่างดี โดยประสิทธิภาพจะแปรตามความเข้มข้นของเฟอร์เรต พีเอช และ เวลาสัมผัส นอกจากนี้ยังได้สารผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ที่ไม่เป็นพิษและยังช่วยเพิ่มตะกอนได้อีกด้วย

Qu, J. H. และคณะ (2003) ได้ทำการทดลองการกำจัดกรดฟูลวิก (Fulvic Acid) โดยใช้เฟอร์เรต พบว่าที่ ความเข้มข้นของกรดฟูลวิก 2 มก./ล. สามารถกำจัดถึง 90 % โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์เรตต่อกรดฟูลวิกเท่ากับ 12 ต่อ 1 และยังพบว่าปริมาณกรดสามารถลดลงได้อีกเนื่องจากการดูดติดในการตกตะกอนของเฟอร์ริก และเมื่อใช้ร่วมกับการตกตะกอนโดยโพลิอะลูมินัมคลอไรด์ หรือ ไอรอนคลอไรด์ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 100%

Sharma, V. K. และคณะ (2000) ได้ทำการทดลองการกำจัด ไธโออะเซตามายด์ (Thioacetamide) โดยใช้เฟอร์เรต ทำการทดลองที่พีเอช 9.14-12.0 อุณหภูมิ 15- 35 °C ใน 0.01 M ฟอสเฟส พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่ 1 ทั้ง 2 สาร อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยไธโออะเซตามายด์ จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็น ซัลฟีนิล (sulfenyl) ซัลฟีนิก (sulfenic) และ กรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) และสุดท้ายกลายเป็น ซัลเฟต (sulfate) และ อะเซตามายด์ (acetamide)

Chao, A.C. Luca, S.J. และ Idle, C.N. (1996) ได้ศึกษาการเติมเฟอร์เรตลงในตะกอนอินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งในการจัดการตะกอนจะมีปัญหาเรื่องกลิ่น พบว่าสามารถลดสารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้โดยเฉพาะ แอมโมเนีย และ ซัลไฟด์ โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท และ ซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟต ทำให้สามารถนำตะกอนอินทรีย์ไปจัดการต่อได้โดยไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น

Graham, N. และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟีนอลและคลอโรฟีนอล 3 ชนิด คือ 4 -Chlorophenol (CP) 2,4-Dichlophenol (DCP) และ 2,4,6-Trichlorophenol (TCP) ด้วยเฟอร์เรต เนื่องจากค่ารีดอกโพเทนเชียล ความเสถียรของเฟอร์เรต และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวได้จะขึ้นอยู่กับพีเอช จึงทำการทดลองในช่วงพีเอช 5.8-11.0 และอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อสารประกอบในช่วง 1 ต่อ 1 ถึง 8 ต่อ 1 และใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนสำหรับสารที่ไม่แตกตัว ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสารประกอบต่างๆด้วยเฟอร์เรตจะขึ้นอยู่กับพีเอชเป็นอย่างมากโดยค่าพีเอชที่เหมาะสมลดลงจากฟีนอล CP DCP และTCP ตามลำดับ และมีค่าอัตราการสลายตัวของพีเอชเหมาะสมใกล้เคียงกัน ผลการทดลองกับฟีนอลและคลอโรฟีนอลชี้ให้เห็นว่า จำนวนอะตอมของคลอรีนในโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ไม่แตกตัวเพิ่มขึ้น และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวลดลง

Sharma, V.K. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเฟอร์เรตพบว่า เฟอร์เรตที่ได้จากการแตกตัวของโปตัสเซียมเฟอร์เรตมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรสูง มีกำลังในการออกซิไดซ์สูง มีความเลือกทำปฏิกิริยา และได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้โปตัสเซียมเฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ปลอดภัยสำหรับน้ำธรรมชาติ ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรม เฟอร์เรตมีกำลังในการออกซิไดซ์ +2.2 ถึง +0.7 โวลต์ ในสารละลายกรดและเบสตามลำดับ การสลายตัวของเฟอร์เรตเป็นเฟอร์ริกและออกซิเจนเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรดและสลายตัวได้ช้าที่พีเอช 10 และในสารละลายเจือจาง การสลายตัวจะเกิดได้ช้า

ที่สุดที่พีเอช 9.4-9.7 เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่เลือกทำปฏิกิริยาและสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารอินทรีย์หลายชนิดโดยที่ยังคงได้เฟอร์ริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ เฟอร์เรตเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเทคโนโลยีสะอาด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำ Super-iron Batteries และการบำบัดน้ำเสีย สารปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียสามารถกำจัดได้โดยใช้เฟอร์เรตโดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาทีโดยที่ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ยังเป็นสารฆ่าเชื้อโรค Antifulant และสารรวมตะกอน จึงนับได้ว่าเป็นสารที่สามารถใช้งานในทางบำบัดน้ำเสียได้อย่างอนกประสงค์

Jiang, J.Q. และ Lloyd, B. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเตรียม และ การใช้เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์และสารรวมตะกอน ในงานด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า จากคุณสมบัติที่พิเศษ(กำลังในการออกซิไดซ์สูง และ การเกิดเฟอร์ริกที่เป็นสารรวมตะกอน ทำให้เฟอร์เรตสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ลดรูป (Degrade) หรือกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้โดยการทำงานเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามยังไม่พบการใช้งานเฟอร์เรตในแบบ Full-Scale ในงานเกี่ยวกับน้ำ เนื่องจาก ความยุ่งยากในการเตรียม อัตราการเกิด (Yield) ต่ำ การเกิดความเป็นเสถียรที่เป็นผลจากเทคนิคการเตรียม และ การศึกษาที่จะชี้แนะถึงความสามารถและข้อดีของมัน ในงานด้านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาขั้นพื้นฐานจำเป็นต้องการค้นหาวิธีการผลิตแบบใหม่ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดและความเสถียรสูง และการหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรต์และคลอรีนในการผลิต ทั้งนี้ประโยชน์ของเฟอร์เรตในงานด้านการผลิตน้ำดื่มยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบและงานด้านนี้เป็นส่วนที่น่าสนใจในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และ สารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

3.1.2 สารเคมี

1. โปตัสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide, KCN): Ajax ,AR 96%
2. โปตัสเซียมไซยาเนต (Potassium Cyanate, KCNO): Aldrich, 96%
3. โปตัสเซียมไนไตรท์ (Potassium Nitrite, KNO₂): Sigma-Aldrich, A.C.S.reagent 96%
4. โปตัสเซียมเฟอร์เรต (Potassium Ferrate, K₂FeO₄): Dr.Sharma, 68% and 86%
5. โซเดียมเมตาอาร์เซไนท์ (Sodium meta Arsenite, NaAsO₂): Fluka, purum 99%
6. ซิงค์ไนเตรท (Zinc Nitrate, Zn(NO₃)₂.6H₂O): Ajax, 98%
7. โซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate, CH₃COONa): BDH, AR 99%
8. เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, C₂H₈N₂): Panreac, 99%
9. กรดไนตริก (Nitric Acid, HNO₃): Carlo ERBA, 65%
10. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCL): Carlo ERBA, 37%
11. กรดฟอสฟอริก (Orthophosphoric Acid, H₃PO₄): Carlo ERBA, 85%
12. โซเดียมเตตระโบรเอต (Sodium tetraBorate, Na₂B₄O₇.10H₂O): BDH, 99.5%

3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และ สารละลายเฟอร์เรต

3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ

เตรียมสารละลายไว้เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ และ การหุขุดปฏิบัติการ โดยสารละลายที่เตรียมไว้มีดังนี้

1) สารละลายไซยาไนด์

สารละลายไซยาไนด์ความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 10,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำไปตีสเข็มไซยาไนด์มาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (เพื่อขประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

2) สารละลายสังกะสี

สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 200 1,000 2,000 3,000 และ 4,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำซิงค์ไนเตรทมาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ และ 1.2 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง

4) สารละลายอาร์เซไนท์

สารละลายอาร์เซไนท์โดยความเข้มข้นอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมอาร์เซไนท์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการหุขุดปฏิบัติการ

5) สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต ความเข้มข้นอย่างละ 0.010 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรตและกรดฟอสฟอริกมาละลายในน้ำปราศจากไอออน

สารละลายบอร์เรต ความเข้มข้น 0.010 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรต มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายทั้ง 2 ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

ในการทดลอง การผสมไซยาไนด์กับเฟอร์เรตจะทำโดยการผสมสารละลายทั้ง 2 ในปริมาณ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์และสารละลายเฟอร์เรตในแต่ละครั้งจึงต้องเตรียมที่ความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ เพื่อให้มีความเข้มข้นเท่าที่ต้องการเมื่อมีการผสมกัน การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์จะเตรียมขึ้นจากสารละลายเข้มข้นและสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ โดยจะเตรียมก่อนการใช้งานแต่ละครั้งและปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย โดยมีวิธีการผสมดังตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การผสมน้ำเสียดังเคราะห์ของไซยาไนด์ในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.

ความเข้มข้นที่กำหนด		สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า				
ไซยาไนด์	สังกะสี	สารละลายไซยาไนด์		น้ำปราศจากไอออน	สารละลายบัฟเฟอร์	
ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มล.	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.
50	0	1,000	5	5	0.005	40
100	0	2,000	5	5	0.005	40
250	0	5,000	5	5	0.005	40
500	0	10,000	5	5	0.01	40

ตารางที่ 3.2 การผสมน้ำเสียดังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสีในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.

ความเข้มข้นที่กำหนด		สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า					
ไซยาไนด์	สังกะสี	สารละลายไซยาไนด์		สารละลายสังกะสี		สารละลายบัฟเฟอร์	
ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.
500	10	10,000	5	200	5	0.01	40
500	50	10,000	5	1,000	5	0.01	40
500	100	10,000	5	2,000	5	0.01	40
500	150	10,000	5	3,000	5	0.01	40
500	200	10,000	5	4,000	5	0.01	40

3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรตจากเอกสารในบทที่ 2 และจากการทดลองที่มีรายละเอียดดังในภาคผนวก ก. พบว่าเฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9 ถึง 11 และ บัฟเฟอร์ หรือ ไอออนต่างๆ มีผลทำให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง ดังนั้นวิธีการเตรียมสารละลายที่ดีที่สุด คือ การเตรียมในน้ำปราศจากไอออนและไม่ต้องปรับพีเอช เพื่อให้เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงที่สุด และจะเตรียมสารละลายก่อนใช้งานเท่านั้นเพราะเฟอร์เรตมีการสลายตัวเร็วและสลายตัวไปตลอดเวลา โดยเตรียมด้วยความเข้มข้น 2 เท่า เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรตตรวจวัดได้ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จะแสดงเป็นค่าการดูดซับแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังในภาคผนวก ก. โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับสารละลายเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 ไมโครโมลาร์ ค่าการดูดซับแสงที่เทียบเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรตที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง

ความเข้มข้นที่กำหนด	ความเข้มข้น 2 เท่า	ค่าการดูดซับแสง
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไม่มีหน่วย
50	100	0.115
75	150	0.172
100	200	0.230
150	300	0.345
200	400	0.460
250	500	0.575
375	750	0.862
500	1,000	1.150

3.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

การทดลองต่างๆจะเป็นลักษณะการทดลองที่ต่อเนื่องกัน โดยการทดลองชุดแรกๆจะใช้ค่าตัวแปรเหมาะสมจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ และนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการทดลองชุดต่อไป โดยการทดลองส่วนใหญ่จะเป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

ก. การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

ก-1 การทดลองการกำจัดไซยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ก-1.1 ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์

ก-1.2 ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

ก-1.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของไซยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์

ก-2 การทดลองถึงผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ก-2.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์

ก-2.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มีไซยาไนต์

ก-2.3 ผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา

ก-2.4 ศึกษาผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ข. การทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง

ข-1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบสังกะสี

ข-2 ศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ และสารผลิตภัณฑ์

การทดลองแต่ละชุดจะมีตัวแปรคงที่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามที่แตกต่างกันตามแต่วัตถุประสงค์ในการทดลองนั้นๆ โดยมีตัวแปรสำคัญต่างๆดังหัวข้อที่ 3.4 และมีวิธีการทดลองดังหัวข้อที่ 3.5

3.4 ตัวแปรในการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ (ก.)

3.4.1.1 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดไขมันด้วยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (ก-1)

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไขมันในน้ำเสียต่อการกำจัดไขมันในน้ำเสียและสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.1)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไขมันในน้ำ	1. 1:1
2. บัฟเฟอร์	2. ฟอสเฟต-บอร์เรต
3. เวลา	3. สิ้นสุดปฏิกิริยา
4. อุณหภูมิ	4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช	1. พีเอช 8 9 10 11 และ 12
2. ความเข้มข้นไขมันในน้ำ	2. ความเข้มข้นไขมันในน้ำ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. พีเอช
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันในน้ำ	2. ความเข้มข้นของไขมันในน้ำ ไขมันตกในไตรท์และในไตรท์

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 (ก-1.2)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไขมันในน้ำ	1. 1:1
2. บัฟเฟอร์	2. ฟอสเฟต-บอร์เรต
3. ความเข้มข้นไขมันในน้ำเริ่มต้น	3. 100 ไมโครโมลาร์
4. อุณหภูมิ	4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช	1. พีเอช 8 9 10 11 และ 12
2. เวลา	2. 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. พีเอช
2. เวลาสิ้นสุดปฏิกิริยา	2. ความเข้มข้นของไขมันในน้ำ

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.3)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช 2. บัฟเฟอร์ 3. เวลา 4. อุณหภูมิ	1. พีเอชเหมาะสม 2. ฟอสเฟต-บอร์เรต 3. สิ้นสุดปฏิกิริยา 4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 2. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	1. 1:1 1.5:1 1 และ 2:1 2. ความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์และไนเตรท

3.4.1.2 ตัวแปรในการทดลองผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (ก-2)
ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.7 ถึงตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์ (ก-2.1)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช 2. อุณหภูมิ	1. พีเอชเหมาะสม 2. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 2. ตัวกลาง	1. ความเข้มข้น 10 50 และ 100 ไมโครโมลาร์ 2. น้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต สารละลายฟอสเฟต และ สารละลายบอร์เรต
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. ความเข้มข้นของสังกะสีหลังการกรอง 2. พีเอช

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรในการศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มีไซยาไนด์ (ก-2.2)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 2. บัฟเฟอร์ 3. อุณหภูมิ	1. 500 ไมโครโมลาร์ 2. บัฟเฟอร์ที่เหมาะสม 3. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไซยาไนด์	1. พีเอช 8 9 10 11 และ 12 2. 0 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. ความเข้มข้นของสังกะสีหลังการกรอง 2. พีเอช

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษาผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา (ก-2.3)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 2. เวลา	1. 500 ไมโครโมลาร์ 2. สิ้นสุดปฏิกิริยา
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นสังกะสี 3. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	1. พีเอชเหมาะสม 2. 0 และ ความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว 3. 0.2:1 0.4:1 0.6:1 0.8:1 และ 1:1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรในการศึกษาผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (ก-2.4)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น ความเข้มข้นสังกะสี อุณหภูมิ 	<ol style="list-style-type: none"> 1:1 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> พีเอช เวลา 	<ol style="list-style-type: none"> พีเอชเหมาะสม 0 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
<ol style="list-style-type: none"> ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง อัตราการเกิดปฏิกิริยา 	<ol style="list-style-type: none"> พีเอช ความเข้มข้นของไซยาไนด์

3.4.2 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง (ข.)

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรในศึกษาอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริง เวลา อุณหภูมิ 	เจือจางตัวอย่างเพื่อทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์ ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม <ol style="list-style-type: none"> สิ้นสุดปฏิกิริยา อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> ความเข้มข้นเฟอร์เรต 	<ol style="list-style-type: none"> 0 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
<ol style="list-style-type: none"> ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 	<ol style="list-style-type: none"> พีเอช ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาไนด์ ไนไตรท์ และ ไนเตรท โลหะหนัก

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ (ก.)

3.5.1.1 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (ก-1)

การทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาถึงผลของพีเอช และ ผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์

3.5.1.1.1 ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.1)

เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในแต่ละพีเอช เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไซยาไนด์ และศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ผลความเข้มข้นทำการแปรพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1

การทดลองที่ 3.5.1.1.1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 30 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 4 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ใน ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 ถึง 4 เติมสารละลายเฟอร์เรต 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ใน ไตรท์ไนเตรท ด้วยเครื่อง ไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของพีเอช และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และเลือกพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป



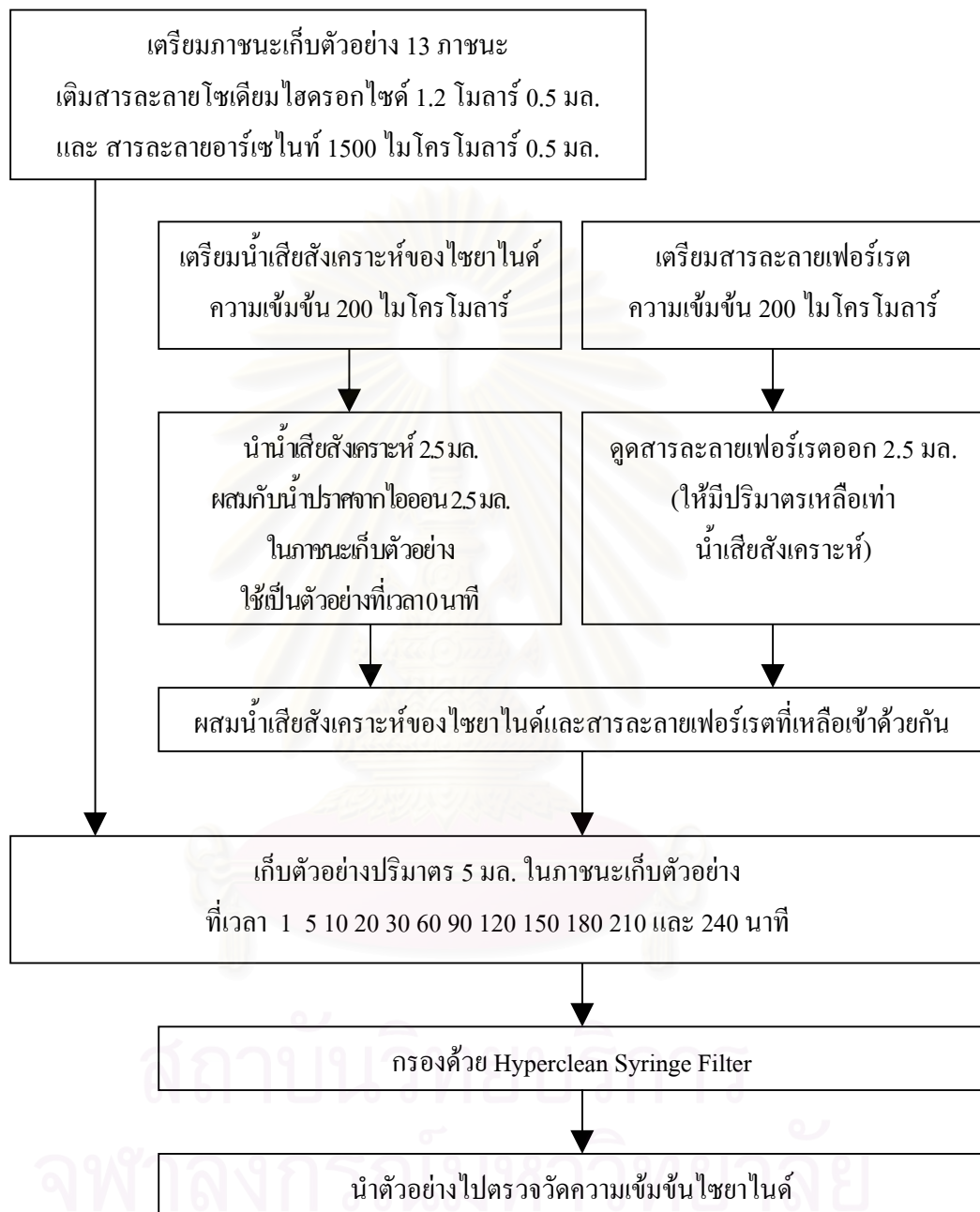
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.1 และ 3.5.1.1.2

3.5.1.1.2 ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 (ก-1.2)

เป็นการทดลองศึกษาถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่พีเอชต่างๆ เพื่อ เลือกพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไซยาไนด์ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 แปรพีเอชเท่ากับ 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที

การทดลองที่ 3.5.1.1.2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง 13 ภาชนะ โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 โมลาร์ 0.5 มล. และ สารละลายอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ 0.5 มล. ไว้ในภาชนะ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ และมีพีเอชเท่ากับพีเอชเหมาะสม ปริมาณ 50 มล.
3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ 2.5 มล. ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 2.5 มล. ในภาชนะเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างนี้ใช้เป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที
4. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาณ 50 มล.
5. ควบสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มล. เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์
6. ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.2

3.5.1.1.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพและสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.3)

เป็นการทดลองศึกษาถึงผลของอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้น ต่อประสิทธิภาพ และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ และแต่ละความเข้มข้นไซยาไนด์ จะแปรค่าอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 1.5:1 และ 2:1 การทดลองกระทำที่พีเอชเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.1.1 และ 3.5.1.1.2 โดยใช้สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

วิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะเหมือนกับการทดลองที่ 3.5.1.1.1 แตกต่างกันที่พีเอชที่เลือกใช้ และ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่านั้น จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

3.5.1.2 การทดลองผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (ก-2)

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผล พีเอช อัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีและไม่มีสังกะสี เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียของไซยาไนด์กับสังกะสี ซึ่งเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสี

3.5.1.2.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์ (ก-2.1)

เป็นการทดลองเพื่อเลือกบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสี ตัวแปรในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 10 50 และ 100 ไมโครโมลาร์ ทดลองที่พีเอชเหมาะสม โดยใช้ตัวกลางเป็นน้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต สารละลายฟอสเฟต และ สารละลายบอร์เรต และแยกส่วนที่ตกตะกอนออกโดยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

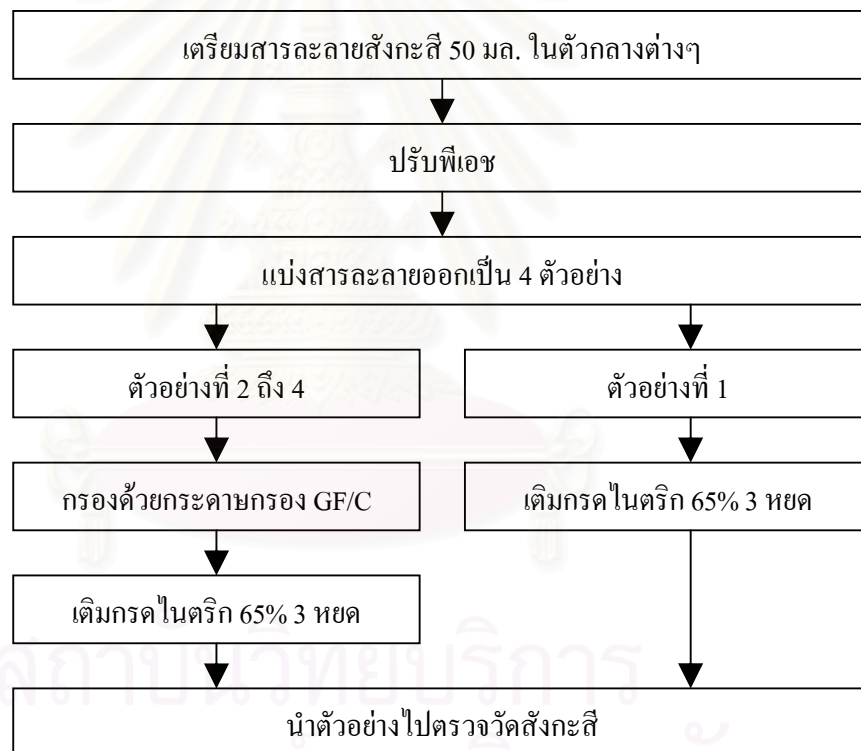
การทดลองที่ 3.5.1.2.1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายสังกะสี ในตัวกลางต่างๆ ปริมาตร 50 มล. ปรับพีเอชที่ต้องการ
2. แบ่งสารละลายออกเป็น 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 มล.
3. นำตัวอย่างที่ 1 เติมกรดไนตริก 65% 3 หยด
4. นำตัวอย่างที่ 2 ถึง 4 ไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C
5. ตรวจวัดความเข้มข้นสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

3.5.1.2.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มีไซยาไนด์ (ก-2.2)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการละลายในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีและไม่มีไซยาไนด์ ตัวแปรในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 500 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ และไม่มีไซยาไนด์ ทดลองที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้บัฟเฟอร์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.2.1 และแยกส่วนที่ตกตะกอนออกโดยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

วิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะเหมือนกับการทดลองที่ 3.5.1.2.1 จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงความสามารถในการละลายของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไซยาไนด์และคำนวณปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ



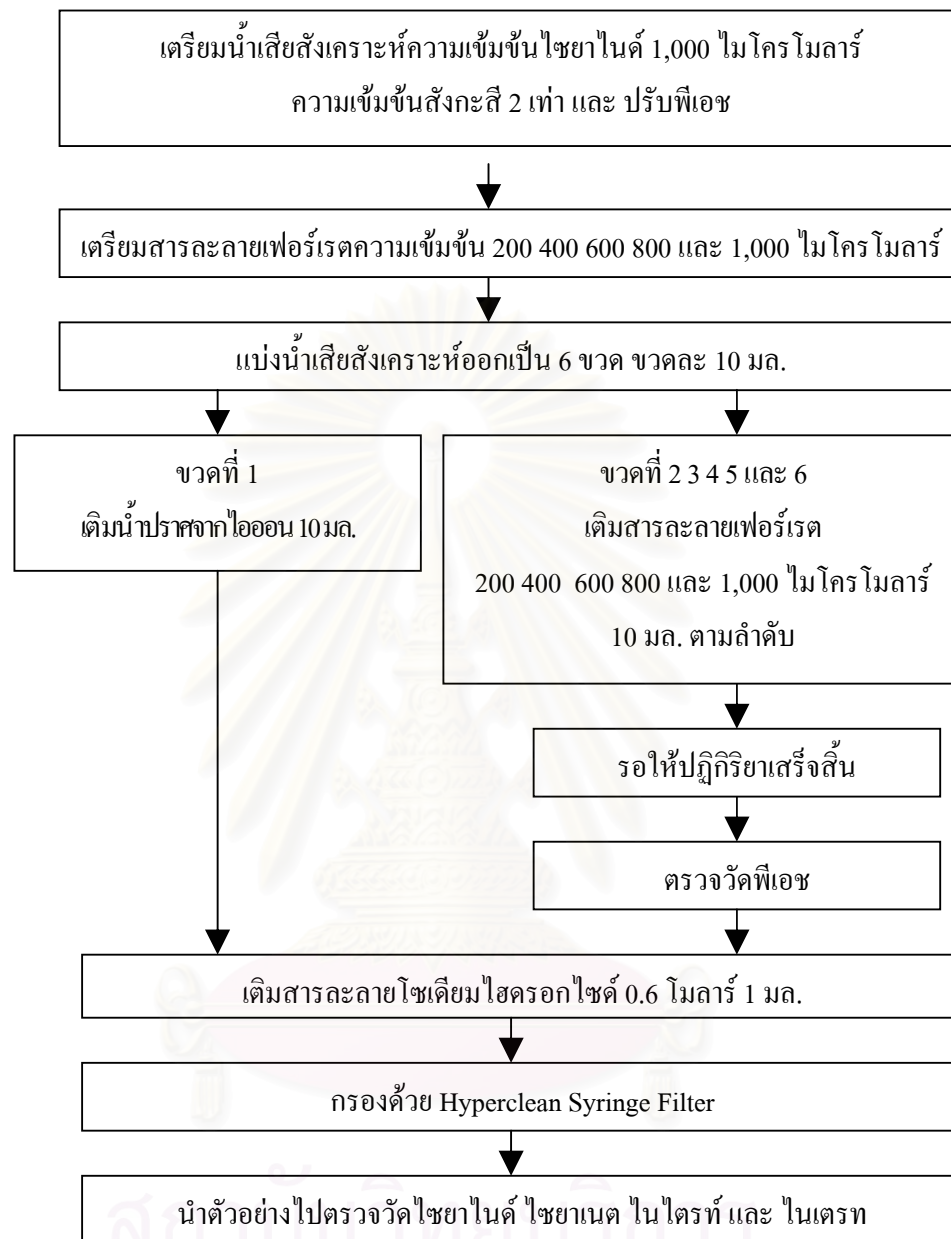
รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.1 และ 3.5.1.2.2

3.5.1.2.3 ผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดย โมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา (ก-2.3)

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา โดยจะใช้เปรียบเทียบกันในแต่ละพีเอช และเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีและมีสังกะสีอยู่ด้วย ตัวแปรในการทดลองมีความเข้มข้นของไซยาไนด์ 500 ไมโคร โมลาร์ ความเข้มข้นสังกะสีที่ 0 ไมโคร โมลาร์ และความเข้มข้นอิมตัว จากการทดลองที่ 3.5.1.2.2 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 0.2:1 0.4:1 0.6:1 0.8:1 และ 1:1 ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นได้เป็น 100 200 300 400 และ 500 ไมโคร โมลาร์ ใช้สารละลายเฟอร์เรต 0.004 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และใช้พีเอชเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1.1 และ 3.4.1.2.2 การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดในการทดลอง เพื่อให้สามารถแปรค่าอัตราส่วนเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์ได้มาก

การทดลองที่ 3.5.1.2.3 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.4 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 1,000 ไมโคร โมลาร์ และ สังกะสี 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโคร โมลาร์ ปริมาตร ความเข้มข้นละ 10 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 6 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 3 4 5 และ 6 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโคร โมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยานิด ไนไตรท์ ไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยานิด ไนไตรท์ ไนเตรท กับ ความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของสังกะสีต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และ สารผลิตภัณฑ์



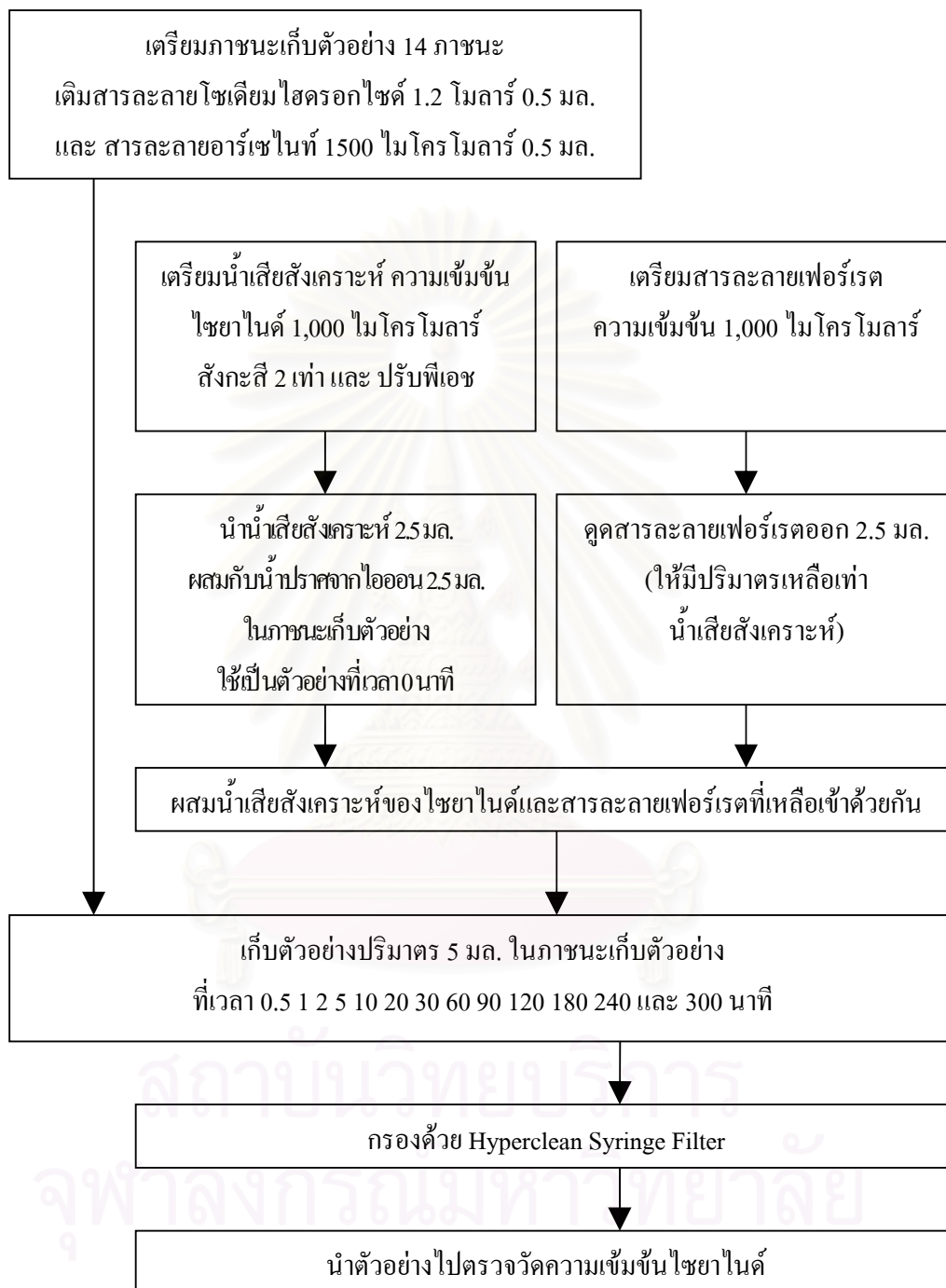
รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.3

3.5.1.2.4 ศึกษาผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (ก-2.4)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอชเหมาะสมโดยจะนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับในแต่ละพีเอช และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีและมีสังกะสีอยู่ด้วย ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นสังกะสีที่ 0 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นอิมตัว จากการทดลองที่ 3.5.1.2.2 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์เท่ากับค่าเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.2.3 ใช้พีเอชเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.1.1 และ 3.5.1.2.2 และ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที

การทดลองที่ 3.5.1.2.4 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยเติมสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 โมลาร์ 0.5 มล. และสารละลายอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ 0.5 มล. ไว้ในภาชนะ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 1,000 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นสังกะสี 2 เท่าของที่ต้องการ และมีพีเอชเท่ากับพีเอชเหมาะสม 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. ดูดสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มล. เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์
6. ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้คูณด้วย 1.2



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.4

3.5.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง (ข.)

3.5.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบสังกะสี (ข-1)

เป็นการศึกษาโดยการเก็บน้ำตัวอย่างจากโรงงานชุบสังกะสีและนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยานेट ไนไตรท์ ไนเตรท โลหะหนัก และ ฟิเอช

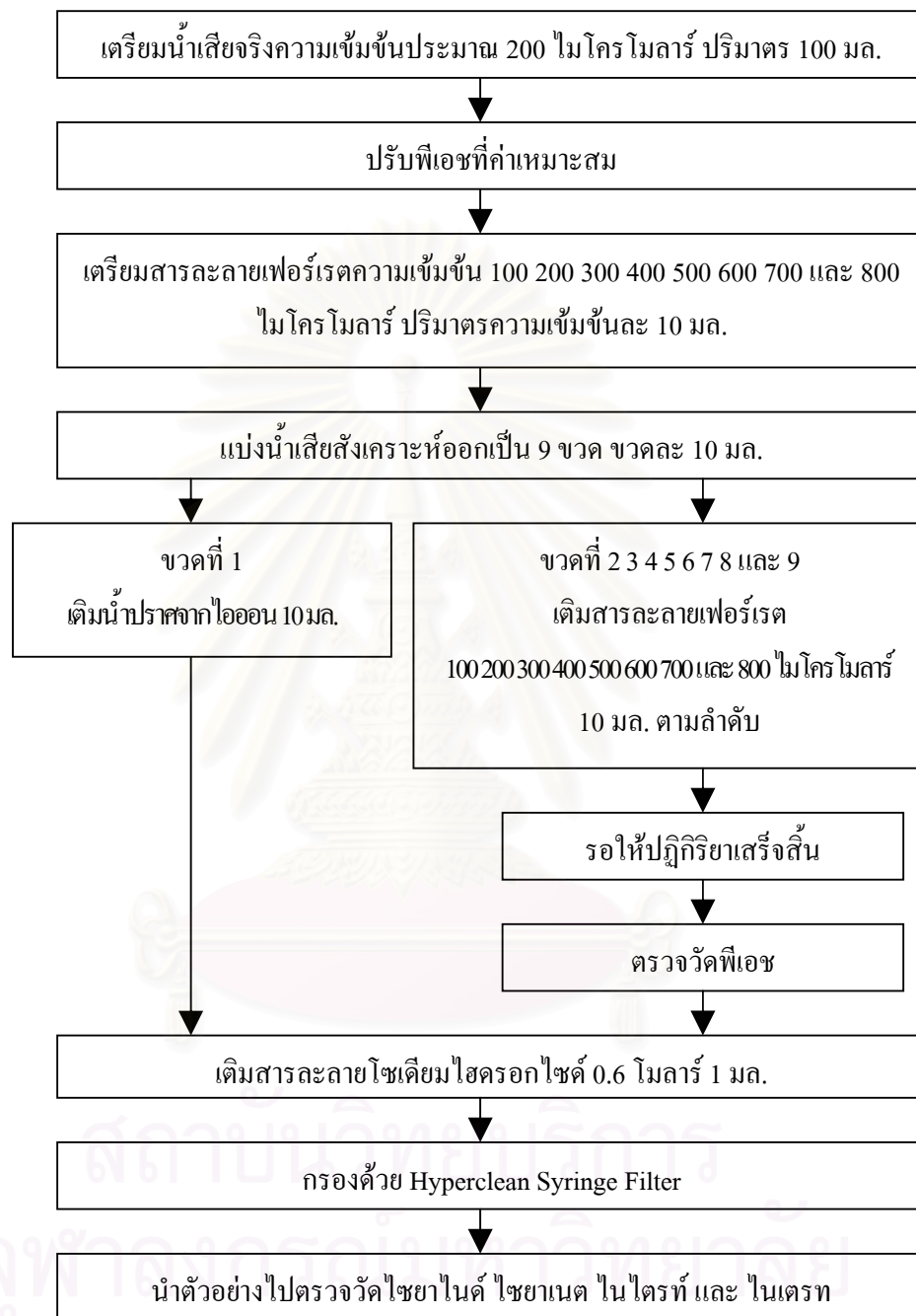
3.5.2.2 ศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัด

ไซยาไนต์ และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสียจริง โดยการเจือจางตัวอย่างเพื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ประมาณ 100 ไมโครโมลาร์ และนำมาทดลองโดยปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็น 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

การทดลองที่ 3.5.2.2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เจือจางน้ำเสียด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้นไซยาไนต์ประมาณ 200 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 100 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 100 200 300 400 500 600 700 และ 800 ไมโครโมลาร์ ปริมาตรความเข้มข้นละ 10 มล.
3. แบ่งน้ำเสียออกเป็น 9 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 100 200 300 400 500 600 700 และ 800 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนต์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยานेट ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยานेट ไนไตรท์ ไนเตรท กับ ความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของสังกะสีต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ และ สารผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.2.2

3.6 วิธีการวิเคราะห์

- 1) เฟอร์เรต ตรวจสอบด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.
- 2) ไซยาไนต์ ตรวจสอบด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.
- 3) ไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท ตรวจสอบด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ง.
- 4) สังกะสี ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักAAS
- 5) ฟิออซ ตรวจสอบด้วยพีเอชมิเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ (ก)

4.1.1 ผลการทดลองการกำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (ก-1)

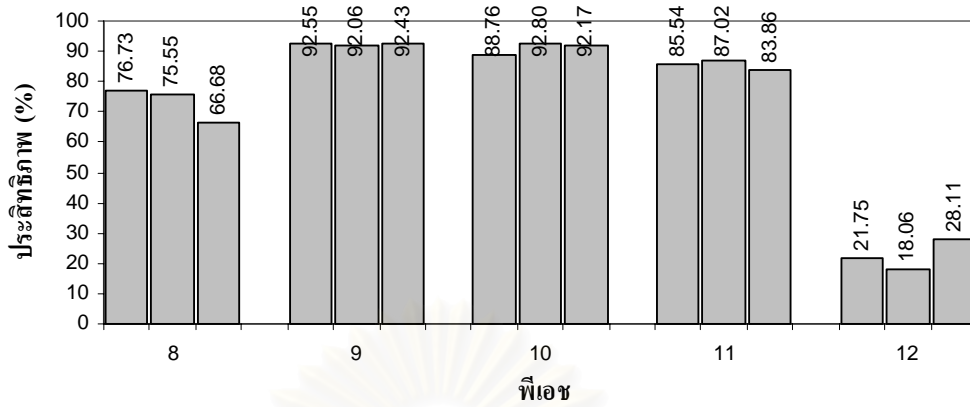
4.1.1.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของไชยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.1)

ทดลองที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ละความเข้มข้นมีการแปรพีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเป็นตัวกลาง และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรต ต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1

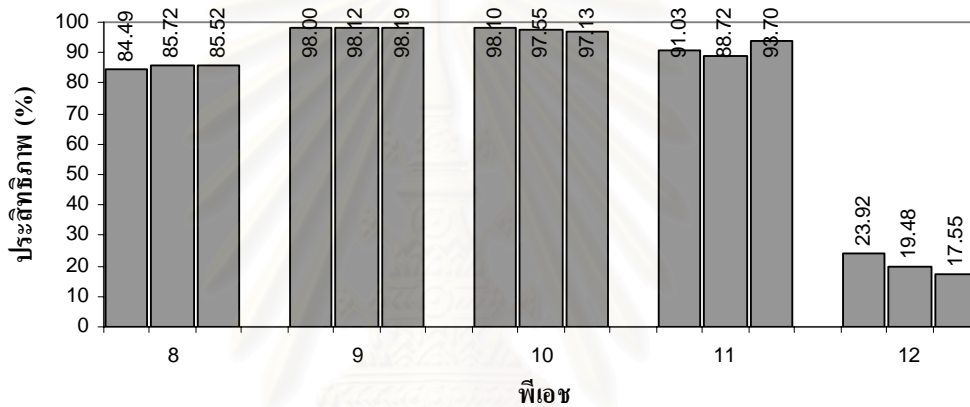
ผลการทดลองในส่วนของผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 พีเอช 8 9 10 11 และ 12 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.99 92.35 91.24 85.47 และ 22.64 % ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ข. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85.24 98.10 97.59 91.15 และ 20.32 % ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ค. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 79.64 100.00 100.00 99.55 และ 45.98 % ตามลำดับ

ผลการทดลองในส่วนของผลของพีเอชต่อสารผลิตภัณฑ์พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ไชยานิต ทุกพีเอช ทุกความเข้มข้นเริ่มต้น โดยตรวจพบไนเตรตและไนเตรท เพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.2 โดยที่ความเข้มข้น 50 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 12 ตรวจไม่พบสารผลิตภัณฑ์ใดๆ คาดว่าเนื่องจากมีปริมาณต่ำกว่าที่เครื่องจะตรวจวัดได้

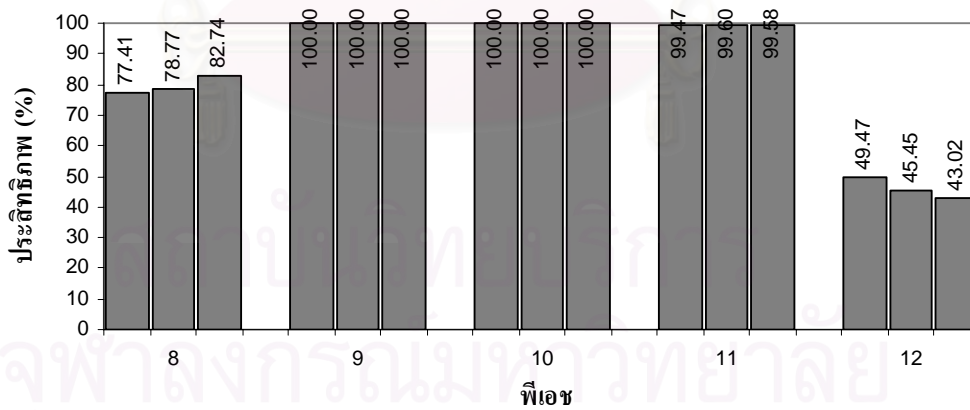
เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองข้างต้นที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้นต่างกัน มาเปรียบเทียบกัน พบว่า สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ ที่ช่วงพีเอช 9 10 และ 11 เป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์สูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ 85 -100 % และมีแนวโน้มถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.3 โดยที่ความเข้มข้นไชยาไนต์ 500 ไมโครโมลาร์ ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงถึง 100 % และสำหรับสารผลิตภัณฑ์ไม่พบความแตกต่างใดดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.1 ก. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

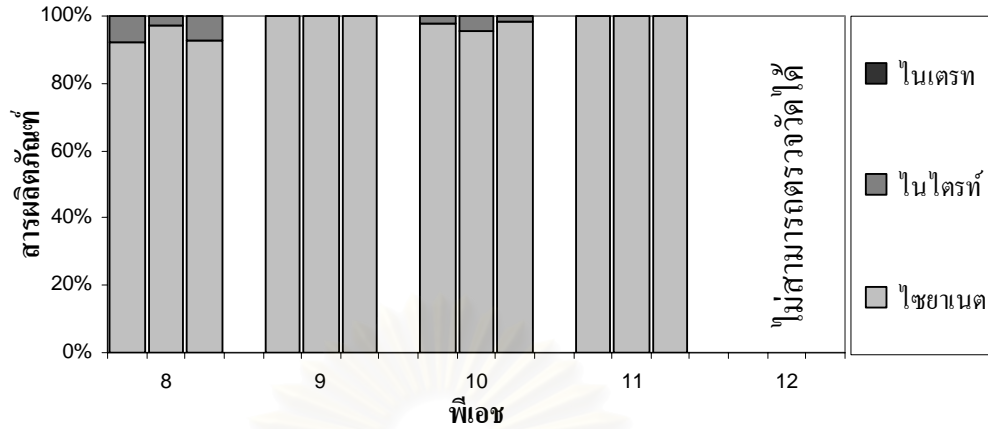


รูปที่ 4.1 ข. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

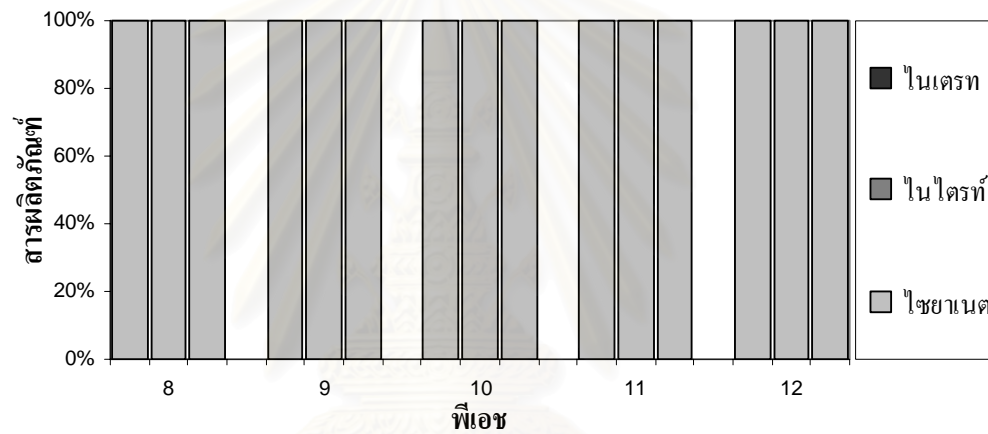


รูปที่ 4.1 ค. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

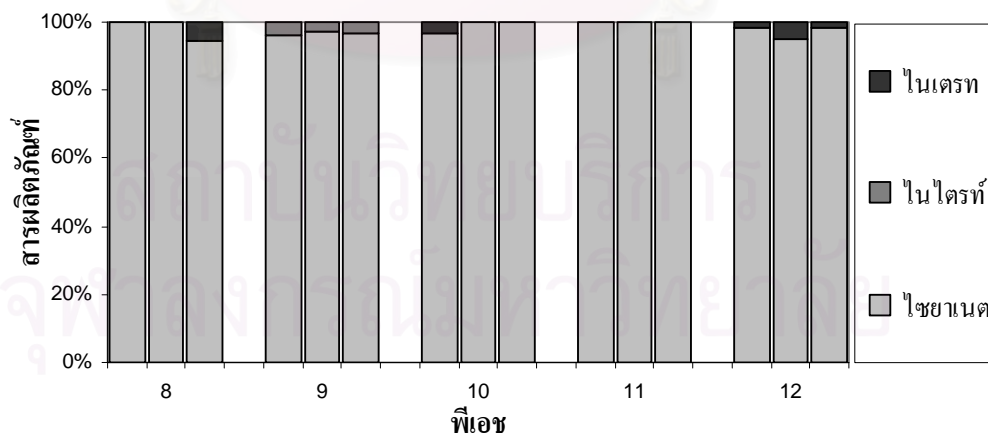
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ กับ ฟิออน ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1



รูปที่ 4.2 ก. ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

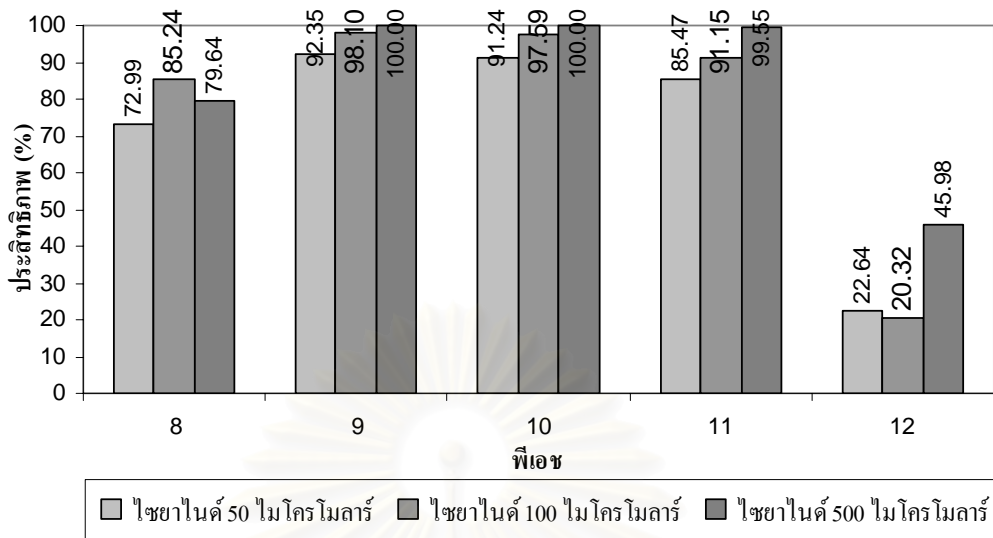


รูปที่ 4.2 ข. ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

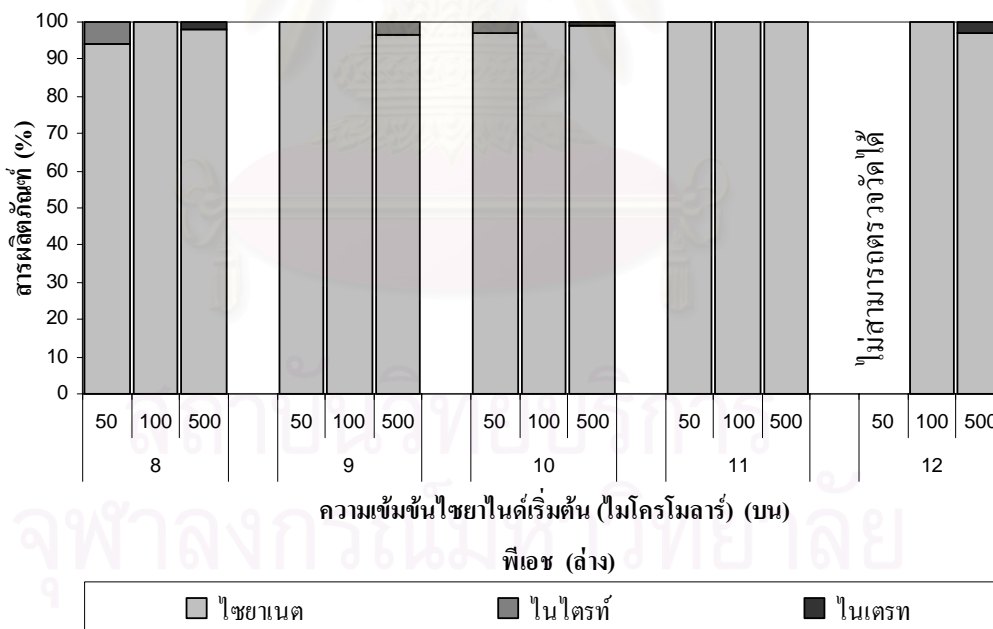


รูปที่ 4.2 ค. ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.2 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับปุ๋ย ที่อัตราส่วนโดยโมลเปอร์เซ็นต์ต่อไซยาไนต์เท่ากับ 1:1



รูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์กับพีเอช อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้นต่างๆ



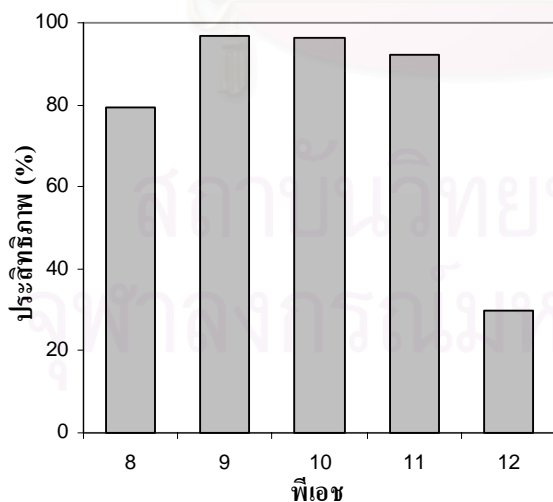
รูปที่ 4.4 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์กับพีเอช อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ที่ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้นต่างๆ

4.1.1.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 (ก-1.2)

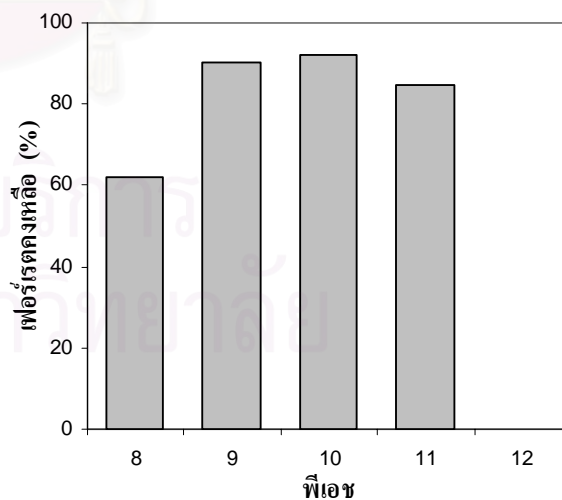
เนื่องจากที่พีเอช 9 10 และ 11 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ใกล้เคียงกัน จึงได้ทำการทดลองถึงผลของพีเอชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 และใช้สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.004 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์

ผลการทดลองพบว่า มีปฏิกิริยาลีนสุดเร็วที่สุดที่พีเอช 8 และ ใช้เวลานานขึ้นที่พีเอช 9 10 12 และ 11 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 ที่พีเอช 11 ปฏิกิริยาใช้เวลานานที่สุดโดยใช้เวลาประมาณ 180 นาที และที่พีเอช 12 ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ดังรูปที่ 4.7 ก. ที่พีเอช 8 9 และ 10 ใช้เวลาประมาณ 5 10 และ 20 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 ข.

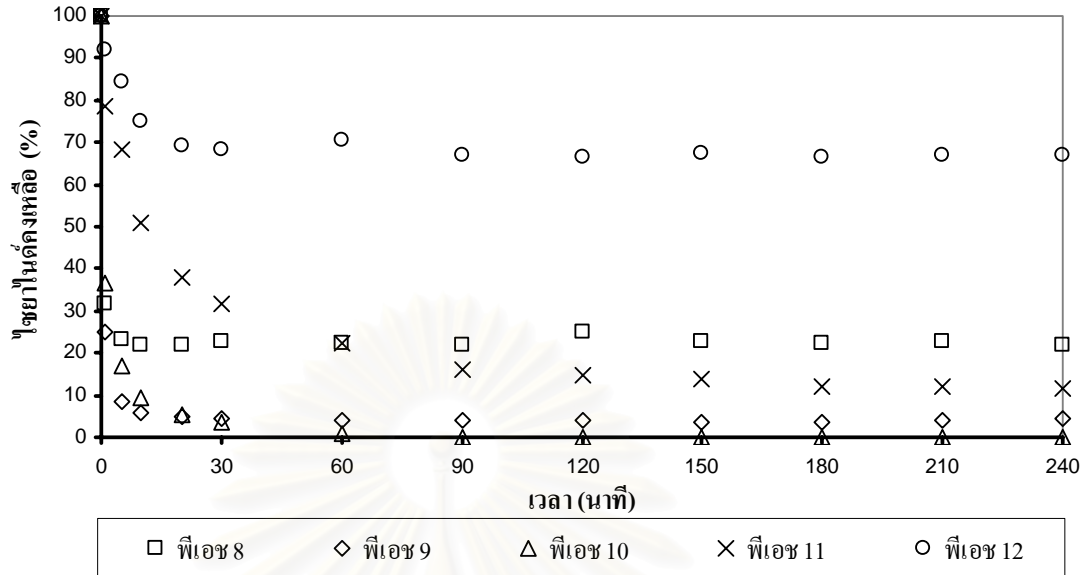
จากผลการทดลองที่ 4.1.1.2 และผลการทดลองด้านความเสถียรของเฟอร์เรตในภาคผนวก ก. คาดว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์น่าจะมีความสัมพันธ์กับความเสถียรของเฟอร์เรตเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ที่พีเอชต่างๆ มีแนวโน้มคล้ายกับความเสถียรของเฟอร์เรตที่พีเอชต่างๆ ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ที่พีเอช 8 ปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เกิดขึ้นได้เร็วแต่เฟอร์เรต มีการสลายตัวเร็วเช่นกัน ทำให้เฟอร์เรตส่วนหนึ่งสลายตัวไปก่อนที่ปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์ ที่พีเอช 9 และ 10 ปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เกิดขึ้นได้เร็ว และเฟอร์เรตมีความเสถียรสูง ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ที่พีเอช 11 แม้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้า แต่เฟอร์เรตยังคงมีความเสถียรสูง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน และที่พีเอช 12 ปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เกิดขึ้นได้ช้ามาก และเฟอร์เรตสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์



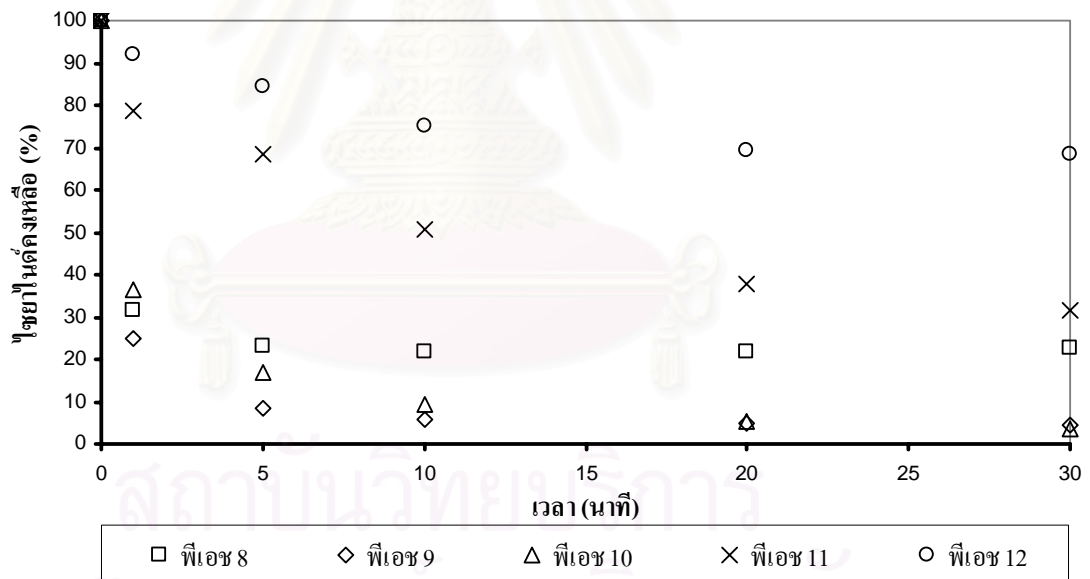
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เฉลี่ยทั้ง 3 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นจากการทดลองที่ 4.1.1.1



รูปที่ 4.6 เฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้นเฟอร์เรตเริ่มต้น 200 ไมโครโมลาร์ (ภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.7 ก. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 240 นาที



รูปที่ 4.7 ข. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นไชยาในด่างเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.004 โมลาร์

สำหรับช่วงพีเอช 9 10 และ 11 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์สูง พบว่า พีเอช 9 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้พีเอช 9 ในการทดลอง

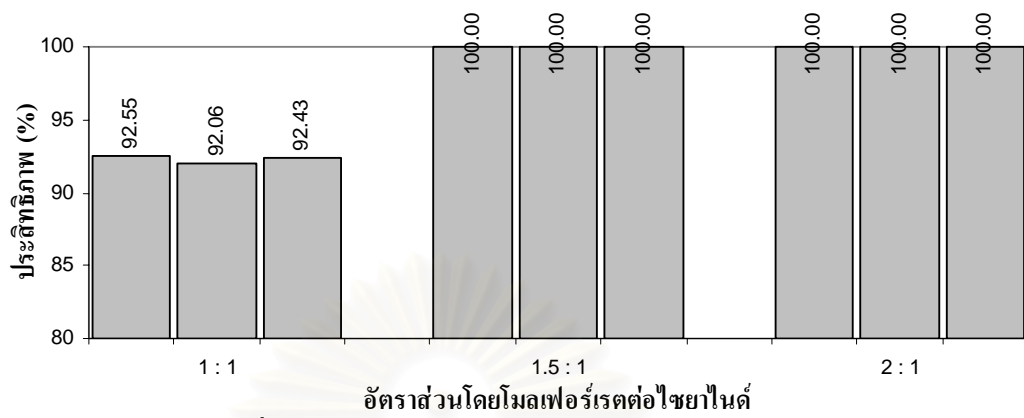
4.1.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1.3)

ทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ โดยแต่ละความเข้มข้นมีการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 1.5:1 และ 2:1 ทำการทดลองที่พีเอช 9 ซึ่งเป็นพีเอชเหมาะสมจากผลการทดลองที่ 4.1.1

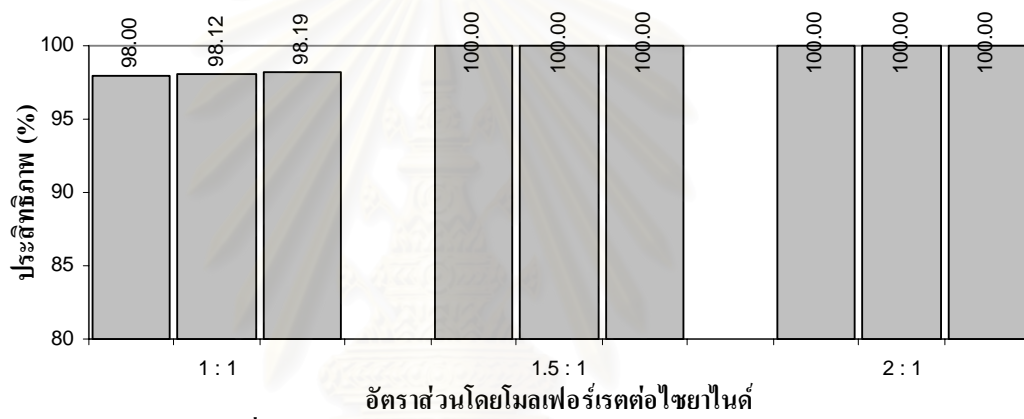
ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์พบว่า ที่พีเอช 9 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 1.5:1 และ 2:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.8 ก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.35 100 และ 100 % ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.8 ข. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.10 100 และ 100 % ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.8 ค. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 100 100 และ 100 % ตามลำดับ

ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อสารผลิตภัณฑ์ที่พีเอช 9 พบว่า สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ไซยานเนต ทุกค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และทุกความเข้มข้นเริ่มต้น โดยตรวจพบไนไตรท์และไนเตรทเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 4.1.1.1 ดังรูปที่ 4.9

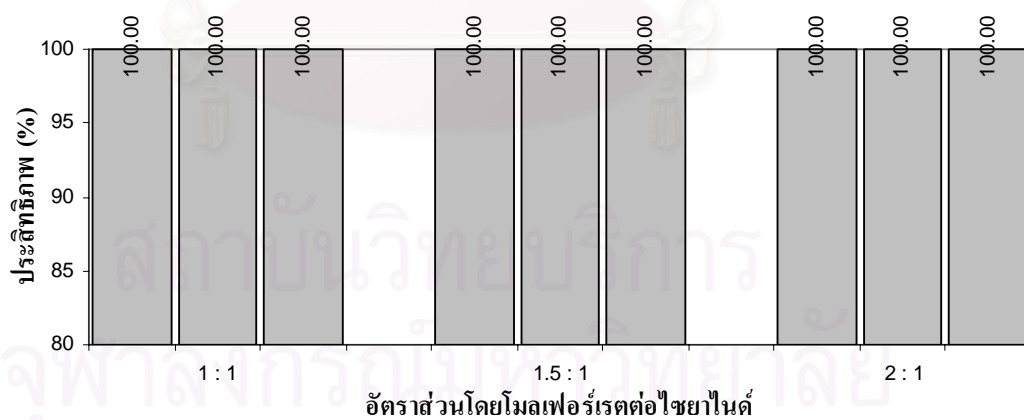
จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกันพบว่า สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ความเข้มข้นสูงนั้น ถ้าเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์อีกเล็กน้อยน่าจะสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 100 % ได้ ดังรูปที่ 4.10 และ สำหรับสารผลิตภัณฑ์ พบว่า สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ยังคงเป็นไซยานเนต ทุกค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งคาดว่าเฟอร์เรตอาจจะไม่ทำปฏิกิริยากับไซยานเนต เนื่องจาก ผลการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 100 % แล้วแต่ ผลการทดลองที่เพิ่มอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ยังคงพบสารผลิตภัณฑ์เป็นไซยานเนตเช่นเดิม



อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์
รูปที่ 4.8 ก. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

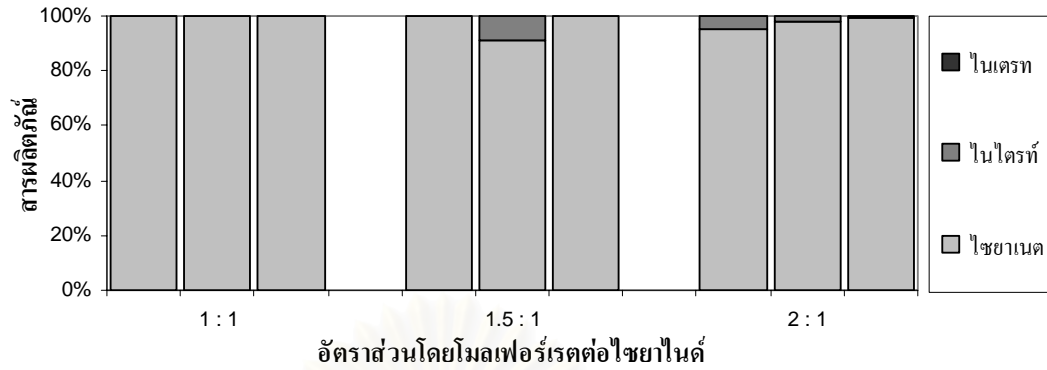


อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์
รูปที่ 4.8 ข. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

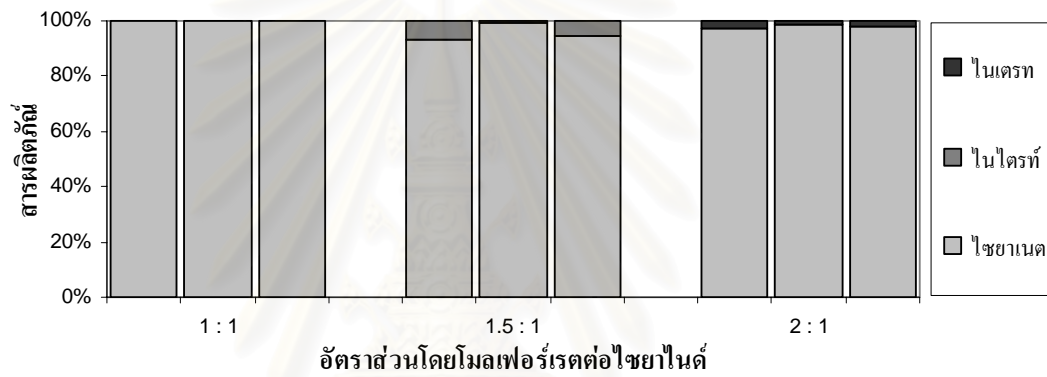


อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์
รูปที่ 4.8 ค. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

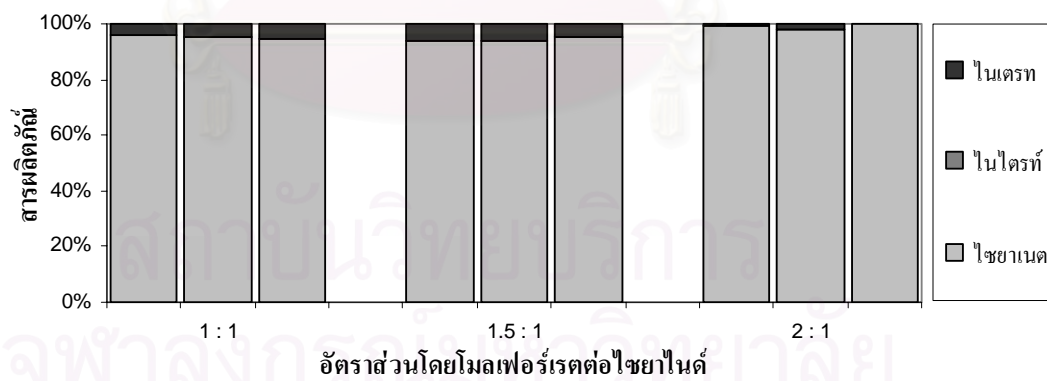
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ กับ อัตราส่วนโดยมวลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ ที่พีเอช 9



รูปที่ 4.9 ก. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

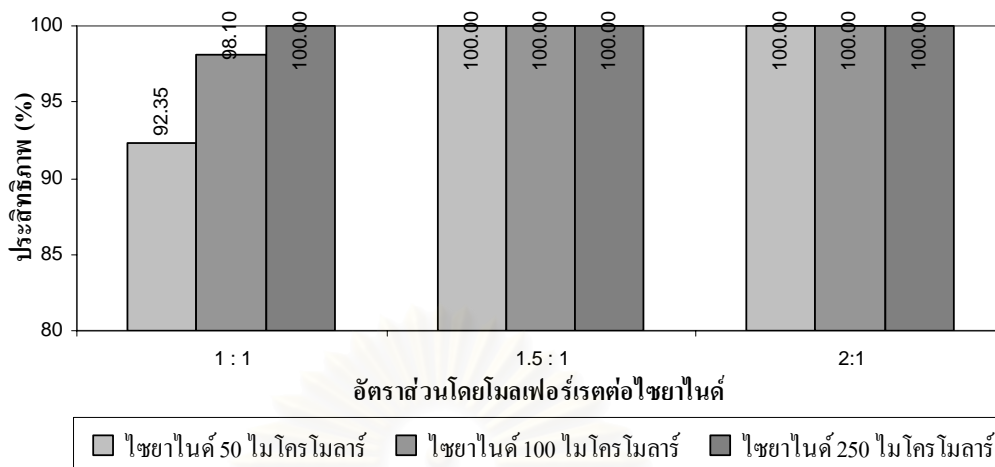


รูปที่ 4.9 ข. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

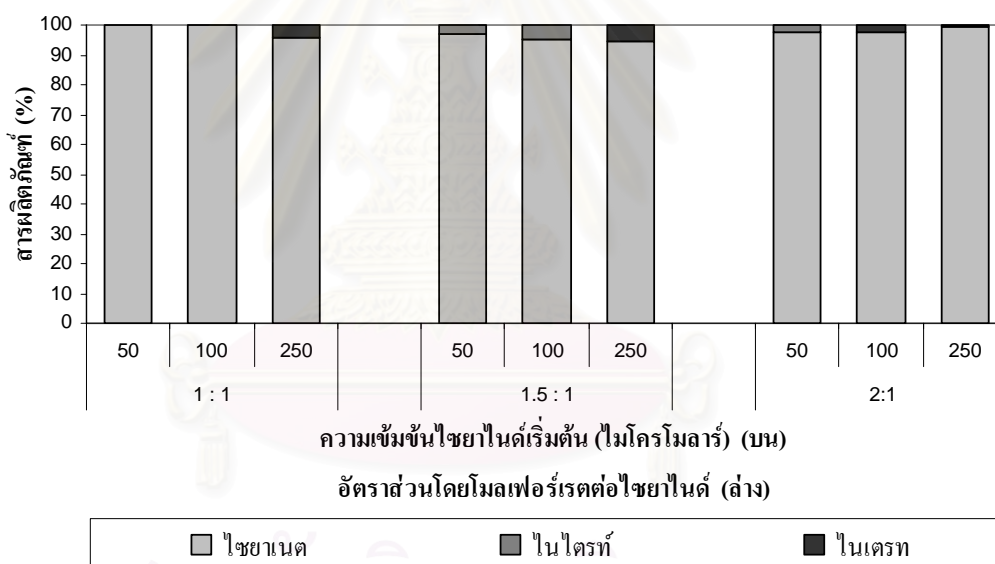


รูปที่ 4.9 ค. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.9 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอรัเรตต่อไชยาไนต์ ที่พีเอช 9



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนด์ พีเอช 9 ที่ความเข้มข้นไชยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.11 สัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ กับ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนด์ พีเอช 9 ที่ความเข้มข้นไชยาไนด์เริ่มต้นต่างๆ

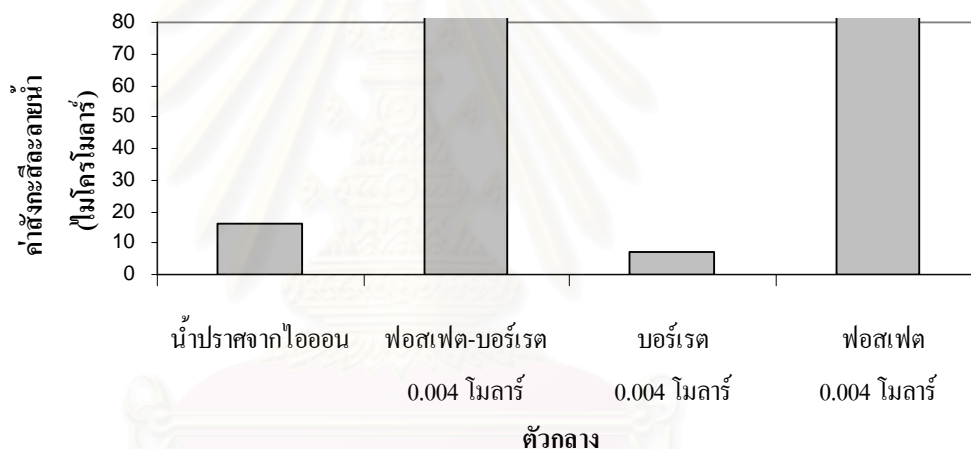
ผลการทดลองที่ 4.1.1 การกำจัดไชยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต สรุปได้ว่า มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 9 ถึง 10 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ 90-100 % ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนด์เท่ากับ 1:1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (1998) สารผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไชยาไนด์ คือ ไชยานต ทุกพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (2005) และคาดว่าเฟอร์เรตไม่ทำปฏิกิริยากับไชยานต

4.1.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสี (ก-2)

4.1.2.1 ความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายบัฟเฟอร์ (ก-2.2)

ทดลองโดยใช้ตัวกลาง 4 ชนิด คือ น้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ สารละลายบอร์เรตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ และ สารละลายฟอสเฟตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 9 ± 0.05 และแปรค่าสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 10 50 และ 100 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการละลายของสังกะสีในน้ำปราศจากไอออนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16.37 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบอร์เรตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.92 ไมโครโมลาร์ และในสารละลายฟอสเฟตและฟอสเฟต-บอร์เรตมีค่ามากกว่า 80 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการละลายของสังกะสีในตัวกลางต่างๆ ที่พีเอช 9

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ความเข้มข้นสังกะสีละลายในสารละลายที่มีฟอสเฟตมีความเข้มข้นสูง ซึ่งหมายความว่า สังกะสีสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับฟอสเฟตได้ ส่วนสารละลายบอร์เรตมีความเข้มข้นสังกะสีละลายต่ำ ซึ่งหมายความว่าสังกะสีไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับบอร์เรต ดังนั้นบอร์เรตมีความเหมาะสมในการใช้เป็นบัฟเฟอร์สำหรับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสี โดยในการทดลองต่อไป ต้องการให้สังกะสีเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์เท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกสารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ในการทดลอง

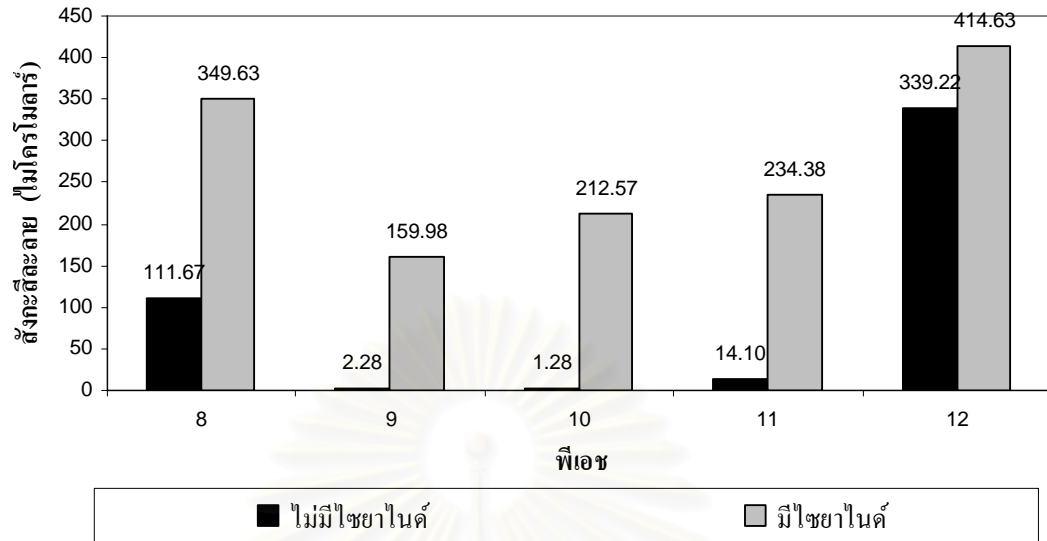
4.1.2.2 ความสามารถในการละลายของสังกะสีในสารละลายที่มีและไม่มีไซยาไนด์ (ก-2.2)

ทดลองที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นไซยาไนด์ 0 และ 500 ไมโครโมลาร์ ปรับพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์

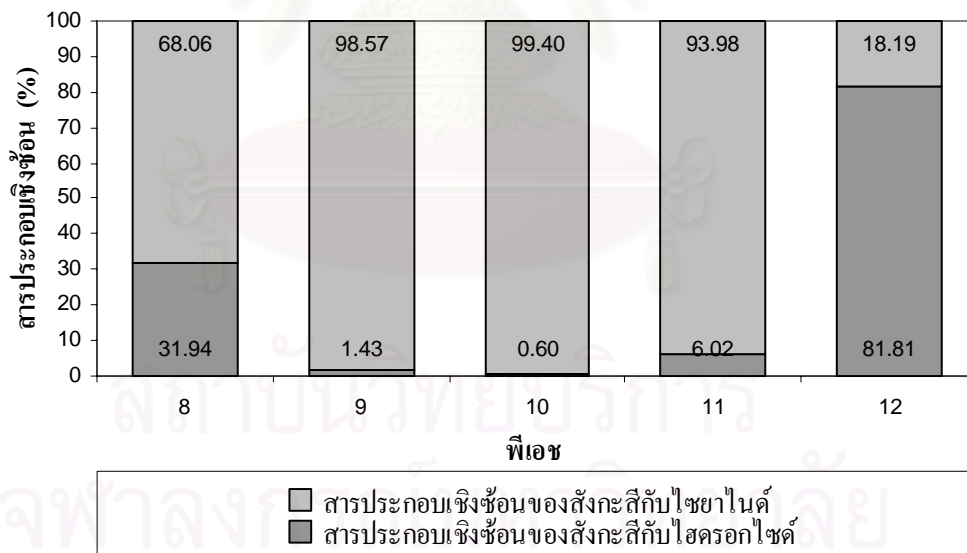
ผลการทดลองพบว่า ในสารละลายบอร์เรตที่ไม่มีไซยาไนด์ มีค่าสังกะสีละลายเฉลี่ยที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 11.67 2.28 1.28 14.10 และ 339.22 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ และในสารละลายบอร์เรตที่มีไซยาไนด์ประมาณ 500 ไมโครโมลาร์ มีค่าสังกะสีละลายที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 349.63 159.98 212.57 234.38 และ 414.63 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองจะเห็นว่าสารละลายที่มีไซยาไนด์จะมีความเข้มข้นสังกะสีละลายที่สูงกว่าสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์ โดยเฉพาะที่พีเอช 9 10 และ 11 ซึ่งในสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์จะมีค่าสังกะสีละลายที่ต่ำมาก

จากผลการทดลองนี้สามารถคำนวณเป็นความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ โดยให้ความเข้มข้นสังกะสีละลายทั้งหมดเท่ากับความเข้มข้นสังกะสีละลายในสารละลายที่มีไซยาไนด์ และให้ความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไฮดรอกไซด์ เท่ากับความเข้มข้นสังกะสีละลายในสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์ ผลการคำนวณได้ความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์เท่ากับ 237.97 157.70 211.29 220.28 และ 75.42 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ตามลำดับ โดยเทียบเป็นหน่วย % ได้ดังรูปที่ 4.14 โดยพบว่าที่พีเอช 9 10 และ 11 สังกะสีจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์เกือบทั้งหมด

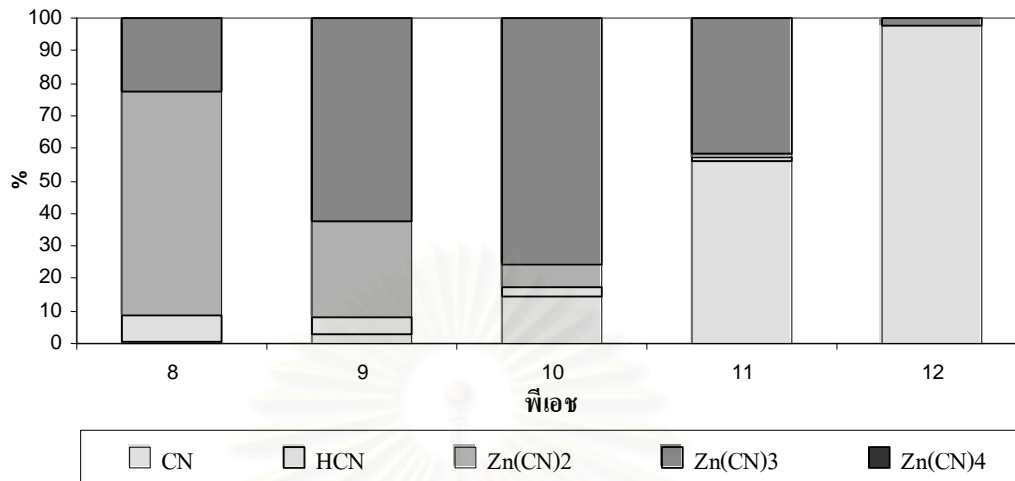
ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของสังกะสีในขั้นต่อไปจะเลือกพีเอช 9 10 และ 11 เป็นพีเอชเหมาะสมในการศึกษาต่อไป เนื่องจากสังกะสีจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับไฮดรอกไซด์ น้อยมาก โดยจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์เกือบทั้งหมด และจากผลการทดลองที่ 4.1 ช่วงพีเอช 9 ถึง 11 เป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์สูงสุด สำหรับความเข้มข้นของสังกะสี กำหนดค่าสังกะสีสูงสุดหรือค่าสังกะสีอิ่มตัว ที่พีเอช 9 เท่ากับ 150 ไมโครโมลาร์ พีเอช 10 เท่ากับ 200 ไมโครโมลาร์ และพีเอช 11 เท่ากับ 200 ไมโครโมลาร์ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้สังกะสีเกิดการตกตะกอนจากการที่ความเข้มข้นของสังกะสีมากเกินไป และเพื่อให้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีมีความแตกต่างกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสีมากที่สุดซึ่งจะทำให้ผลการทดลองมีความแตกต่างกันมากที่สุด



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการละลายของสังกะสีที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ในสารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ ที่ไม่มีสังกะสี และ มีสังกะสี 500 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.14 รูปแบบของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ในสารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ที่มีสังกะสี 500 ไมโครโมลาร์

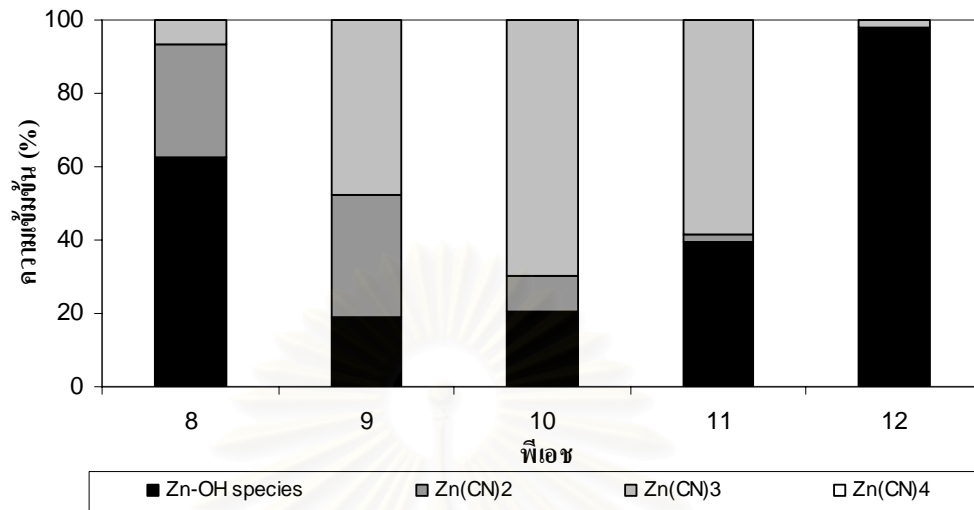


รูปที่ 4.15 รูปแบบของไซยาไนด์จากการคำนวณ ที่ความเข้มข้นสังกะสีอิ่มตัว ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์

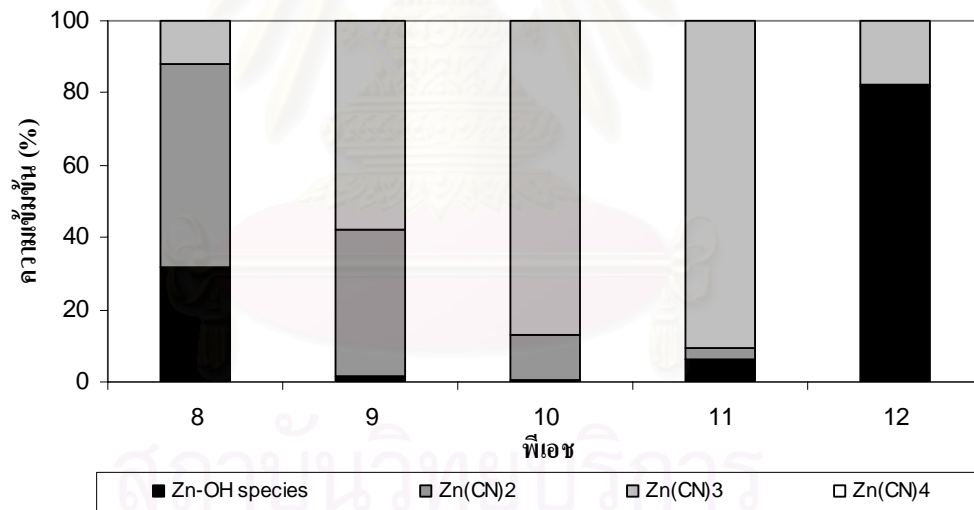
รูปแบบของไซยาไนด์สามารถคำนวณได้ตามทฤษฎีได้ ดังรูปที่ 4.15 ไซยาไนด์ในสารละลายที่มีสังกะสี จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสังกะสี เท่ากับ 91.61 91.85 82.73 42.95 และ 2.24 % ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ตามลำดับ หมายความว่า ไซยาไนด์ที่เติมลงไปจะไปจับกับไอออนของสังกะสีและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ โดยเฉพาะที่พีเอช 8 9 และ 10 ไซยาไนด์ส่วนมากไม่อยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระ แต่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของ $Zn(CN)_3^-$

สำหรับรูปแบบของสังกะสีในสารละลายไซยาไนด์สามารถคำนวณตามทฤษฎีได้ดังรูปที่ 4.16 ก. สังกะสีในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์เท่ากับ 37.64 81.05 79.56 60.71 และ 2.22 % ตามลำดับ หมายความว่า ที่พีเอช 9 10 และ 11 ไอออนของสังกะสีส่วนมากจะจับกับไอออนของไซยาไนด์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่แตกตะกอน ทำให้สังกะสีละลายน้ำได้มากขึ้น

เมื่อนำสัดส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ตามทฤษฎีมาคำนวณกับสัดส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์จะได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 4.16 ข.



รูปที่ 4.16 ก. จำนวนตามทฤษฎี



รูปที่ 4.16 ข. จำนวนโดยใช้สัดส่วนตามทฤษฎี

และความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ทั้งหมดจากการทดลอง

รูปที่ 4.16 รูปแบบของสังกะสีจากการคำนวณในสารละลายไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

4.1.2.3 ผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ สารผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา (ก-2.3)

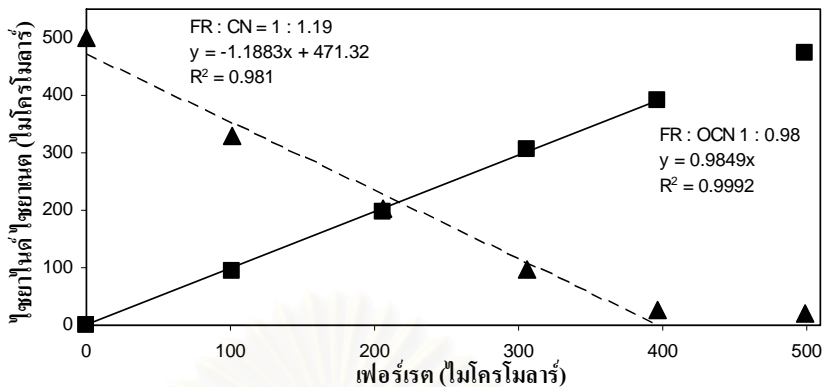
ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ไม่มีสังกะสีและมีสังกะสีที่ค่าอิมตัวของแต่ละพีเอช ที่ได้จากการทดลองที่ 4.1.2.2 คือ 150 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9 และ 200 ไมโครโมลาร์ที่พีเอช 10 และ 11 โดยใช้สารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และแปรความเข้มข้นเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 9 10 และ 11 ที่มีสังกะสี และไม่มีสังกะสี ใกล้เคียงกันประมาณ 95 ถึง 100 % และได้สารผลิตภัณฑ์หลักเป็นไซยานต

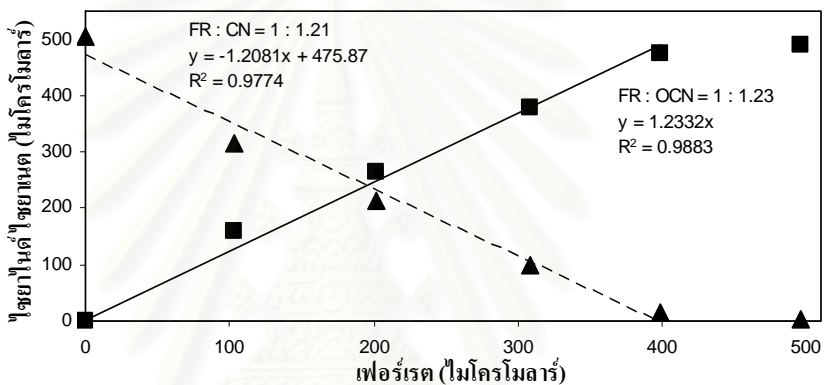
เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนแผนภูมิ โดยให้ความเข้มข้นเฟอร์เรตที่ใช้เป็นแกน X และให้ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลือและไซยานตที่เกิดขึ้นเป็นแกน Y และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ความชันจากกราฟทั้ง 2 จะเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสีมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.17 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิมตัวมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.18 และเนื่องจากไซยานตเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากไซยาไนด์ จึงสามารถนำอัตราส่วนไซยาไนด์ที่เหลือต่อเฟอร์เรตที่ใช้ และอัตราส่วนไซยานต ที่เกิดขึ้นกับเฟอร์เรตที่ใช้ มาเฉลี่ยกันเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น โดยค่าอัตราส่วนโดยโมลทั้งหมดแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันทุกพีเอชทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีและไม่มีสังกะสี ดังนั้น พีเอช และ สังกะสีไม่ผลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา ของน้ำเสียสังเคราะห์ทุกการทดลองประมาณ 1:1.13 หรือ 0.88 : 1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองที่ 4.1.2.3

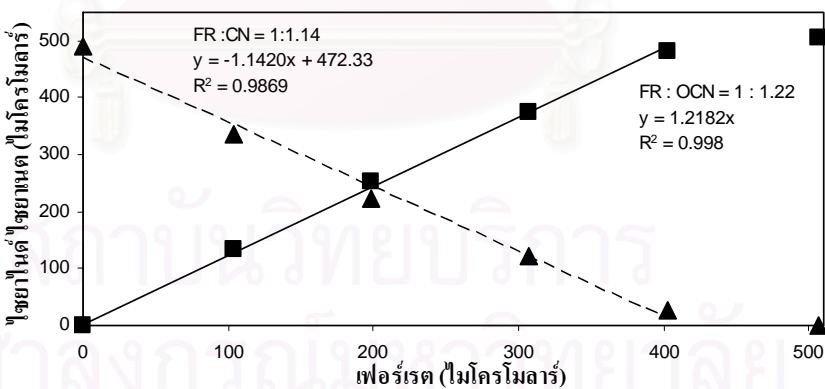
น้ำเสียสังเคราะห์	อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อ ไซยาไนด์	อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อ ไซยานต	อัตราส่วนโดยโมล เฉลี่ย
พีเอช 9 ไม่มีสังกะสี	1:1.18	1:0.98	1:1.09
พีเอช 10 ไม่มีสังกะสี	1:1.19	1:1.23	1:1.21
พีเอช 11 ไม่มีสังกะสี	1:1.13	1:1.21	1:1.17
พีเอช 9 มีสังกะสีอิมตัว	1:0.99	1:1.15	1:1.07
พีเอช 10 มีสังกะสีอิมตัว	1:1.15	1:1.18	1:1.17
พีเอช 11 มีสังกะสีอิมตัว	1:1.03	1:1.10	1:1.07



รูปที่ 4.17 ก. พีเอช 9



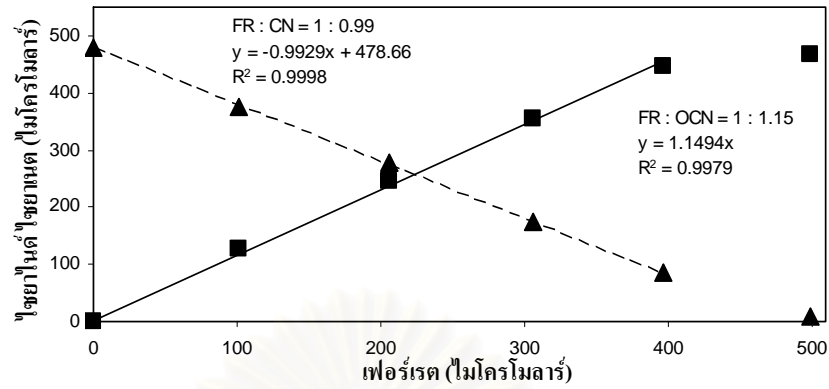
รูปที่ 4.17 ข. พีเอช 10



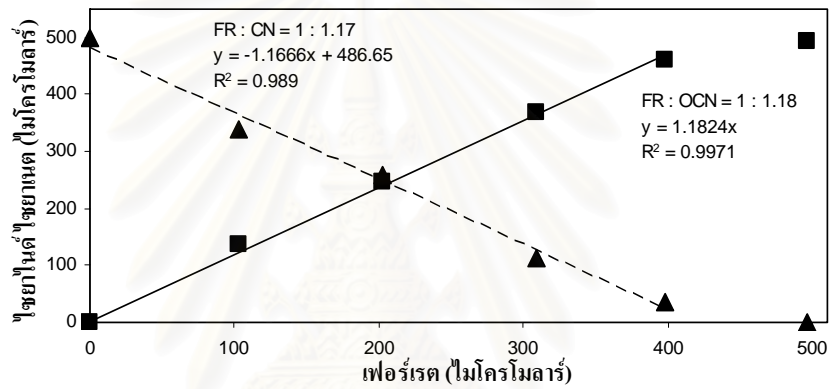
รูปที่ 4.17 ค. พีเอช 11

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนที่สูญเสียและไนโตรเจนที่ตรึงขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี ความเข้มข้นไนโตรเจนเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

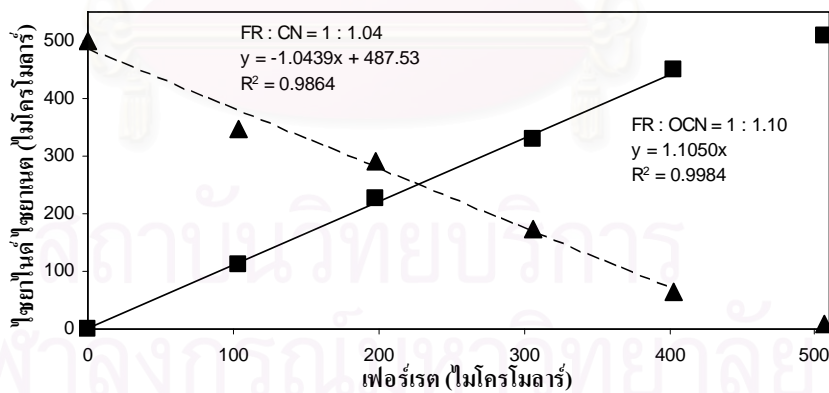
▲ ไนโตรเจนที่สูญเสีย ■ ไนโตรเจนที่ตรึง



รูปที่ 4.18 ก. พีเอช 9



รูปที่ 4.18 ข. พีเอช 10



รูปที่ 4.18 ค. พีเอช 11

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนที่เหลือและไนโตรเจนที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิมิตัว ความเข้มข้นไนโตรเจนเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

▲ ไนโตรเจนที่เหลือ ■ ไนโตรเจนที่เกิดขึ้น

4.1.2.4 ผลของสังกะสีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (ก-2.4)

ทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1 พีเอช 9 10 และ 11 เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที โดยใช้อาร์เซนไนท์ (As^{3+}) เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา

ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ พบว่า พีเอช 11 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุด ซึ่งต่างกับพีเอช 9 และ 10 มาก ดังรูปที่ 4.19 ก. และ พีเอช 9 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าพีเอช 10 ดังรูปที่ 4.19 ข. โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 9 10 และ 11 เท่ากับ 10 30 และ 300 นาที ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในเวลา 1 2 และ 60 นาที ที่พีเอช 9 10 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 90 % และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ช้าลงจนสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ประสิทธิภาพเกือบ 100 %

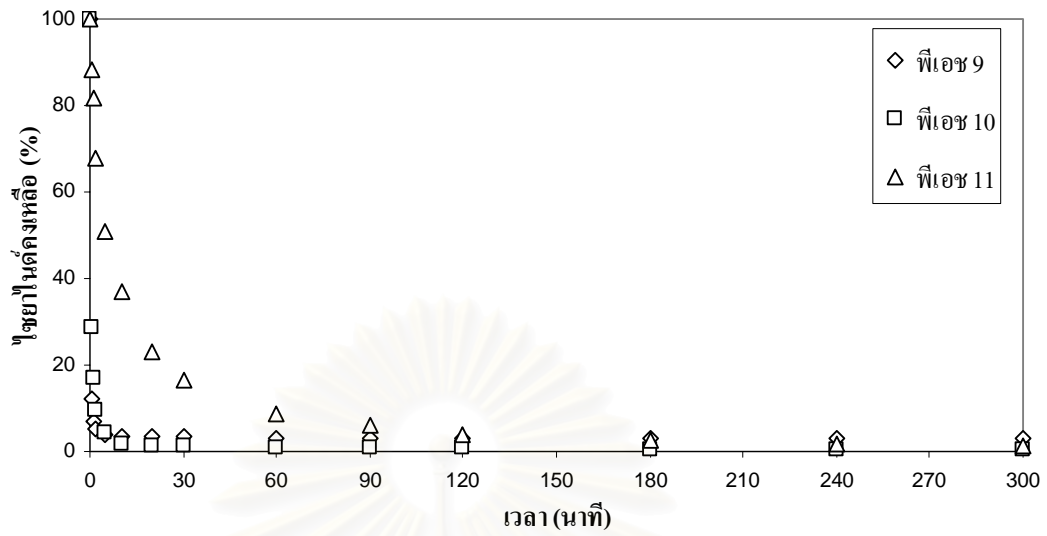
ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับสังกะสี พบว่า มีแนวโน้มของแผนภูมิเหมือนกับผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 9 10 และ 11 เท่ากับ 30 120 และ มากกว่า 300 นาที ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในเวลา 2 5 และ 90 นาที ที่พีเอช 9 10 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 90 % และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ช้าลง จนสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ประสิทธิภาพเกือบ 100 % เช่นกัน ดังรูปที่ 4.20

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิมตัว พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสีทุกพีเอช ดังรูปที่ 4.21

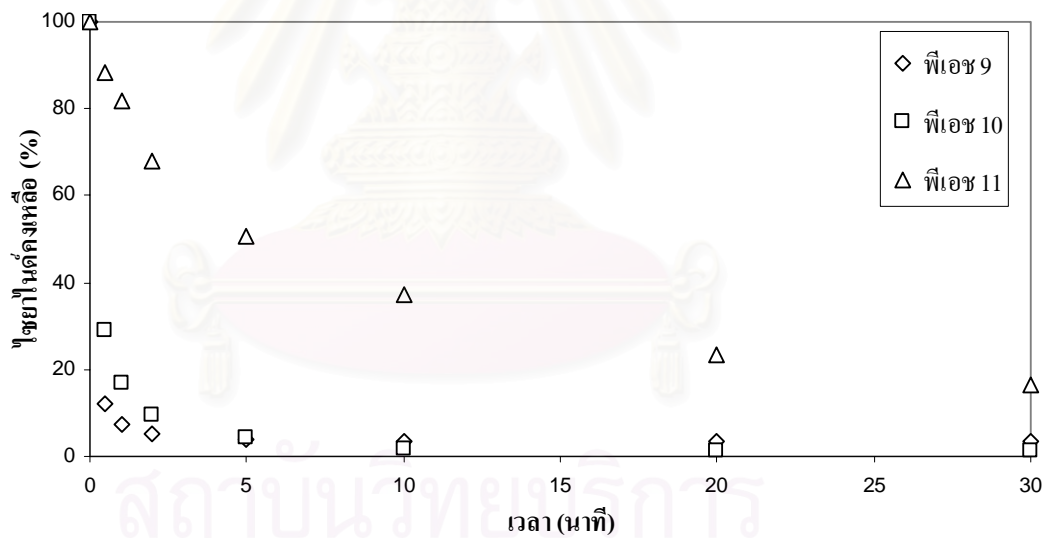
จากผลการทดลองที่ 4.1.2.4 พบว่า พีเอชมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดย มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดที่พีเอช 9 และช้าลงที่พีเอช 10 และ 11 ตามลำดับ ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีและไม่มีสังกะสี และ สังกะสีมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ช้าลงทุกพีเอช โดยเวลาในการทำปฏิกิริยาได้แสดงเปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 4.2 ผลการทดลองยังคงพบว่าที่พีเอช 9 10 และ 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน และสังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 4.1.2.3

ตารางที่ 4.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) จากการทดลองที่ 4.1.2.4

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

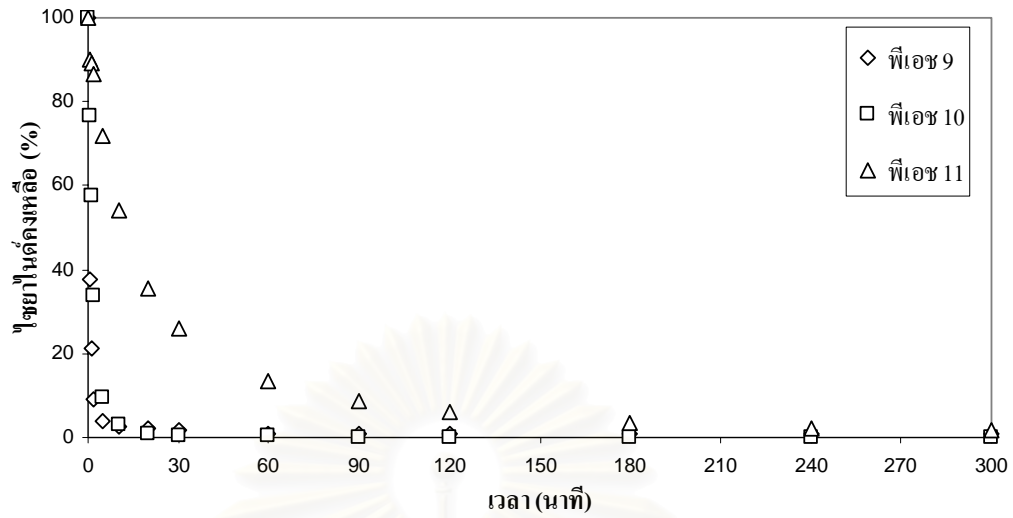


รูปที่ 4.19 ก. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที

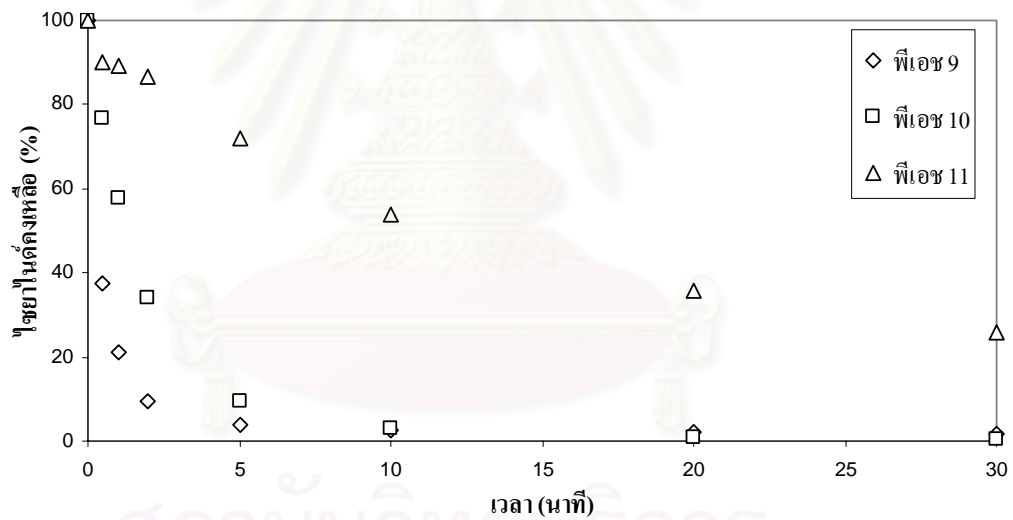


รูปที่ 4.19 ข. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นไชยาไนต์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอไรต์ต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสี

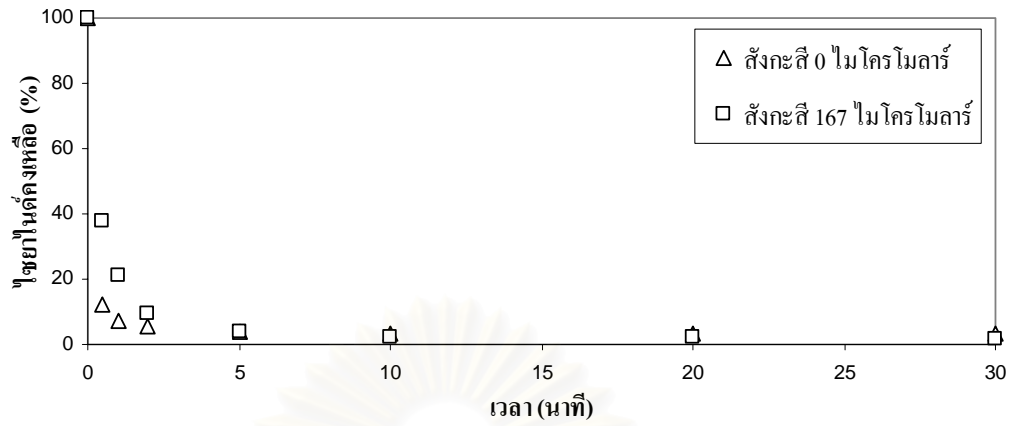


รูปที่ 4.20 ก. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที

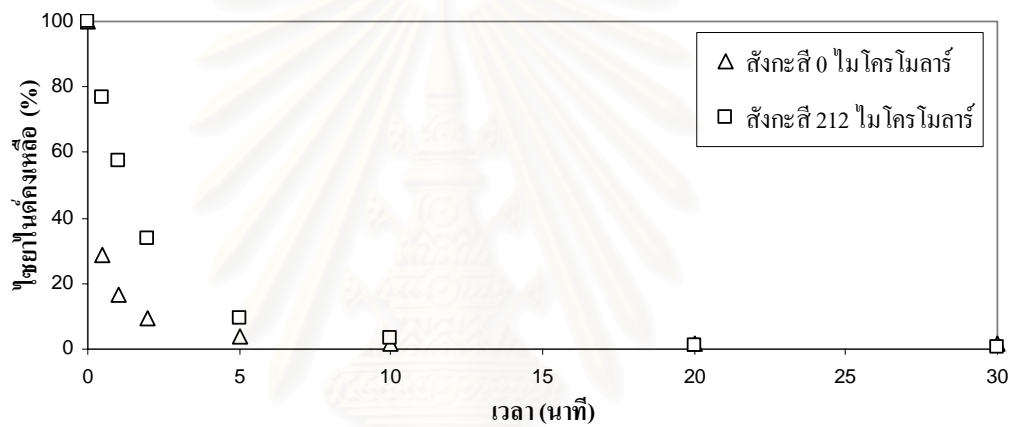


รูปที่ 4.20 ข. ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

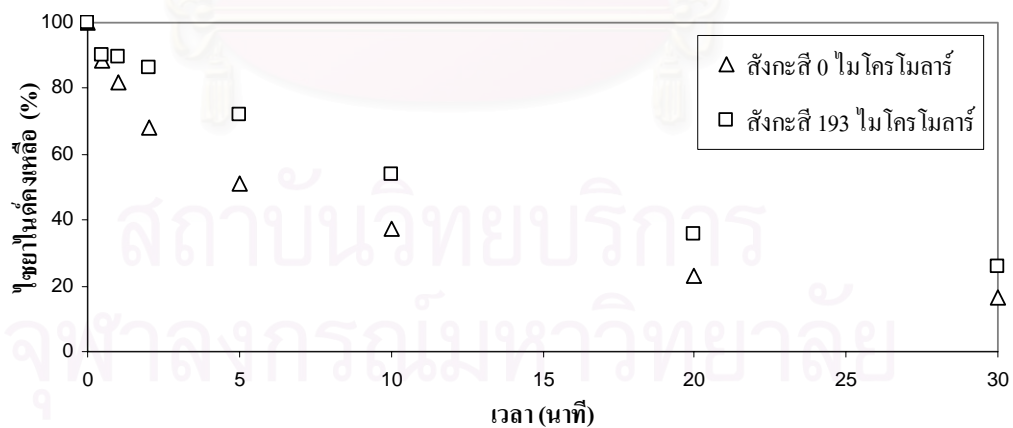
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นไชยาไนต์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วน เฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีที่ค่าอิมตัว



รูปที่ 4.21 ก. พีเอช 9



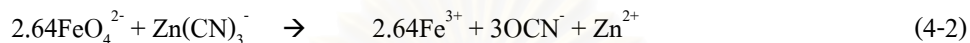
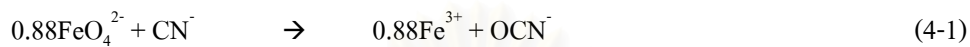
รูปที่ 4.21 ข. พีเอช 10



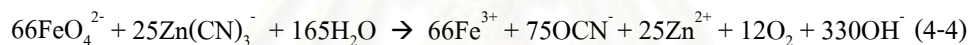
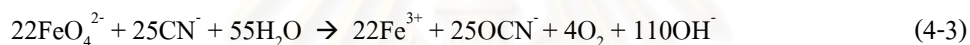
รูปที่ 4.21 ค. พีเอช 11

รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นไซยาไนด์คงเหลือ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสังกะสีและมีสังกะสีที่ค่าอิมตัว อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1

จากการทดลองที่ 4.1 สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่พีเอช 9 ถึง 11 เป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพเกือบ 100% โดยไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยาเนต เฟอร์เรตจะสลายตัวไปเป็นเฟอร์ริก โดยสังกะสีไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.88 : 1 และมีสมการของการทำปฏิกิริยา ดังสมการที่ (4-1) และ (4-2)



ในการทดลองพบว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาน้ำเสียสังเคราะห์จะมีพีเอชสูงขึ้นและ จากผลการทดลองของ Sharma (2005) พบว่า การเกิดปฏิกิริยาจะได้ออกซิเจนเป็นสารผลิตภัณฑ์ด้วย จึงคาดว่าสมการของปฏิกิริยาจะคำนวณได้ดังสมการที่ (4-3) และ (4-4)



4.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง (ข.)

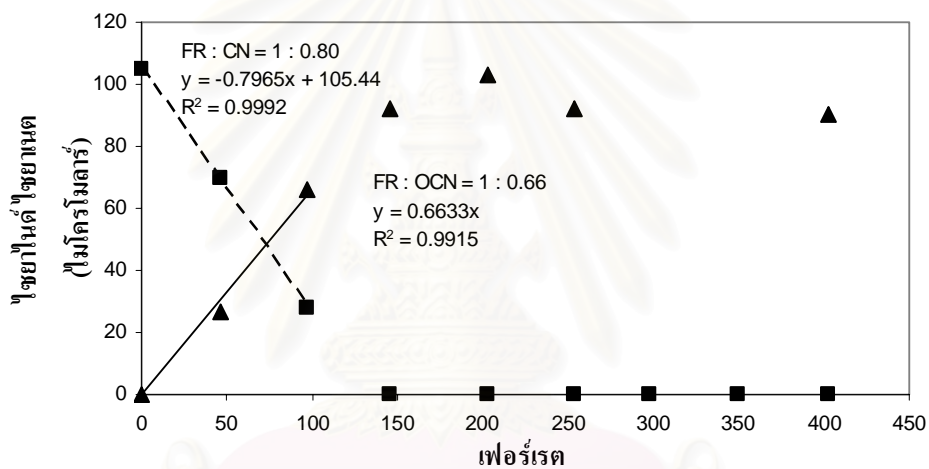
4.2.1 ผลการตรวจวัดน้ำเสียโรงชุบสังกะสี (ข-1)

น้ำเสียจริงได้จากโรงงานชุบสังกะสีแห่งหนึ่งบริเวณวงแหวนแสงประทีป เป็น โรงงานชุบสังกะสีอย่างเดีย อัตรากาใช้น้ำประมาณ 600 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน ผลการตรวจวัดน้ำเสียจริงมีพีเอชประมาณ 12 ถึง 13 ความเข้มข้นไซยาไนด์ 2,824.17 มก./ล. สังกะสี 631.78 มก./ล. เหล็ก 710.28 มก./ล. ทองแดง 30.78 มก./ล. โครเมียม 2.47 มก./ล. นิกเกิล 9.43 มก./ล. อลูมิเนียม 3.22 มก./ล. แคลเซียม 44.59 มก./ล. และโซเดียม 3,134.44 มก./ล. ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นไซยาไนด์ 108,622 ไมโครโมลาร์ และสังกะสี 9,664 ไมโครโมลาร์

4.2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และ สารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

ทดลองบำบัดน้ำเสียจริงโดยการเจือจางตัวอย่างลง 500 เท่า หลังการเจือจางมีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 104.78 ไมโครโมลาร์ สังกะสี 9.45 ไมโครโมลาร์ ปรับพีเอชเป็น 9.41 และแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็น 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลงมีค่าเท่ากับ 0.80 และ อัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาเนตที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.66 ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลง กับ เฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาเนตที่เกิดขึ้น ประมาณ 1:0.73 หรือ 1.37:1 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 100 % คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ประมาณ 1.56 เท่าของค่าจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ตรวจพบเป็นไซยาเนตทั้งหมด ภายหลังการทดลองที่ความเข้มข้นเฟอร์เรต 145.65 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่ต่ำที่สุดที่สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ทั้งหมด พบว่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 9.56 และที่ความเข้มข้นเฟอร์เรตสูงที่สุดที่ใช้ทดลองคือ 402.61 ไมโครโมลาร์ น้ำตัวอย่างหลังปฏิกิริยามีพีเอชเท่ากับ 10.59



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่ลดลงและไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียจริง

▲ ไซยาไนด์ ■ ไซยาเนต

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 พบว่าน้ำเสียจากโรงหีบสังกะสีมีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงมากและมีองค์ประกอบหลักที่เป็นโลหะคือ สังกะสี และ เหล็ก จากการทดลองที่ 4.2.2 พบว่าเฟอร์เรตสามารถใช้กำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงหีบสังกะสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ในปริมาณมากกว่าค่าจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 1.56 เท่า คาดว่าปริมาณของเฟอร์เรตที่เพิ่มขึ้น เกิดจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงจะมีผลทำให้พีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ในด้านของประสิทธิภาพ สารผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ที่ไม่มีและมีสังกะสี และนำเสียจากโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง

5.1.1 การกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ การทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์มีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในช่วงพีเอช 9 ถึง 11 ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1 : 1.13 หรือ 0.88 : 1 ซึ่งมากกว่าผลการทดลองของ Sharma (2005) คือประมาณ 0.67 : 1 โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์ประมาณ 90-100 % สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma (1998) และได้สารผลิตภัณฑ์เป็นไซยาเนต สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma (2005) ช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่สุดคือ พีเอช 9 ถึง 10 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ช้าที่พีเอช 11 โดยจากการทดลองที่พีเอช 9 ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด คือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนสิ้นสุดประมาณ 10 นาที โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่หรือที่ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ประมาณ 90 % เกิดขึ้นภายใน 1 นาทีเท่านั้น และพีเอช 10 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนสิ้นสุดประมาณ 30 นาที ทั้งนี้ระยะเวลาที่ได้มาจากการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ หรือ 13 มก./ล. และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีผลทำให้สารละลายจะมีพีเอชสูงขึ้นเมื่อไม่ใช้บัฟเฟอร์

5.1.2 ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นสังกะสีใกล้เคียงความเข้มข้นอิมิตัว ช่วงพีเอช 9 ถึง 11 ผลการทดลองพบว่า สังกะสีไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และ สารผลิตภัณฑ์ แต่สังกะสีมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง โดยจากการทดลองที่พีเอช 9 ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด คือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนสิ้นสุดประมาณ 30 นาที โดยมีปฏิกิริยาส่วนใหญ่หรือที่ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ประมาณ 90 % เกิดขึ้นภายใน 2 นาที และที่พีเอช 10 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจน

สิ้นสุดประมาณ 120 นาที ทั้งนี้ระยะเวลาที่ได้มาจากการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ หรือ 13 มก./ล.

5.1.3 การทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง

ตัวอย่างน้ำเสียโรงชุบสังกะสีที่นำมามีความเข้มข้นไซยาไนด์สูงถึง 2824.17 มก./ล. หรือคิดเป็น 108,622 ไมโครโมลาร์ และมีความเข้มข้นสังกะสี 631.78 มก./ล. หรือคิดเป็น 9,664 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงชุบสังกะสีมีค่ามากกว่าความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ทดลองมาก ในการทดลองโดยการเจือจาง 1000 เท่า ทำให้ความเข้มข้นต่างๆลดลงโดยเหลือ ความเข้มข้นไซยาไนด์ 104.78 ไมโครโมลาร์ และ สังกะสี 9.45 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นค่าสังกะสีที่น้อยกว่าที่ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์มาก

การจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรตในน้ำเสียโรงชุบสังกะสี มีประสิทธิภาพสูงถึง 100 % โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับประมาณ 1:0.7 หรือ 1.37:1 ซึ่งคิดเป็น 1.56 เท่า จากผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆที่เจือปนอยู่ในน้ำที่อาจส่งผลโดยการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตโดยตรง หรือส่งผลให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง หรือมีผลทำให้ปฏิกิริยาช้าลงมากทำให้เฟอร์เรตบางส่วนสลายตัวไป ซึ่งทำให้ต้องการเฟอร์เรตในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างที่ใช้ค่าเฟอร์เรตเข้มข้น 145.65 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถกำจัด ไซยาไนด์ได้ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 9.56 และที่ความเข้มข้นเฟอร์เรตสูงที่สุดใน การทดลอง คือ 402.61 ไมโครโมลาร์ น้ำตัวอย่างหลังปฏิกิริยามีพีเอชเท่ากับ 10.59 แสดงให้เห็นว่า การใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้พีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

5.1.4 การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียไซยาไนด์สำหรับโรงชุบสังกะสีโดยการใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นในช่วงที่ทำการทดลอง ควรจะใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาประมาณ 2 ชั่วโมง โดยควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 9.0 ถึง 9.5 และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 2 เท่าจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสี คือ ประมาณ 3:1 ทั้งนี้เพื่อความแน่นอนของผลการบำบัดเนื่องจากความเข้มข้นไซยาไนด์ที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีค่าต่ำมาก คือ น้อยกว่า 0.2 มก./ล. หรือน้อยกว่า 7.6 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นไซยาไนด์ในการทดลองคือ 500 ไมโครโมลาร์จะต้องกำจัดไซยาไนด์ให้ได้ถึง 98.5 %

สำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์สูง จำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึง การเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความเสถียรของเฟอร์เรตในน้ำเสีย เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับ พีเอช และ ความเสถียรของเฟอร์เรต เป็นอย่างมาก

ในการบำบัดน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นไฮยาไนด์สูงการเกิดปฏิกิริยาย่อมทำให้พีเอชของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงควรที่จะต้องมึระบบควบคุมพีเอชเป็นอย่างดี และใช้บัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช ร่วมกับโดยในที่นี้คาดว่า บอรัเรต เหมาะสมที่จะใช้เป็นบัฟเฟอร์เนื่องจากสามารถควบคุมพีเอชได้ดีในช่วง 9 ถึง 10 และจากผลการทดลอง บอรัเรตยังมีแนวโน้มทำให้สังกะสีละลายน้ำได้น้อยลงด้วย ซึ่งอาจส่งผลเช่นเดียวกับโลหะหนักอื่นๆ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการตกตะกอนโลหะหนักซึ่งเป็นการบำบัดในขั้นต่อไป

การใช้เฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองเตรียมเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นสูงประมาณ 0.05 โมลาร์ ซึ่งเฟอร์เรตที่เตรียมเกิดการสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากพีเอชที่สูงขึ้นอย่างมาก ความเข้มข้นที่สูงมาก และ เฟอร์ริก ที่เกิดขึ้นมากก็จะส่งผลต่อความคงตัวของเฟอร์เรตเช่นกัน (Schreyer และ Ockerman, 1951) จากการ ศึกษาเอกสารต่างๆ พบว่าไอออนต่างๆในน้ำมีผลต่อความคงตัวของเฟอร์เรต เช่นกัน และจากการทดลองถึงผลของบัฟเฟอร์ในภาคผนวก ก. พบว่าบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลทำให้ความเสถียรลดลงดังนั้นในน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นไอออนสูงจึงน่าจะส่งผลให้เฟอร์เรตมีความเสถียรลดลงอย่างมาก

จากผลการทดลองของ Sharma (2005) ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่มีความเข้มข้นไฮยาไนด์ทั้งหมด 662 ไมโคร โมลาร์ ซึ่งพบว่า ต้องใช้เฟอร์เรตในรูปโปตัสเซียมเฟอร์เรต 1200 มก./ล. หรือคิดเป็น 6060 ไมโคร โมลาร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ 99 % ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์สูงถึง 10 :1 แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับพีเอชของน้ำเสีย ผลการทดลองนี้ทำให้เชื่อว่าการบำบัดน้ำเสียจริงให้ได้ประสิทธิภาพสูงยังจำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรสำคัญบางตัวอีกซึ่งคาดว่าจะเป็นตัวแปรเกี่ยวข้องกับความเสถียรของเฟอร์เรต หรือ สารประกอบเชิงซ้อนของไฮยาไนด์กับโลหะหนักบางชนิด

5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมศาสตร์

1. ทราบถึงประสิทธิภาพ อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา และอัตราเกิดปฏิกิริยา ในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตและไฮยาไนด์ และผลกระทบของสังกะสีต่อการทำปฏิกิริยา
2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในเชิงทฤษฎีในการบำบัดน้ำเสียที่มีไฮยาไนด์และสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก
3. สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมจริง
4. เป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ที่มีไฮยาไนด์และสารอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ โดยมีประสิทธิภาพสูง มีปฏิกิริยาที่รวดเร็ว และไม่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยถึงผลของสิ่งกระตุ้นต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงโดยไม่เจือจางน้ำเสีย และโดยอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่ได้ศึกษาจากน้ำเสียจริง และ ใช้สภาวะที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้างต้น เพื่อศึกษาถึง ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และ การเปลี่ยนแปลงของพีเอช
2. ศึกษาถึงผลของเหล็ก เนื่องจากในน้ำเสียจริงนอกจากโลหะหนักที่เป็นพิษแล้ว ยังมีเหล็กที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ที่มีพันธะแข็งแรง และ อาจส่งผลต่อการบำบัดได้
3. ศึกษาถึงผลของโลหะหนักอื่นๆที่พบในอุตสาหกรรมการชุบโลหะชนิดอื่นๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ประยูร ฟองสดีศย์กุล, ชลาศัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และ วิสิทธิ์ สุขป้อม. การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยสารโปตัสเซียมเปอร์มังกานेट. วารสารสาธารณสุขศาสตร์ ปีที่ 29 ฉบับที่ 2 (2542): 38-47.

มันสิน ตันกุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

อนันต์ ทองมอย. 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.M. Water chemistry. NY: McGraw-Hill, 2002.

Bielski, B.; and Thomas, M. J. Studies of hypervalent iron in aqueous solutions.1: Radiation-induced reduction of iron(VI) to iron(V) by CO₂. 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. 33,3. (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.
- 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 K^+ -crown Ether as a Carrier” Desalination. 151 (2002): 87-94.
- Graham, N.; Jiang, C. C.; Li, X. Z.; Jiang, J. Q.; Ma, J. The Influence of pH on The Degradation of Phenol and Chlorophenols by Potassium Ferrate. Chemosphere. 56 (2004): 949-956.

- Hattinger, L. Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry. 2nd ed. Finishing Publications, 1994
- Hine, F.; Yasuda, M.; Lida, T.; and Ogata, Y. On the Oxidation of Cyanide Solution with Lead Oxide Coated Anode. Electrochimica Acta. 31 (1986): 1389-1395.
- Ho, S. P.; Wang, Y. Y.; and Wan, C. C. Electrolytic decomposition 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.
- Kurama, H.; and Catalarik, 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): 5750-5756.
- 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.htm>[2005, September 14]

- 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.; Lei, P. J. Reduction of Fulvic Acid in Drinking Water by Ferrate. Journal of Environmental Engineering, 129,1 (2003): 17-24.
- 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.
- Rania, H.; and Roldan, C. J. Toxicity Cyanide[online]. 2003. Available from: <http://www.emedicine.com/cgi-bin/foxweb.exe/screen@d:/em/ga?book=med&authored=2689&topicid=487>[2004, June 10]
- 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 O'Brien, B. Ferrate(VI) Oxidation Of Aqueous Cyanide. Environ. Sci. Technol. 32 (1998): 2608-2613.

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.

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.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต



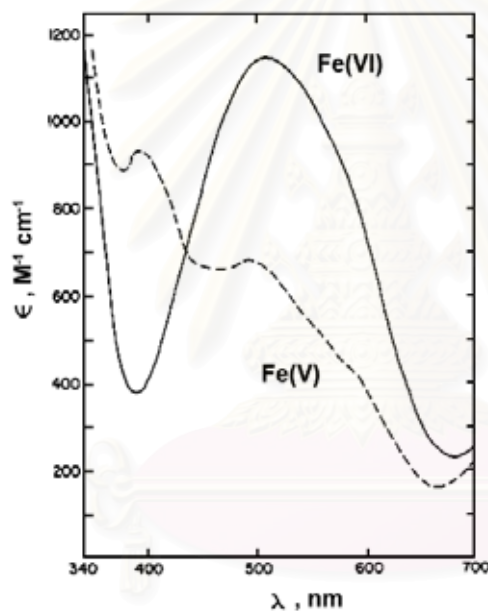
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

ก.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตมีเป็นสารละลายที่มีสีม่วงและสามารถตรวจวัดได้โดย Spectroscopy Method โดยเฟอร์ค่าการดูดซับแสงของเฟอร์เรต มีค่าสูงสุดที่ 510 นาโนเมตร (nm) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ $\epsilon = 1150 \pm 25$ โมลาร์⁻¹เซนติเมตร⁻¹ (M⁻¹cm⁻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) และ คำนวณเป็นความเข้มข้นของเฟอร์เรตได้จากสมการของ beer's law ดังสมการที่ ก-1

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

เมื่อ

A = ค่าการดูดซับแสง ที่ตรวจวัดได้ ไม่มีหน่วย

ϵ = สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง มีค่าเท่ากับ 1150 โมลาร์⁻¹เซนติเมตร⁻¹ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

C = ความเข้มข้นของเฟอร์เรต หน่วย โมลาร์

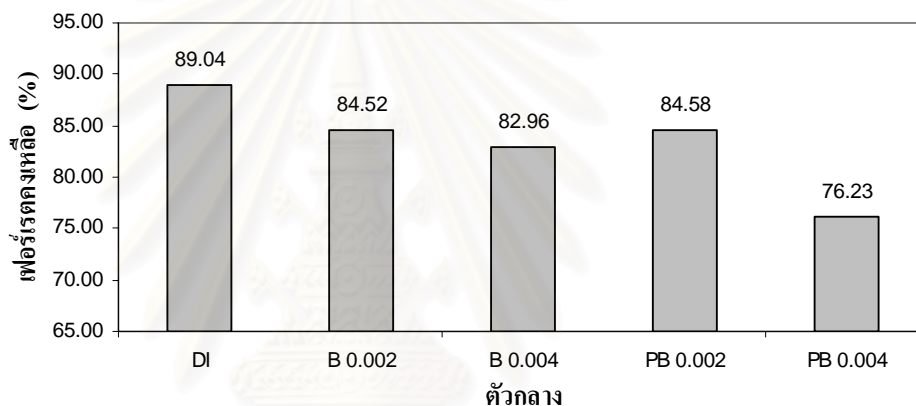
L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวกลาง มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร สำหรับเครื่องยูวีวิสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ก.2 ความคงตัวของสารละลายเฟอร์เรต

ก.2.1 ผลของสารละลายบัฟเฟอร์

ทดลองโดยผสมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 ไมโคร โมลาร์ ด้วยตัวกลางต่างๆ คือ น้ำปราศจากไอออน (DI) ไม่ปรับพีเอช สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต (PB) เข้มข้น 0.004 และ 0.002 โมลาร์ และ สารละลายบอร์เรต (B) เข้มข้น 0.004 และ 0.002 โมลาร์ นำสารละลายที่ได้ไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เวลา 0 10 20 30 และ 60 นาที และนำผลมาวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือในสารละลาย

ผลการทดลองพบว่า ความคงตัวของสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนมีค่าสูงที่สุด และ เมื่อความเข้มข้นของบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความคงตัวลดลงดังรูปที่ ก.2

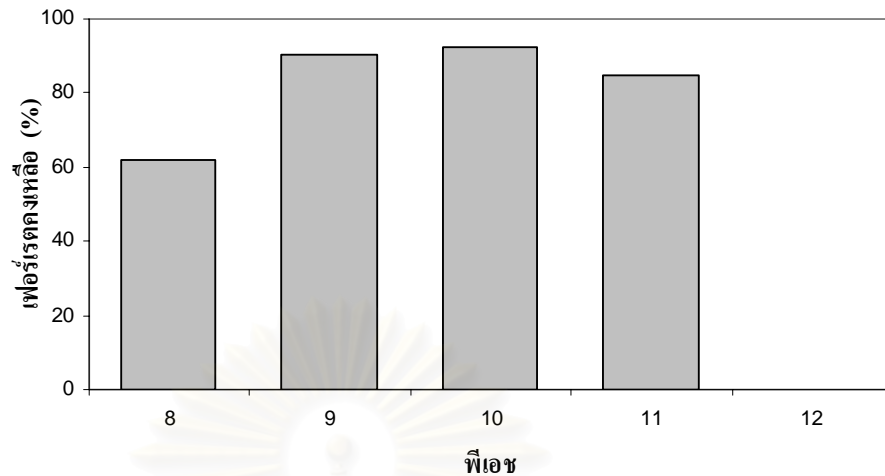


รูปที่ ก.2 ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือกับตัวกลางชนิดต่างๆที่เวลา 60 นาที

ก.2.2 ผลของพีเอช

ทดลองโดยใช้ตัวกลางคือ สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตซึ่งมีความสามารถเป็นบัฟเฟอร์ได้ทุกพีเอชที่ใช้ทดลอง สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตมีความเข้มข้น 0.002 โมลาร์ ปรับพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 แล้วนำไปผสมเป็นสารละลายเฟอร์เรต และนำไปตรวจความเข้มข้นที่เวลา 0 10 20 และ 30 นาที และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือในสารละลาย

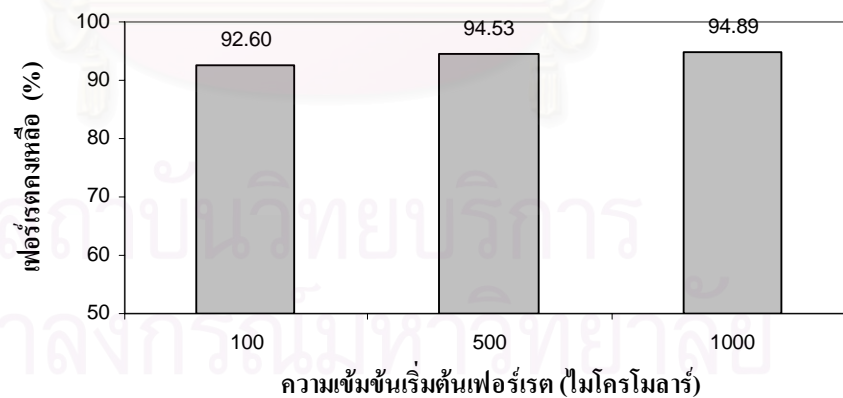
ผลการทดลองพบว่าที่เวลา 10 นาที สารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 12 ได้สลายตัวไปจนหมด โดยสังเกตจากสีของสารละลาย ในขณะที่สารละลายที่พีเอช 8 9 10 และ 11 สลายตัวไปเล็กน้อย และที่เวลา 20 นาทีปริมาณการสลายตัวของเฟอร์เรตแตกต่างกันจนเห็นได้ชัดดังรูปที่ ก.3 โดยพบว่าในช่วงพีเอช 9 ถึง 11 สารละลายเฟอร์เรตมีความคงตัวสูง และมีความคงตัวสูงที่สุดที่พีเอช 10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Graham และคณะ (2004)



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์เรตคองเหลือกับฟิเช
ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.002 โมลาร์ ที่เวลา 20 นาที

ก.2.3 ผลของความเข้มข้น

ทดลองโดยผสมสารละลายเฟอร์ในน้ำปราศจากไอออน โดยแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรต 100 500 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เวลา 0 10 20 30 และ 60 นาที ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เฟอร์เรตสลายตัวในปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะมีค่าไม่ต่างกันมากดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ปริมาณเฟอร์เรตคองเหลือกับความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรต
ในน้ำปราศจากไอออน ที่เวลา 60 นาที

ก.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

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

ก.4 การหยุดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์

ในการทดลองเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะหยุดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไซยาไนด์ การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยการทำให้เฟอร์เรตหายไปจากน้ำตัวอย่างในเวลาที่ต้องการ โดยวิธีการหยุดปฏิกิริยาวิธีหนึ่ง คือการหาสารอื่นๆที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าไซยาไนด์อย่างมาก เติมนลงในน้ำตัวอย่างที่ต้องการ

อาร์เซไนท์ (As^{3+}) มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ $3.54 \cdot 10^5$ โมล⁻¹ วินาที⁻¹ ที่พีเอช 8.4 และลดลงเป็นประมาณ $1.23 \cdot 10^3$ โมล⁻¹ วินาที⁻¹ ที่พีเอช 12.9 (Lee Um และ Yoon, 2003) ในขณะที่ไซยาไนด์มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ $3.76 \cdot 10^2$ โมล⁻¹ 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 จะใช้ความเข้มข้นอาร์เซไนท์ในการหยุดปฏิกิริยา 750 ไมโครโมลาร์ ซึ่งกระทำโดยเติมสารละลายอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มล. ต่อตัวอย่าง 10 มล. สารละลายหลังผสมจะมีเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนท์เท่ากับ 2:3 พอดี

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายอาร์เซไนท์ลงในสารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 พบว่าสารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซไนท์หมดทันทีโดยสังเกตจากสีม่วงของสารละลายที่หายไปทันที ซึ่งเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดกับไซยาไนด์มาก

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายบัฟเฟอร์

เวลา นาที	น้ำปราศจากไอออน		บอร์เรต		บอร์เรต		ฟอสเฟต-บอร์เรต		ฟอสเฟต-บอร์เรต	
	0.002 โมลาร์ ที่พีเอช 9		0.004 โมลาร์ ที่พีเอช 9		0.002 โมลาร์ ที่พีเอช 9		0.004 โมลาร์ ที่พีเอช 9			
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%
0	190.43	100.00	207.83	100.00	193.91	100.00	208.70	100.00	212.17	100.00
10	187.83	98.63	202.61	97.49	186.09	95.96	201.74	96.67	199.13	93.85
20	186.09	97.72	203.48	97.91	180.87	93.27	195.65	93.75	189.57	89.34
30	180.87	94.98	194.78	93.72	173.91	89.69	188.70	90.42	180.00	84.84
60	169.57	89.04	175.65	84.52	160.87	82.96	176.52	84.58	161.74	76.23

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นของฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต 0.002 โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

เวลา นาที	พีเอช									
	8		9		10		11		12	
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%
0	193.04	100.00	196.52	100.00	204.35	100.00	188.70	100.00	196.52	100.00
10	142.61	73.87	182.61	92.92	194.78	95.32	179.13	94.93	148.70	75.66
20	120.00	62.16	177.39	90.27	188.70	92.34	160.00	84.79	0.00	0.00
30	104.35	54.05	172.17	87.61	187.83	91.91	143.48	76.04	0.00	0.00

ตารางที่ ก.3 ความเข้มข้นฟอร์เรตที่เวลาต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เวลา	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%
0	1255	100.00	476	100.00	119	100.00
10	1243	99.03	472	99.27	118	99.27
20	1218	97.09	463	97.26	115	96.35
30	1216	96.88	463	97.26	114	95.62
60	1216	96.88	459	96.53	113	94.89

ภาคผนวก ข.

การเก็บรักษาตัวอย่าง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การเก็บรักษาตัวอย่าง

ข.1 ข้อควรระวังในการเก็บรักษาไซยาไนด์ในไตรท์ และไนเตรท

ข้อควรระวังในการเก็บรักษาตัวอย่างมีดังนี้

ข.1.1 การระเหย

เป็นข้อควรระวังที่สำคัญที่สุดสำหรับไซยาไนด์ การระเหยจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อสารละลายมีพีเอช ต่ำกว่า 12

ข.1.2 การเกิดการออกซิไดซ์

การเกิดการออกซิไดซ์ เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารที่มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับ ไซยาไนด์ ไซยาเนต และ ไนไตรท์

ข.1.3 การเกิดปฏิกิริยากับสารเจือปนอื่นๆ

เป็นข้อควรระวังอีกข้อหนึ่งสำหรับไซยาไนด์ เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ (S^{2-}) กลายเป็นไซโอไซยาเนต (SCN⁻) (มันสิน ดันจกุลเวศม์, 2546)

ข.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ

ไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

ข.2 การเก็บรักษาตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ไซยาไนด์ในไตรท์ และไนเตรท

จากผลการศึกษาข้างต้น การเก็บรักษาตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรทั้งหมดคือ การเก็บรักษาในสภาวะที่เป็นเบส มีพีเอชมากกว่า 12 ในที่นี้จะใช้วิธีผสมตัวอย่างในอัตราส่วน น้ำตัวอย่างต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ เท่ากับ 5 ต่อ 1 เพื่อให้ตัวอย่างถูกเก็บรักษาในสภาพที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ซึ่งจะมีพีเอชมากกว่า 12.5 และ เก็บรักษาตัวอย่างในที่มืด และอุณหภูมิต่ำ

ภาคผนวก ค.

ศึกษาวีรทัศดลองเกี่ยวกับไชยาไนด์



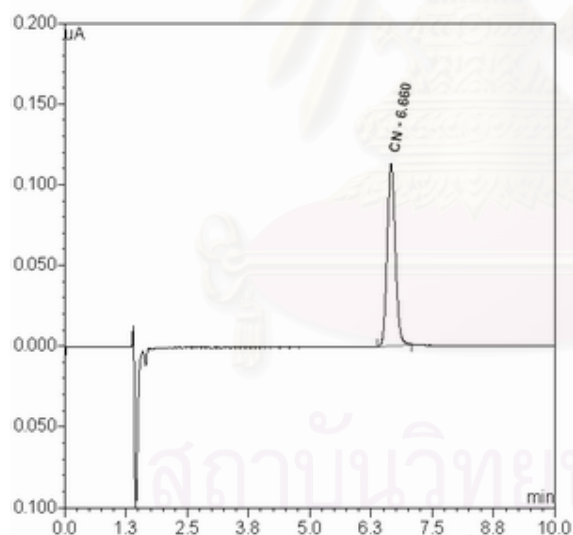
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

ค.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

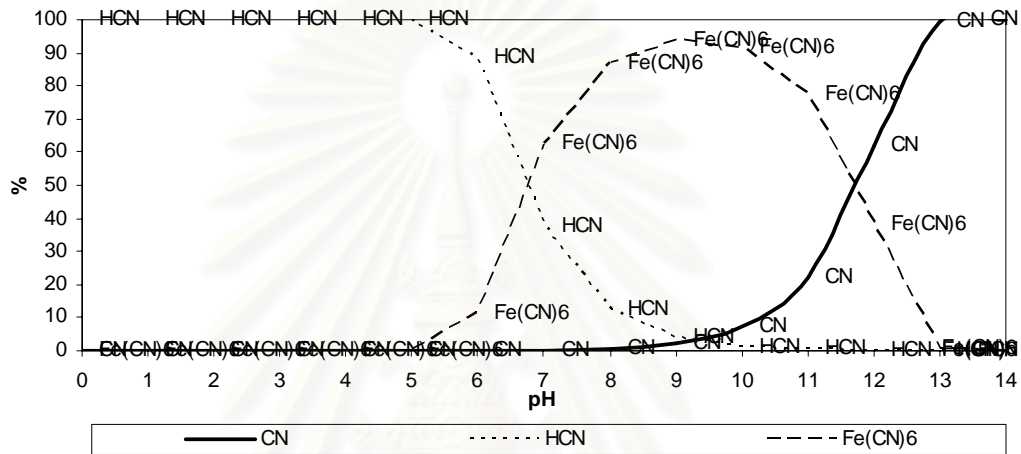
ไซยาไนด์สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสารคือ คอลัมน์ AS7 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Electrochemical Cell โดยใช้ Silver working Electrode ที่ 0.00 V และ ใช้ Ag/AgCl reference Mobile phase ที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท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



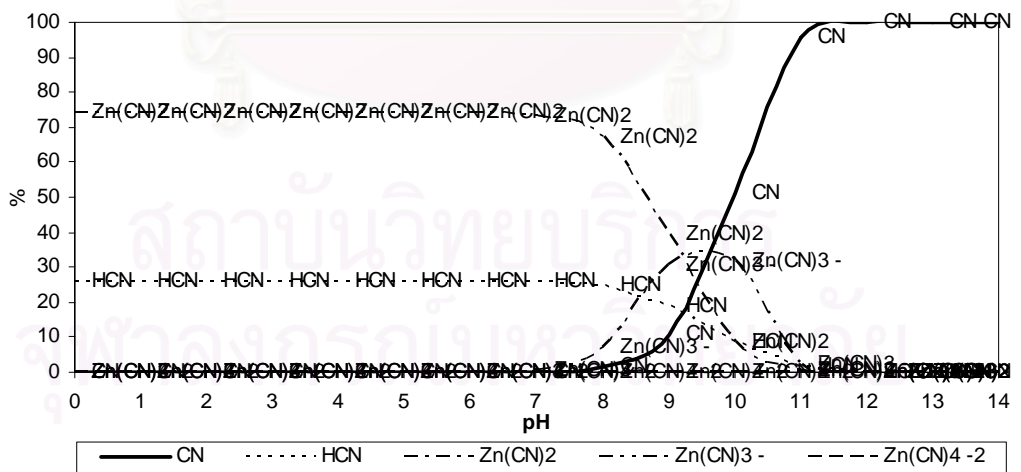
รูปที่ ค.1 สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ

ค.2 ผลของเฟอร์ริก สังกะสี และสารอื่นๆในระบบต่อการตรวจวัดไซยาไนด์

ไซยาไนด์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) ได้ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดคลาดเคลื่อนเพราะการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟเป็นการตรวจวัดไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระเป็นหลัก จากการคำนวณพบว่า ไซยาไนด์ในระบบที่มีเฟอร์ริก และสังกะสี ที่พีเอชมากกว่า 12 ไซยาไนด์ในระบบจะอยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระ ดังรูปที่ ค.2 และ ค.3



รูปที่ ค.2 รูปแบบของไซยาไนด์ในสารละลายที่มีเฟอร์ริกที่ค่าอิมตัว ที่พีเอชต่างๆ ในสารละลายไซยาไนด์ 50 ไมโครโมลาร์ จากการคำนวณ



รูปที่ ค.3 รูปแบบของไซยาไนด์ในสารละลายที่มีสังกะสีที่ค่าอิมตัว ที่พีเอชต่างๆ ในสารละลายไซยาไนด์ 50 ไมโครโมลาร์ จากการคำนวณ

การทดลองกระทำโดยผสมสารละลายที่มีไซยาไนด์ 10 และ 100 ไมโครโมลาร์ในสารละลายที่มีสังกะสี 100 ไมโครโมลาร์ และในสารละลายที่มีเฟอร์ริก 500 ไมโครโมลาร์ เมื่อผสม

นำตัวอย่างพร้อมแล้วให้นำตัวอย่าง 10 มล. ไปเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 2 มล. เป็นการปรับพีเอชให้สูงเพื่อป้องกันการระเหยของไซยาไนด์ และนำไปกรองเพื่อนำไปตรวจความเข้มข้นไซยาไนด์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ ซึ่งเป็นขั้นตอนการเก็บตัวอย่างแบบเดียวกับการทดลองในบทที่ 3 ผลการทดลองมีค่าดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่ตรวจวัดได้ในสารละลายที่มีสังกะสี 100 ไมโครโมลาร์ และสารละลายที่มีเฟอร์ริก 500 ไมโครโมลาร์

ตัวอย่าง	สารละลายที่มีสังกะสี 100 ไมโครโมลาร์		สารละลายที่มีเฟอร์ริก 500 ไมโครโมลาร์	
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
blank	10.13	98.86	10.78	111.68
ตัวอย่างที่ 1	10.37	103.43	8.92	111.67
ตัวอย่างที่ 2	10.77	103.54	9.87	110.31
ตัวอย่างที่ 3	9.45	102.37	10.15	108.77

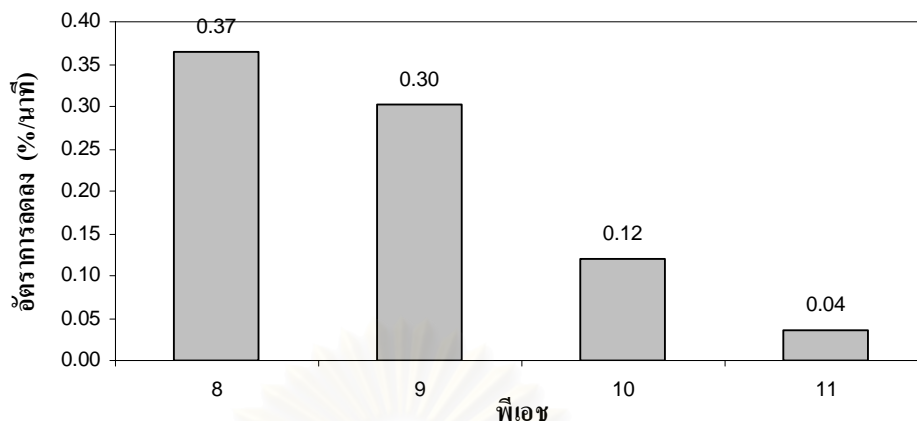
ผลการทดลองพบว่า ไซยาไนด์ที่ตรวจวัดได้ในสารละลายที่ไม่มีสังกะสีและเฟอร์ริก สารละลายที่มีสังกะสี และสารละลายที่มีเฟอร์ริก มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสังกะสีและเฟอร์ริก ไม่มีผลต่อการตรวจวัดตัวอย่างที่ผ่านวิธีการปรับสภาพตัวอย่างโดยวิธีนี้ สำหรับสารอื่นๆที่ใช้พบว่าไม่มีผลต่อสัญญาณการตรวจวัดเช่นกัน

ค.3 การระเหยของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถระเหยได้เมื่ออยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ดังนั้นจึงควรทราบถึงลักษณะในการระเหยของไซยาไนด์เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถทำการทดลองได้อย่างเหมาะสม

การทดลองกระทำโดยเตรียมสารละลายไซยาไนด์ความเข้มข้น 10 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 นำสารละลายใส่ภาชนะที่ใช้ในการทดลอง เปิดฝา และวางไว้ในตู้ดูดอากาศ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 และ 30 นาทีเพื่อนำไปวิเคราะห์การระเหยของไซยาไนด์

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลต่ออัตราการระเหยที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การระเหยได้ใกล้เคียงกัน และ การระเหยมีค่าลดลงจากพีเอช 8 ถึง 12 ดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไชยาไนต์กับฟีเอช

ค.4 การเตรียมสารละลายไชยาไนต์

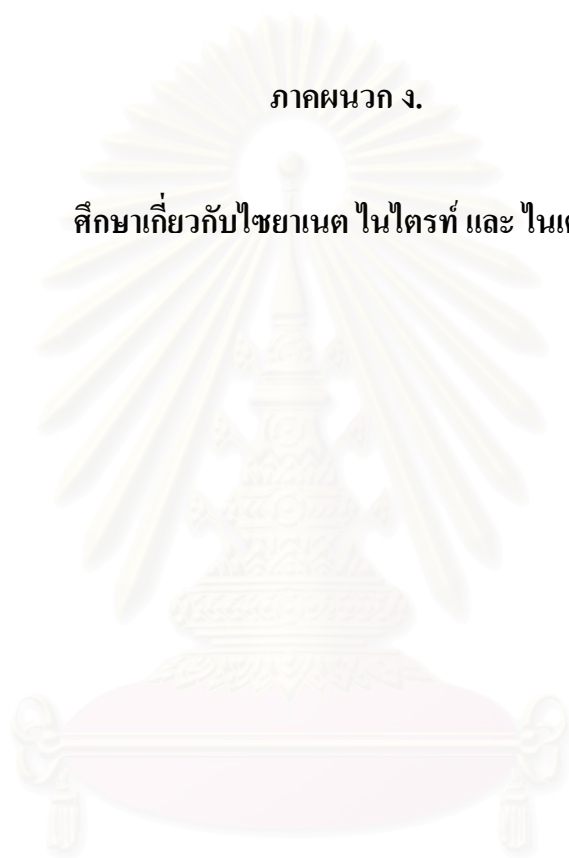
สารละลายไชยาไนต์จะเตรียมโดยผสมโปตัสเซียมไชยาไนต์ 0.064 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ เพื่อให้สารละลายมีพีเอชมากกว่า 12 ปริมาตร 100 มล. ซึ่งจะได้สารละลายไชยาไนต์เข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับสารละลายไชยาไนต์ที่ความเข้มข้นอื่นให้เจือจางลงมาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ สารละลายที่เตรียมแต่ละครั้งไม่ควรเก็บไว้ใช้งานเกิน 1 สัปดาห์ เนื่องจากสารละลายนี้ใช้ในการทำสารละลายมาตรฐานในการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟีด้วย

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะเปิดฝา พีเอช 8 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ต่างๆ

พีเอช	ตัวอย่าง	เวลา 0 นาที	เวลา 30 นาที	อัตราการระเหย		
		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์/นาที	% / นาที	เฉลี่ย % / นาที
8	ตัวอย่างที่ 1	481.3	421.0	60.3	0.42	0.37
	ตัวอย่างที่ 2	85.0	77.2	7.8	0.31	
	ตัวอย่างที่ 3	40.5	36.3	4.2	0.35	
	ตัวอย่างที่ 4	6.8	6.0	0.8	0.39	
9	ตัวอย่างที่ 1	479.0	436.7	42.3	0.29	0.30
	ตัวอย่างที่ 2	84.0	76.5	7.5	0.29	
	ตัวอย่างที่ 3	41.8	37.6	4.2	0.33	
	ตัวอย่างที่ 4	6.8	6.2	0.6	0.29	
10	ตัวอย่างที่ 1	490.3	475.7	14.6	0.10	0.12
	ตัวอย่างที่ 2	88.0	84.0	4.0	0.15	
	ตัวอย่างที่ 3	42.6	40.9	1.7	0.13	
	ตัวอย่างที่ 4	7.1	6.9	0.2	0.09	
11	ตัวอย่างที่ 1	517.0	509.0	8.0	0.05	0.04
	ตัวอย่างที่ 2	80.8	80.2	0.6	0.02	
	ตัวอย่างที่ 3	42.9	42.7	0.2	0.02	
	ตัวอย่างที่ 4	6.7	6.6	0.1	0.05	

ภาคผนวก ง.

ศึกษาเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท



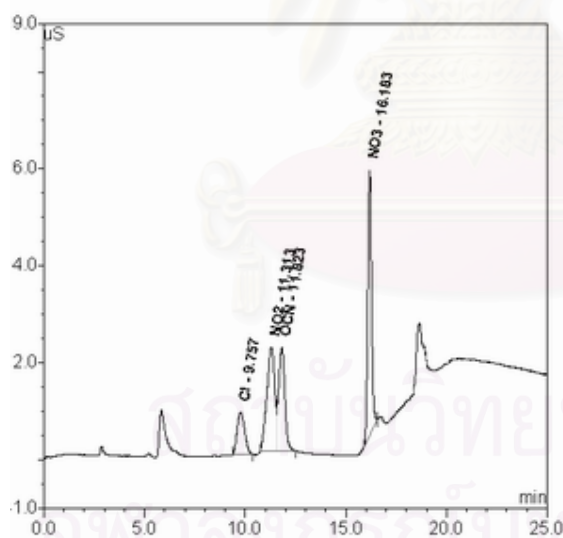
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ศึกษาเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

ง.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

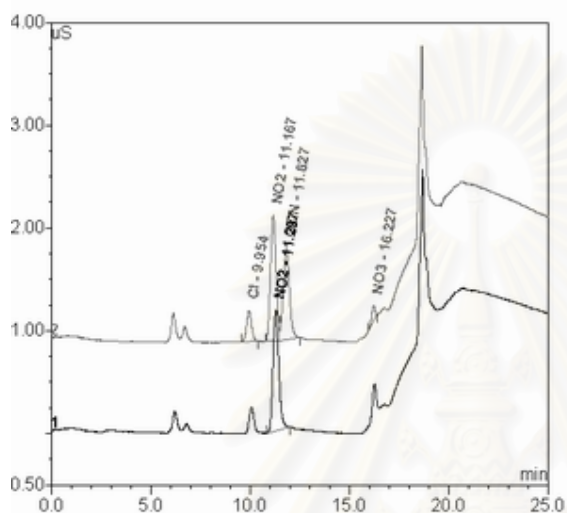
ไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสารคือ คอลัมน์ AS16 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Suppressor รุ่น ASRS 4 mm โดยใช้ Mode : Conductivity SRS current เท่ากับ 137 mA อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส Mobile phase ใช้ สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์โดยผลิตจาก RFC โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นสารตั้งต้น อัตราการไหล 1 มล./นาที ที่เครื่อง RFC กำหนดความเข้มข้นของโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.8 มิลลิโมลาร์ ถึง 55 มิลลิโมลาร์ ใช้ระยะเวลาเกรเดียน 5 นาที ที่โปรแกรมกำหนดเริ่มทำการเกรเดียนที่เวลา 12 นาที สิ้นสุดที่เวลา 25 นาที ระยะเวลาตรวจวัดตัวอย่าง 25 นาที และ เว้นช่วงให้ ความเข้มข้นของ Mobile phase คงที่อีก 5 นาที ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท ดังรูปที่ ง.1



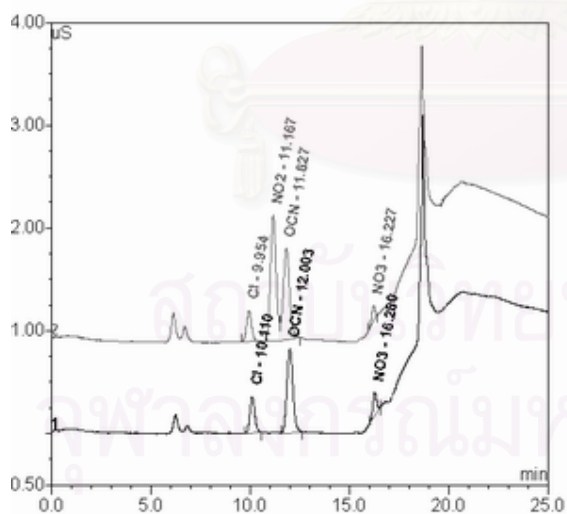
รูปที่ ง.1 สัญญาณของคลอไรด์ ไนไตรท์ ไซยาเนต และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ

ไซยาเนตและไนไตรท์จะมีสัญญาณติดกัน โดยไนไตรท์จะปรากฏสัญญาณก่อน ดังรูปที่ ง.2 และ ไซยาเนต เป็นสัญญาณถัดไปดังรูปที่ ง.3 สัญญาณทั้ง 2 มีเวลาปรากฏใกล้เคียงกันมาก และเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย จากการทดลองพบว่า สัญญาณของคลอไรด์ จะปรากฏก่อนสัญญาณของไนไตรท์เล็กน้อยและสามารถใช้คลอไรด์เป็นสัญญาณอ้างอิงได้ ตัวอย่างสัญญาณจากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างจริงที่มีการเติมคลอไรด์ลงไปเล็กน้อย ดังรูปที่ ง.4 หรือ อีกวิธีหนึ่งสามารถตรวจความ

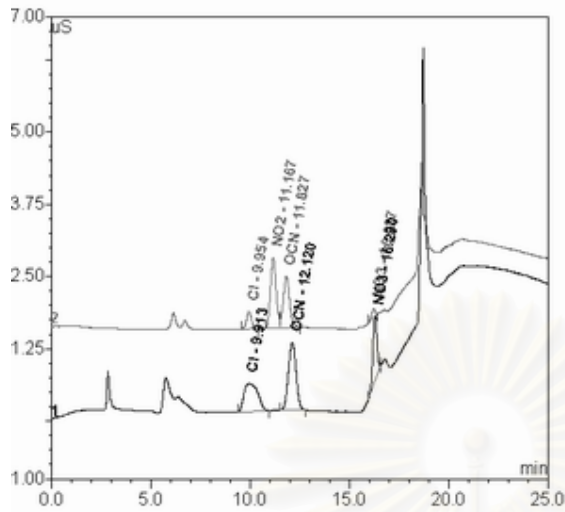
แน่นอนได้ว่าเป็นสัญญาณของไนไตรท์หรือไซยาเนตได้ โดยการเติมสารละลายมาตรฐานที่ใช้ลงไปในตัวอย่าง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐานดังรูปที่ ๓.5 จะเห็นได้ชัดว่า สัญญาณของไซยาเนตมีค่าสูงขึ้น



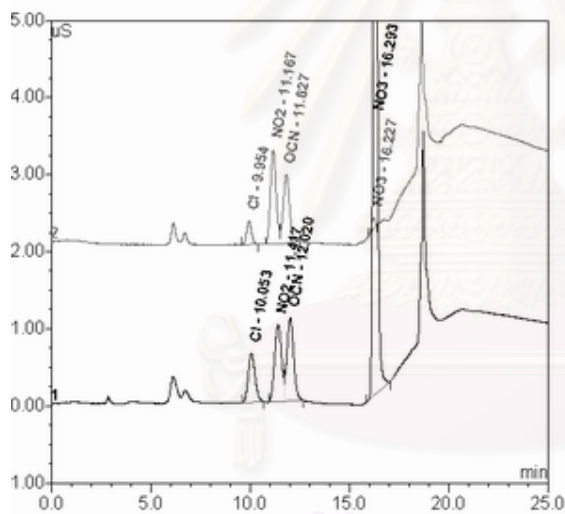
รูปที่ ๓.2 ตำแหน่งสัญญาณของไนไตรท์ โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไนไตรท์ และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ๓.3 ตำแหน่งสัญญาณของไซยาเนต โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไซยาเนต และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน

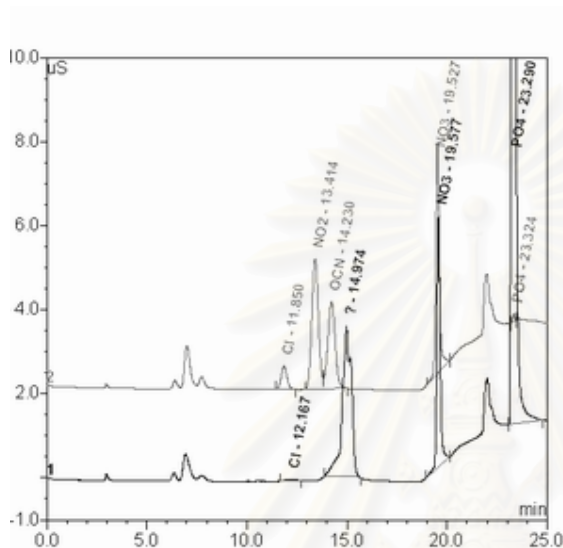


รูปที่ ๔.4 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากตัวอย่างน้ำจริงกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ๕.5 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เติมสารละลายมาตรฐานลงไป กับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้มคือสัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน

ง.2 ผลของเฟอร์ริก สังกะสี และสารอื่นๆในระบบต่อการตรวจวัดไซยาเนตในไตรท์ และในเตรท จากการทดลองพบว่าเฟอร์ริกและสังกะสี ไม่มีผลต่อการตรวจวัด สำหรับสารอื่นๆพบว่า ฟอสเฟต มีผลต่อการตรวจวัดอย่างมาก เนื่องจากฟอสเฟตที่ใช้เป็นบัฟเฟอร์มีความเข้มข้นสูงมากทำให้เกิดการโอเวอร์โหลด ทำให้สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ ง.6



รูปที่ ง.6 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เกิดการโอเวอร์โหลด กับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐานโดยเส้นสีเข้มคือสัญญาณของน้ำตัวอย่างและเส้นสีจางคือสัญญาณของสารละลายมาตรฐาน

จากการทดลองพบว่าสัญญาณการตรวจวัดจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อน้ำตัวอย่างมีฟอสเฟตไม่เกิน 0.002 โมลาร์ ดังนั้นในการทดลองที่ใช้ฟอสเฟตจึงต้องมีการเจือจางตัวอย่างให้มีฟอสเฟตไม่เกินค่านี้ด้วย ปัญหานี้ไม่พบกับสารละลายบอร์เรตที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษากำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ตารางที่ จ.1 ก. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโคร โมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์		สารผลิตภัณฑ์						
				พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท			ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.00	49.94	5.26	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	8.03	11.62	7.68	28.51	0.00	76.73	72.99	7.82	5.99	92.18	94.01	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	8.06	12.21	6.06	29.59	0.00	75.55		2.63		97.37		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	8.05	16.64	7.55	28.13	0.00	66.68		7.53		92.47		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		9.01	51.78	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	50.86	9.11	9.03	3.86	0.00	50.83	0.00	92.55	92.35	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	50.86	9.11	9.03	4.11	0.00	43.33	0.00	92.06		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	50.86	9.11	8.99	3.92	0.00	45.63	0.00	92.43		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		9.98	52.50	8.66	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.14	10.09	5.90	9.69	43.92	0.00	88.76	91.24	2.29	2.77	97.71	97.23	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.14	10.04	3.78	10.67	45.38	0.00	92.80		4.24		95.76		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.14	10.06	4.11	9.47	44.66	0.00	92.17		1.78		98.22		0.00		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank			11.02	46.90	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	10.97	6.78	0.00	52.19	0.00	85.54	85.47	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	10.88	6.09	0.00	36.67	0.00	87.02		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	11.01	7.57	0.00	46.32	0.00	83.86		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank			12.26	52.53	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	12.04	41.10	ND.	ND.	0.00	21.75	22.64	ND.	ND.	ND.	ND.	ND.	ND.	
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	12.05	43.04	ND.	ND.	0.00	18.06		ND.		ND.		ND.		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	11.98	37.76	ND.	ND.	0.00	28.11		ND.		ND.		ND.		

ตารางที่ จ.1 ข. ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอริ์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์		สารผลิตภัณฑ์						
				ฟิเอช	ไซยาไนด์	ไนโตร	ไซยาเนต	ไนเตรท			ไนเตรท		ไซยาเนต		ไนเตรท		
		ไมโครโมลาร์	ฟิเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1 (ฟิเอช 8)	Blank	0.00		8.08	114.23	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.45	8.09	17.72	0.00	64.63	0.00	84.49	85.24	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.45	8.11	16.31	0.00	66.10	0.00	85.72		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.45	8.12	16.54	0.00	65.28	0.00	85.52		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 2 (ฟิเอช 9)	Blank	0.00		8.92	101.09	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	98.26	10.01	8.97	2.02	0.00	97.97	0.00	98.00	98.10	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	98.26	10.01	8.95	1.90	0.00	99.00	0.00	98.12		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	98.26	10.01	9.03	1.83	0.00	98.73	0.00	98.19		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 3 (ฟิเอช 10)	Blank	0.00		9.99	94.96	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.45	10.00	1.80	0.00	90.81	0.00	98.10	97.59	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.45	10.02	2.33	0.00	93.03	0.00	97.55		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.45	10.01	2.73	0.00	94.26	0.00	97.13		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 4 (ฟิเอช 11)	Blank	0.00		11.08	104.13	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.45	11.06	9.34	0.00	82.07	0.00	91.03	91.15	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.45	11.09	11.75	0.00	77.71	0.00	88.72		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.45	11.06	6.56	0.00	85.63	0.00	93.70		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 5 (ฟิเอช 12)	Blank	0.00		12.21	103.20	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	98.26	10.01	12.08	78.51	0.00	24.35	0.00	23.92	20.32	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	98.26	10.01	12.09	83.10	0.00	14.02	0.00	19.48		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	98.26	10.01	12.08	85.09	0.00	19.88	0.00	17.55		0.00		100.00		0.00		

ตารางที่ จ.1 ค. ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอรัเรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์		สารผลิตภัณฑ์						
				ฟิเอช	ไซยาไนด์	ไนโตร	ไซยาเนต	ไนเตรท			ไนเตรท		ไซยาเนต		ไนเตรท		
		ไมโครโมลาร์	ฟิเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (ฟิเอช 8)	Blank	0.00		7.86	550.58	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	486.52	10.59	7.91	124.38	0.00	274.36	0.00	77.41	79.64	0.00	0.00	100.00	98.13	0.00	0.00	1.87
	ตัวอย่างที่ 2	486.52	10.59	7.85	116.88	0.00	277.73	0.00	78.77		0.00		100.00				
	ตัวอย่างที่ 3	486.52	10.59	7.88	95.01	0.00	268.08	15.94	82.74		0.00		94.39				
ชุดที่ 2 (ฟิเอช 9)	Blank	0.00		8.82	489.00	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	488.70	10.60	8.99	0.00	16.92	423.70	0.00	100.00	100.00	3.84	3.32	96.16	96.68	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	488.70	10.60	8.95	0.00	12.21	429.58	0.00	100.00		2.76		97.24				
	ตัวอย่างที่ 3	488.70	10.60	8.91	0.00	14.70	424.62	0.00	100.00		3.35		96.65				
ชุดที่ 3 (ฟิเอช 10)	Blank	0.00		9.83	480.98	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	486.96	10.63	9.87	0.00	0.00	455.89	14.76	100.00	100.00	0.00	0.00	96.86	98.95	3.14	0.00	1.05
	ตัวอย่างที่ 2	486.96	10.63	9.85	0.00	0.00	453.78	0.00	100.00		0.00		100.00				
	ตัวอย่างที่ 3	486.96	10.63	9.87	0.00	0.00	459.39	0.00	100.00		0.00		100.00				
ชุดที่ 4 (ฟิเอช 11)	Blank	0.00		11.09	482.97	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	486.96	10.63	11.04	2.54	0.00	402.94	0.00	99.47	99.55	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	486.96	10.63	10.99	1.91	0.00	432.40	0.00	99.60		0.00		100.00				
	ตัวอย่างที่ 3	486.96	10.63	10.98	2.01	0.00	482.32	0.00	99.58		0.00		100.00				
ชุดที่ 5 (ฟิเอช 12)	Blank	0		12.22	532.54	0.00	0.00	21.76									
	ตัวอย่างที่ 1	494.78	10.61	12.14	269.08	0.00	205.53	24.71	49.47	45.98	0.00	0.00	98.58	97.27	1.42	0.00	2.73
	ตัวอย่างที่ 2	494.78	10.61	12.10	290.51	0.00	202.62	32.17	45.45		0.00		95.11				
	ตัวอย่างที่ 3	494.78	10.61	12.07	303.46	0.00	204.07	25.69	43.02		0.00		98.11				

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

เวลา	พีเอช									
	8		9		10		11		12	
นาที่	ไมโคร	%	ไมโคร	%	ไมโคร	%	ไมโคร	%	ไมโคร	%
	โมลาร์		โมลาร์		โมลาร์		โมลาร์		โมลาร์	
0	79.09	100.00	85.02	100.00	90.01	100.00	89.75	100.00	101.75	100.00
1	25.11	31.75	21.13	24.85	32.90	36.55	70.48	78.53	93.62	92.01
5	18.38	23.24	7.24	8.52	15.28	16.98	61.45	68.47	85.75	84.28
10	17.29	21.86	4.84	5.69	8.60	9.55	45.57	50.77	76.41	75.10
20	17.14	21.67	4.34	5.10	4.79	5.32	33.90	37.77	70.55	69.34
30	17.89	22.62	3.94	4.63	3.19	3.54	28.48	31.73	69.43	68.24
60	17.81	22.52	3.47	4.08	1.00	1.11	20.13	22.43	71.59	70.36
90	17.37	21.96	3.23	3.80	0.00	0.00	14.51	16.17	67.98	66.81
120	19.67	24.87	3.32	3.90	0.00	0.00	13.12	14.62	67.64	66.48
150	17.86	22.58	3.05	3.59	0.00	0.00	12.37	13.78	68.72	67.54
180	17.62	22.28	2.92	3.43	0.00	0.00	10.68	11.90	67.68	66.52
210	17.91	22.65	3.49	4.10	0.00	0.00	10.77	12.00	68.01	66.84
240	17.20	21.75	3.68	4.33	0.00	0.00	10.22	11.39	67.94	66.77
ประสิทธิภาพ %	78.25		95.67		100.00		88.61		33.23	
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	101.30		101.30		101.30		101.30		101.30	
พีเอช	7.88		9.03		9.94		10.77		12.08	

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ตารางที่ จ.3 ก. ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์		สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	% เกลี่ย	% เกลี่ย	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์			%	% เกลี่ย	%	% เกลี่ย	%	% เกลี่ย	
ชุดที่ 1 (อัตราส่วน 1:1)	Blank	0.00		9.03	51.78	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.27	9.09	3.86	0.00	50.83	0.00	92.55	92.35	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.27	9.04	4.11	0.00	43.33	0.00	92.06		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.27	9.05	3.92	0.00	45.63	0.00	92.43		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 2 (อัตราส่วน 1:1.5)	Blank	0.00		8.86	46.17	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	73.91	9.47	8.89	0.00	0.00	48.48	0.00	100.00	100.00	0.00	2.95	100.00	97.05	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	73.91	9.47	8.89	0.00	4.00	41.20	0.00	100.00		8.85		91.15		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	73.91	9.47	8.91	0.00	0.00	45.66	0.00	100.00		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 3 (อัตราส่วน 1:2)	Blank	0.00		8.89	46.03	6.46	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	96.96	9.69	8.92	0.00	8.71	44.24	0.00	100.00	100.00	4.84	2.42	95.16	97.58	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	96.96	9.69	8.91	0.00	7.36	44.23	0.00	100.00		1.99		98.01		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	96.96	9.69	8.95	0.00	6.65	43.82	0.00	100.00		0.43		99.57		0.00		

ตารางที่ จ.3 ข. ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

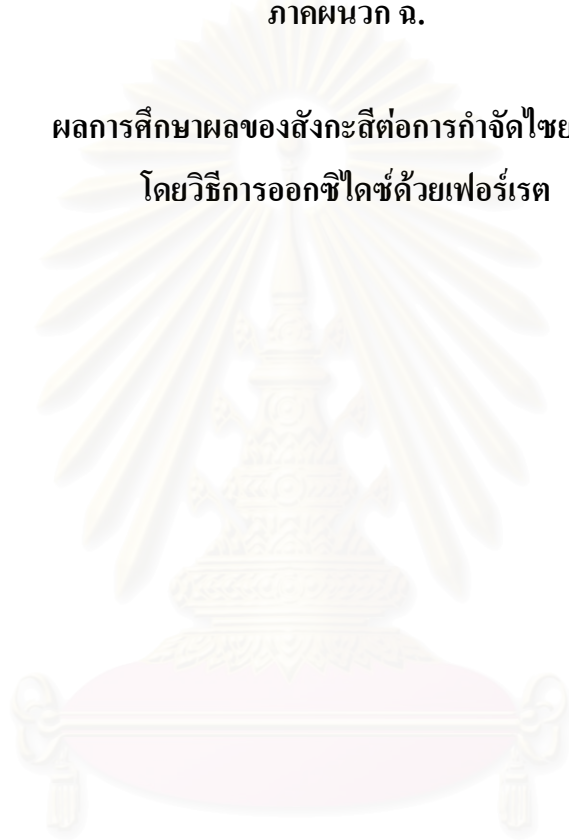
ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพใน		สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานต	ไนเตรท	การกำจัดไซยาไนด์		ไนเตรท์		ไซยานต		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1 (อัตราส่วน 1:1)	Blank	0.00		9.98	101.09	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.56	9.00	2.02	0.00	97.97	0.00	98.00	98.10	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.56	9.02	1.90	0.00	99.00	0.00	98.12		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.56	9.01	1.83	0.00	98.73	0.00	98.19		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 2 (อัตราส่วน 1:1.5)	Blank	0.00		8.89	98.22	13.19	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	146.96	10.01	8.93	0.00	20.40	93.98	0.00	100.00	100.00	7.13	4.57	92.87	95.43	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	146.96	10.01	8.94	0.00	14.04	93.81	0.00	100.00		0.90		99.10		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	146.96	10.01	8.96	0.00	18.74	92.06	0.00	100.00		5.69		94.31		0.00		
ชุดที่ 3 (อัตราส่วน 1:2)	Blank	0.00		8.90	97.87	0.00	0.00	4.00									
	ตัวอย่างที่ 1	200.00	10.17	8.93	0.00	0.00	89.77	6.74	100.00	100.00	0.00	0.00	97.04	97.76	2.96	1.45	2.24
	ตัวอย่างที่ 2	200.00	10.17	8.95	0.00	0.00	89.00	5.31	100.00		0.00		98.55				
	ตัวอย่างที่ 3	200.00	10.17	8.99	0.00	0.00	88.52	6.08	100.00		0.00		97.70		2.30		

ตารางที่ จ.3 ค. ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพใน		สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนโตรที่	ไซยานเนต	ไนเตรท	การกำจัดไซยาไนด์		ไนเตรท		ไซยานเนต		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1 (อัตราส่วน 1:1)	Blank	0.00		8.98	237.53	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	244.57	10.56	9.00	0.00	0.00	217.86	8.96	100.00	100.00	0.00	0.00	96.05	95.46	3.95	4.54	
	ตัวอย่างที่ 2	244.57	10.56	9.03	0.00	0.00	209.50	9.76	100.00		0.00		95.55		4.45		
	ตัวอย่างที่ 3	244.57	10.56	9.02	0.00	0.00	223.08	12.31	100.00		0.00		94.77		5.23		
ชุดที่ 2 (อัตราส่วน 1:1.5)	Blank	0.00		8.95	263.06	0.00	0.00	7.34									
	ตัวอย่างที่ 1	373.37	10.55	8.96	0.00	0.00	234.93	21.83	100.00	100.00	0.00	0.00	94.19	94.33	5.81	5.67	
	ตัวอย่างที่ 2	373.37	10.55	8.97	0.00	0.00	242.48	23.50	100.00		0.00		93.75		6.25		
	ตัวอย่างที่ 3	373.37	10.55	8.99	0.00	0.00	232.61	19.45	100.00		0.00		95.05		4.95		
ชุดที่ 3 (อัตราส่วน 1:2)	Blank	0.00		8.95	257.29	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	497.83	10.62	9.06	0.00	0.00	228.69	0.91	100.00	100.00	0.00	0.00	99.60	99.13	0.40	0.87	
	ตัวอย่างที่ 2	497.83	10.62	9.08	0.00	0.00	237.14	5.37	100.00		0.00		97.79		2.21		
	ตัวอย่างที่ 3	497.83	10.62	9.05	0.00	0.00	232.44	0.00	100.00		0.00		100.00		0.00		

ภาคผนวก ฉ.

ผลการศึกษาผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์
โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ความเข้มข้นสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรอง และ หลังการกรอง ในสารละลายต่างๆ

ที่ค่าพีเอช 9 ± 0.05

* ค่าสังกะสีก่อนการกรองคือ สังกะสีทั้งหมดที่ใส่ลงไปนสารละลาย

** ค่าสังกะสีหลังการกรองคือ สังกะสีส่วนที่ละลายในสารละลาย

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	ตัวกลาง			
		น้ำปราศจาก	ฟอสเฟต-บอร์เรต	บอร์เรต	ฟอสเฟต
		ไอออน	0.004 โมลาร์	0.004 โมลาร์	0.004 โมลาร์
1	ก่อนการกรอง	6.48	8.85	8.20	12.26
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 1	3.20	9.37	7.97	10.98
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 2	4.46	10.00	8.40	11.38
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 3	4.88	9.79	9.51	11.48
	หลังการกรอง เฉลี่ย	4.18	9.72	8.62	11.28
2	ก่อนการกรอง	47.03	47.95	46.53	64.56
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 1	12.70	46.92	6.90	57.21
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 2	13.37	46.24	7.55	60.71
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 3	12.58	47.52	8.06	60.30
	หลังการกรอง เฉลี่ย	12.89	46.89	7.50	59.41
3	ก่อนการกรอง	88.85	89.35	88.05	109.19
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 1	14.93	86.27	4.71	100.80
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 2	16.08	88.88	8.69	105.03
	หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 3	18.11	86.14	7.36	104.34
	หลังการกรอง เฉลี่ย	16.37	87.09	6.92	103.39

ตารางที่ ๑.2 ความเข้มข้นของสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรองและหลังการกรอง

ในตัวกลางที่เป็นสารละลายบอร์เรต 0.004 โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

ตัวอย่าง	พีเอช ± 0.05				
	8	9	10	11	12
ก่อนการกรอง	531.20	481.55	523.75	483.45	421.90
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 1	94.98	1.38	1.88	14.37	294.95
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 2	117.99	2.55	1.12	13.96	359.35
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 3	122.05	2.93	0.84	13.97	363.35
หลังการกรอง เฉลี่ย	111.67	2.28	1.28	14.10	339.22

ตารางที่ ๑.3 ความเข้มข้นของสังกะสี (ไมโคร โมลาร์) ก่อนการกรองและหลังการกรอง ในตัวกลางที่มีสารละลายบอร์

เรต 0.004 โมลาร์ และ โซดาไนต์ 500 ± 10 ไมโคร โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12

ตัวอย่าง	พีเอช ± 0.05				
	8	9	10	11	12
ก่อนการกรอง	506.05	477.65	534.00	502.30	472.00
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 1	321.25	152.90	211.90	205.35	400.85
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 2	353.45	159.35	218.10	247.20	441.80
หลังการกรอง ตัวอย่างที่ 3	374.20	167.70	207.70	250.60	401.25
หลังการกรอง เฉลี่ย	349.63	159.98	212.57	234.38	414.63

ตารางที่ ๓.4 ตารางการคำนวณสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไฮดรอกไซด์ และ สังกะสีกับไซยาไนด์

พีเอช	สังกะสีทั้งหมด		สารประกอบเชิงซ้อน			
	ไม่มีไซยาไนด์	มีไซยาไนด์	สังกะสี-ไฮดรอกไซด์		สังกะสี-ไซยาไนด์	
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%
8	111.67	349.63	111.67	31.94	237.97	68.06
9	2.28	159.98	2.28	1.43	157.70	98.57
10	1.28	212.57	1.28	0.60	211.29	99.40
11	14.10	234.38	14.10	6.02	220.28	93.98
12	339.22	414.63	339.22	81.81	75.42	18.19

ตารางที่ ๓.5 รูปแบบของสังกะสีที่จับตัวในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์

จากการคำนวณตามทฤษฎี ในหน่วย %

pH	Zn	ZnOH	Zn(OH) ₂	Zn(OH) ₃	Zn(OH) ₄	Total Zn-OH	Zn(CN) ₂	Zn(CN) ₃	Zn(CN) ₄	Total Zn-CN	Total Zn
8	50.47	5.53	6.35	0.00	0.00	62.36	30.90	6.74	0.00	37.64	100.00
9	1.29	1.41	16.20	0.05	0.00	18.95	33.48	47.57	0.00	81.05	100.00
10	0.02	0.17	19.63	0.62	0.00	20.44	9.91	69.62	0.02	79.56	100.00
11	0.00	0.03	29.72	9.40	0.15	39.29	2.18	58.45	0.08	60.71	100.00
12	0.00	0.00	20.97	66.30	10.51	97.78	0.05	2.17	0.00	2.22	100.00

ตารางที่ ๓.6 รูปแบบของสังกะสีที่จับตัวในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ จากการคำนวณโดยใช้สัดส่วนตามทฤษฎี

จากตารางที่ ๓.4 และค่าสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับไซยาไนด์ทั้งหมดจากการทดลอง จากตารางที่ ๓.3 ในหน่วย %

pH	Zn	ZnOH	Zn(OH) ₂	Zn(OH) ₃	Zn(OH) ₄	Total Zn-OH	Zn(CN) ₂	Zn(CN) ₃	Zn(CN) ₄	Total Zn-CN	Total Zn
8	25.85	2.83	3.25	0.00	0.00	31.94	55.88	12.18	0.00	68.06	100.00
9	0.10	0.11	1.22	0.00	0.00	1.43	40.71	57.86	0.00	98.57	100.00
10	0.00	0.01	0.58	0.02	0.00	0.60	12.38	86.98	0.03	99.40	100.00
11	0.00	0.00	4.55	1.44	0.02	6.02	3.38	90.49	0.12	93.98	100.00
12	0.00	0.00	17.54	55.47	8.79	81.81	0.38	17.77	0.04	18.19	100.00

ตารางที่ ๑.7 รูปแบบของไซยาไนด์ ในสารละลายที่มีสังกะสีที่ค่าอิมิตัว ความเข้มข้นไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์
จากการคำนวณ ในหน่วย %

pH	CN	HCN	Total Free CN	Zn(CN)2	Zn(CN)3	Zn(CN)4	Total Zn-CN	TOTCN
8.00	0.46	7.93	8.39	69.03	22.58	0.00	91.61	100.00
9.00	2.98	5.17	8.15	29.33	62.52	0.01	91.85	100.00
10.00	14.71	2.56	17.27	7.17	75.53	0.03	82.73	100.00
11.00	56.08	0.97	57.05	1.04	41.83	0.07	42.95	100.00
12.00	97.59	0.17	97.76	0.03	2.20	0.01	2.24	100.00



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘.๘ ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียสังเคราะห์
ตารางที่ ๘.๘ ก. พีเอช 9 ไม่มีสังกะสี (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	501.20	0.00	0.00	0.00
101.30	328.97	0.00	93.79	0.00
206.09	204.32	0.00	198.27	0.00
305.65	95.70	0.00	305.00	0.00
397.39	25.71	0.00	392.32	0.00
499.57	20.87	0.00	473.76	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
95.84		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๘ ข. พีเอช 10 ไม่มีสังกะสี (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	505.36	0.00	0.00	0.00
103.04	316.05	0.00	160.11	0.00
202.17	212.23	0.00	265.37	0.00
308.70	100.19	0.00	379.99	0.00
398.26	15.83	0.00	474.99	0.00
495.65	4.05	0.00	488.79	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
99.20		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๘ ค. พีเอช 11 ไม่มีสังกะสี (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	491.62	0.00	0.00	0.00
103.48	336.29	0.00	134.20	0.00
198.26	222.40	0.00	253.98	0.00
306.52	122.24	0.00	373.99	0.00
403.04	28.22	0.00	482.36	0.00
506.09	1.45	0.00	506.76	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
99.71		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๘ ง. พีเอช 9 ความเข้มข้นสังกะสี 167.20 ไมโครโมลาร์ (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	480.20	0.00	0.00	0.00
101.30	375.09	0.00	126.99	0.00
206.09	276.49	0.00	244.01	0.00
305.65	173.07	0.00	354.93	0.00
397.39	85.22	0.00	447.56	0.00
499.57	9.89	0.00	467.58	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
97.94		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๘ จ. พีเอช 10 ความเข้มข้นสังกะสี 212.48 ไมโครโมลาร์ (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	498.42	0.00	0.00	0.00
103.04	338.88	0.00	136.96	0.00
202.17	257.71	0.00	245.93	0.00
308.70	114.36	0.00	368.35	0.00
398.26	35.11	0.00	460.89	0.00
495.65	0.00	0.00	493.42	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
100.00		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๘ ฉ. พีเอช 11 ความเข้มข้นสังกะสี 193.51 ไมโครโมลาร์ (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท
0.00	500.59	0.00	0.00	0.00
103.48	346.72	0.00	111.00	0.00
198.26	291.16	0.00	225.82	0.00
306.52	173.16	0.00	328.29	0.00
403.04	65.72	0.00	450.85	0.00
506.09	8.07	0.00	508.35	0.00
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
98.39		0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๘.๑ ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์

อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 1:1

ตารางที่ ๘.๑ ก. พีเอช 9 ไม่มีสังกะสี

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	506.44	100.00	475.29	100.00	498.50	100.00	100.00
0.5	65.21	12.88	55.19	11.61	60.45	12.13	12.20
1	33.80	6.67	34.30	7.22	38.02	7.63	7.17
2	26.34	5.20	25.93	5.46	26.53	5.32	5.33
5	20.19	3.99	18.81	3.96	21.13	4.24	4.06
10	16.34	3.23	17.97	3.78	18.33	3.68	3.56
20	16.98	3.35	16.71	3.52	18.02	3.61	3.49
30	15.99	3.16	15.97	3.36	17.38	3.49	3.33
60	15.40	3.04	13.09	2.75	16.73	3.36	3.05
90	14.81	2.92	15.23	3.20	15.00	3.01	3.05
120	14.92	2.95	15.36	3.23	15.18	3.05	3.07
180	14.83	2.93	15.24	3.21	15.52	3.11	3.08
240	15.11	2.98	15.20	3.20	15.44	3.10	3.09
300	14.96	2.95	15.29	3.22	15.38	3.09	3.09
ประสิทธิภาพ %	97.05		96.78		96.91		96.91
เฟอร์เรต เริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	500.87		486.96		487.83		
พีเอช	8.94		8.94		9.01		

ตารางที่ ๑.๑ ข. พีเอช 10 ไม่มีสังกะสี

เวลา	ไชยาไนต์คังเกลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	502.07	100.00	448.35	100.00	521.71	100.00	100.00
0.5	135.07	26.90	136.42	30.43	152.87	29.30	28.88
1	72.83	14.51	77.36	17.25	96.44	18.49	16.75
2	34.80	6.93	45.53	10.16	57.77	11.07	9.39
5	22.03	4.39	20.46	4.56	17.98	3.45	4.13
10	3.79	0.75	15.11	3.37	8.00	1.53	1.89
20	3.19	0.64	13.56	3.02	4.52	0.87	1.51
30	3.18	0.63	12.77	2.85	3.65	0.70	1.39
60	3.19	0.64	10.30	2.30	0.00	0.00	0.98
90	3.20	0.64	9.25	2.06	0.00	0.00	0.90
120	3.17	0.63	8.84	1.97	0.00	0.00	0.87
180	3.18	0.63	5.86	1.31	0.00	0.00	0.65
240	3.21	0.64	4.13	0.92	0.00	0.00	0.52
300	3.18	0.63	3.57	0.80	0.00	0.00	0.48
ประสิทธิภาพ %	99.37		99.20		100.00		99.52
เฟอร์เรต เริ่มต้น (ไมโคร โมลาร์)	485.22		482.17		491.30		
พีเอช	10.14		9.85		10.14		

ตารางที่ ๑๑ ค. พีเอส 11 ไม่มีสังกะสี

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	488.73	100.00	499.96	100.00	502.13	100.00	100.00
0.5	436.01	89.21	485.65	97.14	393.95	78.46	88.27
1	383.29	78.43	462.62	92.53	372.05	74.09	81.68
2	281.11	57.52	416.63	83.33	316.51	63.03	67.96
5	178.92	36.61	343.93	68.79	236.46	47.09	50.83
10	122.45	25.05	265.83	53.17	166.68	33.19	37.14
20	73.36	15.01	173.24	34.65	100.11	19.94	23.20
30	52.77	10.80	129.80	25.96	63.37	12.62	16.46
60	23.46	4.80	76.00	15.20	29.95	5.96	8.66
90	15.50	3.17	54.87	10.97	19.38	3.86	6.00
120	11.88	2.43	36.80	7.36	12.50	2.49	4.09
180	6.82	1.40	25.66	5.13	5.92	1.18	2.57
240	3.90	0.80	19.33	3.87	2.75	0.55	1.74
300	3.32	0.68	14.15	2.83	2.53	0.50	1.34
ประสิทธิภาพ %	99.32		97.17		99.50		98.66
เฟอร์เรด เริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	492.17		491.74		504.35		
พีเอส	11.03		11.24		10.96		

ตารางที่ ๑.๑ ง. พีเอช 9 ความเข้มข้นสังกะสี 167.20 ไมโครโมลาร์

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที่	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	534.67	100.00	452.74	100.00	533.99	100.00	100.00
0.5	231.76	43.35	169.19	37.37	171.08	32.04	37.58
1	125.61	23.49	96.53	21.32	101.18	18.95	21.25
2	50.53	9.45	43.20	9.54	47.26	8.85	9.28
5	20.23	3.78	16.71	3.69	21.65	4.05	3.84
10	13.48	2.52	10.07	2.22	13.85	2.59	2.45
20	11.45	2.14	10.87	2.40	8.10	1.52	2.02
30	8.07	1.51	6.09	1.35	11.16	2.09	1.65
60	0.00	0.00	5.75	1.27	9.93	1.86	1.04
90	0.00	0.00	5.36	1.18	9.07	1.70	0.96
120	0.00	0.00	4.97	1.10	7.32	1.37	0.82
180	0.00	0.00	4.30	0.95	7.68	1.44	0.80
240	0.00	0.00	3.93	0.87	7.67	1.44	0.77
300	0.00	0.00	3.93	0.87	8.32	1.56	0.81
ประสิทธิภาพ %	100.00		99.13		98.44		99.19
เฟอร์เรด เริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	489.57		486.96		487.83		
สังกะสี (ไมโครโมลาร์)	178.75		151.48		159.99		
พีเอช	8.99		8.91		8.97		

ตารางที่ ๑.๑ จ. พีเอส 10 ความเข้มข้นสังกะสี 212.48 ไมโคร โมลาร์

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที่	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	498.24	100.00	464.32	100.00	499.77	100.00	100.00
0.5	416.80	83.65	351.83	75.77	352.26	70.48	76.64
1	328.86	66.00	240.47	51.79	275.41	55.11	57.63
2	193.98	38.93	149.65	32.23	153.58	30.73	33.96
5	54.66	10.97	44.97	9.69	39.73	7.95	9.54
10	16.20	3.25	15.91	3.43	14.41	2.88	3.19
20	4.94	0.99	5.62	1.21	3.47	0.69	0.97
30	1.95	0.39	3.37	0.73	0.00	0.00	0.37
60	0.00	0.00	3.72	0.80	0.00	0.00	0.27
90	0.00	0.00	2.18	0.47	0.00	0.00	0.16
120	0.00	0.00	1.39	0.30	0.00	0.00	0.10
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ประสิทธิภาพ %	100.00		100.00		100.00		100.00
เฟอร์เรด เริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	485.22		482.17		491.30		
สังกะสี (ไมโครโมลาร์)	224.27		202.65		199.27		
พีเอส	10.05		9.78		10.07		

ตารางที่ ๑.๑ ฉ. พีเอส 11 ความเข้มข้นสังกะสี 193.51 ไมโครโมลาร์

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ						
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย
	1		2		3		
นาที่	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	ไมโคร โมลาร์	%	%
0	503.15	100.00	523.21	100.00	487.91	100.00	100.00
0.5	461.96	91.81	480.72	91.88	424.37	86.98	90.22
1	460.97	91.62	472.84	90.37	419.09	85.89	89.29
2	462.61	91.94	451.41	86.28	396.75	81.32	86.51
5	375.87	74.70	384.96	73.58	328.43	67.31	71.86
10	258.73	51.42	314.50	60.11	247.49	50.72	54.09
20	175.32	34.84	213.49	40.80	153.01	31.36	35.67
30	128.37	25.51	159.59	30.50	106.09	21.74	25.92
60	59.88	11.90	84.32	16.12	60.07	12.31	13.44
90	36.61	7.28	58.38	11.16	35.41	7.26	8.56
120	27.81	5.53	39.49	7.55	22.98	4.71	5.93
180	15.05	2.99	27.23	5.20	12.56	2.57	3.59
240	8.26	1.64	20.48	3.91	6.90	1.41	2.32
300	6.12	1.22	14.04	2.68	4.25	0.87	1.59
ประสิทธิภาพ %	95.75		85.96		99.13		98.41
เฟอร์เรด เริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	489.57		491.74		504.35		
สังกะสี (ไมโครโมลาร์)	202.69		208.42		196.88		
พีเอส	10.97		11.12		10.94		

ภาคผนวก ช.

ผลการศึกษการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสีที่ผ่านการเจือจาง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียโรงพยาบาล
สังกะสี (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	ฟิเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	9.41	104.78	0.00	0.00	0.00
46.09	9.46	70.00	26.65	0.00	0.00
96.96	9.52	27.62	66.17	0.00	0.00
145.65	9.56	0.00	92.32	0.00	0.00
203.48	9.73	0.00	103.30	0.00	0.00
253.48	9.91	0.00	92.22	0.00	0.00
298.26	10.02	0.00	-	0.00	0.00
349.13	10.38	0.00	-	0.00	0.00
402.61	10.59	0.00	90.30	0.00	0.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ.

ผลการตรวจวัดตัวอย่างน้ำเสียโรงชุบโลหะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ตารางที่ ข.1 ก. เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 (2547)

หมายเลข โรงงาน	ประเภทของโรงชุบ	ลักษณะน้ำเสีย						
		พีเอช	ไซยาไนด์ มก/ล.	ทองแดง มก/ล.	นิกเกิล มก/ล.	โครเมียม มก/ล.	สังกะสี มก/ล.	เหล็ก มก/ล.
1	นิกเกิล โครเมียม	7	0	0.06	1.87	3.52	0.10	0.42
2	นิกเกิล โครเมียม	1	0	7.19	0.24	4.12	0.75	113.62
3	นิกเกิล โครเมียม	6	11.88	0.88	134.33	4.75	1.27	12.74
4	นิกเกิล โครเมียม	2	8.97	15.75	49.86	1.87	144.39	423.81
5	นิกเกิล โครเมียม	3	15.67	7.46	15.70	3.49	2.67	79.03
6	สังกะสี	1	3.69	3.82	3.35	24.96	815.22	982.51
7	สังกะสี	7	90.14	0.51	0.27	21.61	256.10	55.89
8	สังกะสี	4	0	0.77	17.18	0.72	283.52	489.44
9	ชุบทั่วไป(น้ำล้างทั่วไป)	6	0	3.76	8.91	0	0.98	0
	ชุบทั่วไป(น้ำล้างไซยาไนด์)	10	251.44	212.33	0.20	0	0.18	0
	ชุบทั่วไป(น้ำล้างโครเมียม)	6	3.36	0.81	23.74	3.96	0.14	0

ตารางที่ ข.1 ข. เก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 (2547)

หมายเลข	ประเภทของโรงสูบ	ลักษณะน้ำเสีย						
		ฟิออซ	ไซยาไนด์ มก/ล.	ทองแดง มก/ล.	นิกเกิล มก/ล.	โครเมียม มก/ล.	สังกะสี มก/ล.	เหล็ก มก/ล.
1	นิกเกิล โครเมียม	6	0	0.10	1.62	5.33	0.140	0.20
2	นิกเกิล โครเมียม	1	0.21	6.94	0.23	123.26	0.506	92.55
3	นิกเกิล โครเมียม	5	56.16	2.36	63.88	2.69	39.559	99.23
4	นิกเกิล โครเมียม	6	0	2.62	9.05	41.20	1.26	0
5	นิกเกิล โครเมียม	4	49.21	16.63	32.74	6.55	1.744	18.52
6	สังกะสี	5	31.57	0.68	0.09	138.57	130.17	6.34
7	สังกะสี	2	17.73	6.69	6.76	249.36	2310.70	1307.73
8	สังกะสี	5	0.28	0.85	1.38	0	37.49	211.91
9	สูบทั่วไป(น้ำล้างทั่วไป)	7	0.01	15.75	13.17	0	0.99	0
	สูบทั่วไป(น้ำล้างไซยาไนด์)	7	519.80	212.90	0.44	0	0.44	0
	สูบทั่วไป(น้ำล้างโครเมียม)	7	221.74	57.31	33.53	2.43	1.09	0

หมายเหตุ การสำรวจในปี พ.ศ. 2547 โรงงานหมายเลข 1 ถึง 8 เป็นของโรงสูบขนาดห้องแถว 1 ห้อง ทั้งนี้ประเภทของโรงสูบในตารางได้มาจากการสอบถามจากเจ้าของ และน้ำตัวอย่างที่ 9 ถึง 11 เป็นของโรงงานสูบขนาดใหญ่แห่งหนึ่งซึ่งแยกน้ำเสียออกเป็น 3 ชนิด คือ น้ำล้างทั่วไป น้ำล้างไซยาไนด์ และน้ำล้างโครเมียม

ตารางที่ ข.1 ค. เก็บตัวอย่างครั้งที่ 3 (2548)

หมายเลข โรงงาน	ประเภทการชุบ	ฟิเอช	ไซยาไนด์ มก./ล.	สังกะสี มก./ล.	ทองแดง มก./ล.	นิกเกิล มก./ล.	โครเมียม มก./ล.	เหล็ก มก./ล.	อลูมิเนียม มก./ล.	แคลเซียม มก./ล.	โซเดียม มก./ล.
1	นิกเกิล โครเมียม	3	7.35	36.98	14.70	440.16	150.02	181.74	1.99	86.60	702.73
2	นิกเกิล โครเมียม	3	0.40	201.82	26.31	178.40	284.11	218.47	8.93	221.44	544.19
3	นิกเกิล โครเมียม	12	70.50	87.97	1.26	419.50	73.30	203.99	5.31	81.54	784.59
5	นิกเกิล โครเมียม	7	2,824.17	101.48	18.33	6.51	0.75	27.52	1.49	156.79	518.33
4	สังกะสี	12	11.67	631.78	30.78	9.43	2.47	710.28	3.33	44.56	3134.44

หมายเหตุ การสำรวจในปี พ.ศ. 2548 โรงงานส่วนหนึ่งที่ทิ้งน้ำเสียลงสู่รางระบายน้ำได้หยุดกิจการไปเนื่องจากกรมโรงงานได้เข้าตรวจสอบ โรงงานที่เหลือจะมีบ่อสำหรับกักเก็บน้ำเสียเพื่อส่งไปบำบัดต่อไป

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศีลาวุธ ดำรงศิริ เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย