

ผลของนิกเกิดต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต



นางสาวภัทรวรรณ ตียนนท์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

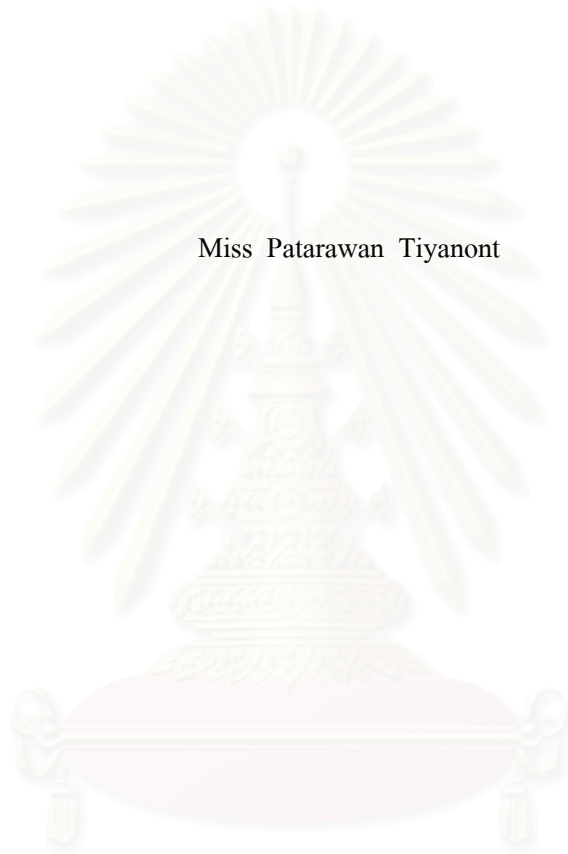
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3441-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF NICKEL ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION

Miss Patarawan Tiyanont



สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

(Interdiscipline)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

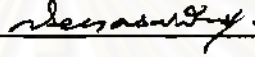
ISBN 974-14-3441-3

Copyright of Chulalongkorn University

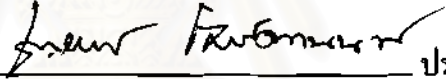
หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
โดย	นางสาวภัทรวรรณ ตียนานท์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์


---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

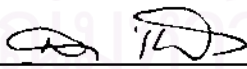
  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มร.กัลยา ตั้งศรัทธี)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ ไชยิตานนท์)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์)

  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

  
กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

  
กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

ภัทรวรรณ คิยานนท์ : ผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต (EFFECT OF NICKEL ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION) อ.ที่ปรึกษา ศศ.ดร.เขมรรฐ์ โอสถาพันธุ, อ.ที่ปรึกษาร่วม ศศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 98 หน้า. ISBN 974-14-3441-3

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีอันตรายที่มักพบอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะ วิธีการกำจัดไซยาไนด์ที่ใช้กันทั่วไปคือ การกำจัดโดยการออกซิเดชัน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยในส่วนตัวแรกได้ทำการศึกษาถึงผลของนิกเกิลต่อประสิทธิภาพ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดไซยาไนด์ และส่วนต่อมาได้ทำการศึกษาถึงผลของนิกเกิล และอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ โดยทดลองในช่วงความเข้มข้นไซยาไนด์ และอีดีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และใช้ความเข้มข้นนิกเกิลที่ความเข้มข้นอิมคว่ำที่แต่ละพีเอช ซึ่งทำการทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11

ผลการทดลองในส่วนตัวแรกพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าประมาณ 58% ที่พีเอช 8 ประมาณ 50% ที่พีเอช 9 และ 10 ประมาณ 38% ที่พีเอช 11 ซึ่งนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลงที่ทุกๆ พีเอช แต่ไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นโดยสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการกำจัดไซยาไนด์คือ ไซยาเนต ในส่วนต่อมาเป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ อีดีทีเอ และนิกเกิล ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าประมาณ 61% ที่พีเอช 8 ประมาณ 95% ที่พีเอช 9 และ 10 ประมาณ 80% ที่พีเอช 11 ดังนั้นในสารละลายที่มีอีดีทีเออยู่นั้นจะทำให้ นิกเกิลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ไซยาเนต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ภัทรวรรณ คิยานนท์  
ปีการศึกษา 2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ศศ.ดร.เขมรรฐ์ โอสถาพันธุ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....ศศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

## 4789121820: ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: CYANIDE / NICKEL / FERRATE / OXIDATION

PATARAWAN TIYANONT: EFFECT OF NICKEL ON CYANIDE REMOVAL BY FERRATE OXIDATION. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., 98 pp. ISBN 974-14-3441-3

Cyanide is hazardous chemical widely found in the metal-plating wastewater. Typical cyanide removal method is the chemical oxidation. This research studied the effect of nickel on cyanide removal by ferrate oxidation. In the first part, the effect of nickel on cyanide removal efficiency and the chemical reaction rate were investigated with pH ranging from 8 to 11. In the second part, the effect of nickel and EDTA on cyanide removal efficiency was studied with pH ranging from 8 to 11.

From the first part, cyanide removal efficiency was 58%, 50%, 50% and 38% at pH 8, 9, 10 and 11 respectively. It was found that nickel decreased the cyanide removal efficiency and slowed the chemical reaction rate for all pH, but had no effect on the reaction by-product, which was cyanate. From the second part, cyanide removal efficiency was 61%, 95%, 95% and 80% at pH 8, 9, 10 and 11 respectively. It might be concluded that in the presence of both EDTA and nickel gave minimal effect on cyanide removal efficiency.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Field of Study Environmental Science..... Student's Signature กิตติมา อิ่มนวล  
Academic Year 2006..... Advisor's Signature K. O. S.  
Co-advisor's Signature P. R.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง และตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ Virender K. Sharma, Ph.D. สำหรับการอนุเคราะห์เกี่ยวกับสารเคมี โพลีเอทิลีนเทอร์เรท และเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือที่ห้องวิจัย เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ เอิร์ท ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำโครงร่างวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ น้องต้อง น้องเคย น้องแอน น้องก้อย น้องท้อป และเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในการทำโครงร่างวิทยานิพนธ์ การเขียนวิทยานิพนธ์ และให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ มากมาย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เป็นอย่างสูงที่ให้ช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้สามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้ตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ

### บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

### บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.1 หลักเบื้องต้นของการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.1.3 แหล่งที่มา และลักษณะของน้ำเสียจากการชุบโลหะ.....	8
2.2 นิกเกิล (Nickel).....	12
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนิกเกิล.....	12
2.2.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล.....	12
2.3 อีดีทีเอ (EDTA).....	12
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ.....	12
2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ.....	14
2.4 เฟอร์เรต (Ferrate).....	14
2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	14
2.4.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต.....	15
2.4.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์.....	15
2.4.1.3 ความเสถียรของเฟอร์เรต.....	16
2.4.2 วิธีการเตรียมเฟอร์เรต.....	17

2.4.2.1	วิธีการ Dry Oxidation .....	17
2.4.2.2	วิธีการ Wet Oxidation.....	18
2.4.2.3	วิธีการ Electro-Chemical.....	18
2.4.3	ประโยชน์ของเฟอร์เรตในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	19
2.4.3.1	การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์.....	19
2.4.3.2	การฆ่าเชื้อโรค.....	19
2.4.3.3	การโคแอกกูเลชัน.....	21
2.4.4	ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต.....	21
2.5	ไซยาไนด์.....	24
2.5.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์.....	24
2.5.2	การแบ่งประเภทของไซยาไนด์.....	24
2.5.2.1	ไซยาไนด์อิสระ.....	24
2.5.2.2	สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน.....	25
2.5.2.3	สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ.....	26
2.5.3	ความเป็นพิษของไซยาไนด์.....	26
2.5.4	การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย.....	28
2.5.4.1	การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน.....	28
2.5.4.2	การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	29
2.5.4.3	การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfur Dioxide/Air.....	29
2.5.4.4	การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid.....	30
2.5.4.5	การออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์มังกานेट.....	30
2.5.4.6	การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน.....	31
2.5.4.7	การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	31
2.5.4.8	การออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	32
2.5.4.9	การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	32
2.5.4.10	การสลายตัวด้วยไฟฟ้า.....	32
2.5.4.11	การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ.....	33
2.5.5	การทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์.....	33
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย</b>		
3.1	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	38



	หน้า
3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	38
3.1.2 สารเคมี.....	38
3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรด.....	39
3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ.....	39
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	40
3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรด.....	40
3.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	41
3.3.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
3.3.2 การทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ.....	41
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.4.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
3.4.1.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ.....	41
3.4.1.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในสารละลายที่ไม่มี และมีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	42
3.4.1.3 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรดต่อไซยาไนด์ใน การทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	44
3.4.1.4 ศึกษาผลของนิกเกิล และอดีทีเอต่ออัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรดต่อ ไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์.....	46
3.4.1.5 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรด กับ ไซยาไนด์.....	48
3.4.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการ เจือจาง.....	50
3.4.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ.....	50
3.4.2.2 ศึกษาอัตราส่วนโมลเฟอร์เรดต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	50

#### บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมของไซยาไนด์กับนิกเกิล.....	52
4.1.1 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ.....	52

4.1.2 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่ไม่มี และมี ไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ.....	53
4.1.3 ผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อ โมล ไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ .....	55
4.1.4 ผลของนิกเกิล และอิตีที่เอต่ออัตราปริมาณเฟอร์เรตต่อ ไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	59
4.1.5 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์.....	63
4.2 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ ผ่านการเจือจาง .....	67
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.....	67
4.2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	67
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 ผลของนิกเกิลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรต.....	69
5.2 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	70
5.3 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง.....	70
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	70
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>73</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. การตรวจวัดความเข้มข้นเฟอร์เรต .....	79
ภาคผนวก ข. ขั้นตอนวิธีการกลั่นไซยาไนด์.....	82
ภาคผนวก ค. ผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์.....	84
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองในน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะ.....	95
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>98</b>

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ..... 8
2.2	สารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า..... 9
2.3	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... 10
2.4	ลักษณะและคุณสมบัติของอิตีทีเอ..... 13
2.5	ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กัน ในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ..... 16
2.6	ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต..... 20
2.7	ค่าคงที่เสถียรภาพ ( $\beta_i$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก..... 26
2.8	ค่าคงที่ ( $\log K$ ) และประเภทของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับ โลหะหนัก..... 27
2.9	ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ..... 28
3.1	ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง..... 40
4.1	อัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่หายไป และโมลไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น..... 63
ค.1	ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวกลางต่างๆ ที่พีเอชต่างๆ..... 85
ค.2	ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวกลางที่ไม่มี และมีไซยาไนด์ในอัตราส่วน ต่างๆ ที่พีเอชต่างๆ..... 86
ค.3	การศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วน โมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น นิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 8 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..... 87
ค.4	ผลการศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วน โมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น นิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 9 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..... 87
ค.5	ผลการศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วน โมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น นิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 10 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..... 88
ค.6	ผลการศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วน โมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น นิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 11 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..... 88
ค.7	แสดงผลการศึกษาผลของนิกเกิล และอิตีทีเอต่ออัตราส่วน โมลเฟอร์เรตต่อโมล ไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 8 ความเข้มข้นไซยาไนด์ และอิตีทีเอ เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..... 89

ตารางที่	หน้า
ค.8 ผลการศึกษาผลของนิกเกิล และฮีทีทีเอต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 9 ความเข้มข้นไซยาไนด์ และฮีทีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์.....	89
ค.9 ผลของนิกเกิล และฮีทีทีเอต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น นิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 10 ความเข้มข้นไซยาไนด์ และฮีทีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์..._	90
ค.10 ผลการศึกษาผลของนิกเกิล และฮีทีทีเอต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 11 ความเข้มข้นไซยาไนด์ และฮีทีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์.....	90
ค.11 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับ ไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นนิกเกิล อิมิตัวที่พีเอช 8.....	91
ค.12 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับ ไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นนิกเกิล อิมิตัวที่พีเอช 9.....	92
ค.13 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับ ไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นนิกเกิล อิมิตัวที่พีเอช 10.....	93
ค.14 ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับ ไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นนิกเกิล อิมิตัวที่พีเอช 11.....	94
ง.1 ผลการตรวจวัดลักษณะน้ำเสียจริงจากโรงงานหุบโลหะ.....	96
ง.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานหุบ โลหะ.....	97

## สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2	ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.3	รูปแบบของนิกเกิลที่ละลายอยู่ในน้ำที่พีเอชต่างๆ.....	13
2.4	รูปแสดงลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอิตีทีเอ และ โครงสร้างโมเลกุลของอิตีทีเอเมื่อจับกับโลหะ.....	14
2.5	รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ .....	15
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ .....	17
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออน และกรดไฮโดรไซยานิกที่พีเอชต่างๆ.....	25
3.1	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.1 .....	42
3.2	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.2 .....	43
3.3	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.3.....	45
3.4	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.4.....	47
3.5	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.5.....	49
3.6	ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.2.2.....	51
4.1	ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12.....	52
4.2	ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่ไม่มี และมีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12.....	54
4.3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่มี และไม่มีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12.....	54
4.4	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล และ ไซยาไนด์ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ500:500 ไมโคร โมลาร์.....	55
4.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล และไซยาไนด์กับผลการศึกษาของศิลาวุธ.....	56
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และ ไซยานิดที่เกิดขึ้นในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 500 ไมโคร โมลาร์ และนิกเกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมิตีที่พีเอชต่างๆ.....	57
4.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมของนิกเกิล อิตีทีเอ และที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อ ไซยาไนด์เท่ากับ 500:500 ไมโคร โมลาร์.....	59

รูปที่	หน้า
4.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสีย สังเคราะห์ผสมนิกเกิล อีดีทีเอ และไซยาไนต์กับผลการศึกษาของสีลาวุธ..... 60
4.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ของผลการ ทดลองที่ 4.1.3 การทดลองที่ 4.1.4 และผลการศึกษาของสีลาวุธ..... 60
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนต์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้นในการทำ ปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นอีดีทีเอ และไซยาไนต์ เริ่มต้นเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และนิกเกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมตัว ที่พีเอชต่างๆ..... 61
4.11	กราฟแสดงปริมาณไซยาไนต์คงเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาใน น้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล และไซยาไนต์ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 อัตราส่วน เฟอร์เรตต่อไซยาไนต์เท่ากับ 500:500 ไมโครโมลาร์..... 64
4.12	กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไซยาไนต์คงเหลือ (%) กับเวลาในการทำ ปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์เท่ากับ 500:500 ไมโครโมลาร์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล และไซยาไนต์ กับผลการศึกษาของสีลาวุธ..... 65
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนต์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้นในการทำ ปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียจริง ..... 68
ก.1	การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V) ..... 80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจมากขึ้น ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ผลของความเจริญทางภาคอุตสาหกรรมก่อให้เกิดโรงงานอุตสาหกรรมขึ้นมากมาย โดยเฉพาะโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก ส่งผลทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา โดยเฉพาะปัญหาการปนเปื้อนของมลพิษลงสู่แหล่งน้ำ การปนเปื้อนที่พบมากคือ การปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าเกิดจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และน้ำที่นำมาใช้ในขบวนการผลิตมีค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณน้ำเสียสูงขึ้นตามไปด้วย

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ในการชุบโลหะจะมีลักษณะเป็นสารอินทรีย์เป็นหลัก ซึ่งพบว่าจะเป็นสารที่เป็นพิษอันได้แก่ โลหะหนัก และที่นิยมนำมาใช้ในการชุบเคลือบเช่น สังกะสี นิกเกิล ทองแดง โครเมียม เป็นต้น นอกจากนี้พบว่าในน้ำเสียที่เกิดขึ้นยังมีไซยาไนด์ปนอยู่ด้วย ซึ่งไซยาไนด์ก็เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่อยู่ในน้ำยาชุบโลหะ เนื่องจากไซยาไนด์ถูกใช้เป็นสารช่วยในการทำคามสะอาดผิวโลหะ และใช้เป็นสารเคลื่นเพื่อให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น ดังนั้นในน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีทั้งโลหะหนัก และไซยาไนด์ปนกันอยู่ ซึ่งไซยาไนด์สามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักได้ ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต สามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางทั้งการกิน การหายใจ และการซึมผ่านผิวหนัง ซึ่งอาการที่เกิดขึ้นมีทั้งอาการระคายเคือง และอาการแบบเฉียบพลันเป็นอันตรายถึงชีวิต ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะของโรงงานขนาดใหญ่พบว่าไม่เป็นปัญหามากนัก เนื่องจากมีเงินลงทุนสูงในการเตรียมการ และการติดตั้งระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพ แต่สำหรับโรงงานขนาดกลาง และขนาดเล็กมักประสบปัญหาด้านเงินทุน ทำให้เกิดการระบายน้ำเสียลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ และแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยตรงเลยไม่ได้ผ่านการบำบัดก่อน จากการสำรวจจึงพบว่าน้ำเสียขึ้นต้นจากโรงงานชุบโลหะขนาดกลาง และขนาดเล็กหลายแห่งจึงยังคงมีความเข้มข้นของไซยาไนด์และโลหะหนักอยู่ในปริมาณที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

วิธีการในการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียที่นิยมใช้กันอยู่ในประเทศไทย เช่น การออกซิเดชันด้วยคลอรีน การใช้รังสีอัลตราไวโอเลต การใช้โอโซน เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ดีแต่ก็มีข้อเสียต่างกันออกไป เช่น การออกซิเดชันด้วยคลอรีนจะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเนื่องจากคลอรีน การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตต้องมีเครื่องมือในการผลิตรังสี

และต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูง ส่วนการใช้โอโซนจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักต่ำ เป็นต้น

ส่วนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการเลือกสารเคมีชนิดหนึ่งมาทำการศึกษา คือ เฟอร์เรต เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนของนิกเกิลอยู่ด้วย เฟอร์เรตเป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แทนสารออกซิไดซ์อื่นๆ ได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่น่าสนใจของเฟอร์เรตคือ เป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ไม่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเพิ่มขึ้น เป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยาจึงประหยัดกว่าสารที่ไม่เลือกทำปฏิกิริยา จากคุณสมบัติดังกล่าวเฟอร์เรตจึงเป็นสารเคมีที่น่าสนใจศึกษา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของนิกเกิลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
3. เพื่อศึกษาผลของนิกเกิล และอัตราที่เอที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนประกอบของไซยาไนด์ นิกเกิล และอัตราที่เอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยศึกษาถึงผลกระทบของนิกเกิลที่มีต่อค่าพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองที่พีเอช 8 ถึง 11 ความเข้มข้นของเฟอร์เรตและไซยาไนด์สูงที่สุดไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นของนิกเกิลไม่เกินความเข้มข้นอิมิตัวที่แต่ละพีเอช และในการควบคุมพีเอชจะใช้ความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่น้อยที่สุดเพื่อให้รบกวนปฏิกิริยาน้อยที่สุด

ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองกับน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจางโดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1 และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบของนิกเกิลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และอัตราในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรต และไซยาไนด์
2. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในเชิงทฤษฎีในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เฟอร์เรตโดยมีไซยาไนด์ และนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก
3. ทราบถึงผลกระทบของนิกเกิล และอัตราที่เอื้อที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

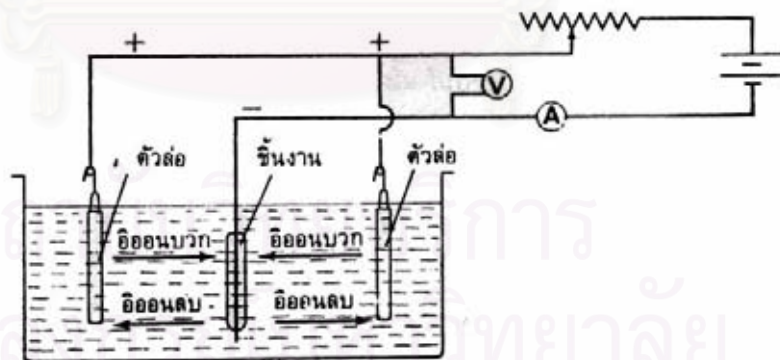
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะจะกระทำด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น การชุบเพื่อความสวยงาม การชุบเพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน และการชุบเพื่อรองพื้นหรือเพิ่มความหนาของชิ้นงาน โลหะที่นิยมใช้ชุบโดยทั่วไปได้แก่ ทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี และทองคำ เป็นต้น

##### 2.1.1 หลักเบื้องต้นของการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการ โดยอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย หลักการ คือ นำเอาชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วลบ (Cathode) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และนำโลหะที่จะนำไปเคลือบบนผิวของชิ้นงานต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) หรือที่เรียกว่า ตัวล่อ จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มลงไปในน้ำยาชุบที่มีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ และปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสม ก็จะทำให้ไอออนของโลหะที่จะเคลือบบนชิ้นงานวิ่งไปยังขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงาน แล้วรับอิเล็กตรอนที่ผิวของชิ้นงานกลายเป็นโลหะเคลือบติดอยู่ที่ผิวของชิ้นงานนั้นๆ ตามที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

ที่มา: สาโรจน์ พันธุ์เทพ และอภิชาติ ธรรมวิทย์กุล (2526)

ที่ขั้วลบ ไอออนบวกของโลหะจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอน ที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงานดังสมการที่ (2-1)



ที่ขั้วบวก ถ้าโลหะเป็นชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบชิ้นงาน ก็จะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอน และกลายเป็น ไอออนบวกละลายลงในสารละลายดังสมการที่ (2-2)



### 2.1.2 ขั้นตอนการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

รูปแบบขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย ๆ จะเริ่มจากการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึงการขัดผิวงานให้ได้ขนาด และความเรียบตามที่ต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน แล้วนำไปจุ่มกรดเพื่อล้างสนิมออก จากนั้นจึงนำเอาชิ้นงานไปชุบในน้ำยาชุบ ซึ่งจะควบคุมสภาวะการชุบตามที่กำหนดเอาไว้ เสร็จแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปล้างน้ำ อบให้แห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาทำเป็นชิ้นงาน และชนิดของโลหะที่ต้องการชุบ ส่วนน้ำเสียที่ได้จากขั้นตอน

ชุบน้ำมันจะได้มาจากขั้นตอนการล้างไขมัน การล้างสนิม การชุบโลหะ และการล้างชิ้นงานขั้นสุดท้าย ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนในการชุบมีดังนี้

### 2.1.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

เป็นการจัดชิ้นงานก่อนชุบ แบ่งออกเป็นการจัดหยาบ และการขัดละเอียด การจัดหยาบเป็นการจัดขั้นแรกเพื่อเป็นการขัดเอารอยขูดขีดๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ล้อขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการจัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ล้อขัดที่เคลือบด้วยทรายละเอียด และถ้าชิ้นงานมีขนาดเล็กมากๆ อาจขัดโดยใช้ถึงหมุนที่มีหินขัดบรรจุอยู่ภายใน

### 2.1.2.2 การล้างไขมัน เป็นขั้นตอนการล้างไขมัน และน้ำมันซึ่งมีวิธีการดังนี้

- กำจัดโดยใช้ไอระเหยของไตรคลอโรเอทีลีน (Vapour degreasing) โดยจะนำชิ้นงานจุ่มในถังที่บรรจุไตรคลอโรเอทีลีน และมีการให้ความร้อนจนถึง 86 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นไอระเหยมากระทบกับท่อขดทำความเย็นบริเวณปากขอบถัง และชิ้นงาน ไอระเหยจะเกิดการกลั่นตัวบนชิ้นงาน และทำการล้างชิ้นงานเอาไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง

- การกำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soak clean) นำชิ้นงานแช่ในถังที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

### 2.1.2.3 การล้างสนิม

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยกรดหรือจุ่มเงา เป็นการกัดสนิมเหล็ก และกำจัดออกไซด์ของโลหะที่ผิวชิ้นงานออก เช่นออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมโลหะอื่นๆ เป็นต้นโดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดอื่นๆ ที่มีการใช้กัน กรดอินทรีย์ เช่น กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และ กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดฟอร์มิก และ อีดีทีเอ เป็นต้น และยังมีกรดล้างด้วยโซดาไฟเพื่อกันสนิมขั้นซ้ำหลังการล้างด้วย

### 2.1.2.4 การชุบโลหะประเภทต่างๆ

เป็นขั้นตอนการชุบผิวชิ้นงานโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะแต่ละแบบมีขั้นตอนแตกต่างกัน และการชุบโลหะบางชนิดต้องมีการรองพื้นด้วยโลหะอีกชนิดก่อนด้วย

ก) การชุบโครเมียม การชุบโครเมียมแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ชนิดบางหรือการชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดหนา (Hard Chromium) การชุบชนิดบางนั้น

จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบบางโดยตรงบนผิวเหล็กจะทำให้เกิดรูพรุนอยู่ทั่วไปจึงเกิดการหลุดร่อนได้ง่าย ดังนั้นเวลาทำการชุบจึงรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดงก่อน แล้วรองพื้นตามด้วยนิกเกิล และจึงนำไปชุบโครเมียม ส่วนการชุบชนิดแข็งสามารถชุบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลรองพื้น คุณสมบัติของชิ้นงานหลังการชุบจะมีความแข็งแรง ทนทาน ทนต่อการเกิดสนิม และทนต่อความร้อน

**ข) การชุบนิกเกิล** เป็นการชุบเพื่อรักษา และป้องกันเนื้อโลหะ ทำให้ผิวชิ้นงานดูสวยงาม ปกติจะตามด้วยการชุบโครเมียมเพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด การชุบนิกเกิลสามารถแบ่งได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

1. นิกเกิลซัลเฟต (Dull Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิกเกิลเงา
2. นิกเกิลกึ่งเงา (Semi Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนการชุบนิกเกิลเงา
3. นิกเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนการชุบโครเมียม ทอง ทองเหลือง
4. นิกเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานที่ไม่ต้องการการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่นตา อาวุธต่างๆ
5. นิกเกิลซาติน (Satin Nickel) จะได้สีเคลือบเหมือนสีแพร
6. นิกเกิลแบบหนา (Heavy Electrodeposition of Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่สึกหรอ

**ค) การชุบสังกะสี** สามารถชุบได้โดยไม่ต้องมีการชุบรองพื้น นิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กเพื่อกันสนิม เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และการชุบสังกะสีแบบด่าง โดยการชุบสังกะสีแบบกรดนั้นจะไม่มีไฮยาไนด์เป็นส่วนผสม ส่วนการชุบสังกะสีแบบด่างแบ่งได้เป็น มีไฮยาไนด์สูง มีไฮยาไนด์ต่ำ และไม่มีไฮยาไนด์

**ง) การชุบทองแดง** นิยมใช้ชุบเพื่อรองพื้นก่อนนำไปชุบอย่างอื่นต่อไป เช่นชุบงานที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล เพื่อป้องกันไม่ให้สังกะสีละลายลงไปในน้ำยานิกเกิล การชุบทองแดงสามารถแบ่งออกเป็น การชุบทองแดงแบบด่าง และการชุบทองแดงแบบกรด ซึ่งการชุบแบบด่างจะมีกำลังการเคลือบผิวดีมาก และเกาะจับติดแน่นเหมาะสำหรับชุบรองพื้นชิ้นแรกก่อนการชุบแบบกรด และการชุบนิกเกิลเงา ส่วนงานสังกะสีเหล่านั้นไม่สามารถชุบทองแดงแบบกรดได้โดยตรงก็ต้องนำมาชุบทองแดงแบบด่างก่อน ส่วนการชุบรองพื้นด้วยการชุบทองแดงแบบกรดจะได้ผิวทองแดงที่เรียบ และมีความเงามาก นิยมใช้ชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนชุบนิกเกิลเงา

#### 2.1.2.5 การล้างชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดหลังจากการชุบเพื่อล้างสารต่างๆในน้ำยาชุบออก

### 2.1.3 แหล่งที่มา และลักษณะของน้ำเสียจากการชุบโลหะ

น้ำเสียที่มาจากขั้นตอนต่างๆ จะมีลักษณะ ปริมาณ และความเข้มข้นของมลพิษต่างๆกัน ในโรงงานที่ไม่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมน้ำเสียจากทุกแหล่งจะถูกนำมารวมกันเป็นน้ำทิ้งรวม ส่วนในโรงงานที่มีการจัดการน้ำเสียจะมีการแยกน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ไว้เป็นประเภท น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Nemerrow, 1978)

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

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนในปริมาณสูงที่ถูกปล่อยออกมานั้น ส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนการล้างไขมันหรือน้ำมันซึ่งจะเป็นน้ำเสียที่เป็นด่าง ส่วนน้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และการกำจัดสนิมในส่วนนี้จะปนเปื้อนน้ำเสียกรด น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยาจะเป็นน้ำเสียที่มีโลหะหนัก และไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากน้ำยาเสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีพิษสูง แต่เบาๆ จะเกิดขึ้นสักครั้ง น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่ปฏิบัติงานจะมีความเข้มข้นของสารพิษต่ำ และปริมาณไม่มากนัก ตัวอย่างการศึกษาลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

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

ที่มา: ประยูร ฟองสดีศย์กุล และคณะ (2542)

ปริมาณ และลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ และลักษณะของน้ำเสียอย่างมากเมื่อมีการเปลี่ยนโรงงาน หรือโรงงานเดียวกันแต่วัน และเวลาในการศึกษาต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของคนงาน รูปแบบการจับชิ้นงาน วิธีการล้างชิ้นงาน หลังการชุบตัวอย่าง น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบโลหะเป็นน้ำเสียที่มีมลพิษสูงซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิต เนื่องจากจะมีส่วนผสมของสารเคมีที่มีพิษต่างๆ เจือปนอยู่ เช่น น้ำมัน กรด ด่าง โซดาไฟ โลหะหนัก และไอออนเชิงซ้อน เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด
น้ำมัน	สารประเภทไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ
ของแข็ง	ยาขัด, ทราย	การขัด
กรด	กรดกำมะถัน, กรดเกลือ, กรดไนตริก, กรดกัดแก้ว, กรดฟอสฟอริก, กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดกระตุ้นผิว, การขัดเงาด้วยสารเคมี
ด่าง	โซดาไฟ, โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมซัลไฟด์, โซเดียมฟอสเฟต	ต้มล้างไขมัน, ทำให้เป็นกลาง, กัดผิวอะลูมิเนียม
โซดาไฟ	สารประกอบโซดาไฟต่างๆ	ล้างด้วยไฟฟ้าหรือจากถังชุบ
โลหะหนักในรูปของไอออน	โลหะที่มีค่า, ทองแดง, นิกเกิล, เหล็ก, แคดเมียม, สังกะสี, อะลูมิเนียม, แมงกานีส	อยู่ในน้ำยาชุบ และการเตรียมก่อนชุบ
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบ, การทำโครเมต
ไอออนเชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของทองแดง, นิกเกิล	น้ำยาชุบ

ที่มา: วลัยรัตน์ จันทรวงศ์ (2542)

จากขั้นตอนการชุบโลหะที่กล่าวมาพบว่า น้ำเสียที่ออกมาจะมีโลหะหนัก และโซดาไฟ เป็นสารมลพิษที่เป็นส่วนประกอบหลัก และมีอันตรายสูง การปล่อยสารมลพิษเหล่านี้เข้าสู่สิ่งแวดล้อมย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ไม่ว่าจะทางตรงหรือทางอ้อม ดังนั้น โรงงานต่างๆ จึงต้องหาทางควบคุม ป้องกัน และแก้ไขน้ำทิ้งให้ได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนดก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียกับสิ่งแวดล้อม ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	1. ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. 2. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มล./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มก./ล.
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.



ตารางที่ 2.3 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตรู (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด
13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)	
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.

ที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1)

## 2.2 นิกเกิล (Nickel)

### 2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนิกเกิล

นิกเกิลเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นโลหะแข็งสีขาวเงิน หรือเป็นผงสีเทา เป็นธาตุทรานซิชันที่อยู่ในคาบที่ 4 ของตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 28 มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,455 องศาเซลเซียส เป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก และละลายได้บ้างในกรดเกลือและกรดกำมะถัน นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่นำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง และทนทานต่อการสึกกร่อน เมื่อนำมาใช้ในการชุบเคลือบแล้วจะทำให้ได้ชิ้นงานที่ทนทานต่อการสึกกร่อน นอกจากนี้ยังช่วยในการป้องกัน และรักษาเนื้อโลหะเดิมไม่ให้เกิดสนิม ป้องกันการเกิดรอยด่างอันเกิดจากสารเคมี และช่วยให้โลหะที่ชุบมีความสวยงามมากขึ้น

สำหรับนิกเกิลที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นจะมีด้วยกันหลายรูป และมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3

### 2.2.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล

ถึงแม้ว่านิกเกิลจะเป็นโลหะที่มีความสำคัญในด้านเศรษฐกิจก็ตาม แต่สำหรับผลกระทบต่อที่เกิดจากนิกเกิลนั้นก็มิตามมาด้วย เนื่องจากการได้รับนิกเกิลในปริมาณมากย่อมจะก่อให้เกิดพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตนั่นเอง นิกเกิลสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งการกิน และการหายใจ เมื่อหายใจเข้าไปมักพบว่าจะมีการสะสมของนิกเกิลที่ปอดมากที่สุด และกระจายไปสะสมตามกระดูกต่อมขั้วรอยด์ ไต หัวใจ สมอง และจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เป็นต้น ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน แน่นหน้าอก

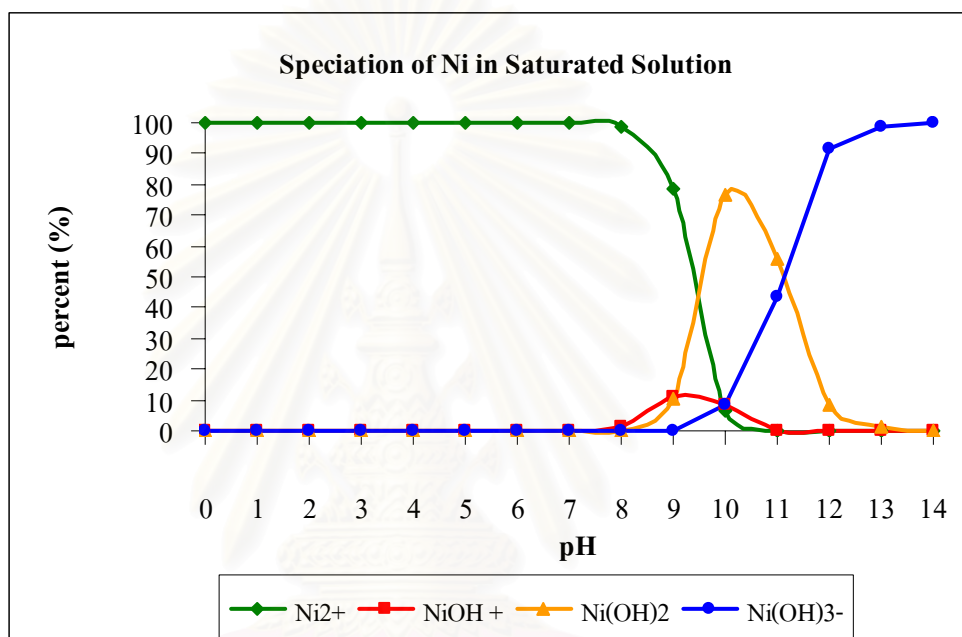
การได้รับพิษแบบเฉียบพลันจะทำให้เกิดเลือดออกในปอด เกิดอาการปอดอักเสบอย่างรุนแรงจนกระทั่งเสียชีวิตได้ และหากมีการสัมผัสกับนิกเกิลอย่างเรื้อรังจะก่อให้เกิดอาการต่างๆ เช่น ก่อให้เกิดโรคผิวหนังอักเสบ เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ นอกจากนี้ยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย (วิลาวลัย จิงประเสริฐ และสุรจิต สุนทรธรรม, 2542)

## 2.3 อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra-acetic acid, EDTA)

### 2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ

อีดีทีเอเป็นสารคีเลชัน (Chelation) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะ การทำน้ำอ่อน สิ่งทอ การผลิตกระดาษ และเยื่อกระดาษ เป็นต้น (Davis และ Green, 1999) นอกจากนี้ยังใช้อีดีทีเอในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำความสะอาดผิวโลหะหรือกำจัดออกไซด์

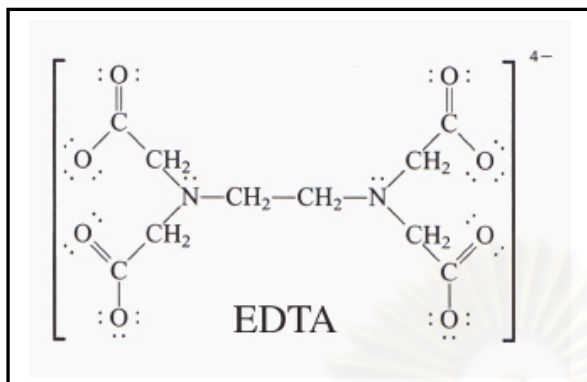
ออกจากผิวโลหะที่ต้องการถ่ายเทความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ หรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น เนื่องจากอีดีทีเอมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ดี ทำให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ดี (Madden และคณะ, 1997) อีกทั้งยังมีการใช้อีดีทีเอเป็นน้ำยากันสนิมในกระบวนการชุบโลหะอีกด้วย เนื่องจากอีดีทีเอจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ตารางที่ 2.4 จะเป็นตารางที่แสดงลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วไปของอีดีทีเอ และลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอีดีทีเอแสดงดังรูปที่ 2.4



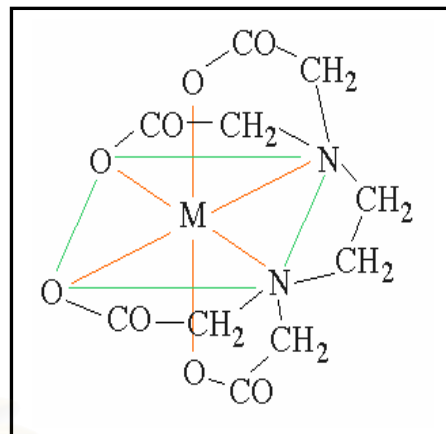
รูปที่ 2.3 รูปแบบของนิกเกิลที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ

ตารางที่ 2.4 ลักษณะและคุณสมบัติของอีดีทีเอ

ลักษณะและคุณสมบัติ	
1. ลักษณะที่ปรากฏ	เกร็ดหรือผงสีขาว
2. สูตรโมเลกุล	$C_{10}H_{16}O_8N_2$
3. น้ำหนักโมเลกุล	292.25
4. จุดหลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส
5. ค่าคีเลชัน (Chelation)	3.39 มิลลิโมล/กรัม
6. ค่าพีเอช	3.0-2.5 สารละลายอิ่มตัว
7. การละลายน้ำสูงสุด	0.05 กรัม/100 มิลลิลิตร



รูปที่ 2.4 ก)



รูปที่ 2.4 ข)

### รูปที่ 2.4 ก) ลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอีดีทีเอ

ที่มา: [http://www.progressivegardens.com/growers\\_guide/EDTA.jpg](http://www.progressivegardens.com/growers_guide/EDTA.jpg)

### ข) ลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอีดีทีเอเมื่อจับกับ โลหะ

ที่มา: [http://it.wikipedia.org/wiki/compleso-\(chimica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/compleso-(chimica))

### 2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ

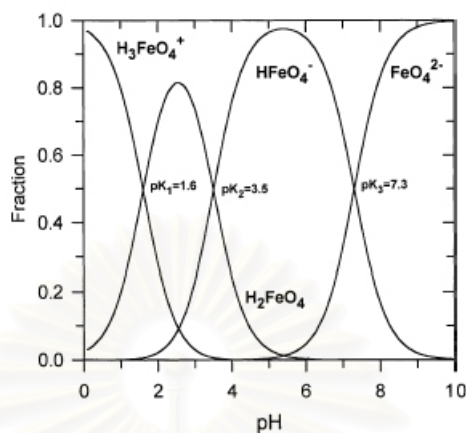
สำหรับผลกระทบของอีดีทีเอต่อมนุษย์นั้นจะไม่มีผลกระทบโดยตรง แต่จะมีผลกระทบทางอ้อมมากกว่า เนื่องจากอีดีทีเอนี้เป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น และอีดีทีเอยังสามารถที่จะจับตัวกับโลหะหนักที่เป็นพิษจากดิน และตะกอนทำให้สามารถละลายลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่โลหะหนักจะเข้าไปปนเปื้อนในสิ่งมีชีวิตมีเพิ่มมากขึ้น (Ramo และ Sillanpaa, 2001)

## 2.4 เฟอร์เรต

### 2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต

เมื่อโพแทสเซียมเฟอร์เรตถูกเติมลงในน้ำจะแตกตัวออกได้เฟอร์เรต ( $\text{Fe}^{6+}$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ไม่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ และเป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา และปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่หน้างานจากสารเคมีพื้นฐานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เพราะทำให้ใช้งานได้สะดวก และมีข้อจำกัดน้อยกว่า

### 2.4.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ

ที่มา: Sharma (2002)

จากการศึกษารูปแบบของเฟอร์เรตไอออนในสารละลายที่พีเอชต่างๆ พบว่ามี 4 รูปแบบ ดังสมการที่ (2-3) ถึง (2-5)



เมื่อนำค่าคงที่การแตกตัว (pK) มาคำนวณจะได้กราฟการแตกตัวของเฟอร์เรตดังรูปที่ 2.5 จากกราฟจะเห็นว่าในน้ำธรรมชาติและน้ำที่เป็นด่างจะพบเฟอร์เรตอยู่ในรูป  $\text{HFeO}_4^-$  และ  $\text{FeO}_4^{2-}$  เป็นส่วนมาก

### 2.4.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์

กำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของเฟอร์เรตมีค่าสูงโดยมีค่าระหว่าง +0.7 V ถึง +2.2 V ในสารละลายเบส และกรดตามลำดับ ซึ่งนับว่าแรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำดังตารางที่ 2.5

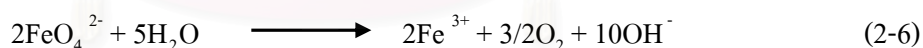
ตารางที่ 2.5 ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

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

ที่มา: Jiang และ Lloyd (2002)

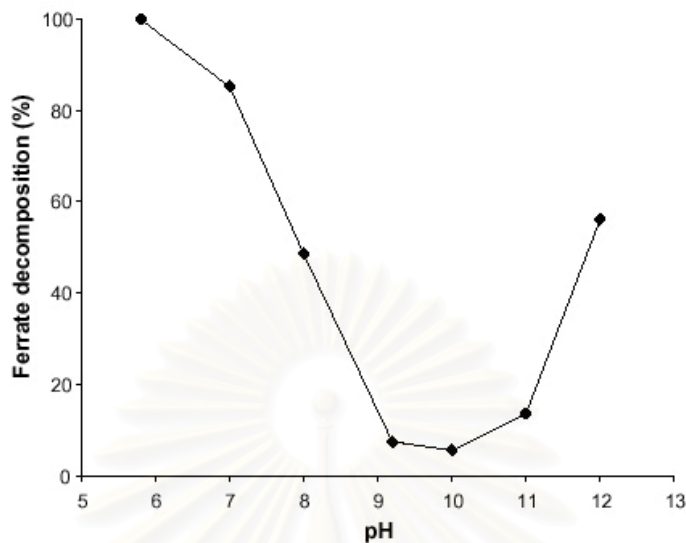
#### 2.4.1.3 ความเสถียรของเฟอร์เรต

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



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

นอกจากผลของสารละลายแล้วยังมีรายงานว่าพีเอชก็มีผลต่อความเสถียรของเฟอร์เรต ด้วยพบว่าเฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9.4-9.7 (Sharma, 2002) แต่ยังไม่มีการรายงานถึงกลไก หรือเหตุผลที่เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงสุดในช่วงพีเอชนี้ จากการทดลองของ Graham, N. และคณะ (Graham และคณะ, 2004) ได้ผลดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์  
ที่มา: Graham และคณะ (2004)

และยังมีการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ KOH ในสารละลายมีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต โดยเมื่อความเข้มข้นของ KOH สูงขึ้นค่าความเสถียรจะมีค่ามากขึ้น สำหรับสารอื่นๆ เช่น เกลือของไนเตรท กับ ทองแดง เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แบริยม เซอร์เนียม แคลเซียม และแมกนีเซียม และเกลืออื่นๆ เช่น  $K_2Zn(OH)_4$ ,  $KIO_4$ ,  $K_2B_4O_9$ ,  $K_3PO_4$ ,  $Na_4P_2O_7$ ,  $Na_2SiF_6$ ,  $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2MoO_4$  และ  $Na_2WO_4$  ไม่มีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

## 2.4.2 วิธีการเตรียมเฟอร์เรต

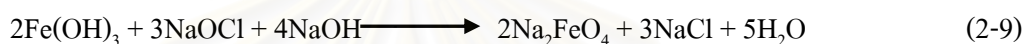
### 2.4.2.1 วิธีการ Dry Oxidation

เป็นวิธีการเก่าที่ยาก และอันตรายเพราะสามารถเกิดการระเบิดได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเตรียมเฟอร์เรตด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการผสมเฟอร์ริกออกไซด์กับโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 350-370 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $FeO_5^{4-}$  และจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น  $FeO_4^{2-}$  ดังสมการที่ (2-7)



### 2.4.2.2 วิธีการ Wet Oxidation

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยการออกซิไดซ์เฟอร์ริกให้กลายเป็นเฟอร์เรตภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง โดยเฟอร์เรตที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการล้างและทำให้แห้งอีกครั้งเพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความเสถียรสูง ในระยะแรกเป็นการเตรียมในรูปของ โซเดียมเฟอร์เรต ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากโซเดียมเฟอร์เรตมีความสามารถในการละลายสูง ต่อมาจึงได้พัฒนามาเป็นรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรต ที่เตรียมได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่า การเตรียมโพแทสเซียมเฟอร์เรตทำได้ตามสมการที่ (2-8) ถึง (2-10)

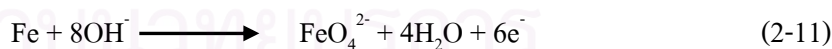


ภายหลังได้มีการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ (2-9) ทำให้ได้เฟอร์เรตในปริมาณที่มากขึ้น

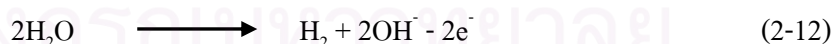
### 2.4.2.3 วิธีการ Electro-Chemical

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยใช้กระแสไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนด และใช้ KOH เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังสมการที่ (2-11) ถึง (2-14) ปริมาณเฟอร์เรตที่ได้มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า และชนิดของขั้วแอโนดเป็นอย่างมาก

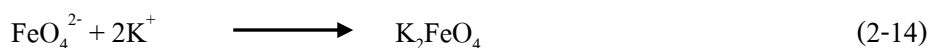
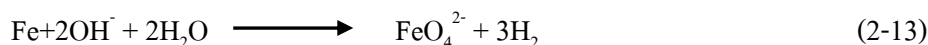
Anode reaction



Cathode reaction



Overall reaction



การเตรียมเฟอร์เรตในรูปของโซเดียมเฟอร์เรตทำได้ยากเนื่องจากความสามารถในการละลายสูง ซึ่งการเตรียมในรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรตทำได้ง่ายกว่า การเตรียมเฟอร์เรตใน



ปริมาณมากทำได้ยากเนื่องจากความต้องการความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นสูง และยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่าง เช่น ชนิดของขั้วแอโนดในวิธีการ Electrochemical เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ การแยกส่วนที่ตกตะกอน (Isolation process) ในวิธีการ Wet Oxidation นอกจากนี้ยังมีการเกิดก๊าซคลอรีนเนื่องจากไฮโปคลอไรต์ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ดังนั้นการเตรียมเฟอร์เรตจึงต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวัง

### 2.4.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

#### 2.4.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิดดังตารางที่ 2.6 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับพีเอชเป็นอย่างมาก และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้

เฟอร์เรตมีความสามารถในการกำจัดสารพิษได้หลายชนิด และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย นอกจากนี้เฟอร์เรตยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้คลอรีน คือ การใช้คลอรีนจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ของคลอรีน (Chlorinated by-products) เช่น THM (Trihalomethanes) มีรายงานว่า การใช้เฟอร์เรตในการบำบัดน้ำจะมีค่า THM formation potential (THMFP,4-h) น้อยกว่าการใช้คลอรีนถึง 75 เปอร์เซ็นต์ (Jiang และ Lloyd, 2002)

#### 2.4.3.2 การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีน เป็นวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ มีการทดลองการใช้สารอื่นๆในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไอโอดีน และโอโซน พบว่ามีสารผลิตภัณฑ์อื่นๆ เกิดขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน

มีรายงานการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการฆ่าเชื้อโรค พบว่าเฟอร์เรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียโดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในอีกการทดลองหนึ่งพบว่าที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ( $\text{as FeO}_4^{2-}$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัด Total Coli form ได้ 99.9 เปอร์เซ็นต์ และกำจัด Total Viable Bacteria ได้ 97.0 เปอร์เซ็นต์

สำหรับไวรัส ได้มีการทดลองการกำจัด (Inactivate) f2 Coliphage ซึ่งเป็นไวรัสที่พบได้ทั่วไปในท่อระบายน้ำ และมีความคงทนต่อคลอรีน พบว่าที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ( $\text{as K}_2\text{FeO}_4$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัดไวรัสได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีน ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งคือ เฟอร์เรตจะไม่มีสารตกค้าง (Residual) เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Jiang และ Lloyd, 2002)

ตารางที่ 2.6 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต

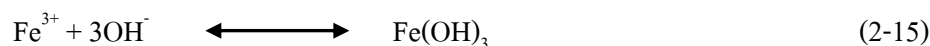
Contaminant	pH	$k, M^{-1} s^{-1}$	$t_{1/2}$	Reference
Hydrogen sulfide	9.0	$7.4 \times 10^5$	2.7 ms	Sharma et al., 1997
<i>p</i> -Hydroquinone	9.0	$2.0 \times 10^5$	10.0 ms	Bielski, 1991
2-Mercaptoethanesulfonic acid	9.0	$3.0 \times 10^4$	66.7 ms	Read et al., 1998b
2-Mercaptobenzoic acid	10.0	$2.5 \times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

<sup>a</sup>Based on five-fold higher concentration of Fe(VI) than contaminant (100  $\mu$ M).

ที่มา: Sharma (2002)

### 2.4.3.3 การโคแอกกูเลชัน

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อกำจัดความขุ่นได้โดยเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่เกิดขึ้นจากเฟอร์เรต ซึ่งตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ (2-15)



มีรายงานว่า เฟอร์เรตสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ในเวลาเพียง 1 นาที ในขณะที่เกลือของเฟอร์ริกใช้เวลาถึง 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้ในการกำจัดโลหะในน้ำได้หลายชนิด เช่น เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม และปรอท นอกจากนี้ยังมีการทดลองที่พบว่าเฟอร์เรตสามารถใช้ในการบำบัดสารกัมมันตรังสี เช่น อะเมริซิยม (Americium) และพลูโทเนียม (Plutonium) ในน้ำได้อีกด้วย (Jiang และ Lloyd, 2002)

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

### 2.4.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต

Ma, J. และ Liu, W. (2002) ได้ทำการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สารต่างๆ ในน้ำก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ในการผลิตน้ำประปาโดยใช้ตัวอย่างน้ำ 3 ชนิด พบว่าการเติมเฟอร์เรตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และการกรอง (Filtration) โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพียง 0.5-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังเห็นผลได้ชัดเมื่อน้ำดิบมีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ที่มากขึ้น

Ma, J. และ Liu, W. (2002) ได้ทำการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สาหร่ายในน้ำก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีโคแอกกูเลชัน ทดลองโดยใช้น้ำตัวอย่าง 2 ชนิด คือน้ำดิบจริงจากทะเลสาบซึ่งมีสาหร่ายอยู่มาก และน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีสาหร่าย 2 ชนิด คือ Chlorococoum และ Scenedesmus ซึ่งเป็นสาหร่ายที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ พบว่าการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรตในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยใช้สารส้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในน้ำดิบจริง นอกจากนั้นการเติมเฟอร์เรตจะทำให้เซลล์สาหร่ายตาย (Inactivate) และปล่อยสารไบโอโพลีเมอร์ออกมา ซึ่งจะทำให้เกิดกลไก Bridging ช่วยในการโคแอกกูเลชัน และการเติมเฟอร์เรตจะทำให้เกิดตะกอนของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Yuan, B.L. Qu, J.H. และ Fu, M.L. (2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารไมโครไซติน (Microcystin) ที่เกิดจากไซยาโนแบคทีเรีย โดยการใช้เฟอร์เรตพบว่าสามารถกำจัดสารไมโครไซตินได้อย่างดี โดยประสิทธิภาพจะแปรตามความเข้มข้นของเฟอร์เรต พีเอช และเวลาสัมผัส นอกจากนี้ยังได้สารผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ที่ไม่เป็นพิษ และยังช่วยเพิ่มตะกอนได้อีกด้วย

Qu, J.H. และคณะ (2003) ได้ทำการทดลองการกำจัดกรดฟุลวิก (Fulvic Acid) โดยใช้เฟอร์เรต พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดฟุลวิก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์เรตต่อกรดฟุลวิกเท่ากับ 12 ต่อ 1 และยังพบว่าปริมาณกรดสามารถลดลงได้อีก เนื่องจากการดูดติดในการตกตะกอนของเฟอร์ริก และเมื่อใช้ร่วมกับการตกตะกอนโดยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์

Sharma, V.K. และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาทดลองกำจัดไทโออะเซตามายด์ (Thioacetamide) โดยใช้เฟอร์เรต ทำการทดลองที่พีเอช 9.14-12.0 ที่อุณหภูมิ 15-35 องศาเซลเซียส ในสารละลายฟอสเฟตเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่ 1 ทั้ง 2 สาร และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยไทโออะเซตามายด์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซัลฟีนิล (sulfenyl) ซัลฟีนิก (sulfinic) และกรดซัลโฟนิก (sulfonic acid) และสุดท้ายกลายเป็นซัลเฟต (sulfate) และอะเซตามายด์ (acetamide)

Chao, A.C. Luca, S.J. และ Idle, C.N. (1996) ได้ศึกษาการเติมเฟอร์เรตลงในตะกอนอินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งในการจัดการตะกอนจะมีปัญหาเรื่องกลิ่น พบว่าสามารถลดสารที่จะทำให้กลิ่นได้โดยเฉพาแอมโมเนีย และซัลไฟด์ โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท และซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟต ทำให้สามารถนำตะกอนอินทรีย์ไปจัดการต่อได้โดยไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น

Graham, N. และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟีนอล และคลอโรฟีนอล 3 ชนิด คือ 4-Chlorophenol (CP) 2,4-Dichlorophenol (DCP) และ 2,4,6-Trichlorophenol (TCP) ด้วยเฟอร์เรต เนื่องจากค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ความเสถียรของเฟอร์เรต และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวได้จะขึ้นอยู่กับพีเอช จึงทำการทดลองในช่วงพีเอช 5.8-11.0 และอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อสารประกอบในช่วง 1 ต่อ 1 ถึง 8 ต่อ 1 และใช้ไทรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนสำหรับสารที่ไม่แตกตัว ผลการทดลองพบว่ากำจัดสารประกอบต่างๆ ด้วยเฟอร์เรตจะขึ้นอยู่กับ

พีเอชเป็นอย่างมาก โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมลดลงจากฟีนอล CP DCP และ TCP ตามลำดับ และมีค่าอัตราการสลายตัวที่พีเอชเหมาะสมใกล้เคียงกัน ผลการทดลองกับฟีนอล และคลอโรฟีนอลชี้ให้เห็นว่าจำนวนอะตอมของคลอรีนใน โมเลกุลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ไม่แตกตัวเพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวลดลง

Sharma, V.K. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเฟอร์เรตพบว่า เฟอร์เรตที่ได้จากการแตกตัวของโพแทสเซียมเฟอร์เรตมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรสูง มีกำลังในการออกซิไดซ์สูง มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยา และได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้โพแทสเซียมเฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ปลอดภัยสำหรับน้ำธรรมชาติ ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม เฟอร์เรตมีกำลังในการออกซิไดซ์ +0.7 ถึง +2.2 โวลต์ ในสารละลายเบส และกรดตามลำดับ การสลายตัวของเฟอร์เรตเป็นเฟอร์ริก และออกซิเจนเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรด และสลายตัวได้ช้าที่พีเอช 10 และในสารละลายเจือจาง การสลายตัวจะเกิดได้ช้าที่สุดที่พีเอช 9.4-9.7 เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่เลือกทำปฏิกิริยา และสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารอินทรีย์หลายชนิด โดยที่ยังคงได้เฟอร์ริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ เฟอร์เรตเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเทคโนโลยีสะอาด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำ Super-iron Batteries และการบำบัดน้ำเสีย สารปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียสามารถกำจัดได้โดยใช้เฟอร์เรต โดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาทีโดยไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ยังเป็นสารฆ่าเชื้อโรค Antifulant และสารรวมตะกอน จึงนับได้ว่าเป็นสารที่สามารถใช้งานบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Jiang, J.Q. และ Lloyd, B. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเตรียม และการใช้เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ และสารรวมตะกอนในงานด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าจากคุณสมบัติที่พิเศษ (กำลังในการออกซิไดซ์สูง และการเกิดเฟอร์ริกที่เป็นสารรวมตะกอน) ทำให้เฟอร์เรตสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ลดรูป (Degrade) หรือกำจัดสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้โดยการทำงานเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามยังไม่พบการใช้งานเฟอร์เรตในแบบ Full-Scale ในงานเกี่ยวกับน้ำ เนื่องจากความยุ่งยากในการเตรียม อัตราการเกิดสารผลิตภัณฑ์ต่ำ การเกิดความไม่เสถียรที่เป็นผลจากเทคนิคการเตรียม และการศึกษาที่จะชี้แนะถึงความสามารถ และข้อดีของมันในงานด้านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาขั้นพื้นฐานจำเป็นต้องการค้นคว้าวิธีการผลิตแบบใหม่ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิด และความเสถียรสูง และการหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรต์ และคลอรีนในการผลิต ทั้งนี้ประโยชน์ของเฟอร์เรตในงานด้านการผลิตน้ำดื่มยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ และงานด้านนี้เป็นส่วนที่น่าสนใจในอนาคต

## 2.5 ไซยาไนด์ (Cyanide)

### 2.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์

ไซยาไนด์ (Cyanide) หมายถึง กลุ่มของไซยาไนด์ทั้งหมดที่สามารถวิเคราะห์หาได้ในรูปของไซยาไนด์ไอออน (CN<sup>-</sup>) โดยในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไป และในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะพบไซยาไนด์ทั้งในรูปของไซยาไนด์ไอออน และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาไซยาไนด์จะทำการตรวจวัดในรูปของปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดโดยใช้วิธีการกลั่น (Distillation Measurement)

### 2.5.2 การแบ่งประเภทของไซยาไนด์

การแบ่งประเภทของไซยาไนด์สามารถแบ่งได้โดยอาศัยลักษณะของโมเลกุลซึ่งแบ่งออกเป็น

ก) สารประกอบไซยาไนด์เชิงเดี่ยว (Simple Cyanide) หมายถึง ไซยาไนด์อิสระและสารประกอบไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลนั้

ข) สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนักทุกประเภท (Zheng และคณะ, 2003) สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน สามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีกโดยแบ่งตามความแข็งแรงของพันธะซึ่งแบ่งได้เป็น

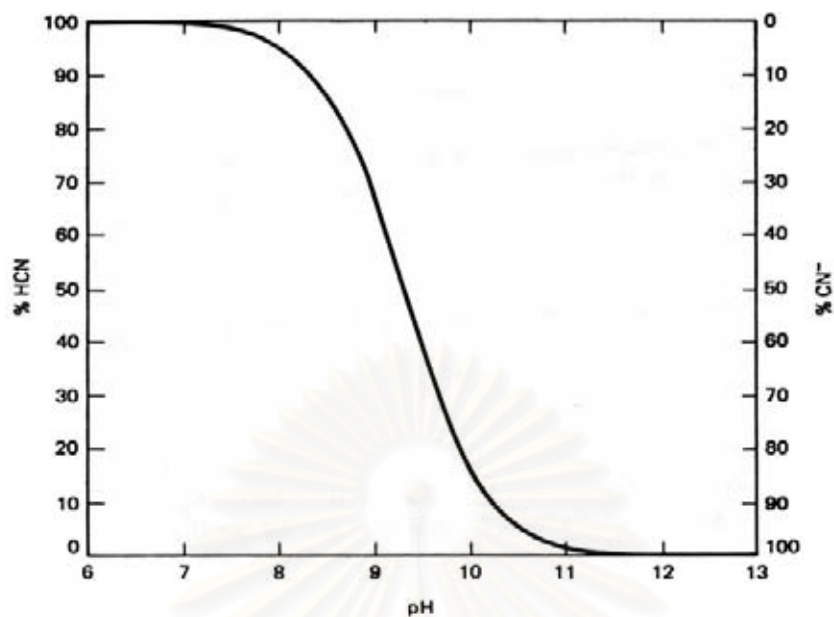
- **Strong Metal-Cyanide Complexes** หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะแข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ทองคำ และโคบอล

- **Weak Metal-Cyanide Complexes** หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะไม่แข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของ เงิน แคดเมียม ทองแดง โปรท นิกเกิล และ สังกะสี ทั้งหมดนี้เรียกอีกอย่างว่า Weak Acid Dissociable Species (WAD) (Botz, 2001)

#### 2.5.2.1 ไซยาไนด์อิสระ

ไซยาไนด์อิสระ (Free Cyanide) หมายถึง ไซยาไนด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์หรือกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) และไซยาไนด์ไอออน (CN<sup>-</sup>) สัดส่วนของกรดไฮโดรไซยานิกต่อไซยาไนด์ไอออนจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และค่าคงที่การแตกตัวเป็นไอออนของกรดไฮโดรไซยานิก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ไซยาไนด์ไอออน และกรดไซยานิกมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2-16)



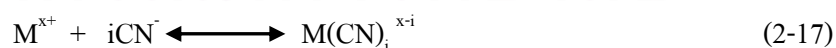


**รูปที่ 2.7** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออน และกรดไฮโดรไซยานิกที่พีเอชต่างๆ  
ที่มา: Benfield และคณะ (1982)

จากกราฟพบว่า ที่พีเอช 9.24 ปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิกจะเท่ากับปริมาณของไซยาไนด์ไอออน ที่พีเอชต่ำกว่า 9.24 ไซยาไนด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดไฮโดรไซยานิก ซึ่งเป็นกรดอ่อนที่ระเหยง่าย และที่พีเอชสูงกว่า 9.24 ไซยาไนด์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออนซึ่งละลายอยู่ในน้ำ

### 2.5.2.2 สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน

สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะหนักที่เกิดจากการจับตัวกันของไซยาไนด์ไอออนกับโลหะหนัก (M) ที่ละลายอยู่ในน้ำดังสมการที่ (2-17)



สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี แต่จะมีบางรูปที่ตกตะกอนได้เช่นกัน โลหะแต่ละชนิดสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบ และในแต่ละแบบก็จะมีค่าคงที่เสถียรภาพ ( $\beta_i$ ) แตกต่างกันไป ดังแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่เสถียรภาพ ( $\beta_i$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก

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

ที่มา: 1.Benjamin (2002) 2.Gherrou และKerdjoudj (2002)

โดยค่าคงที่เสถียรภาพนี้จะบอกถึงความแข็งแรงพันธะ ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนในการให้ไซยาไนด์ไอออนออกมา โดยสามารถแบ่งประเภทสารประกอบเชิงซ้อนตามความแข็งแรงของพันธะได้ 2 แบบ คือ Strong Metal-Cyanide Complexes หรือ Strong Acid Dissociable Species (SAD) หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะแข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ทองคำ และ โคบอล เป็นต้น และ Weak Metal-Cyanide Complexes หรือ Weak Acid Dissociable Species (WAD) หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่มีพันธะไม่แข็งแรง เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของเงิน ทองแดง พรอท นิกเกิล และสังกะสีซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.8

### 2.5.2.3 สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ

สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ เช่น ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride, CNCl) เกิดจากการบำบัดไซยาไนด์ด้วยวิธีการออกซิเดชันด้วยคลอรีน เป็นสารประกอบที่ระเหยได้ง่าย ละลายน้ำได้เล็กน้อย และมีความเป็นพิษสูง นอกจากนี้ยังสามารถพบสารประกอบประเภทไซยาไนด์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ไซยาเนต (Cyanate, CNO<sup>-</sup>) เกิดจากการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ในระหว่างการบำบัด และไธโอไซยาเนต (Thiocyanate, SCN<sup>-</sup>)

### 2.5.3 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่องกับโปรตีน และเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส ที่จำเป็นต่อการหายใจในระดับเซลล์ในร่างกายสิ่งมีชีวิต และฮีโมโกลบิน ซึ่งจะมีผลทำให้เซลล์ขาดออกซิเจน เสื่อมหรือตายได้ (ประยูร ฟองสติษฐ์กุล และคณะ, 2542)



ตารางที่ 2.8 ค่าคงที่ (log K) และประเภทของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก

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

ที่มา: Dionex (2003)

ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางกิน ทางหายใจ การดูดซึมผ่านผิวหนัง และลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณน้อย จะเกิดอาการพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมองอาจปรากฏอาการทางจิต ประสาทตาเสื่อม หรือฝ่อไปได้

ส่วนผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างมากจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกาย โดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงชีวิต (Rania และ Roldan, 2004) ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้มีการทดลอง และกำหนดเป็นค่าระดับอันตรายไว้ดังตารางที่ 2.9 โดย Threshold Limit Value (TLV) คือ ค่าความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสทางอากาศหลายๆ วันต่อเนื่องกันโดยไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อสุขภาพ และค่า Median Lethal Dose ( $LD_{50}$ ) คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณสารที่เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วจะทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่มตายลงครึ่งหนึ่ง

สำหรับไซยาเนต มักพบเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการกำจัดไซยาไนด์และมีความเสถียรสูงกว่าไซยาไนด์ ซึ่งไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์มาก ถ้าได้รับการสัมผัสภายนอกจะเกิดอาการระคายเคือง ถ้าได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยจะส่งผลเรื้อรังทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรง น้ำหนักลด และหากได้รับในปริมาณมากจะเกิดอาการอาเจียน อ่อนเพลีย ส่งผลต่อระบบประสาท และทำให้ระบบการหายใจหยุดทำงานได้เมื่อได้รับในปริมาณสูงมาก (Mallinckrodt Baker, 2004)

ตารางที่ 2.9 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ

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

ที่มา: U.S. EPA (2000)

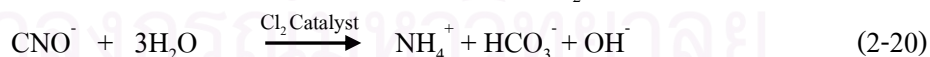
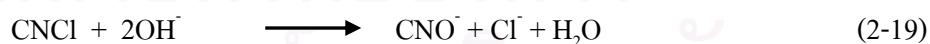
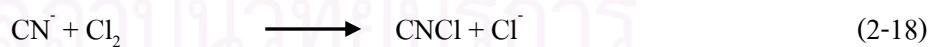
### 2.5.4 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารประกอบไซยาไนด์จะต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีในการบำบัดไซยาไนด์อยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งวิธีการที่มีการใช้งานกัน และวิธีที่มีการศึกษากันอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

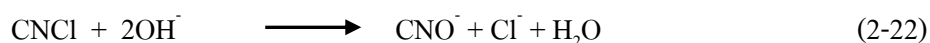
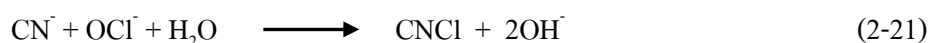
#### 2.5.4.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) หรือ ก๊าซคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นที่ 1 ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-18) ถึง (2-20) (Botz, 2001) และสมการที่ (2-21) ถึง (2-23) (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003)

เมื่อใช้ก๊าซคลอรีน



เมื่อใช้โซเดียมไฮโปคลอไรด์



ก๊าซไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) เป็นก๊าซพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และจะรวมกับไฮดรอกไซด์กลายเป็นไซยาเนตดังสมการที่ (2-19) และ (2-22) ซึ่งเกิดขึ้นได้เร็วที่พีเอชสูงดังนั้นปฏิกิริยาทั้งหมดในขั้นที่ 1 จึงควรทำที่พีเอชประมาณ 9.0-10.0 เพื่อให้ปฏิกิริยาการเกิดไซยาเนต เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ต่อมาในขั้นที่ 2 กรณีการใช้ก๊าซคลอรีน ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) และแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) โดยมีคลอรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-20) ส่วนกรณีการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรด์ ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต และก๊าซไนโตรเจนดังสมการที่ (2-23)

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

#### 2.5.4.2 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-24)



วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้โดยการตกตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง และเหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.31 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3-8 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 9.0-9.5 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes แต่จะกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้น้อย เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และเหล็กจะเกิดขึ้น และตกตะกอนได้มากที่พีเอชต่ำกว่านี้

#### 2.5.4.3 การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfur Dioxide/Air

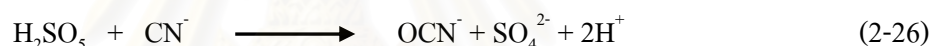
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนร่วมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนตดังสมการที่ (2-25)



วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry) สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้ โดยการตกตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ทองแดง และเหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 2.46 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3.5-4.5 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม 8.0-9.0 และควรเติมปูนขาวเพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

#### 2.5.4.4 การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid

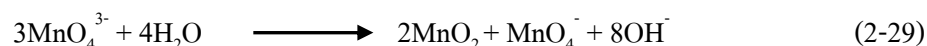
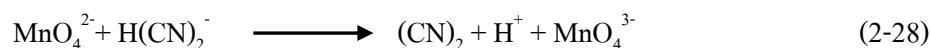
เป็นการออกซิไดซ์ด้วยกรดเพอร์ร็อกซีโมโนซัลฟูริก (Peroxymonosulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) หรือ Caro's Acid โดยไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยาเนตดังสมการที่ (2-26)



Caro's Acid เป็นสารที่สลายตัวเร็ว การใช้งานจึงต้องผลิตขึ้นที่จุดใช้งาน (on-site) โดยการผสมกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น ตามทฤษฎีใช้ Caro's Acid ประมาณ 4.39 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ Caro's Acid 5-15 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม และควรเติมปูนขาวเพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

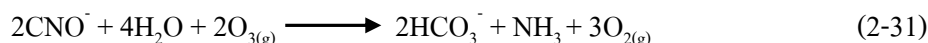
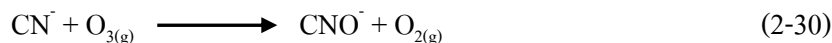
#### 2.5.4.5 การออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์มังกานต

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์มังกานต ( $\text{KMnO}_4$ ) ที่ค่าพีเอช 12-14 เนื่องจากที่พีเอชต่ำกว่า 6 จะไม่เกิดปฏิกิริยา และที่พีเอช 6-9 จะเกิดก๊าซไซยาโนเจน ( $(\text{CN})_2$ ) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่พีเอช 6-12 จะเป็นไปตามสมการที่ (2-27) ถึง (2-29) (วิสิทธิ์ สุขป้อม, 2540)

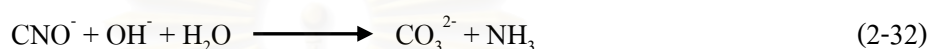


### 2.5.4.6 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

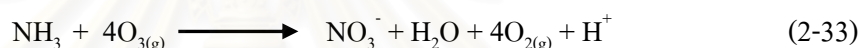
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-30) และ (2-31)



ในสารละลายที่มีพีเอชสูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนตได้ดังสมการที่ (2-32)



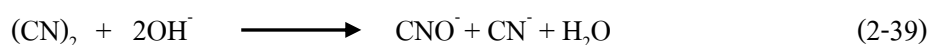
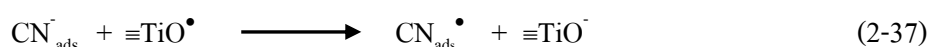
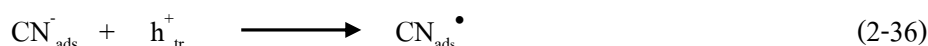
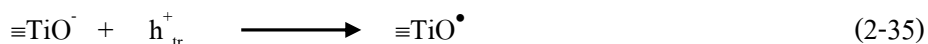
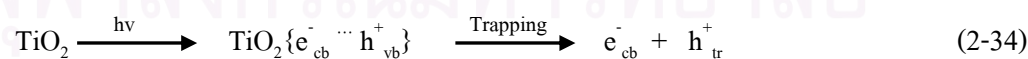
และจากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนเตรตดังสมการที่ (2-33)



วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Metal-Cyanide Complexes ได้ และยังสามารถใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ แต่สำหรับ Strong Metal-Cyanide Complexes จะทำลายได้น้อยแม้จะเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปก็ตาม ปฏิกิริยาของไซยาเนต (สมการที่ 2-31) จะเกิดขึ้นช้าเมื่อเทียบกับไซยาไนด์ (สมการที่ 2-30) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณไซยาไนด์แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซนเท่านั้น (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003)

### 2.5.4.7 การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เป็นการออกซิไดซ์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กแตกตัวได้บางส่วน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดการออกซิไดซ์โดยเรดิคอลที่พื้นผิวไททาเนียม ( $\equiv\text{TiO}^\bullet$ ) (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ดังสมการที่ (2-34) ถึง (2-39)



วิธีนี้สามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์ (Rader และคณะ, 1995)

#### 2.5.4.8 การออกซิเดชันด้วยความร้อน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 140-200 องศาเซลเซียส และพีเอชเท่ากับ 8 แรงดันที่ใช้ต้องสูงถึง 100 บาร์ โดยไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอร์มเมต ( $\text{HCOO}^-$ ) และแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) (Hartinger, 1994) ดังสมการที่ (2-40)



และหากมีไนโตรที่เข้ามาด้วย ฟอรัมเมต และแอมโมเนียจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ (2-41) และ (2-42)



วิธีการนี้สามารถบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง และสามารถใช้น้ำล้างชิ้นงานที่เข้มข้นได้ด้วย

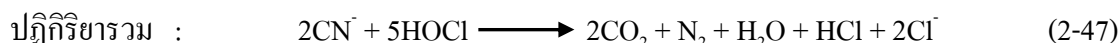
#### 2.5.4.9 การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ปกติ และถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับแต่งพื้นผิว เช่น ปรับแต่งถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิว (Modified Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002b) และการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยโลหะหนักบางชนิด (Impregnate Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002a) วิธีนี้ใช้ได้ดี และมีราคาถูกมักใช้เป็นระบบสุดท้ายเพื่อลดปริมาณไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมักเหลือจากการบำบัดด้วยวิธีอื่น

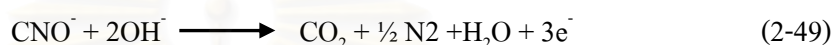
#### 2.5.4.10 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ ( $\text{OCl}^-$ ) จากโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ที่เติมลงไป และไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นสารที่ไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2-43) ถึง (2-47)





2. การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยตรง ไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไซยาเนตที่ขั้วแอโนดโดยตรง และจะถูกสลายต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซาลेटไอออนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย (Ogutveren, Toru และ Kopalal, 1999) ดังสมการที่ (2-48) ถึง (2-53)



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

#### 2.5.4.11 การใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพ

ระบบบำบัดทางชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่มากนัก (White, Pilon และ Woolard, 2000) มีการใช้กันในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดี การย่อยสลายไซยาไนด์โดยกระบวนการทางชีวภาพมีอยู่หลายวิถีทาง (Pathway) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาออกซิเดทีฟ (Oxidative Reaction) ไซยาไนด์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย (Ebbs, 2004) ดังสมการที่ (2-54)



#### 2.5.5 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์

ชลชัย โพธิ์พันธุ์ และคณะ (2540) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และไซยาไนด์ ซึ่งผลการทดลองบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบทองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 และมีความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 58.78 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ประมาณ 2.26 เท่าของที่ใช้ในทางทฤษฎี ในการกำจัด

ไซยาไนด์ และตกตะกอนโลหะหนักจะทำการขยายเวลาของการออกซิไดซ์ในขั้นที่ 1 จากเดิม 20 นาที เป็น 1 ชั่วโมง จะทำให้โลหะหนักทั้งคอปเปอร์ และนิกเกิลที่เหลืออยู่มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐาน และสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้หมด

สีลาวัช ดำรงศิริ (2548) ได้ทำการศึกษาทดลองผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้เฟอร์เรตที่พีเอชต่างๆกัน และที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 9 10 และ 11 ที่มีสังกะสี และไม่มีสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 95 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์

Rader, W.S. และคณะ (1995) ศึกษาการบำบัดน้ำจากเหมืองขุดแร่ (Precious-Metal Mill Tailing) โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ในการทดลองที่พีเอช 11 พื้นที่ผิวน้ำ 350 ตารางเซนติเมตรลึก 3 เซนติเมตร และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ทุกชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยไซยาไนด์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อนส่วนหนึ่งถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก ทองแดง สังกะสี พรอท และสารหนู จะถูกทำให้เสถียรในรูปของตะกอน

Sharma, V.K. และคณะ (1998) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเฟอร์เรต ที่พีเอช และอุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น มีค่า Energy of activation เท่ากับ  $38.9 \pm 1.0$  กิโลจูลต่อโมลที่พีเอช 9.0 และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-55)



การทดลองที่พีเอช 7.5 9.0 และ 12.0 พบว่า ที่พีเอช 9.0 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ปริมาณโดยโมลของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่พีเอช 7.5 จะพบไซยาเนต และไนไตรท์เป็นสารผลิตภัณฑ์ และที่พีเอช 9.0 และ 12.0 จะพบเพียงไนไตรท์โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ ที่ถูกออกซิไดซ์ต่อไนไตรท์เป็น 1 ต่อ 1 สำหรับการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงชุบโลหะพบว่า มีประสิทธิภาพดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

Kurama, H. และ Catalsarik, T. (2000) ศึกษาการใช้เรซิน Lewatit MP62 กำจัดสารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีออกจากน้ำยาชะแร่ การทดลองทำโดยใช้คอลัมน์แก้ว และ



ใช้น้ำตัวอย่างจากบริษัท 100<sup>th</sup> Year Silver Cyanidation Plant ประเทศตุรกี น้ำตัวอย่างมีปริมาณ สังกะสี 474 มิลลิกรัมต่อลิตร และไซยาไนด์ 720 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นการศึกษา เกี่ยวกับความจุของเรซิน และผลกระทบเนื่องจากพีเอชที่มีต่อ Loading capacity ศึกษาโดยใช้ Breakthrough curve ผลการทดลองพบว่า สารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีถูกกำจัดได้อย่าง สมบูรณ์จนกว่าระบบจะถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough point)

Sinbuathong, N. และคณะ (2000) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (Ca(OCl)<sub>2</sub>) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 12.3 ได้สารผลิตภัณฑ์คือไซยาเนต (OCN<sup>-</sup>) ซึ่งสามารถ ออกซิไดซ์ได้เป็นก๊าซไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์

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 และระบบเป็นแบบคอลัมน์ แบบแยกชนิด พบว่า TBA-Carbon สามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ 29.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่า ถ่านกัมมันต์เปล่าๆ 5 เท่า ส่วน SDDC-Carbon สามารถดูดซับทองแดง สังกะสี และแคลเซียมได้ 38.0 9.9 และ 6.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์เปล่าๆ 4 เท่า 4 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ

Aksu, Z. และ Gulen, H. (2002) ศึกษาการกำจัดเหล็ก (III) และสารประกอบเชิงซ้อนของ ไซยาไนด์กับเหล็ก (III) โดยวิธี Biosorption ด้วยเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* ในระบบแบบทีละเท ที่มี ค่าพีเอชเท่ากับ 2 เพื่อดูความสามารถในการดูดซับสารทั้ง 2 ชนิดนี้ในลักษณะการดูดซับสารเดี่ยว (Single Component) และการดูดซับสองสาร (Dual Component) ที่ปริมาณความเข้มข้นของสาร สูงขึ้นถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับเหล็ก (III) และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสารประกอบ เชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก (III) ในการทดลองการดูดซับสารเดี่ยวพบว่า ค่า Biosorption rate และค่า Equilibrium uptake เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น และผลการทดลองที่ได้เข้ากัน ได้พอดีกับ Langmuir Model และ Redlich-Peterson Model และในการทดลองการดูดซับสองสาร พบว่า ค่าequilibrium uptake ของเหล็ก (III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของ ไซยาไนด์กับเหล็ก (III) เพิ่มขึ้น และค่า Equilibrium uptake ของสารประกอบเชิงซ้อนของ

โซยาไนต์กับเหล็ก (III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเหล็ก (III) เพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาแบบเสริมกัน (Synergistic Interaction)

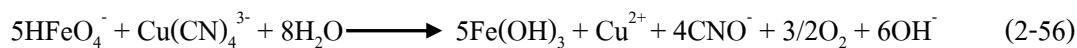
Dabrowski, B. และคณะ (2002) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซยาไนต์อิสระโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยหาอัตราการออกซิเดชันโซยาไนต์ด้วยแสง โดยใช้ความเข้มข้นของโซยาไนต์เริ่มต้น พีเอช ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซที่ใช้ และอุณหภูมิที่ต่างกัน พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต และออกซิเจนมีผลทำให้อัตราการออกซิเดชันโซยาไนต์อิสระเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ขึ้นกับความดันย่อยของออกซิเจน (0.2-1 บรรยากาศ) ที่อัตราการไหลของก๊าซในช่วงที่ทำการศึกษา และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซยาไนต์

Chiang, K. Amal, R. และ Tran, T. (2003) ได้ศึกษาถึงกลไกในการออกซิเดชันโซยาไนต์ โดยการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ โดยทดลองการแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิล บนพื้นผิวไททาเนียมด้วยฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซยาไนต์ไม่ได้เกิดขึ้นโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH<sup>\*</sup>) แต่เกิดขึ้นโดยเรดิคัลของพื้นผิวไททาเนียม ( $\equiv\text{TiO}^*$ ) และที่ความเร็วในการลดของโซยาไนต์ต่ำเนื่องจาก 1. การดูดซับของโซยาไนต์ที่พื้นผิวของไททาเนียมต่ำ 2. ไม่มีปฏิกิริยาที่เกิดจากโซยาไนต์กับไฮดรอกซิลเรดิคัล 3. เกิดการรวมตัวกันใหม่ของเรดิคัลของพื้นผิวไททาเนียมอย่างรวดเร็ว

Parga, J.R. Shukla, S.S. และ Carrillo-Pedroza, F.R. (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดโซยาไนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO<sub>2</sub>) การออกซิเดชันด้วยโอโซน และการออกซิเดชันด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดโซยาไนต์อิสระได้ดีที่ทุกพีเอช ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูงๆ ส่วนการใช้โอโซนสามารถกำจัดโซยาไนต์อิสระได้ดี และอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซนเท่านั้น และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีไททาเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีโดยเฉพาะเมื่อใช้แสงอาทิตย์

Sharma, V.K. และคณะ (2005) ศึกษาการใช้เฟอร์เรตกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของคอปเปอร์ (I) โซยาไนต์ ซึ่งพบได้มากในน้ำเสียจากเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งมีความเสถียรสูงกว่าโซยาไนต์อิสระ และมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่

1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-56) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์เท่ากับ 5:1



ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของเหมืองแร่ทองคำที่สังเคราะห์จาก โซโอไฮยาเนต ไฮยาไนด์ และ คอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์ พบว่าเฟอร์เรตทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์ ในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์ ใกล้เคียงกับทฤษฎี ผลการทดลองกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำที่มีความเข้มข้นไฮยาไนด์ทั้งหมด 17.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมดได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ที่เฟอร์เรต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องใช้เฟอร์เรตถึง 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

##### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดไนตริก (Nitric Acid,  $\text{HNO}_3$ ): Carlo ERBA, 65%
2. นิกเกิลซัลเฟต (Nickel Sulphate,  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ): Ajax, 96%
3. โซเดียมเตตระโบรไรต์ (Sodium tetraBorate,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ): BDH, 99.5%
4. โซเดียมเมตาอาร์เซไนต์ (Sodium meta Arsenite,  $\text{NaAsO}_2$ ): Fluka, purum 99%
5. โซเดียมอะซิเตต (Sodium Acetate,  $\text{CH}_3\text{COONa}$ ): BDH, AR 99%
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ): Fluka, 99%
7. โพแทสเซียมไซยาเนต (Potassium Cyanate,  $\text{KCNO}$ ): Aldrich, 96%
8. โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide,  $\text{KCN}$ ): Ajax, AR 96%
9. โพแทสเซียมไนไตรต์ (Potassium Nitrite,  $\text{KNO}_2$ ): Sigma-Aldrich, 96%
10. โพแทสเซียมเฟอร์เรต (Potassium Ferrate,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ): ได้รับความอนุเคราะห์จาก Dr.Sharma, 86%

11. แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium Chloride,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ): Ajax, AR 99-102%
12. เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine,  $C_2H_8N_2$ ): Panreac, 99%

### 3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต

#### 3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ

เตรียมสารละลายไว้เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ และการหยุดปฏิกิริยา โดยสารละลายที่เตรียมไว้มีดังนี้

##### 1) สารละลายไซยาไนด์

สารละลายไซยาไนด์ความเข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโพแทสเซียมไซยาไนด์มาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (พีเอชประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 2) สารละลายนิกเกิล

สารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำนิกเกิลซัลเฟตมาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ และ 1.2 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง

##### 4) สารละลายอาร์เซไนท์

สารละลายอาร์เซไนท์โดยความเข้มข้นอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมอาร์เซไนท์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา

##### 5) สารละลายบัพเฟอร์

สารละลายบอร์เรตบัพเฟอร์ ความเข้มข้น 0.010 และ 0.004 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรตมาละลายในน้ำปราศจากไอออน

สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ความเข้มข้น 0.010 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรตมาละลายในน้ำปราศจากไอออน

### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดลอง การผสมโซดาไนด์กับเฟอร์เรตจะทำโดยการผสมสารละลายทั้ง 2 ในปริมาณ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรตในแต่ละครั้งจึงต้องเตรียมที่ความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการใช้ เพื่อให้มีความเข้มข้นเท่าที่ต้องการเมื่อมีการผสมกัน การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะเตรียมขึ้นจากสารละลายเข้มข้น และสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ โดยจะเตรียมก่อนการใช้งานแต่ละครั้งและปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย

### 3.2.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรตพบว่าเฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9 ถึง 11 และเพื่อให้เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงที่สุด จะทำการเตรียมสารละลายก่อนใช้งานเท่านั้นเพราะเฟอร์เรตมีการสลายตัวเร็ว และสลายตัวไปตลอดเวลา โดยเตรียมด้วยความเข้มข้น 2 เท่า เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรตตรวจวัดได้ด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จะแสดงเป็นค่าการดูดซับแสง โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับสารละลายเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 ไมโครโมลาร์ ค่าการดูดซับแสงที่เทียบเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรตที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง

ความเข้มข้นที่กำหนด	ความเข้มข้น 2 เท่า	ค่าการดูดซับแสงที่ความเข้มข้น 2 เท่า
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไม่มีหน่วย
100	200	0.230
200	400	0.460
300	600	0.690
400	800	0.920
500	1,000	1.150

### 3.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

การทดลองต่างๆ จะเป็นลักษณะการทดลองที่ต่อเนื่องกัน และนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการทดลองชุดต่อไป โดยการทดลองส่วนใหญ่จะเป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

#### 3.3.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

ก-1 การทดลองถึงผลของนิกเกิลต่อการกำจัด ไชยาไนต์ในน้ำเสียโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเพอร์เรต

ก-1.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ

ก-1.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในสารละลายที่ไม่มี และ มี ไชยาไนต์ในอัตราส่วนต่างๆ

ก-1.3 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนปริมาณเพอร์เรตต่อ ไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัด ไชยาไนต์

ก-1.4 ศึกษาผลของนิกเกิล และอัตราส่วนต่ออัตราส่วนปริมาณเพอร์เรตต่อ ไชยาไนต์ ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัด ไชยาไนต์

ก-1.5 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเพอร์เรตกับ ไชยาไนต์

#### 3.3.2 การทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

ข-1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ

ข-2 ศึกษาอัตราส่วนปริมาณเพอร์เรตต่อ ไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัด ไชยาไนต์ในน้ำเสียจริง

### 3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

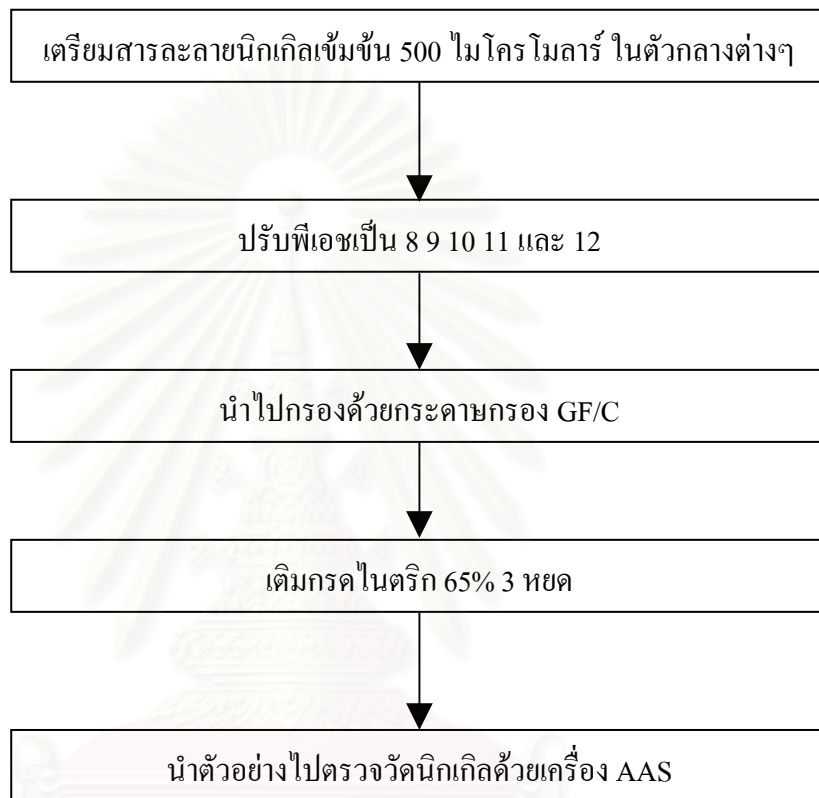
##### 3.4.1.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ (ก-1.1)

เป็นการทดลองเพื่อเลือกตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของ ไชยาไนต์และนิกเกิล โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ ทำการทดลองที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟต-บอร์เรต สารละลายฟอสเฟต และสารละลายบอร์เรต และแยกส่วนที่ตกตะกอนออกโดยกระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

การทดลองที่ 3.4.1.1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ เข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์

2. ปรับพีเอชที่ต้องการ
3. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C
4. เติมกรดไนตริก 65% 3 หยด
5. ตรวจวัดหาความเข้มข้นของนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.1

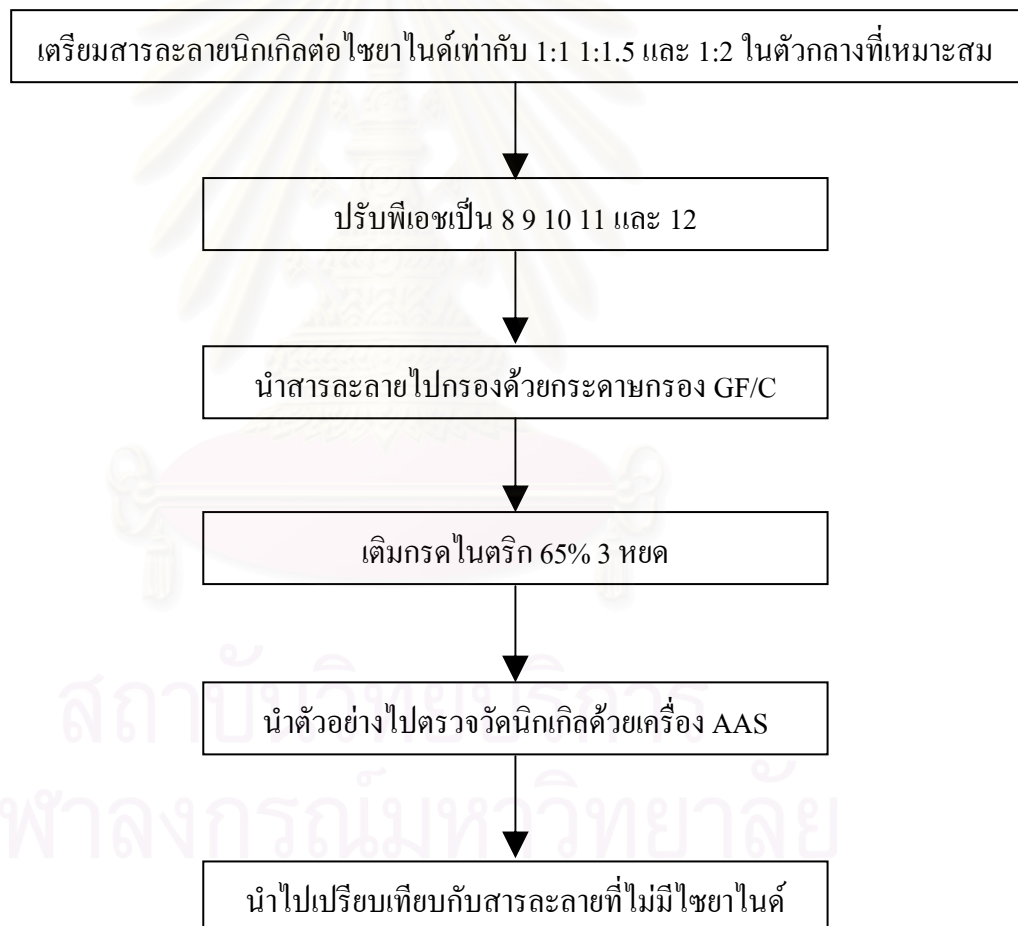
### 3.4.1.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในสารละลายที่ไม่มี และ มีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ (ก-1.2)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในสารละลายที่ไม่มี และ มีไซยาไนด์ ในการทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายที่มีไซยาไนด์ 500 750 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ และไม่มีไซยาไนด์ ทดลองที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1

การทดลองที่ 3.4.1.2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังนี้



1. เตรียมสารละลายนิกเกิลในตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1 เข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์
2. ปรับพีเอชที่ต้องการ
3. นำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C
4. จากนั้นเติมกรดไนตริก 65% 3 หยด
5. ตรวจวัดหาความเข้มข้นของนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS
6. เตรียมสารละลายผสมนิกเกิล และโซยานาไนต์ให้มีอัตราส่วนนิกเกิลต่อโซยานาไนต์เท่ากับ 1:1 1:1.5 และ 1:2 ปรับพีเอชต่างๆ ที่ต้องการ และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-5
7. นำผลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของนิกเกิล



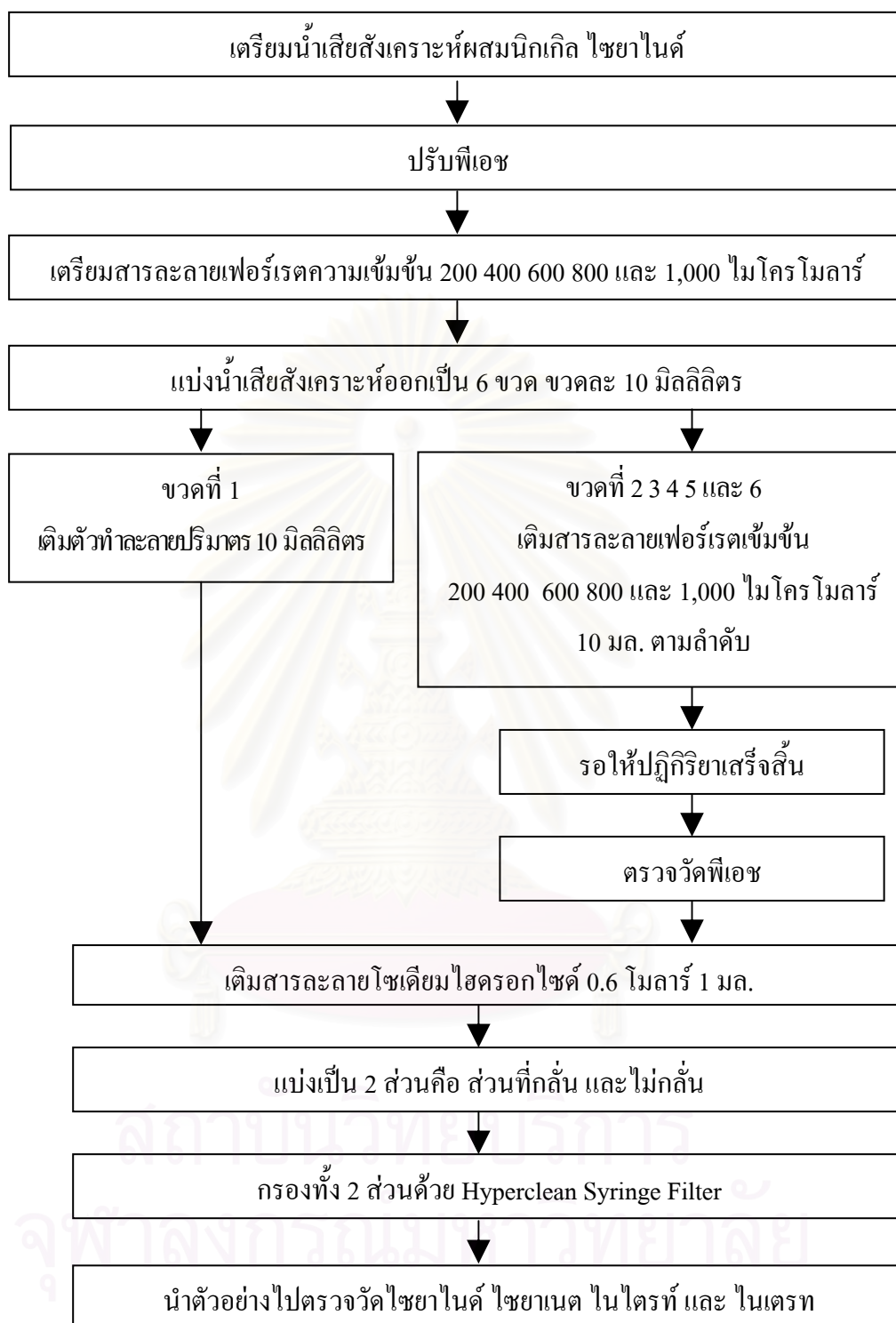
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.2

### 3.4.1.3 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนปริมาตรเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (ก-1.3)

เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลปนอยู่ในการทดลองนี้จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์เท่ากับ 1,000 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นนิกเกิลที่ความเข้มข้นอิมตัวที่แต่ละค่าพีเอช และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 0.2:1 0.4:1 0.6:1 0.8:1 และ 1:1 โดยทำการทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 ใช้สารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1 เป็นตัวทำละลาย การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดในการทดลอง เพื่อให้สามารถแปรค่าอัตราส่วนเฟอร์เรต ต่อไซยาไนด์ได้มาก

การทดลองที่ 3.4.1.3 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่างนิกเกิลที่ความเข้มข้นอิมตัวที่พีเอชต่างๆ กับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์
2. ปรับพีเอชเพื่อให้ได้ค่าพีเอชตามต้องการ
3. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตรความเข้มข้นละ 10 มิลลิลิตร
4. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 6 ขวด ขวดละ 10 มิลลิลิตร
5. ขวดที่ 1 เติมตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ปิดฝา และเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
6. ขวดที่ 2 3 4 5 และ 6 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มิลลิลิตร ปิดฝาทันที และเขย่าให้เข้ากัน รอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
7. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
8. แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่กลั่น และส่วนที่ไม่กลั่น
9. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำส่วนที่กลั่นไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ และส่วนที่ไม่กลั่นนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาเนต ในไตรท์ ในเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี
10. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของนิกเกิลที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์



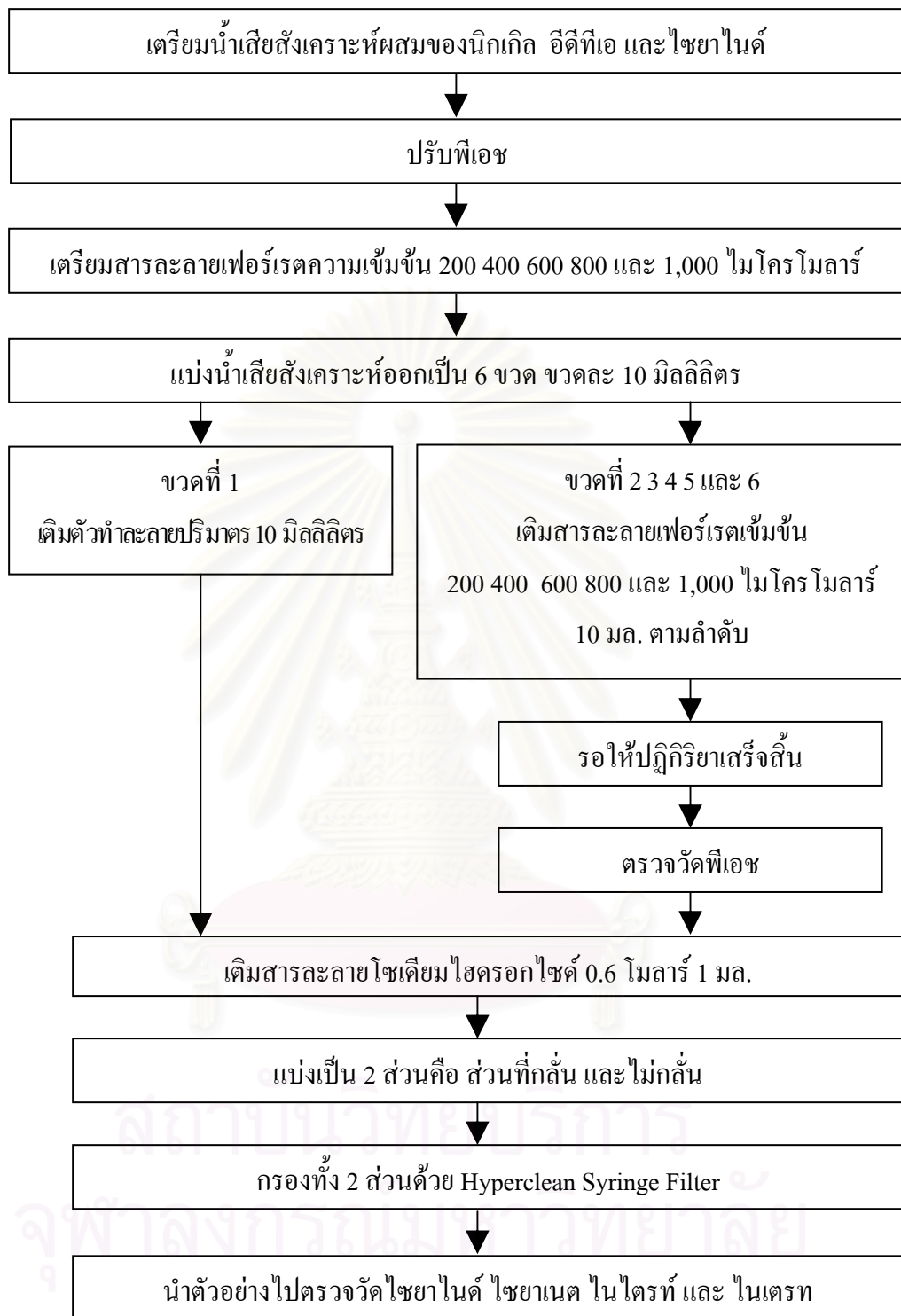
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.3

### 3.4.1.4 ศึกษาผลของนิกเกิล และอิตีที่เอต่ออัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (ก-1.4)

เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลและอิตีที่เอปนอยู่ ในการทดลองนี้จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์และอิตีที่เอเท่ากับ 1,000 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นนิกเกิลเป็น 2 เท่าของความเข้มข้นนิกเกิลอิมตัวที่แต่ละพีเอช และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 0.2:1 0.4:1 0.6:1 0.8:1 และ 1:1 โดยทำการทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 ใช้สารละลายที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.1.1 เป็นตัวทำละลาย การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดในการทดลอง เพื่อให้สามารถแปรค่าอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ได้มาก

การทดลองที่ 3.4.1.4 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.4 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่างนิกเกิลที่ความเข้มข้นอิมตัวกับไซยาไนด์ และอิตีที่เอที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์
2. ปรับพีเอชเพื่อให้ได้ค่าพีเอชตามต้องการ
3. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตรความเข้มข้นละ 10 มิลลิลิตร
4. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 6 ขวด ขวดละ 10 มิลลิลิตร
5. ขวดที่ 1 เติมตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ปิดฝา และเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
6. ขวดที่ 2 3 4 5 และ 6 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันที และเขย่าให้เข้ากัน รอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
7. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
8. แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่กลั่น และไม่กลั่น
9. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำส่วนที่กลั่นไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ และส่วนที่ไม่กลั่นนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาเนต ในไตรท์ ในเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี
10. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของนิกเกิล และอิตีที่เอที่มีต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์



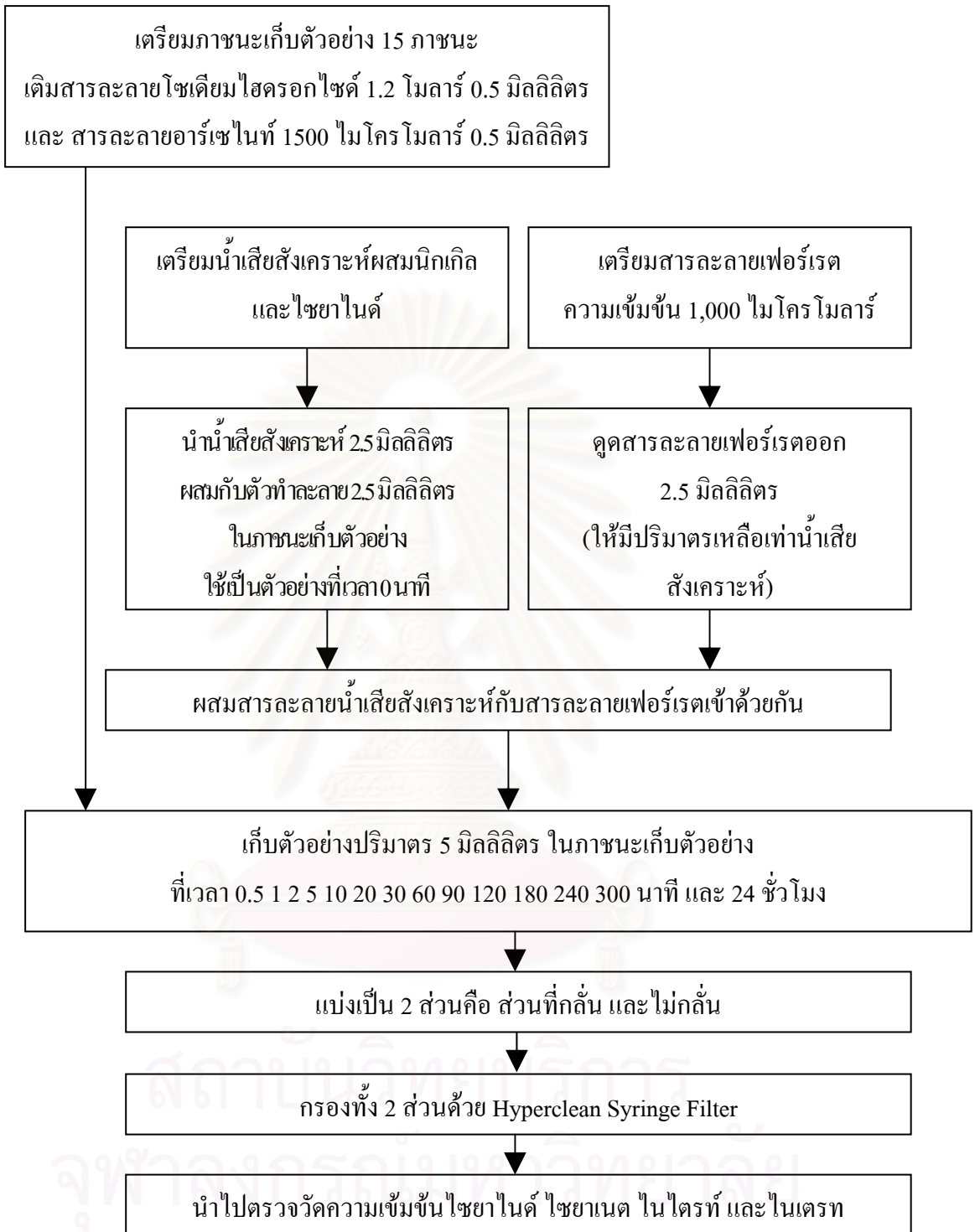
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.4

#### 3.4.1.5 ศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ (ก-1.5)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันในแต่ละพีเอช ซึ่งในการทดลองจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล กับไซยาไนด์ โดยใช้นิกเกิลที่ความเข้มข้นอิ่มตัว และไซยาไนด์เข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 และทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 300 นาที และ 24 ชั่วโมง

การทดลองที่ 3.4.1.5 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่างโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.2 โมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และสารละลายอาร์เซนไนท์เข้มข้น 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ไว้ในภาชนะเก็บตัวอย่าง
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่างนิกเกิลที่ความเข้มข้นอิ่มตัวกับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์
3. ปรับพีเอชให้ได้ค่าพีเอชตามต้องการ
4. นำน้ำเสียสังเคราะห์ 2.5 มล. ผสมกับตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.4.1.1 ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรในภาชนะเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างนี้ใช้เป็นตัวตัวอย่างที่เวลา 0 นาที
5. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และดูดสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มิลลิลิตร เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์
6. ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 300 นาที และ 24 ชั่วโมง
7. แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่กลั่น และไม่กลั่น
8. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำส่วนที่กลั่นไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ และส่วนที่ไม่กลั่นนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของไซยาเนต ในไตรท์ ในเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี
9. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของนิกเกิลที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1.5

### 3.4.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง (ข.)

#### 3.4.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ (ข-1)

เป็นการศึกษาโดยการเก็บน้ำตัวอย่างจากโรงงานชุบโลหะ และนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท โลหะหนัก และฟิเอช

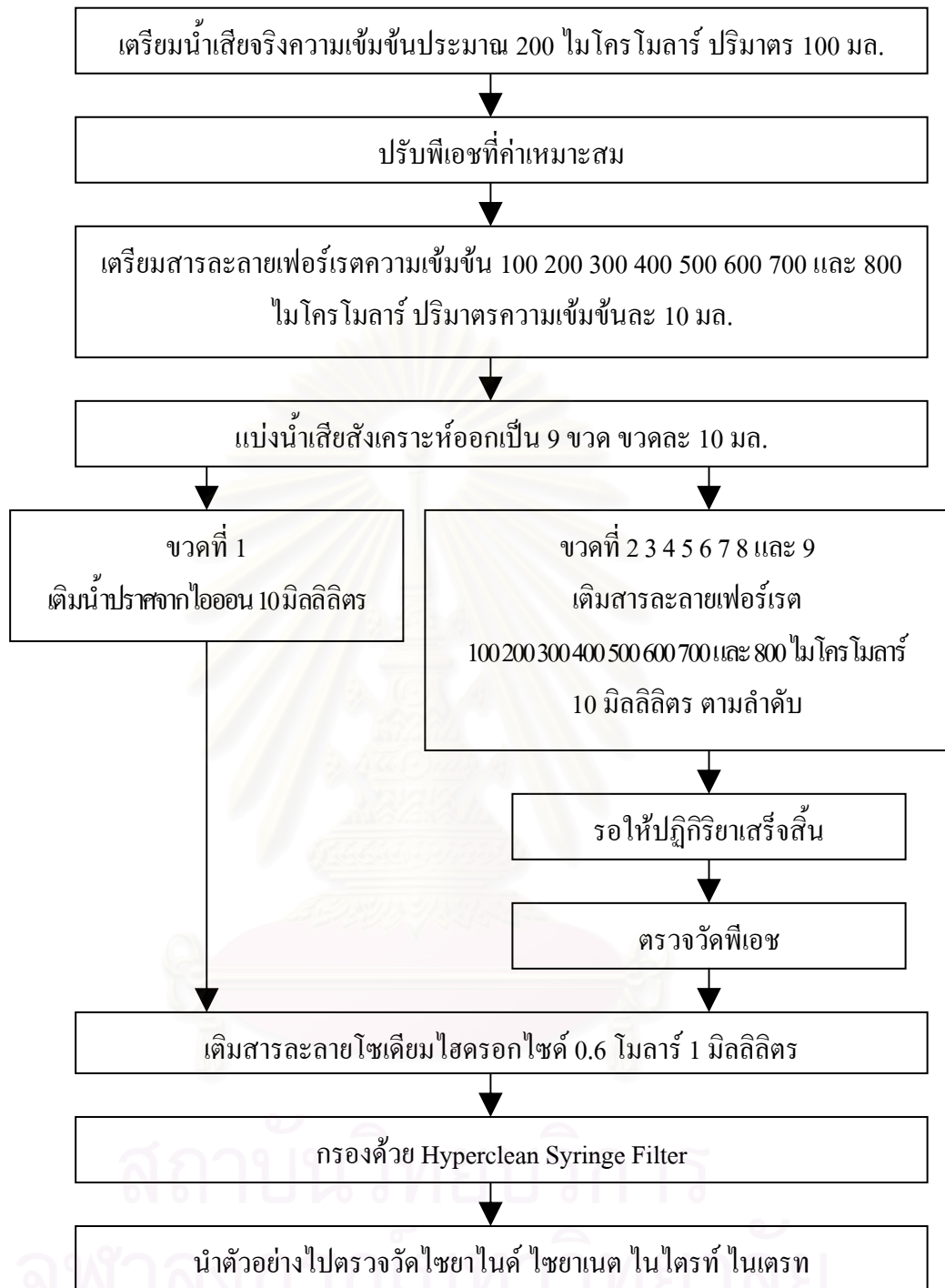
#### 3.4.2.2 ศึกษาอัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสียจริง (ข-2)

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

การทดลองที่ 3.4.2.2 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 มิลลิลิตร
3. แบ่งน้ำเสียออกเป็น 9 ขวด ขวดละ 10 มิลลิลิตร
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร 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 มิลลิลิตร ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะจางหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอช ไม่ให้ไซยาไนต์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนต์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท กับ ความเข้มข้นเฟอร์เรต





รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.2.2

## บทที่ 4

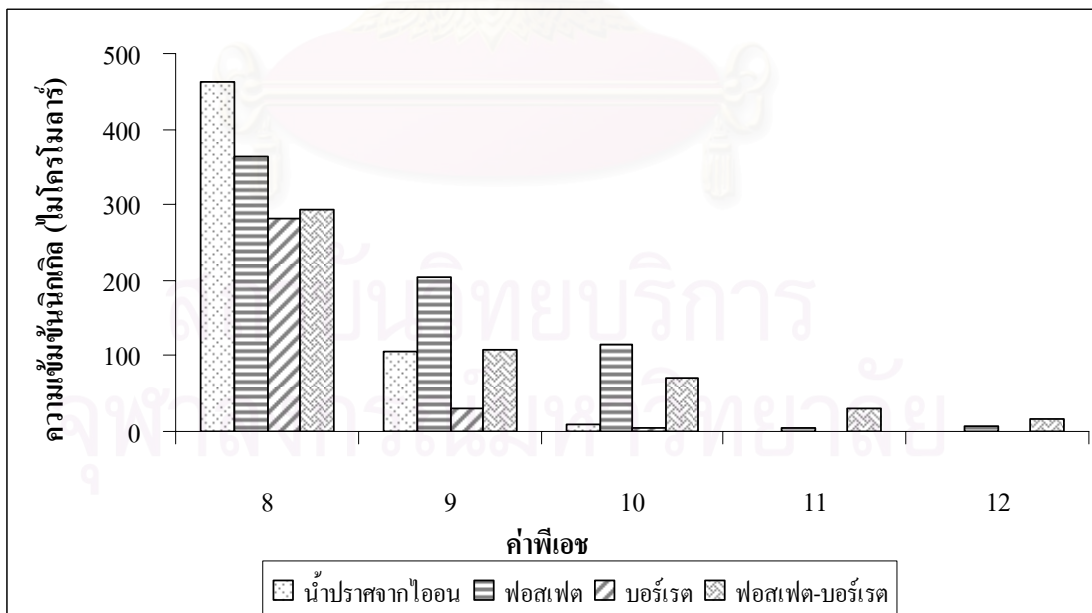
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมของไซยาไนด์กับนิกเกิล

##### 4.1.1 ศึกษาความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ

ทดลองโดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ น้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ สารละลายบอร์เรตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ และสารละลายผสมฟอสเฟตบอร์เรตเข้มข้น 0.004 โมลาร์ ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในน้ำปราศจากไอออน สารละลายบอร์เรต สารละลายฟอสเฟต และสารละลายผสมฟอสเฟตบอร์เรตที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 มีค่าความเข้มข้นนิกเกิลเฉลี่ยเรียงตามลำดับดังนี้ ในน้ำปราศจากไอออนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 468.29, 105.00, 10.35, 0.74 และ 0.21 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 363.79, 207.94, 114.87, 5.33 และ 6.60 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบอร์เรตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 281.89, 31.43, 3.68, 0.50 และ 0.16 ไมโครโมลาร์ และในสารละลายฟอสเฟต-บอร์เรตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 297.20, 107.82, 70.94, 29.43, 15.61 ไมโครโมลาร์ ดังแสดงคงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12

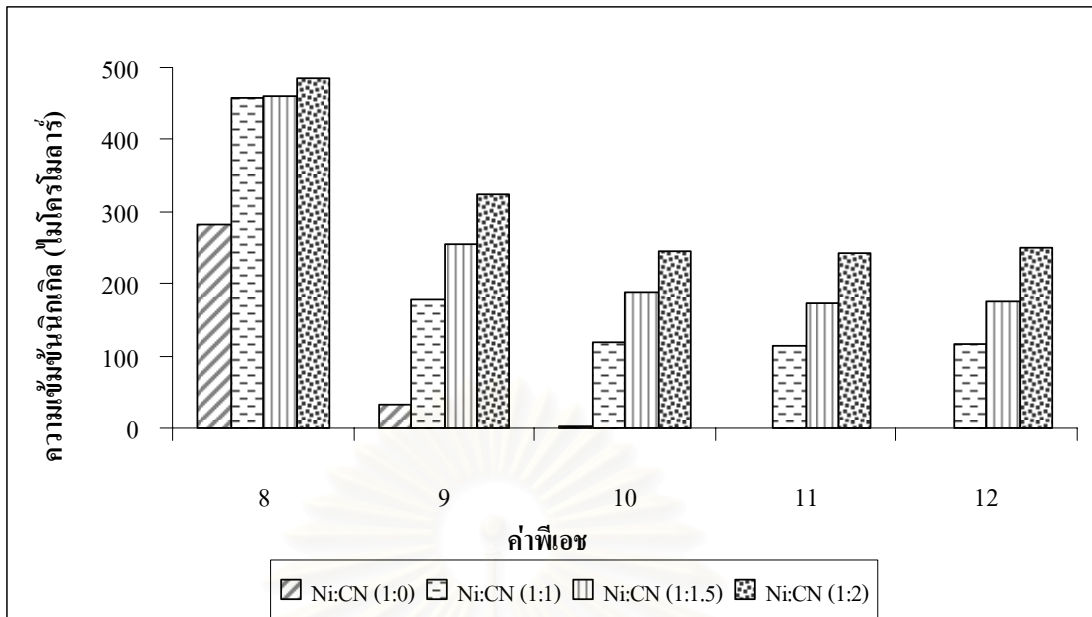
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออน สารละลายฟอสเฟต และสารละลายผสมฟอสเฟตบอร์เรตพบว่ามีความเข้มข้นของนิกเกิลสูงกว่าในสารละลายบอร์เรต ซึ่งหมายความว่า นิกเกิลละลายในสารละลายบอร์เรตได้น้อย แสดงว่านิกเกิลสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับบอร์เรตได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่น ดังนั้นสารละลายบอร์เรตจึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับนิกเกิล โดยในการทดลองต่อไป ต้องการให้นิกเกิลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์เท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายบอร์เรตเป็นตัวทำละลายในการทดลองในครั้งนี้

#### 4.1.2 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่ไม่มี และมีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ

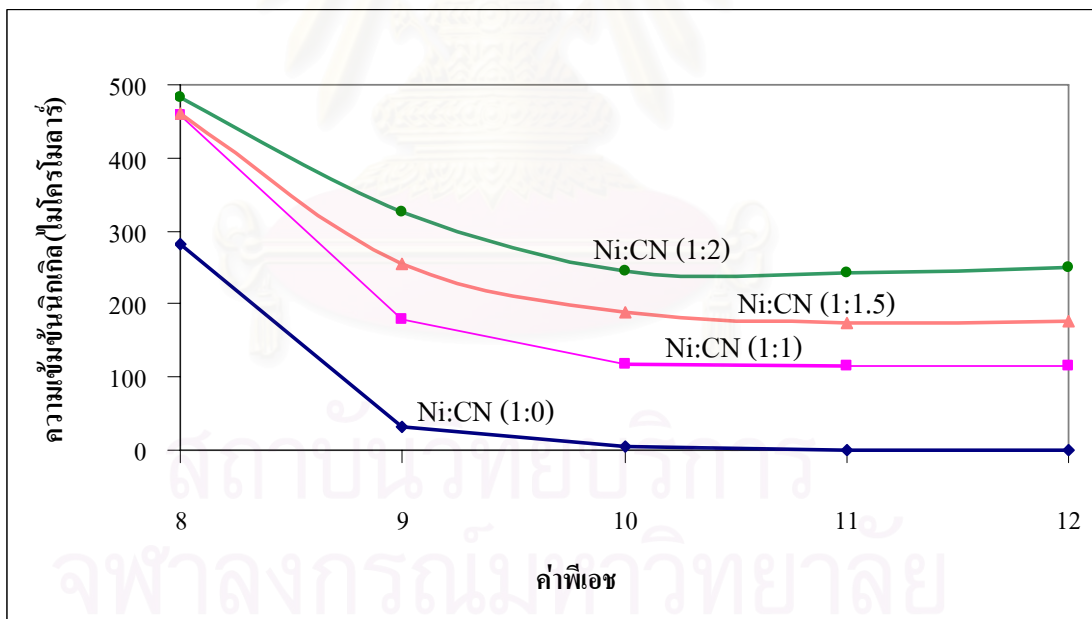
ทดลองที่ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นไซยาไนด์ 0, 500, 750 และ 1000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับคิดเป็นอัตราส่วนนิกเกิลต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:0 1:1 1:1.5 และ 1:2 ตามลำดับ ปรับพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.004 โมลาร์ เป็นตัวทำละลาย

ผลการทดลองพบว่า ในสารละลายบอร์เรตที่ไม่มีไซยาไนด์ มีค่าความเข้มข้นนิกเกิลละลายเฉลี่ยที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 281.89, 31.43, 3.68, 0.50 และ 0.16 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับในสารละลายบอร์เรตที่มีไซยาไนด์เข้มข้น 500 ไมโครโมลาร์ พบว่ามีค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 457.80, 178.20, 117.63, 114.63 และ 115.59 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับในสารละลายบอร์เรตที่มีไซยาไนด์เข้มข้น 750 ไมโครโมลาร์ พบว่ามีค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 464.77, 254.00, 191.97, 173.37 และ 176.17 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ในสารละลายบอร์เรตที่มีไซยาไนด์เข้มข้น 1000 ไมโครโมลาร์ พบว่ามีค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 เท่ากับ 492.68, 325.05, 244.79, 248.87 และ 252.57 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับดังรูปที่ 4.2

จากผลการทดลองจะเห็นว่าสารละลายที่มีไซยาไนด์จะมีความเข้มข้นของนิกเกิลที่สูงกว่าสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยในสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์จะมีค่าความเข้มข้นนิกเกิลที่ต่ำมาก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซยาไนด์เข้าไปก็จะทำให้นิกเกิลสามารถละลายได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นจึงแสดงว่าไซยาไนด์สามารถทำให้โลหะละลายได้มากขึ้น นั่นคือไซยาไนด์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิลเกิดเป็น สารประกอบนิกเกิลไซยาไนด์ซึ่งทำให้นิกเกิลสามารถละลายได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.2 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่ไม่มี และ มีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12

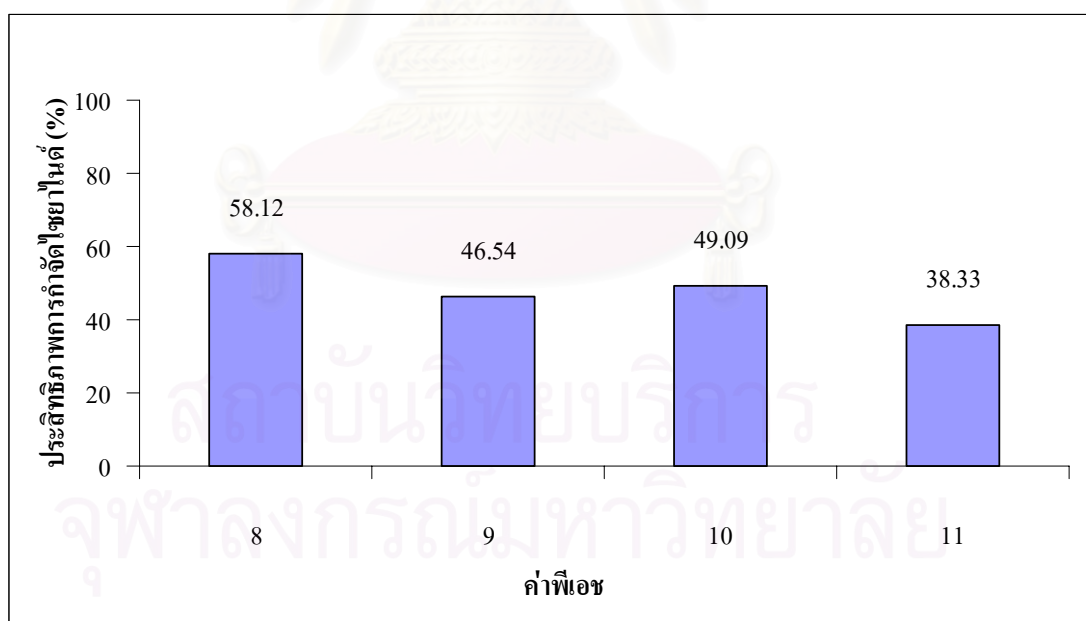


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวทำละลายที่มี และ ไม่มีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่พีเอช 8 ถึง 12

ในการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของนิกิลในขั้นต่อไปจะทำการทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 และเลือกใช้อัตราส่วนนิกิลต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ซึ่งจะให้ความเข้มข้นของไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นของนิกิลจะใช้ค่าประมาณของนิกิลอิมตัวที่หาได้ที่พีเอชต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.2 โดยจะใช้ค่านิกิลอิมตัวที่พีเอช 8 เท่ากับ 450 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 9 เท่ากับ 170 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10 และ 11 เท่ากับ 100 ไมโครโมลาร์ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้นิกิลเกิดการตกตะกอนจากการที่ความเข้มข้นของนิกิลมากเกินไป และเพื่อให้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกิลมีความแตกต่างกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีนิกิลมากที่สุด

#### 4.1.3 ผลของนิกิลต่ออัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

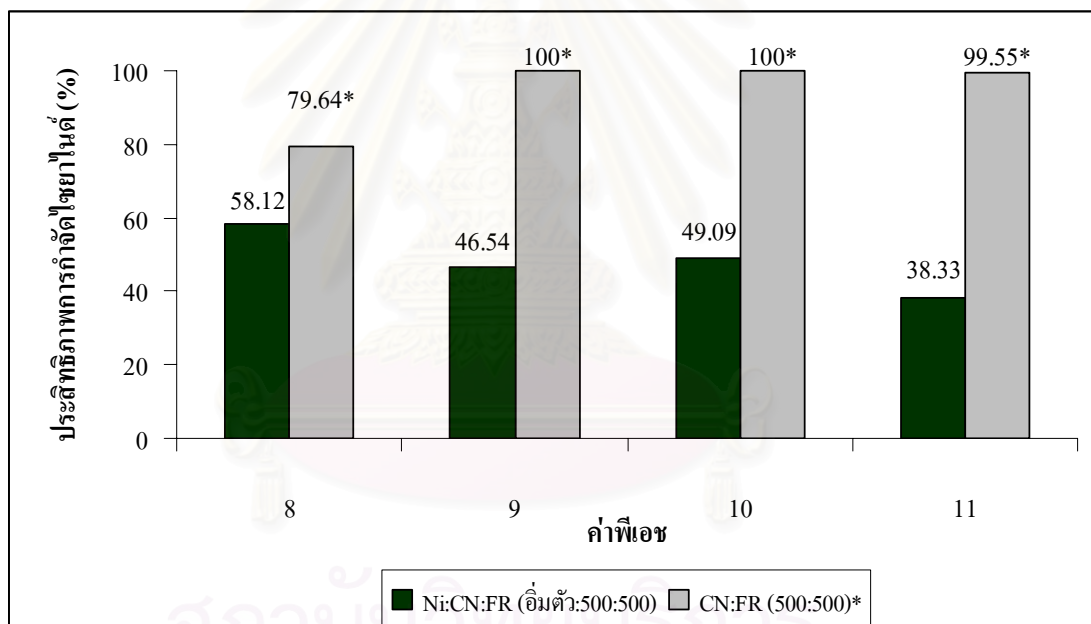
ทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นนิกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมตัวของแต่ละพีเอชที่ได้จากการทดลองที่ 4.1.2 คือ ที่พีเอช 8 ค่านิกิลอิมตัวเท่ากับ 450 ไมโครโมลาร์ พีเอช 9 เท่ากับ 170 ไมโครโมลาร์ พีเอช 10 และ 11 เท่ากับ 100 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบอร์เรตบัฟเฟอร์ 0.004 โมลาร์เป็นตัวทำละลาย และใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกิล และไซยาไนด์ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 500:500 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 มีค่าเท่ากับ 58.12, 46.54, 49.09, 38.33 เปอร์เซ็นต์ และได้สารผลิตภัณฑ์หลักเป็นไซยาเนต เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนแผนภูมิ โดยให้ค่าพีเอชเป็นแกน X และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เป็นแกน Y จะได้กราฟดังรูปที่ 4.4

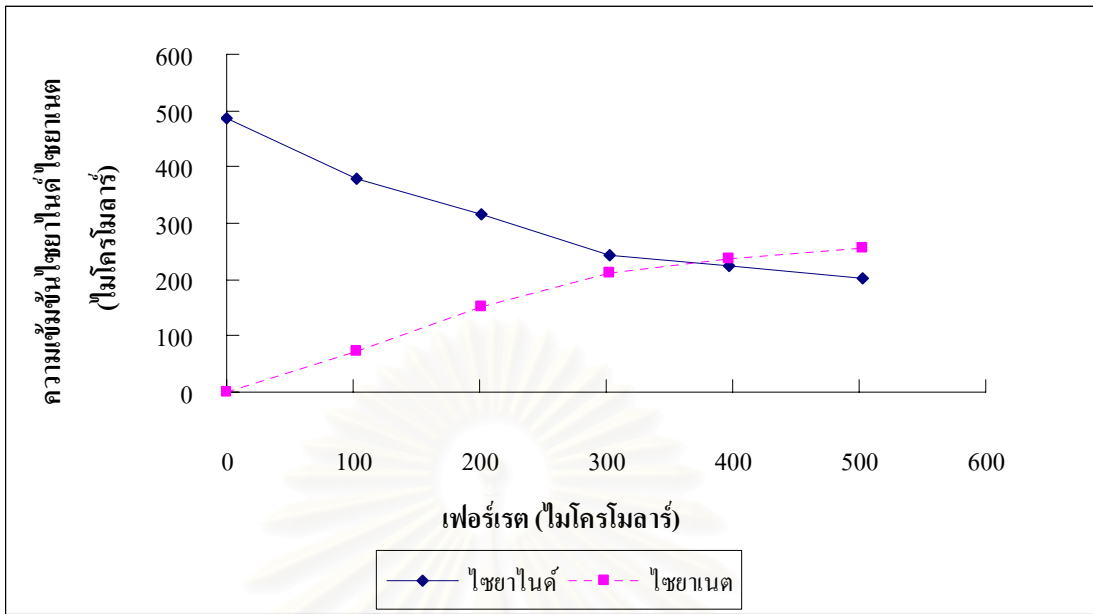
จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลง โดยจะเห็นได้ชัดที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยที่พีเอช 9 และ 10 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่พีเอช 11 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบผลการศึกษาที่ได้กับผลการศึกษาที่ผ่านมาของศิลาวุธ ดำรงศิริ (2548) ในส่วนที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์โดยเฟอร์เรต ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 9 10 และ 11 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sharma และคณะ (1998) ที่ว่าที่พีเอช 9 เฟอร์เรตสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ดี



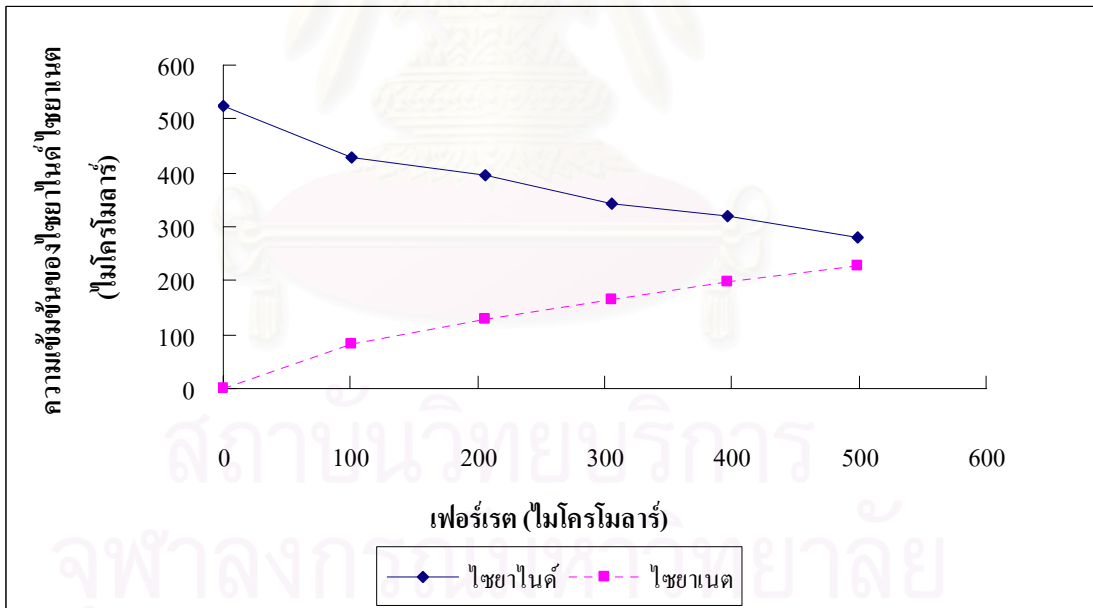
ที่มา: CN:FR (500:500)\* ศิลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

**รูปที่ 4.5** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิล และไซยาไนด์ กับผลการศึกษาของศิลาวุธ\*

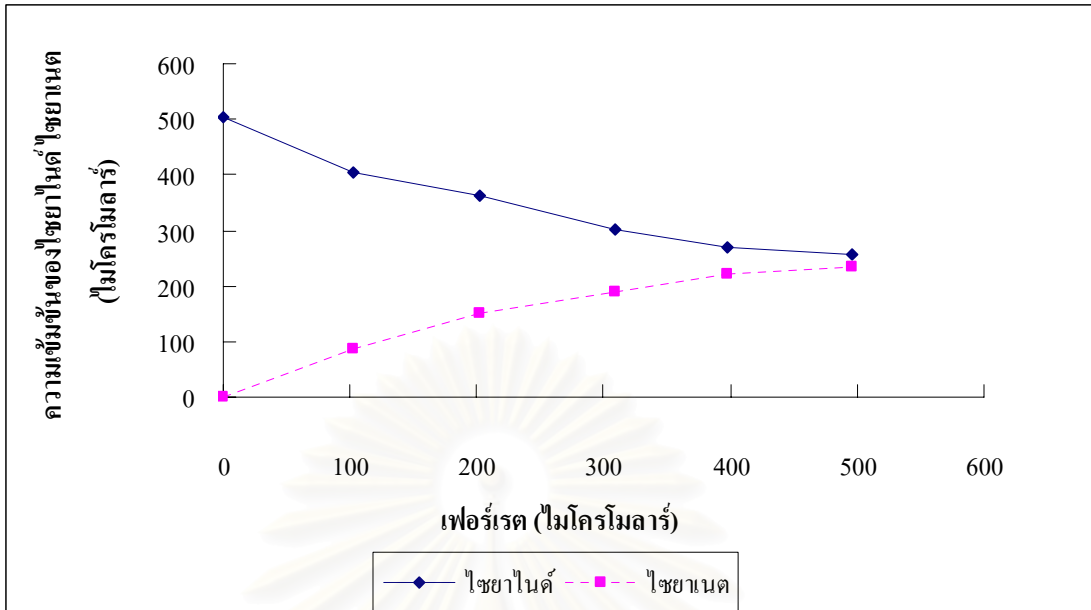
จากผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ทราบว่านิกเกิลมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์โดยเฟอร์เรต เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ไซยาเนต ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งค่าของไซยาเนตที่เกิดขึ้นที่พีเอช 8 9 10 และ 11 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



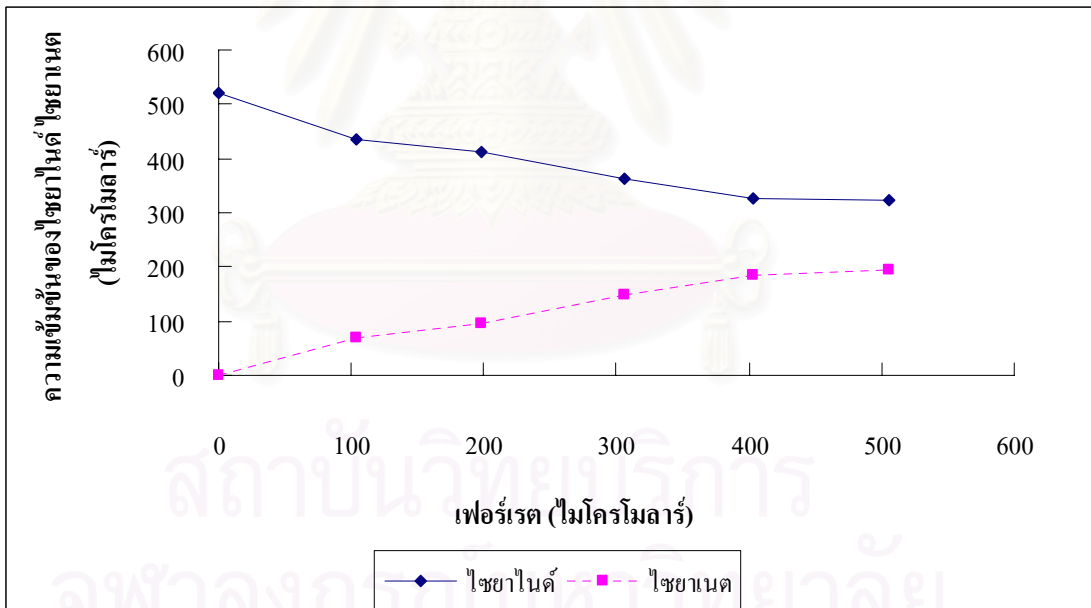
รูปที่ 4.6-ก พีเอช 8



รูปที่ 4.6-ข พีเอช 9



รูปที่ 4.6-ก พีเอช 10



รูปที่ 4.6-ง พีเอช 11

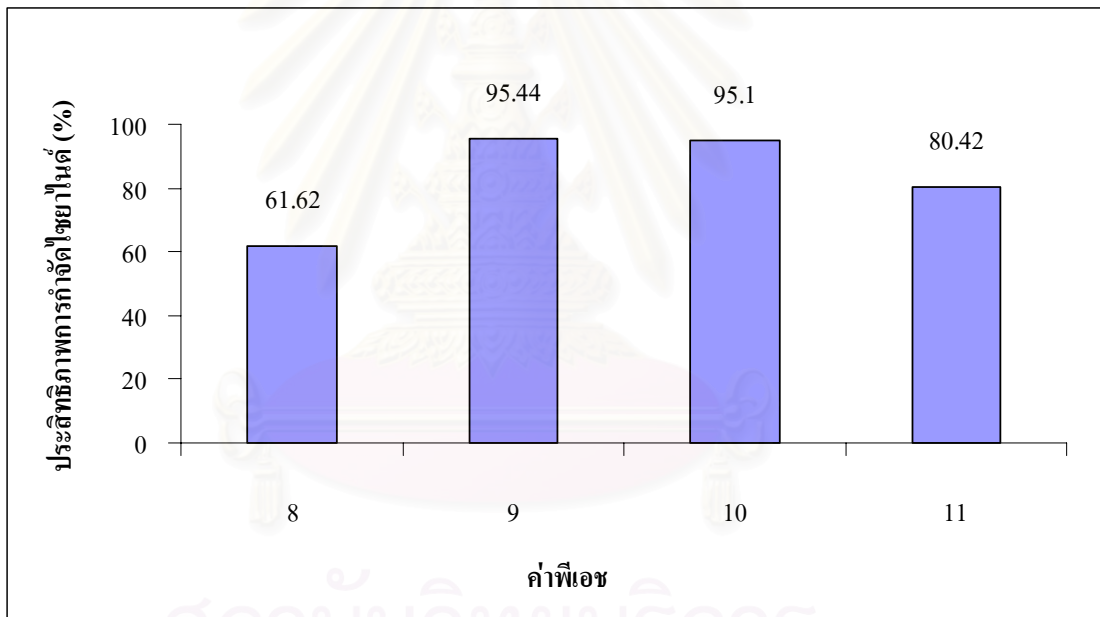
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างใยไนต์ที่เหลือ และใยเนตที่เกิดขึ้นในการกำจัดใยไนต์ด้วยเฟอ์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นใยไนต์เริ่มต้นเท่ากับ 500 ไมโคร โมลาร์ และนิกเกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมิตัวที่พีเอชต่างๆ



#### 4.1.4 ผลของนิกเกิล และอัตราส่วนปริมาตรเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

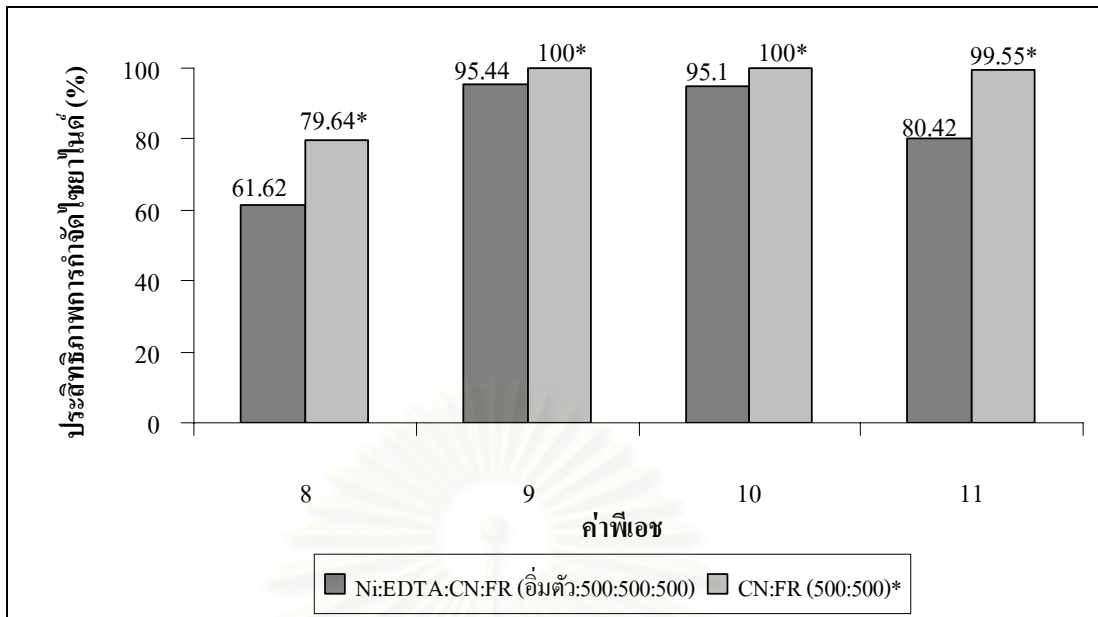
ทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์ และอิตีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นนิกเกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมตัวของแต่ละพีเอชที่ได้จากผลการทดลองที่ 4.1.2 คือ ที่พีเอช 8 ค่านิกเกิลอิมตัวเท่ากับ 450 ไมโครโมลาร์ พีเอช 9 เท่ากับ 170 ไมโครโมลาร์ พีเอช 10 และ 11 เท่ากับ 100 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบอร์เรตบัฟเฟอร์ 0.004 โมลาร์ เป็นตัวทำละลาย และใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 มีค่าเท่ากับ 61.62, 95.44, 95.10, 80.42 เปอร์เซ็นต์ และได้สารผลิตภัณฑ์หลักเป็นไซยาเนต เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนแผนภูมิ โดยให้ค่าพีเอชเป็นแกน X และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เป็นแกน Y จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7



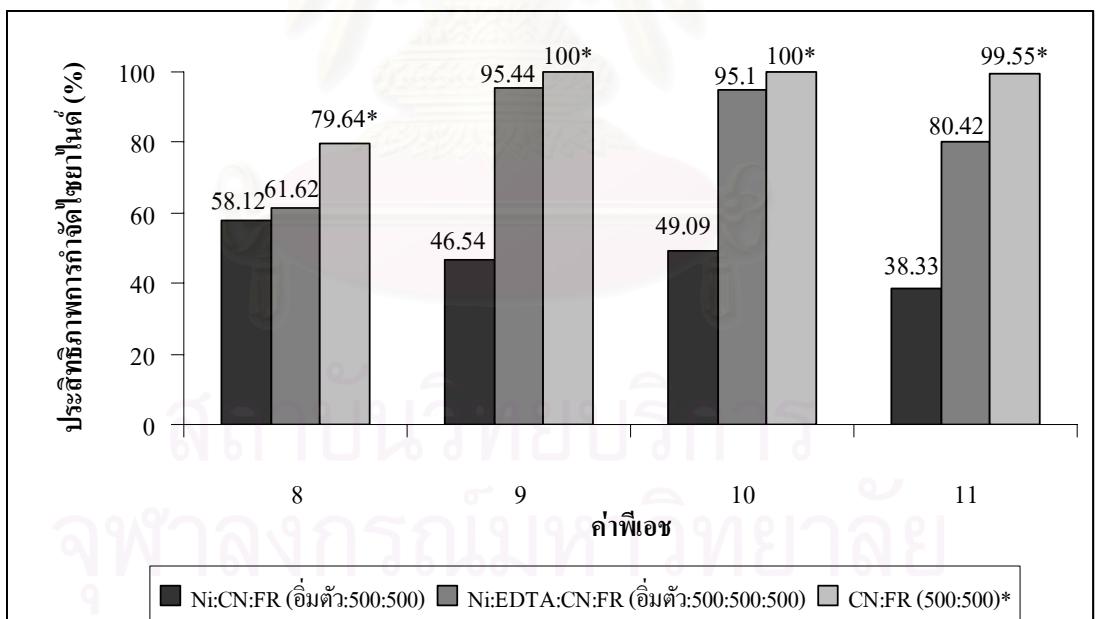
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมของนิกเกิล อิตีทีเอ และไซยาไนด์ ที่อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 500:500 ไมโครโมลาร์

จะเห็นว่าจากผลการศึกษาที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของ Sharma และคณะ กับผลการศึกษาของศิวารุช ดำรงศิริ ในส่วนที่ทำการศึกษาเกี่ยวประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์โดยเฟอร์เรต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 จากกราฟพบว่าที่พีเอช 9 และ 10 นั้นประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่พีเอช 8 และ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงประมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ที่มา: CN:FR(500:500)\* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

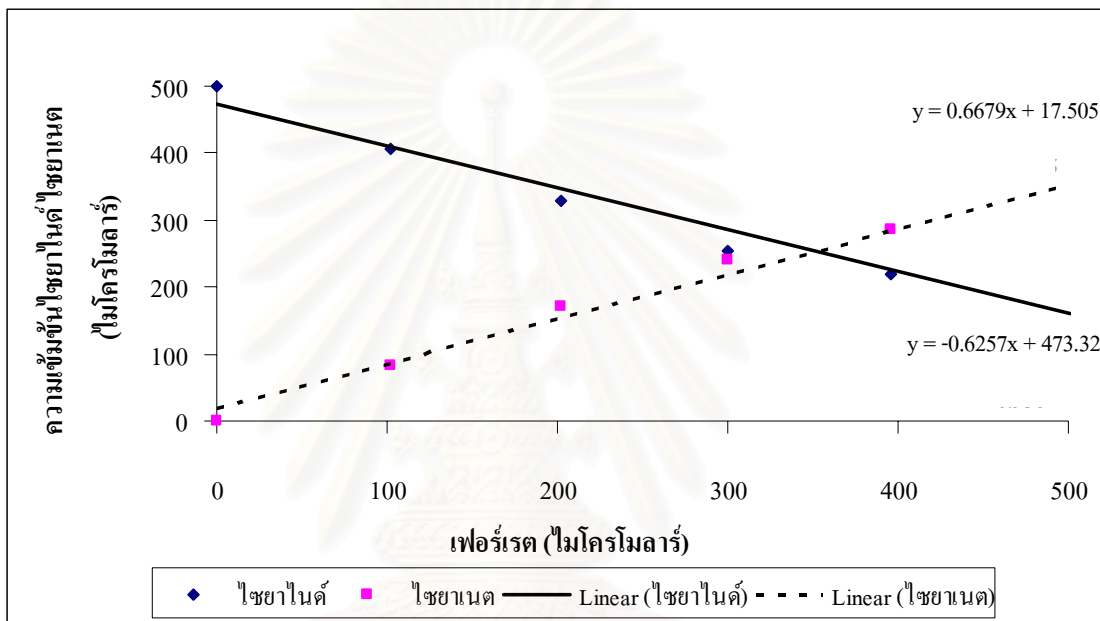
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม นิกเกิล อีดีทีเอ และไซยาไนด์ กับผลการศึกษาของศีลาวุธ\*



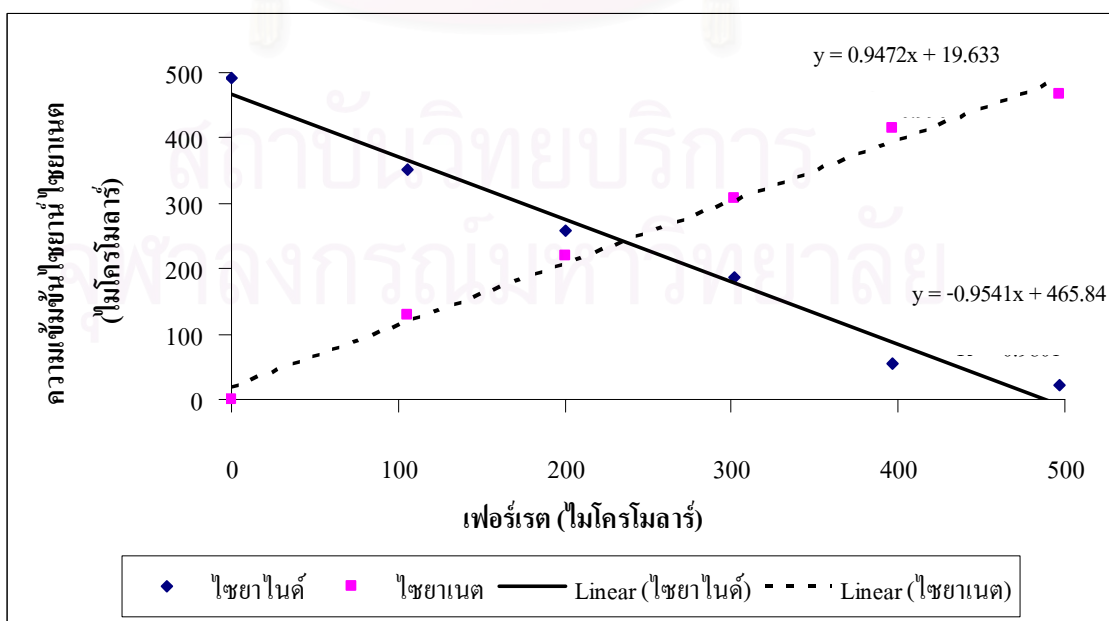
ที่มา: CN:FR(500:500)\* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของผลการทดลองที่ 4.1.3 การทดลองที่ 4.1.4 และผลการศึกษาของศีลาวุธ\*

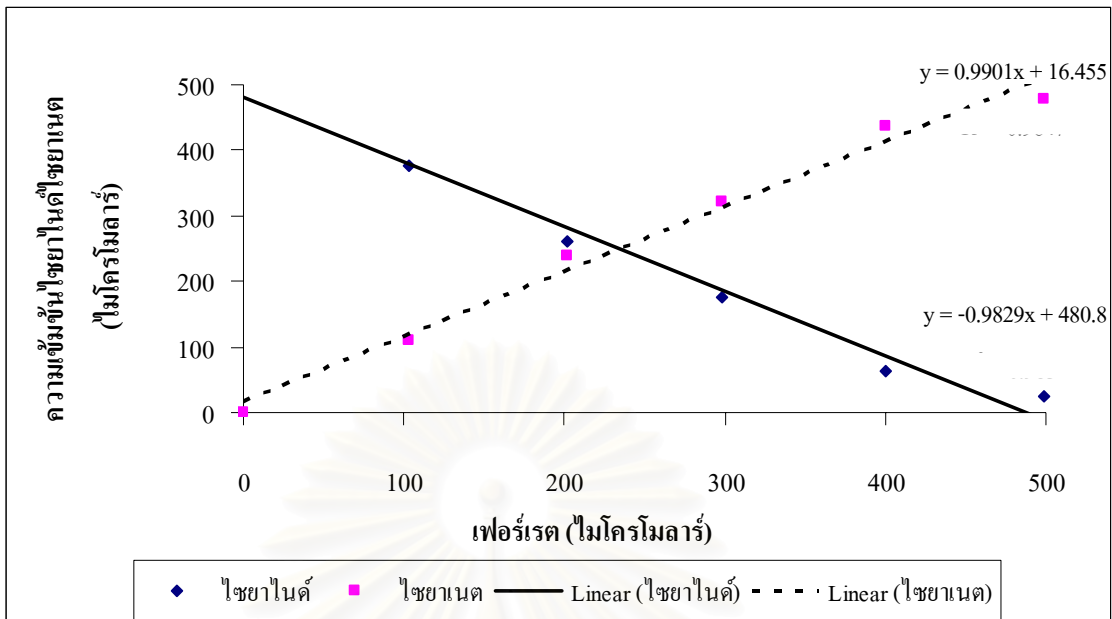
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ 4.1.3 กับการทดลองที่ 4.1.4 พบว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่างนิกเกิล อีดีทีเอ และไซยาไนด์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดีกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีเพียงนิกเกิล และไซยาไนด์เท่านั้น ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากการที่นิกเกิลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอได้ดีกว่าไซยาไนด์ ทำให้นิกเกิลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์น้อยลง และมีไซยาไนด์อิสระมากขึ้น ส่งผลให้เฟอร์เรดสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ดีขึ้น โดยพบว่าที่พีเอช 9 และ 10 นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดีที่สุด และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ไซยานต ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10



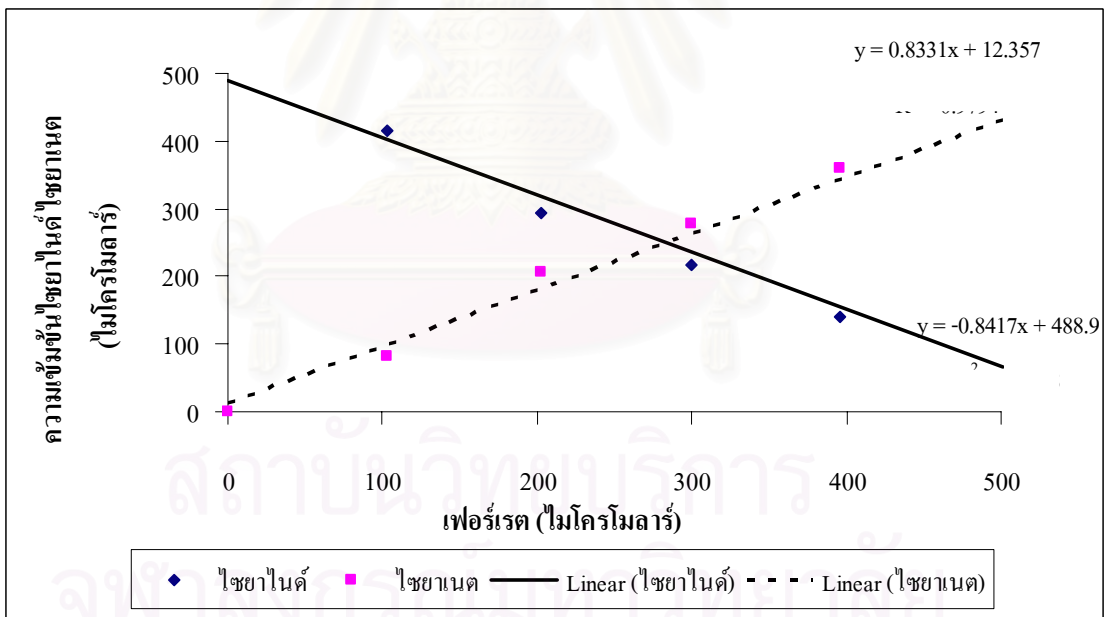
รูปที่ 4.10-ก พีเอช 8



รูปที่ 4.10-ข พีเอช 9



รูปที่ 4.10-ก พีเอช 10



รูปที่ 4.10-ง พีเอช 11

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างไชยาไนต์ที่เหลือและไชยานेंटที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยากับเฟอโรเรตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นอิตีทีเอ และไชยาไนต์เริ่มต้นเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และนิกเกิลที่ค่าความเข้มข้นอ้อมตัว ที่พีเอชต่างๆ

และจากรูปที่ 4.10-ก ถึง 4.10-ง สามารถหาค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่หายไป และโมลไซยาเนตที่เกิดขึ้นได้แสดงดังตารางที่ 4.1 จากตารางสามารถสรุปได้ว่าที่พีเอช 9 และ 10 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ มีค่าประมาณ 1:1 และไซยาเนตที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 1 โมลเช่นเดียวกันด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sharma และคณะ กับการศึกษาของศีลาวุธ คำรังศิริ

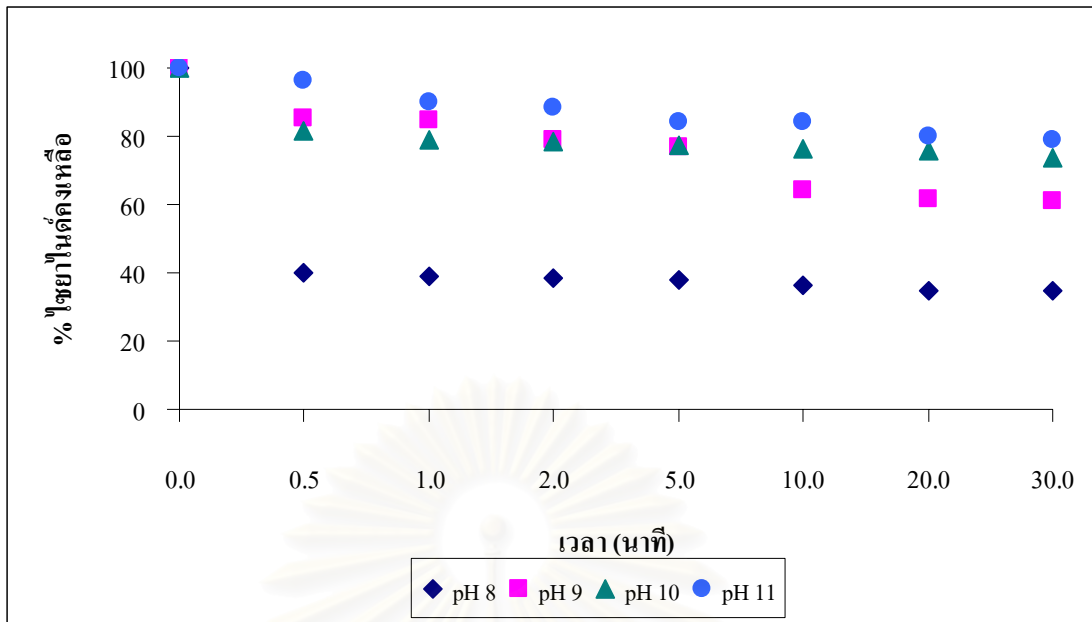
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ที่หายไป และโมลไซยาเนตที่เกิดขึ้น

พีเอช	โมลเฟอร์เรต	โมลไซยาไนด์	โมลไซยาเนต
8	1.0	0.63	0.67
9	1.0	0.95	0.95
10	1.0	0.98	0.99
11	1.0	0.84	0.83

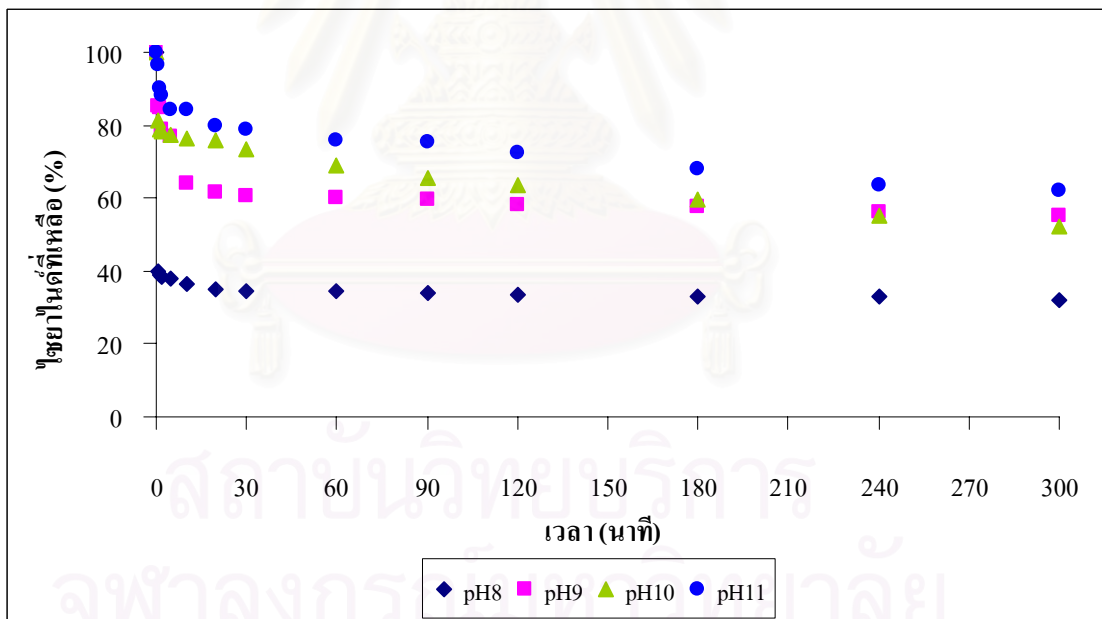
#### 4.1.5 ผลของนิกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ (ก-1.5)

ทดลองที่พีเอช 8 9 10 และ 11 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นนิกิลที่ค่าความเข้มข้นอิมตัวของแต่ละพีเอช และทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 0.5 1 2 5 10 20 30 60 90 120 180 240 300 นาที และที่ 24 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายอาร์เซนไนท์ ( $As^{3+}$ ) เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา

จากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ผสมไซยาไนด์กับนิกิล พบว่าที่พีเอช 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วที่สุด ส่วนที่พีเอช 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าที่สุด และที่พีเอช 9 กับ 10 พบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาใช้เวลาพอๆ กัน ดังแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยจะพบว่าที่พีเอช 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเร็วมากในช่วง 1 นาทีแรกต่อจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนที่พีเอช 9 10 และ 11 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ศีลาวุธ กับการศึกษาของ Sharma และคณะ (1998, 2005) ที่พบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง และเมื่อคุณผลเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของศีลาวุธซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมไซยาไนด์กับนิกิลจะเกิดได้ช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเพียงไซยาไนด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ทราบอย่างแน่นอนว่านิกิลนั้นมีผลต่อทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่พบคือไซยาเนต

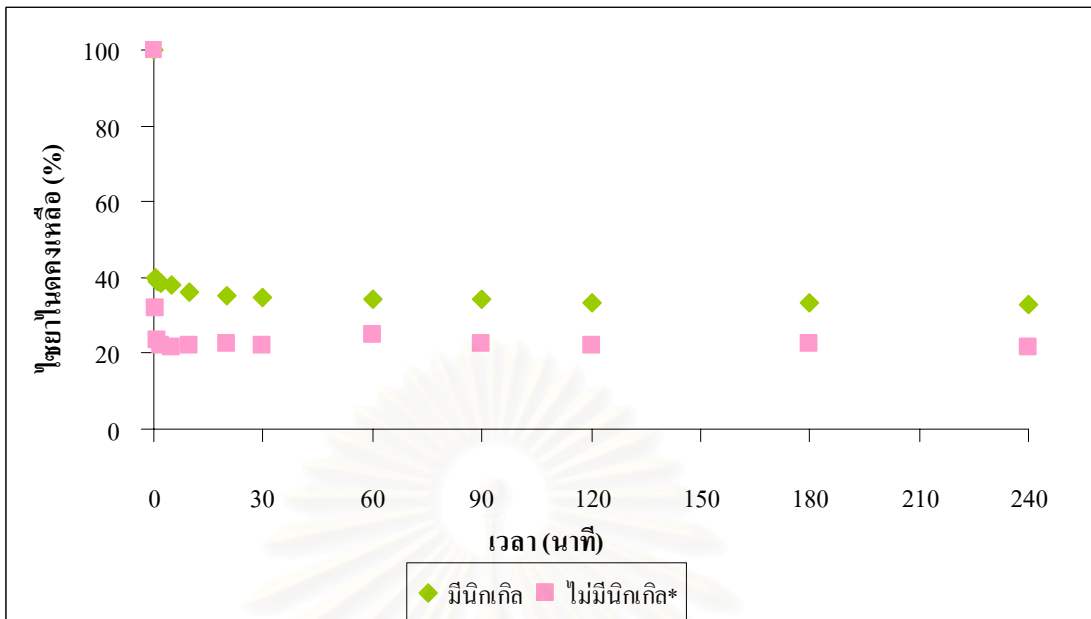


รูปที่ 4.11-ก ค่าไซยาไนด์คงเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลที่ 30 นาทีแรก



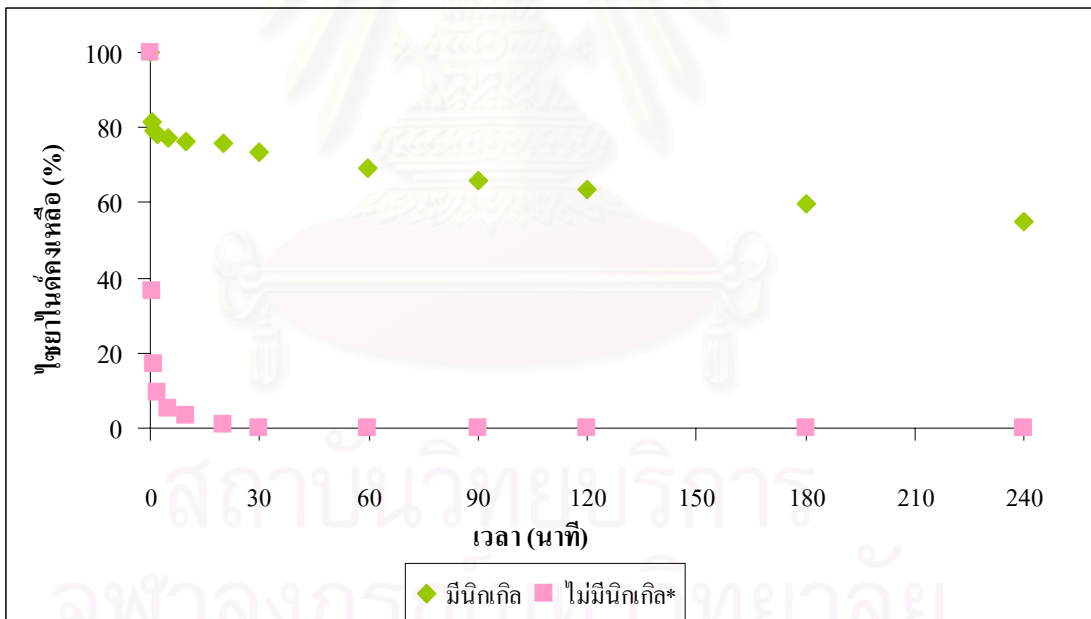
รูปที่ 4.11-ข ปริมาณไซยาไนด์คงเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลที่เวลา 0-300 นาที

รูปที่ 4.11 ปริมาณไซยาไนด์คงเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมนิกเกิลและไซยาไนด์ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 500:500 ไมโครโมลาร์



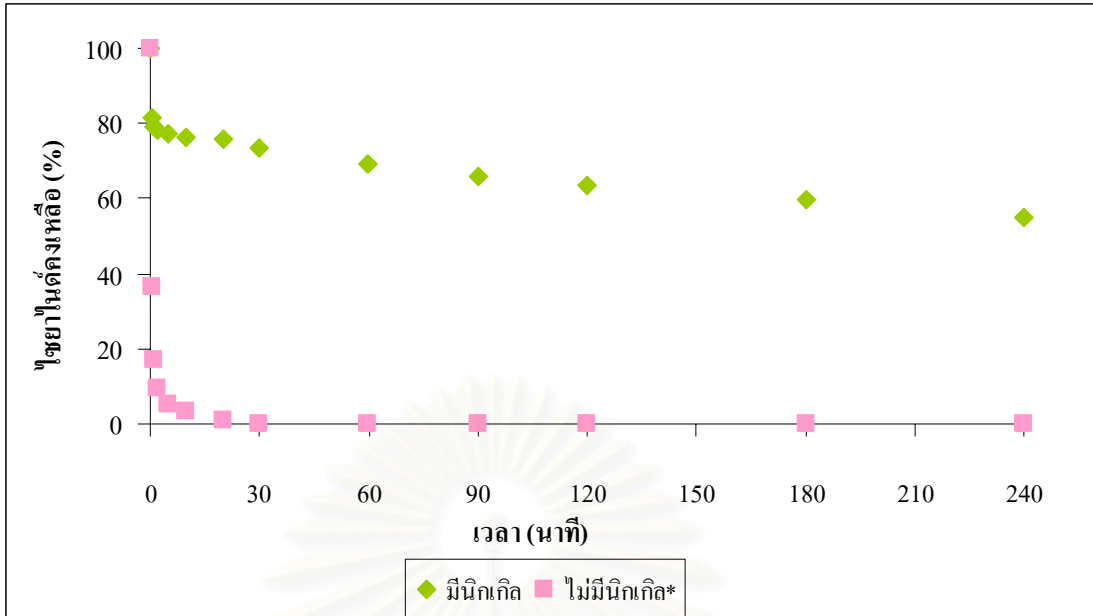
ที่มา: \* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

รูปที่ 4.12-ก ปริมาณไชยาในคั่งเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 8



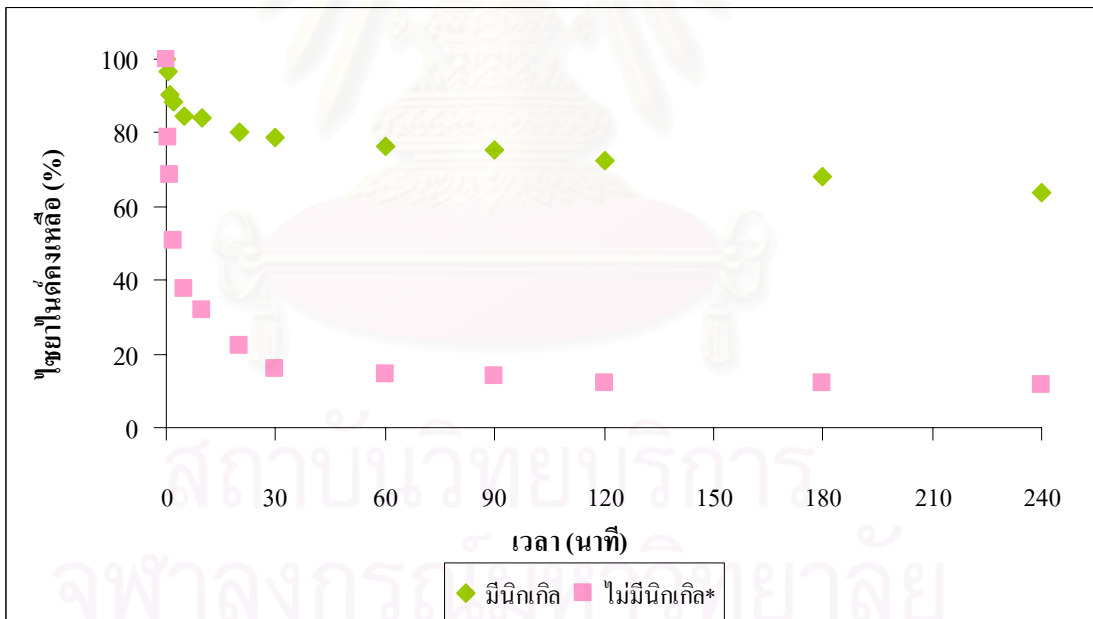
ที่มา: \* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

รูปที่ 4.12-ข ปริมาณไชยาในคั่งเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 9



ที่มา: \* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

รูปที่ 4.12-ค ปริมาณไชยาในคั่งเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 10



ที่มา: \* ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2548

รูปที่ 4.12-ง ปริมาณไชยาในคั่งเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 11

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบปริมาณไชยาในคั่งเหลือ (%) กับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่พีเอช 8 9 10 และ 11 อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไชยาในคั่งเท่ากับ 500:500 ไมโคร โมลาร์ ในน้ำเสียเสียดังเคราะห์ผสมนิกเกิด และไชยาในคั่งกับผลการศึกษาของศีลาวุธ\*



ซึ่งการที่พีเอช 8 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็วที่สุด และที่พีเอช 11 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุดนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆ อย่าง เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยที่แต่ละพีเอชนั้นเราใช้ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลอิมิตัวที่มีค่าต่างกัน และค่าความคงตัวของเฟอร์เรตที่แต่ละพีเอชก็ต่างกันด้วย โดยที่เฟอร์เรตจะมีความคงตัวมากที่สุดที่ช่วงพีเอช 9.4-9.7 และสลายตัวได้เร็วที่พีเอช 8 และ 11 ดังนั้นถึงแม้ว่าเมื่อเริ่มต้นทำปฏิกิริยาจะใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตที่เท่ากัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของเฟอร์เรตก็จะต่างกันเนื่องจากผลของความคงตัวของเฟอร์เรตที่พีเอชต่างๆ

#### 4.2 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

##### 4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (ข-1)

น้ำเสียจริงที่ได้จากจากโรงงานชุบโลหะต่างๆ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดผลจำนวน 5 ชุด ตัวอย่าง และผลการตรวจวัดพบว่าน้ำเสียจริงที่ทำการตรวจวัดมีพีเอชเฉลี่ยประมาณ 8 ความเข้มข้นไซยาไนด์เฉลี่ย 564.04 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีเฉลี่ย 2.65 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กเฉลี่ย 1.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดงเฉลี่ย 15.38 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเฉลี่ย 20.86 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลเฉลี่ย 16.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นไซยาไนด์ 21,679 ไมโครโมลาร์ และนิกเกิล 284.19 ไมโครโมลาร์

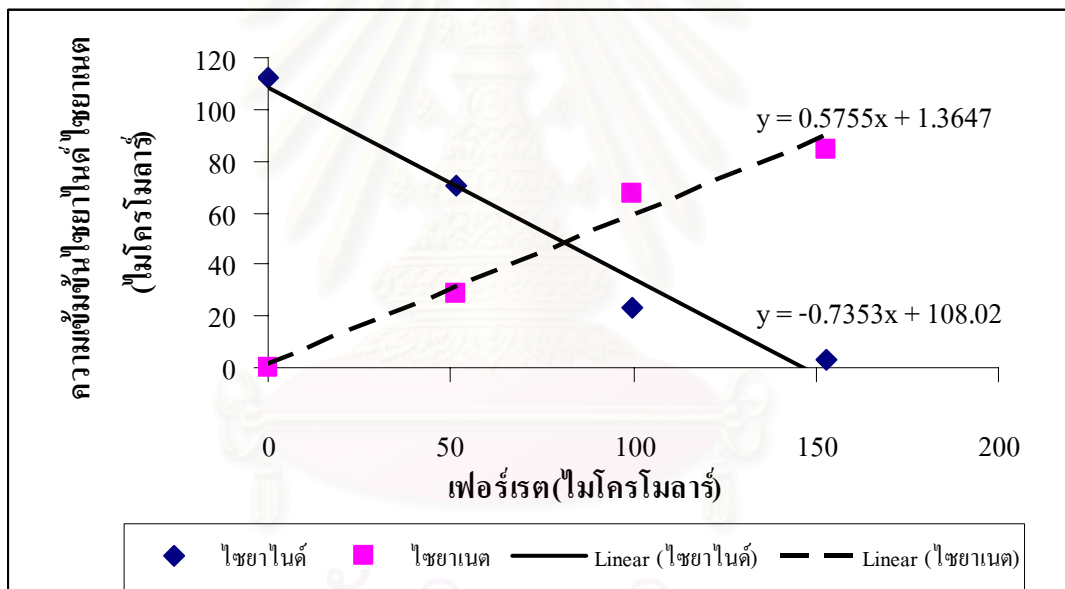
##### 4.2.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ (ข-2)

ทดลองบำบัดน้ำเสียจริงโดยการเจือจางตัวอย่างลง 100 เท่า หลังการเจือจางมีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 111.95 ไมโครโมลาร์ นิกเกิล 1.42 ไมโครโมลาร์ ปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 10 และแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็น 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลงมีค่าเท่ากับ 0.887 และอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.6526 ดังรูปที่ 4.13 เมื่อนำมาคิดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลง กับ เฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น จะได้ประมาณ 1:0.74 คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ประมาณ 1.35 : 1 และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มากกว่าหรือเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ตรวจพบเป็นไซยาเนตทั้งหมด ภายหลังการทดลองที่ความเข้มข้นเฟอร์เรต 153.04 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่ต่ำที่สุดที่สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ทั้งหมด และที่ความเข้มข้นเฟอร์เรตสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองคือ 403.04 ไมโครโมลาร์ พบว่าน้ำตัวอย่างหลังเกิดปฏิกิริยาจะมีพีเอชเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 พบว่าน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงมาก และมีองค์ประกอบหลักที่เป็นโลหะชนิดต่างๆ คือ สังกะสี เหล็ก ทองแดง โครเมียม และ

นิกเกิล เมื่อทำการเจือจางตัวอย่างแล้วจะทำให้ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริงนั้นมีค่าน้อยมาก โดยเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนนิกเกิลต่อไซยาไนด์จะมีค่าประมาณ 1:100 เมื่อเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนนิกเกิลต่อไซยาไนด์ประมาณ 1:5 (พิจารณาที่พีเอช 10) ซึ่งจะเห็นว่านิกเกิลมีค่าน้อยมาก ดังนั้นนิกเกิลจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรด นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลในน้ำเสียบางตัวอย่างด้วย ซึ่งอิทธิพลสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักต่างๆ ได้ดีกว่าไซยาไนด์ ดังนั้นจึงทำให้เฟอร์เรดสามารถเกิดปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ดีขึ้นเนื่องจากไซยาไนด์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะต่างๆ ได้น้อยลง เฟอร์เรดจึงสามารถกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการทดลองคาดว่าต้องใช้เฟอร์เรดในปริมาณที่มากขึ้นประมาณ 1.35 เท่า และการที่ต้องใช้ปริมาณเฟอร์เรดเพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นผลเนื่องจากโลหะหนักต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เฟอร์เรดที่ความเข้มข้นสูงๆ จะมีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรดในน้ำเสียจริง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ในด้านของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่พีเอช 8 9 10 และ 11 โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ที่มี นิกเกิล อีดีทีเอ และน้ำเสียจากโรงชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

#### 5.1 ผลของนิกเกิลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรต

ผลการทดลองพบว่านิกเกิลมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์อย่างมากคือ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ลดลง และลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่พีเอช 9 และ 10 โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงประมาณร้อยละ 50 ส่วนที่พีเอช 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงประมาณร้อยละ 60 ซึ่งไม่สามารถทำลายไซยาไนด์ได้หมดที่อัตราส่วนการใช้ปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ซึ่งคาดว่าอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล ทำให้การกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรตเกิดได้ยากขึ้น เมื่อเทียบกับผลการศึกษาของสีลาวุช ดำรงศิริ (2548) ที่พบว่าอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ก็ สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 95-100 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 9 10 และ 11

แต่เมื่อทำการทดลองผสมอีดีทีเอลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการทดลองพบว่านิกเกิล และอีดีทีเอไม่มีผลต่อการกำจัดไซยาไนด์ คาดว่าอาจเนื่องจากนิกเกิลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีดีทีเอแทนไซยาไนด์จึงทำให้ไซยาไนด์อยู่ในรูปของไซยาไนด์อิสระมากขึ้น ทำให้เฟอร์เรตสามารถเกิดปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จึงเพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่พีเอช 9 และ 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ถึงร้อยละ 95 ส่วนที่พีเอช 11 สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ร้อยละ 80 ที่อัตราส่วนการใช้ปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ คือที่ช่วงพีเอช 9-10 และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ไซยาเนต

## 5.2 ผลของนิกเกิลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ผลการทดลองพบว่านิกเกิลมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลงที่ทุกพีเอช โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากการทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาศิลาวุธ โดยจะพบว่าที่พีเอช 8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเร็วมากในช่วง 1 นาทีแรกต่อจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนที่พีเอช 9 10 และ 11 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดการเกิดปฏิกิริยา สรุปว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง

## 5.3 การทดลองกับน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

ตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะที่นำมาวิเคราะห์มีความเข้มข้น ไซยาไนด์สูงถึง 564.04 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ คิดเป็น 21,679 ไมโครโมลาร์ และมีความเข้มข้นนิกเกิล 16.68 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 284.19 ไมโครโมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะมีค่ามากกว่าความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ทดลองมาก ในการทดลองจึงทำการเจือจางลงประมาณ 100 เท่า ทำให้ความเข้มข้นต่างๆ ลดลงโดยเหลือความเข้มข้นไซยาไนด์ 111.95 ไมโครโมลาร์ และนิกเกิล 1.24 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นค่านิกเกิลที่น้อยกว่าที่ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์มาก

การกำจัดไซยาไนด์ด้วยเปอร์เรตในน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะมีประสิทธิภาพมากกว่าหรือเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเปอร์เรตที่ใช้คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเปอร์เรตต่อไซยาไนด์ประมาณ 1.35:1 ซึ่งปริมาณเปอร์เรตที่เพิ่มขึ้น คาดว่าอาจเกิดจากผลของโลหะหนักต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียอาจส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยากับเปอร์เรตโดยตรง หรือส่งผลให้ความเสถียรของเปอร์เรตลดลง หรือมีผลทำให้ปฏิกิริยาช้าลงมากทำให้เปอร์เรตบางส่วนสลายตัวไปซึ่งทำให้ต้องการเปอร์เรตในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

โดยค่าเปอร์เรตเข้มข้น 153.04 ไมโครโมลาร์ เป็นค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ใช้ทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ทั้งหมด และที่ความเข้มข้นเปอร์เรตสูงที่สุดในการทดลอง คือ 403.04 ไมโครโมลาร์ นำตัวอย่างหลังปฏิกิริยามีพีเอชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้เปอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้พีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

## 5.4 ข้อเสนอแนะ และการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง

จากผลการวิจัยถึงผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเปอร์เรตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงโดยไม่เจือจางน้ำเสีย และโดยอัตราส่วนปริมาณเปอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่ได้ศึกษาจากน้ำเสียจริง และใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาจากน้ำเสียจริง เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

- ศึกษาถึงผลของโลหะหนักอื่นๆ เช่น เหล็ก โคโรเมียม เนื่องจากในน้ำเสียจริงนอกจากนิเกิลแล้วยังมีโลหะอื่นๆ อีกซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ได้ และอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของไต
- ศึกษาถึงอัตราส่วนของปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้ต่อการกำจัดไซยาไนด์ ที่สามารถใช้กำจัดไซยาไนด์ได้หมด ในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่างนิเกิล ไซยาไนด์

#### 5.4.1 การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียไซยาไนด์สำหรับโรงงานชุบโลหะ โดยการใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นในช่วงที่ทำการทดลอง ควรจะใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาประมาณ 3-5 ชั่วโมง โดยควบคุม พีเอชให้อยู่ในช่วง 9.5 ถึง 10 และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ประมาณ 3:1 ทั้งนี้เพื่อความแน่นอนของผลการบำบัดเนื่องจาก ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีค่าต่ำมาก คือ น้อยกว่า 0.2 มก./ล. หรือน้อยกว่า 7.6 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นไซยาไนด์ในการทดลองคือ 500 ไมโครโมลาร์จะต้องกำจัดไซยาไนด์ให้ได้ถึง 98.5 %

สำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์สูง จำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึง การเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความเสถียรของเฟอร์เรตในน้ำเสีย เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับ พีเอช และ ความเสถียรของเฟอร์เรต เป็นอย่างมาก

ในการบำบัดน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์สูงการเกิดปฏิกิริยาร่วมทำให้พีเอชของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงควรที่จะต้องมีระบบควบคุมพีเอชเป็นอย่างดี และใช้บัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช ร่วมด้วยโดยในที่นี้คาดว่า สารละลายบอร์เรตเหมาะสมที่จะใช้เป็นบัฟเฟอร์ เนื่องจากสามารถควบคุมพีเอชได้ดีในช่วง 9 ถึง 10 และจากผลการทดลอง บอร์เรตยังมีแนวโน้มทำให้นิเกิลละลายน้ำได้น้อยลงด้วย ซึ่งอาจส่งผลเช่นเดียวกับโลหะหนักอื่นๆ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการตกตะกอนโลหะหนักซึ่งเป็นการบำบัดในขั้นต่อไป

การใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง เนื่องจากในงานวิจัยได้มีการทดลองเตรียมเฟอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงประมาณ 0.05 โมลาร์ ซึ่งเฟอร์เรตที่เตรียมเกิดการสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่า เป็นผลจากพีเอชที่สูงขึ้นอย่างมาก ความเข้มข้นที่สูงมาก (ศิวาวุธ คำรังศิริ, 2548)

จากผลการทดลองของ Sharma (2005) ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด 662 ไมโครโมลาร์ ซึ่งพบว่า ต้องใช้เฟอร์เรตในรูปแบบโพแทสเซียมเฟอร์เรต 1200 มก./ล. หรือคิดเป็น 6060 ไมโครโมลาร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์สูงถึง 10 :1 แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับพีเอชของน้ำเสีย ผลการทดลองนี้ทำให้เชื่อว่าการบำบัดน้ำเสียจริง

ให้ได้ประสิทธิภาพสูงยังจำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรสำคัญบางตัวอีก ซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรของเฟอร์เรต หรือ สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักบางชนิด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ควบคุมมลพิษ, กรม. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1)[14 สิงหาคม 2548].
- ชลชัย โพธิ์พันธ์, นันทนา ศิริพันธ์ และประทีน กุลละวณิชย์. 2540. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะหนักและกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ. งานวิจัยสำหรับหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ประยูร ฟองสถิตย์กุล, ชลาศัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และวิสิทธิ์ สุขป้อม. 2542. การบำบัด ไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยสารโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต. วารสารสาธารณสุขศาสตร์ 29 2: 38-47.
- มันสิน ดัชนีกุลเวสม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 9, 2: 4-8.
- วิลาวัลย์ จึงประเสริฐ และสุรจิต สุนทรธรรม. 2542. อาชีพเวชศาสตร์ ฉบับพิเศษวิทยา. 2,500 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ไซเบอร์เพรส จำกัด.
- วิสิทธิ์ สุขป้อม. 2540. การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต. วิทยานิพนธ์สาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัย สาขาวิชาสุขภาพสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สาโรจน์ พันธุ์เทพ และอภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- ศิวารุช ดำรงศิริ. 2548. ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาสุขภาพสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรอนงค์ ทรงกิตติ. 2539. ไซยาไนด์ (Cyanide). วารสารโรงงาน 14, 3: 45-51.

### ภาษาอังกฤษ

- Adhoun, N. and Monser, L. 2002. Remove of Cyanide from Aqueous Solution Using Impregnated Activated Carbon. Chemical Engineering and Processing 41: 17-21.

- Adhoum, N. and Monser, L. 2002. Modified Active Carbon for the Removal of Copper, Zinc, Chromium and Cyanide from Wastewater. Separation and Purification Technology 26: 137-146.
- Aksu, Z. and Gulen, H. 2002. Binary Biosorption Of Iron (III) And Iron (III) – Cyanide Complex Ion On *Rhizopus arrhizus*: Modelling Of Synergistic Interaction. Process Biochemistry 38: 161-173.
- Benefield, L.D., Judkins, J.F.Jr. and Weand, B.L. 1982. Process chemistry for water and wastewater treatment. NJ: Prentice-Hall.
- Benjamin, M.M. 2002. Water chemistry. NY: McGraw-Hill.
- Bielski, B., and Thomas, M.J. 1987. Studie of hypervalent iron in aqueous solution.1: Radiation-induced reduction of iron (VI) to iron (V) by CO<sub>2</sub>. J.Am.Chem.Soc 109: 7761-7764.
- Botz, M.M. 2001. Overview of Cyanide Treatment Methods. Mining Environmental Management. UK: Mining Journal.
- Chao, A.C., Luca, S.J., and Idlea, C.N. 1996. Quality Improvement of Biosolids by Ferrate (VI) Oxidation of Offensive Odour Compounds. Water Science and Technology 33 3: 119-130.
- Chiang, K., Amal, R. and Tran, T. 2003. Photocatalytic Oxidation of Cyanide: Kinetic and Mechanistic studies. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 193: 285-297
- Dabrowski, B., Zaleska, A., Janczarek, M., Hupka, J. and Miller, J.D. 2002. Photooxidation of dissolved dyanide using TiO<sub>2</sub> catalyst. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 151: 201-205
- David P., and Green, D.L. 1999. Photocatalytic oxidation of cadmium-EDTA with titanium dioxide. Environ. Sci. Technol 33: 609-617.
- Dionex Corpeoration. Direct Determination of Metal Cyanides by Ion Chromatography with UV Absorbance Detection. Application Update 147.
- Ebbs, S. 2004. Biological degradation of Cyanide Compounds. Current option in biotechnology 15: 1-6.
- EDTA[Online]. Available from: <http://www.progressivegardens.com/growers.guide/EDTA.jpg>
- El-Ghaoui, E.A., Jansson, R.E.W. and Moreland, C. 1982. Application of the Trickle Tower to Poblema of Pollution Control.II. The Direction and Indirect Oxidation of Cyanide. J.Appl.Electrochem 12: 669-673.



- Environment Australia. 1998. Best practice Environmental Management in Mining: Cyanide Management. Tasmania: Australian government, Department of The Environment and Heritage.
- Gherrou, A. and Kerdjoudi, H. 2002. Specific Membrane Transport of Silver and Copper as  $\text{Ag}(\text{CN})_3^{2-}$  and  $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$  Iron through a Supported Liquid Membrane using  $\text{K}^+$ -crown Ether as a Carrier. Desalination 151: 87-94.
- Graham, N., Jiang, C.C., Li, X.Z., Jiang, J.Q, and Ma, J. 2004. The Influence of pH on The Degradation of Phenol and Chlorophenols by Potassium Ferrate. Chemosphere 56: 949-956.
- Hatinger, L. 1994. Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry. 2<sup>nd</sup> ed. Finishing Publications.
- Hine, F., Yasuda, M., Lida, T. And Ogata, Y. 1986. On The Oxidation of Cyanide Solution with Lead Oxide Coated Anode. Electrochimica Acta 31: 1389-1395.
- Ho, S.P., Wang, Y.Y., and Wan, C.C. 1990. Electrolytic decomposition of Cyanide Effluent with an Electrochemical Reactor Packed with Stainless Fiber. Water Research 24: 1317-1321.
- Jiang, Q.J. and Lloyd, B. 2002. Progress in the Development and Use of Ferrate(VI) salt as an Oxidation and Coagulant for Water and Wastewater Treatment. Water Research 36: 1397-1408.
- Kurama, H. and Catala, T. 2000. Remove of Zinc Cyanide from a Leach Solution by An Anionic Ion-Exchange Resin. Desalination 129: 1-6.
- Lee, Y., Um, I.H. and Yoon, J. 2003. Arsenic (III) Oxidation by Iron (VI) (Ferrate) and Subsequent Removal of Arsenic (V) by Iron (III) Coagulation. Environ. Sci. Technol 37: 5750-5756.
- Madden, T.H., Datye, A.K., Fulton, M., Prairie, M.R., Majumdar, S.A. and Stange, B.M. 1997. Oxidation of metal-EDTA complexes by  $\text{TiO}_2$  photocatalysis. Environ. Sci. Technol 31: 3475-3481.
- Ma, J. and Liu, W. 2002. Effectiveness of Ferrate (VI) Preoxidation in Enhancing the Coagulation of Surface Waters. Water Research 36: 4959-4962.
- Ma, J. and Lin, W. 2002. Effectiveness and Mechanism of Potassium Ferrate (VI) Preoxidation for Algae Removal by Coagulation. Water Research 36: 871-878.
- Mallinckrodt Baker. 2004. MSDS: Potassium Cyanide[online]. Available from: <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/p5697.html>[2005, September 14].

- Nemerow, N. L. 1978. Industry Water Pollution, original, characteristics and Treatment. USA: Addison-Wesley Publishing.
- Ogutveren, U.B, Toru, E. and Koparal, S. 1999. Removl of Cyanide by Anodic Oxidation for Wastewater Treatment. Water Research 33: 1851-1856.
- Parga, J.R., Shukla, S.S. and Carrillo-Pedroza, F.R. 2003. Destruction of Cyanide Waste Solutions using Chlorine Dioxide, Ozone and Titania sol. Waste Management 23: 183-191.
- Qu, J.H., Liu, H.J., Liu, S.X., Lei, P.J. 2003. reduction of Fulvic Acid in Drinking Water by Ferrate. Journal of Environmental Engineering 129, 1: 17-24.
- Rader, W.S., Solujic, L., Milosavljevic, E.B., Hendrix, J.L. and Nelson, J.H. 1995. Photocatalytic Detoxification Of Cyanide And Metal Cyano-Species From Precious-Metal Mill Effluents. Environmental Pollution 90, 3: 331-334.
- Ramo, J. and Sillanpaa, M. 2001. Degradation of EDTA by Hydrogen peroxide in alkaline conditions. Journal of Cleaner Production 9: 191-195.
- Rania, H.; and Roldan, C. J. 2003. Toxicity Cyanide[online]. Available from: <http://www.emedicine.com/cgi-bin/foxweb.exe/screen@d:/em/ga?book=med&authored=2689&topicid=487> [2005, July 23].
- Sinbuathong, N.; Kongseri, B.; Plungklang, B.; and Khun-anake, R. 2000. Cyanide Removal from Labolatory Wastewater Using Sodium Hypochlorite and Calcium Hypochlorite. Kasetsart J. (Nat. Sci.) 34: 74-78.
- Sharma, V.K.; Burnett, C.R.; Yngard, R.A.; and Cabelli, D.E. 2005. Iron (VI) and Iron (V) Oxidation of Copper (I) Cyanide. Environ. Sci. Technol 39: 3849-3854.
- Sharma, V.K. 2002. Potassium Ferrate (VI) : an Environmentally Friendly Oxidant. Advance in environmental research 6: 143-156.
- Sharma, V.K.; Rendon, R.A.; Millero, F.J. and Vazquez, F.G. 2000. Oxidation of Thioacetamide by Ferrate VI. Marine Chemistry. 70: 235-242.
- Sharma, V. K.; Rivera, W.; Smith, J. O.; and O'Brien, B. 1998. Ferrate (VI) Oxidation Of Aqueous Cyanide. Environ. Sci. Technol. 32: 2608-2613.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2000. Capsule Report Managing Cyanide in Metal. EPA625/R-99/009. National Risk Management Research Labolatory, Office of Research and Development. U.S.EPA. Cincinnati. Ohio.

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

Wikipedia. EDTA[Online]. Available from: [http://it.wikipedia.org/wiki/complesso\(chimica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/complesso(chimica))[2006, July 21].

Yuan, B.L., Qu, J.H. and Fu, M.L. 2002. Removal Cyanibacterial Microcystin-LR by Ferrate Oxidation-Coagulation. Toxicon. 40: 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. 2003. Evaluation and Testing of Analytical Methods for Cyanide Species in Municipal and Industrial Contaminated Water. Environ. Sci. Technol. 37: 107-115.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

การตรวจวัดความเข้มข้นฟอร์เรต

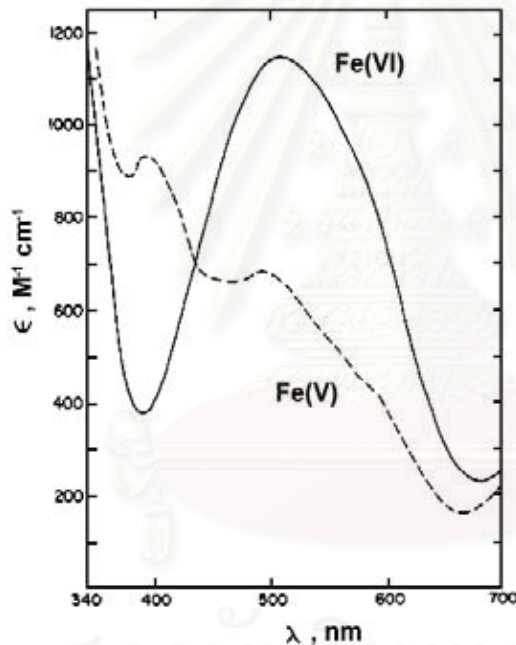
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

### ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

#### ก.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรต

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



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

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

$$A = \epsilon * C * l \quad (ก-1)$$

เมื่อ

A = ค่าการดูดซับแสง ที่ตรวจวัดได้ ไม่มีหน่วย

$\epsilon$  = สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง มีค่าเท่ากับ  $1150$  โมลาร์<sup>-1</sup>เซนติเมตร<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

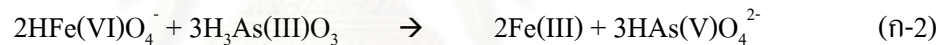
C = ความเข้มข้นของเฟอร์เรต หน่วย โมลาร์

L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวกลาง มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร สำหรับเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## ก.2 การหยุดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์


ในการทดลองเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะหยุดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไซยาไนด์ การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยการทำให้เฟอร์เรตหายไปจากตัวอย่างในเวลาที่ต้องการ โดยวิธีการหยุดปฏิกิริยาวิธีหนึ่ง คือการหาสารอื่นๆที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าไซยาไนด์อย่างมาก เติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการ

อาร์เซไนท์ ( $As^{3+}$ ) มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.54 \times 10^5$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 8.4 และลดลงเป็นประมาณ  $1.23 \times 10^3$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 12.9 (Lee Um และ Yoon, 2003) ในขณะที่ไซยาไนด์มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 25 องศาเซลเซียสประมาณ  $3.76 \times 10^2$  โมล<sup>-1</sup> วินาที<sup>-1</sup> 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 2:3พอดี

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายอาร์เซไนท์ลงในสารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 พบว่าสารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซไนท์หมดทันทีโดยสังเกตจากสีม่วงของสารละลายที่หายไปทันที ซึ่งเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดกับไซยาไนด์มาก



ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนวิธีการกั้นไชยาไนต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ข.

### ขั้นตอนวิธีการกลั่นไซยาไนด์

#### ข.1 การเตรียมสารเคมี

##### 1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ละลายน้ำปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

##### 2. แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )

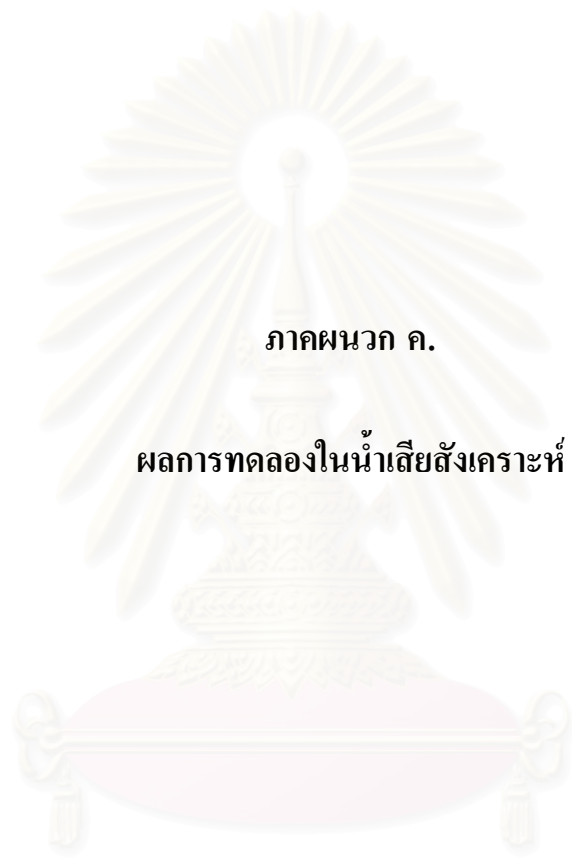
ชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ 510 กรัม ละลายน้ำปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

##### 3. กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )

เจือจางกรดซัลฟูริกด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

#### ข.2 วิธีการกลั่น

1. เปิดสารละลายตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร (ถ้าปริมาตรไม่ถึงให้เติมน้ำให้ครบ 500 มิลลิลิตร)  
ใส่ขวดต้มแบบ Modified claisen flask
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 มิลลิลิตร ลงใน Test Tube
3. ต่อชุดกลั่น
4. เริ่มการกลั่น โดย ปรับวาล์วจนอัตราการเข้าขวดต้มประมาณ 1-2 ฟอง/วินาที โดย ฟองอากาศ  
ต้องไม่ทำให้ของเหลวใน Test Tube สูงกว่า 6.5-10 มิลลิเมตร
5. เติมกรดซัลฟูริก (1:1) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าทางท่อลม (Thistle Tube) โดยใช้กรด 10 มิลลิลิตร ต่อสารละลายตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร
6. ล้างท่อลมด้วยน้ำกลั่น
7. ปล่อยให้สารละลายผสมกัน 3 นาที
8. เติมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ 20 มิลลิลิตร
9. เปิดเตาต้ม เวลากลั่นอย่าให้มีไอน้ำเกิดขึ้นครั้งต่อ Condenser (Reflux rate 40-50 หยด/ นาที)  
ทำการกลั่น 1 ชั่วโมง
10. ปิดเตา แต่ยังไม่ต้องปิดน้ำแล้วทิ้งไว้ให้เย็น 15 นาที
11. เก็บสารละลายไซยาไนด์ที่ได้ใน Test Tube ไปทำการวิเคราะห์ต่อ



ภาคผนวก ค.

ผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวกลางต่างๆ ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	น้ำปราศจากไอออน			ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.004 โมลาร์			บอร์เรตบัฟเฟอร์ 0.004 โมลาร์			ฟอสเฟต-บอร์เรตบัฟเฟอร์ 0.004 โมลาร์		
	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.
8	469.26	468.29	0.92	367.24	363.79	2.99	282.05	281.89	0.75	297.09	297.20	0.72
	467.44			361.99			281.07			296.55		
	468.18			362.13			282.54			297.97		
9	105.16	105.00	0.87	209.54	207.94	1.66	29.05	31.43	2.10	107.17	107.82	1.35
	105.77			206.23			32.99			106.93		
	104.06			208.06			32.24			109.37		
10	10.53	10.35	0.80	114.32	114.87	0.83	3.71	3.68	0.16	71.05	70.94	0.18
	11.05			114.47			3.83			71.03		
	9.47			115.82			3.51			70.73		
11	0.70	0.74	0.07	5.28	5.33	0.31	0.46	0.50	0.04	29.80	29.43	0.50
	0.82			5.06			0.49			28.87		
	0.70			5.67			0.54			29.63		
12	0.14	0.21	0.11	6.56	6.60	0.13	0.12	0.16	0.04	15.61	15.61	0.10
	0.14			6.75			0.17			15.71		
	0.33			6.51			0.19			15.51		

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงความสามารถในการละลายของนิกเกิลในตัวกลางที่ไม่มี และมีไซยาไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	Ni:CN (1:0)			Ni:CN (1:1)			Ni:CN (1:1.5)			Ni:CN (1:2)		
	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.	[Ni] ( $\mu\text{M}$ )	[Ni] เฉลี่ย ( $\mu\text{M}$ )	SD.
8	282.05	281.89	0.75	458.80	457.80	2.33	464.20	464.77	1.53	491.35	492.68	1.24
	281.07			455.13			463.60			493.80		
	282.54			459.46			466.50			492.90		
9	29.05	31.43	2.10	178.60	178.20	1.25	251.80	254.00	2.42	323.40	325.05	1.65
	32.99			176.80			256.60			326.70		
	32.24			179.20			253.60			325.05		
10	3.71	3.68	0.16	117.54	117.63	1.23	193.45	191.97	1.61	244.47	244.79	3.96
	3.83			118.90			190.25			241.00		
	3.51			116.44			192.20			248.90		
11	0.46	0.50	0.04	115.70	114.63	2.10	171.20	173.37	2.93	248.85	248.87	0.63
	0.49			112.22			172.20			248.25		
	0.54			115.98			176.70			249.50		
12	0.12	0.16	0.04	116.26	115.59	1.89	176.70	176.17	2.74	252.85	252.57	1.69
	0.17			113.46			173.20			254.10		
	0.19			117.06			178.60			250.75		

**ตารางที่ ค.3** ตารางแสดงผลการศึกษาค่าผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์

ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิ่มตัวที่พีเอช 8 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	485.34	0.00	NA.	NA.
102.17	378.68	72.00	NA.	NA.
200.87	315.22	151.86	NA.	NA.
302.61	241.83	211.57	NA.	NA.
397.83	223.28	238.06	NA.	NA.
502.17	203.28	256.00	NA.	NA.
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
58.12		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.4** ตารางแสดงผลการศึกษาค่าผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์

ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิ่มตัวที่พีเอช 9 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	523.21	0.00	NA.	NA.
101.30	429.84	83.73	NA.	NA.
206.09	394.00	127.54	NA.	NA.
305.65	344.44	164.47	NA.	NA.
397.39	318.92	196.23	NA.	NA.
499.57	279.71	226.49	NA.	NA.
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
46.54		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.5** ตารางแสดงผลการศึกษาค่าผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อ โมล ไชยาไนต์

ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 10 และความเข้มข้น ไชยาไนต์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไชยาไนต์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไชยานेत ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	503.40	0.00	NA.	NA.
103.04	404.81	85.42	NA.	NA.
202.17	361.27	149.29	NA.	NA.
308.70	300.57	190.34	NA.	NA.
398.26	269.11	220.99	NA.	NA.
495.65	256.30	235.59	NA.	NA.
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
49.09		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.6** ตารางแสดงผลการศึกษาค่าผลของนิกเกิลต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อ โมล ไชยาไนต์

ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 11 และความเข้มข้น ไชยาไนต์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไชยาไนต์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไชยานेत ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	522.30	0.00	NA.	NA.
103.48	436.04	68.64	NA.	NA.
198.26	411.81	94.83	NA.	NA.
306.52	362.50	148.97	NA.	NA.
403.04	326.29	185.02	NA.	NA.
506.09	322.10	196.01	NA.	NA.
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
38.33		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.7** ตารางแสดงผลการศึกษามลของนิกเกิล และอีดีทีเอ ต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิ่มตัวที่พีเอช 8 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	499.82	0.00	NA.	NA.
102.61	406.98	81.94	NA.	NA.
202.61	328.72	171.38	NA.	NA.
300.00	254.01	240.48	NA.	NA.
396.09	218.38	285.06	NA.	NA.
501.30	191.83	329.76	NA.	NA.
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
61.62		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.8** ตารางแสดงผลการศึกษามลของนิกเกิล และอีดีทีเอ ต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิ่มตัวที่พีเอช 9 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	490.41	0.00	NA.	NA.
105.22	350.30	129.84	NA.	NA.
200.87	258.53	221.13	NA.	NA.
301.30	186.78	307.07	NA.	NA.
396.96	54.32	414.56	NA.	NA.
496.96	22.36	467.18	NA.	NA.
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
95.44		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.9** ตารางแสดงผลการศึกษาผลของนิกเกิล และอีดีทีเอ ต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 10 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	504.78	0.00	NA.	NA.
102.61	376.31	110.60	NA.	NA.
201.74	262.24	238.57	NA.	NA.
298.26	177.11	322.15	NA.	NA.
400.00	63.58	436.98	NA.	NA.
499.13	24.74	477.31	NA.	NA.
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
95.10		100	NA.	NA.

**ตารางที่ ค.10** ตารางแสดงผลการศึกษาผลของนิกเกิล และอีดีทีเอ ต่ออัตราส่วนโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัวที่พีเอช 11 และความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์ (เฉลี่ย) ( $\mu\text{M}$ )	ไซยานเนต ( $\mu\text{M}$ )	ไนไตรท์ ( $\mu\text{M}$ )	ไนเตรท ( $\mu\text{M}$ )
0.00	505.1	0.00	NA.	NA.
102.61	414.47	82.2	NA.	NA.
202.61	294.53	205.58	NA.	NA.
300.00	216.10	278.05	NA.	NA.
396.09	139.53	360.92	NA.	NA.
501.30	98.90	399.18	NA.	NA.
ประสิทธิภาพ (%)		สารผลิตภัณฑ์ (%)		
80.42		100	NA.	NA.



ตารางที่ ค.11 ตารางแสดงผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัว ที่พีเอช 8

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ							
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย	SD.
	1		2		3			
นาที่	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	%	
0	482.32	100.00	483.35	100.00	488.95	100.00	100.00	3.57
0.5	190.32	39.46	194.43	40.23	194.18	39.71	39.80	2.31
1	188.66	39.11	187.64	38.82	188.97	38.65	38.86	0.70
2	187.22	38.82	187.45	38.78	185.86	38.01	38.54	0.86
5	185.06	38.37	186.52	38.59	182.09	37.24	38.07	2.26
10	172.96	35.86	175.10	36.23	178.66	36.54	36.21	2.88
20	168.37	34.91	169.62	35.09	171.02	34.98	34.99	1.33
30	167.03	34.63	167.44	34.64	170.25	34.82	34.70	1.75
60	165.69	34.35	165.25	34.19	169.47	34.66	34.40	2.32
90	164.65	34.14	164.27	33.98	167.39	34.23	34.12	1.70
120	162.79	33.75	161.86	33.49	161.84	33.10	33.45	0.54
180	162.47	33.68	160.78	33.26	160.44	32.81	33.25	1.09
240	159.83	33.14	158.26	32.74	159.89	32.70	32.86	0.93
300	150.52	31.21	157.65	32.62	159.00	32.52	32.11	4.55
1440	146.96	30.47	146.95	30.40	148.31	30.33	30.40	0.78
ประสิทธิภาพ %	69.53		69.60		69.67		69.60	
เฟอร์เรตเริ่มต้น ( $\mu\text{M}$ )	500.43		498.70		500.43			

ตารางที่ ค.12 ตารางแสดงผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัว ที่พีเอช 9

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ							
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย	SD.
	1		2		3			
นาที่	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	%	
0	503.66	100.00	498.89	100.00	509.60	100.00	100.00	5.37
0.5	428.65	85.11	427.89	85.77	434.15	85.19	85.36	3.41
1	421.26	83.64	426.64	85.52	432.01	84.77	84.64	5.38
2	397.44	78.91	401.89	80.56	392.38	77.00	78.82	4.76
5	386.67	76.77	384.04	76.98	390.60	76.65	76.80	3.30
10	321.23	63.78	326.48	65.44	322.71	63.33	64.18	2.70
20	307.30	61.01	311.95	62.53	309.20	60.68	61.41	2.34
30	305.61	60.68	304.56	61.05	309.10	60.66	60.79	2.38
60	301.26	59.81	301.92	60.52	302.28	59.32	59.88	0.52
90	301.10	59.78	300.25	60.18	299.56	58.78	59.58	0.77
120	296.31	58.83	283.45	56.82	298.80	58.63	58.09	8.24
180	290.03	57.58	281.06	56.34	297.52	58.38	57.43	8.24
240	286.31	56.85	278.60	55.84	285.99	56.12	56.27	4.36
300	280.03	55.60	273.31	54.78	281.37	55.21	55.20	4.32
1440	267.08	53.03	261.44	52.40	275.96	54.15	53.19	7.32
ประสิทธิภาพ %	46.97		47.60		45.85		46.81	
เฟอร์เรตเริ่มต้น ( $\mu\text{M}$ )	498.70		494.78		499.13			

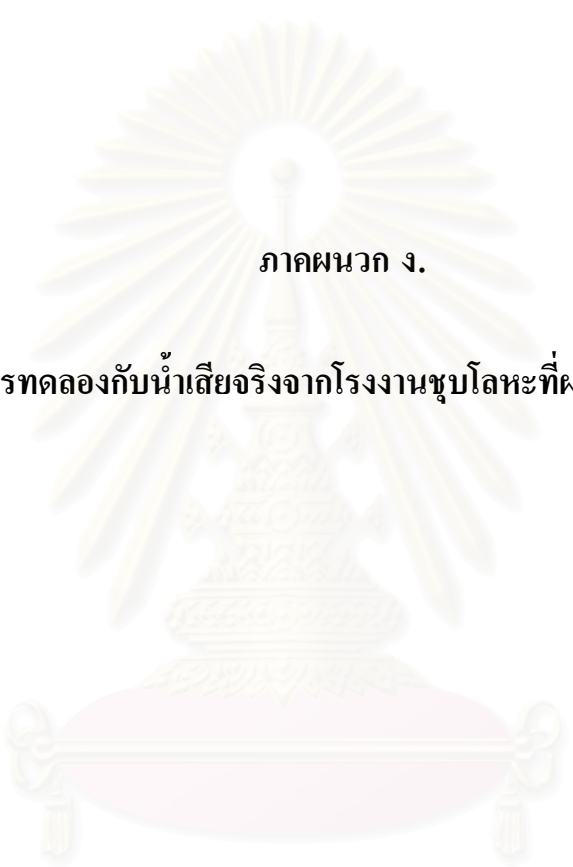
ตารางที่ ค.13 ตารางแสดงผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัว ที่พีเอช 10

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ							
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย	SD.
	1		2		3			
นาที่	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	%	
0	495.29	100.00	496.80	100.00	501.61	100.00	100.00	3.30
0.5	397.81	80.32	385.29	77.55	433.30	86.38	81.42	24.90
1	388.53	78.44	384.54	77.40	406.96	81.13	78.99	11.96
2	388.15	78.37	382.05	76.90	399.11	79.57	78.28	8.65
5	380.12	76.75	380.07	76.50	392.49	78.25	77.17	7.15
10	375.84	75.88	379.77	76.44	386.60	77.07	76.47	5.45
20	375.10	75.73	376.96	75.88	383.01	76.36	75.99	4.14
30	350.88	70.84	376.33	75.75	372.84	74.33	73.64	13.79
60	329.32	66.49	362.04	72.87	339.39	67.66	69.01	16.76
90	318.07	64.22	325.33	65.49	338.96	67.57	65.76	10.60
120	314.94	63.59	320.47	64.51	313.45	62.49	63.53	3.70
180	297.41	60.05	292.17	58.81	299.65	59.74	59.53	3.84
240	262.66	53.03	278.47	56.05	281.44	56.11	55.06	10.10
300	259.01	52.29	263.14	52.97	260.97	52.03	52.43	2.07
1440	255.40	51.57	252.577	50.84	259.21	51.67	51.36	3.33
ประสิทธิภาพ %	48.43		49.16		48.33		48.64	
เฟอร์เรตเริ่มต้น ( $\mu\text{M}$ )	500.43		498.26		497.83			

ตารางที่ ค.14 ตารางแสดงผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์

ที่ความเข้มข้นนิกเกิลอิมิตัว ที่พีเอช 11

เวลา	ไซยาไนด์คงเหลือ							
	การทดลองครั้งที่						เฉลี่ย	SD.
	1		2		3			
นาที่	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	[CN] ( $\mu\text{M}$ )	%	%	
0	505.69	100.00	509.70	100.00	505.75	100.00	100.00	2.30
0.5	480.08	94.93	494.35	96.99	493.82	97.64	96.52	8.09
1	459.36	90.84	457.72	89.80	453.79	89.73	90.12	2.86
2	445.91	88.18	443.47	87.01	451.80	89.33	88.17	4.28
5	394.51	78.01	442.33	86.78	447.31	88.44	84.41	29.16
10	394.09	77.93	441.36	86.59	442.82	87.56	84.03	27.72
20	392.03	77.52	428.79	84.13	396.35	78.37	80.01	20.09
30	386.53	76.44	421.48	82.69	389.53	77.02	78.72	19.37
60	382.47	75.63	389.75	76.47	385.22	76.17	76.09	3.68
90	379.16	74.98	381.18	74.78	382.77	75.68	75.15	1.81
120	366.83	72.54	358.39	70.31	374.91	74.13	72.33	8.26
180	342.18	67.67	339.91	66.69	350.52	69.31	67.89	5.59
240	320.86	63.45	322.77	63.33	326.13	64.48	63.75	2.67
300	313.32	61.96	317.22	62.24	314.36	62.16	62.12	2.02
1440	306.67	60.64	302.64	59.38	308.44	60.99	60.34	2.97
ประสิทธิภาพ %	39.36		40.62		39.01		39.66	
เฟอร์เรตเริ่มต้น ( $\mu\text{M}$ )	500.43		498.26		501.30			



ภาคผนวก ง.

ผลการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ตารางแสดงผลการตรวจวัดลักษณะน้ำเสียจริงจากโรงงานชุมชนโหละ

ลักษณะน้ำเสีย	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	เฉลี่ย
ไซยาไนด์	541.392	503.174	447.415	653.595	674.607	564.04
โครเมียม	26.58	8.85	30.21	0.697	37.97	20.86
ทองแดง	28.67	12.432	3.8304	12.68	19.288	15.38
เหล็ก	0.784	2.492	0.74	0.141	2.37	1.31
นิกเกิล	30.06	17.56	4.55	2.3	28.95	16.68
สังกะสี	1.32	8.169	0.53	3.08	0.144	2.65
อีดีทีเอ	N.D	N.D	N.D	13.48	N.D	-

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 ตารางแสดงผลการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ (หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรตเข้มข้น ( $\mu\text{M}$ )	น้ำเสียจริง ( $\mu\text{M}$ )									
	ชุดที่ 1		ชุดที่ 2		ชุดที่ 3		ชุดที่ 4		ชุดที่ 5	
	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไซยาไนด์	ไซยานต
0.00	135.22	0.00	108.60	0.00	97.68	0.00	110.68	0.00	107.56	0.00
102.60	82.80	34.78	62.11	35.49	69.11	23.92	72.87	21.75	65.49	25.79
199.13	19.74	78.21	23.67	68.39	14.57	64.63	30.48	66.68	27.75	59.10
306.08	2.25	92.49	3.80	88.52	2.31	84.49	3.55	76.73	2.90	80.78
406.95	0.00	90.68	0.00	93.81	0.00	82.74	0.00	83.86	0.00	91.37
499.13	0.00	96.56	0.00	89.00	0.00	93.03	0.00	92.17	0.00	80.72
602.60	0.00	92.87	0.00	90.81	0.00	94.96	0.00	93.70	0.00	94.80
701.73	0.00	95.43	0.00	94.26	0.00	92.80	0.00	83.86	0.00	79.93
806.08	0.00	89.77	0.00	91.85	0.00	88.76	0.00	89.75	0.00	94.36
ประสิทธิภาพการกำจัด ไซยาไนด์ (%)	100		100		100		100		100	

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรวรรณ ดิยานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี การศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย