


การกำจัดไขมันและอืดที่เอิน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต



นายปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN : 974-14-3478-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**CYANIDE AND EDTA REMOVAL FROM WASTEWATER BY
FERRATE OXIDATION**



Mr.Piyasak Singhasuriya

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)**

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN : 974-14-3478-2

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดไซยาไนด์และอีดีทีเอในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วย
เฟอร์เรต
โดย นายปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ โอสถาปนันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา ดิงศภัทย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ โอสถาปนันธ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

.....
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

ปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ : การกำจัดไซยาไนด์และอิตีทีเอในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต. (CYANIDE AND EDTA REMOVAL FROM WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 118 หน้า. ISBN 974-14-3478-2

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอิตีทีเอต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้สูงสุด โดยทำการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองจะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะเป็นกระบวนการกำจัดอิตีทีเอ ได้ทำการศึกษาโดยจะทำการแปรค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอเป็น 1:1 เพื่อดูประสิทธิภาพต่อการกำจัดอิตีทีเอ และในส่วนที่สองได้ทำการศึกษาผลของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ได้ทำการแปรค่าพีเอชอัตราส่วน โดยโมลของไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ และอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

ผลการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นกระบวนการกำจัดอิตีทีเอในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอในแต่ละพีเอชมีค่าค่อนข้างต่ำ และพบว่าที่พีเอช 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอได้สูงที่สุด ซึ่งสามารถกำจัดอิตีทีเอมีค่าประมาณ 40% ในส่วนที่สองเป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไซยาไนด์และอิตีทีเอ ทำการศึกษาที่พีเอช 10 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้มากถึง $\geq 99\%$ ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่าอิตีทีเอ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าเมื่อมีการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของอิตีทีเอมีมากกว่าไซยาไนด์ แต่เมื่อค่าความเข้มข้นของอิตีทีเอเท่ากับหรือน้อยกว่าไซยาไนด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้สูงถึง 100% และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา คือ ไซยาเนต

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ปิยะ ศักดิ์ สิงหะสุริยะ.....
ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4789112120 : MAJOR INTERDISCIPLINARY PROGRAM OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD : CYANIDE, EDTA, FERRATE, OXIDATION

PIYASAK SINGHASURIYA : CYANIDE AND EDTA REMOVAL FROM WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., 118 pp. ISBN 974-14-3478-2

This research studied the effect of EDTA on cyanide removal from synthetic wastewater by ferrate oxidation. There were two parts of this study. In the first part, investigation of EDTA removal efficiency by ferrate oxidation with varying pH was performed. In the second part, the effect of EDTA on the efficiency of cyanide removal by ferrate oxidation was studied with these following conditions: varying pH, molar ratio of ferrate to EDTA and molar ratio of ferrate to cyanide. Reaction by product was also determined.

With molar ratio of one to one, ferrate did not effectively remove EDTA from the EDTA synthetic wastewater for the range of pH studied. The highest efficiency of EDTA removal was 40 % at pH 10. At molar ratio of cyanide to EDTA to ferrate of 1:1:1, cyanide was still effectively removed by ferrate oxidation. It was found that $\geq 99\%$ cyanide removal was achieved at pH 10. However, at molar concentration of EDTA higher than molar concentration of cyanide, cyanide removal efficiency decreased. Reaction major by product from reaction was found to be cyanate.

Field of Study..... Environmental Science..... Student's Signature Piyasak Singhasuriya
 Academic Year..... 2006..... Advisor's Signature K. O. S.
 Co-Advisor's Signature Pichaya R.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำอย่างดียิ่ง ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง และตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณ Virender K. Sharma สำหรับการแนะนำ สารเคมีโปตัสเซียมเฟอร์เรต และ เอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โหมยิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.อมรเพชรสม และ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ ศีลาวุธ คำรงศิริ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทั้งสอนการใช้เครื่องมือ และช่วยแก้ปัญหาในหลายๆด้าน ขอขอบคุณ พี่เอ๋ ที่คอยช่วยเหลือในขณะทำการวิจัยและให้คำปรึกษาในเรื่องที่ไม่เข้าใจ ขอขอบคุณ พี่ไอ้ต ที่ได้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆมากมาย และ ขอขอบคุณ เพื่อนๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจตลอดการทำกรวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และ ญาติพี่น้อง เป็นอย่างสูงที่ให้ช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจ ซึ่งทำให้กระผมสามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้ตลอดมา

สารบัญ

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

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ.....	4
2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะของน้ำเสีย.....	7
2.2 ไชยาไนต์.....	8
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์.....	8
2.2.2 การแบ่งประเภทของไชยาไนต์.....	8
2.2.2.1 ไชยาไนต์อิสระ.....	8
2.2.2.2 สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน.....	9
2.2.2.3 สารประกอบไชยาไนต์อื่นๆ.....	10
2.2.3 ความเป็นพิษของไชยาไนต์.....	10
2.2.4 การกำจัดไชยาไนต์ในน้ำเสีย.....	12

2.2.4.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน	12
2.2.4.2 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	15
2.2.4.3 การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์มังกานต	16
2.2.4.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน	17
2.2.4.5 การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	17
2.2.4.6 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า	18
2.2.4.7 วิธีอื่นๆ ที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์	19
2.2.5 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์	20
2.3 อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra-acetic acid, EDTA)	24
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ	24
2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ	24
2.3.3 การกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสีย	24
2.3.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดอีดีทีเอ	25
2.4 เฟอร์เรต	28
2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต	28
2.4.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต	28
2.4.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์	29
2.4.1.3 ความคงตัวของเฟอร์เรต	29
2.4.2 การเตรียมเฟอร์เรต	31
2.4.2.1 วิธีการ Dry Oxidation	31
2.4.2.2 วิธีการ Wet Oxidation	31
2.4.2.3 วิธีการ Electro-Chemical	31
2.4.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ	32
2.4.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	32
2.4.3.2 การฆ่าเชื้อโรค	34
2.4.3.3 การโคแอกกูเลชัน	34
2.4.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต	35
2.5 การทำงานกับสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันสูง	37

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย.....	38
3.1.1 การเตรียมเครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.1.2 การเตรียมน้ำเสียจริง น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลาย.....	38
3.1.3 การดำเนินการวิจัย และการวิเคราะห์.....	38
3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.3 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรด.....	40
3.3.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ.....	40
3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	41
3.3.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรด.....	42
3.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	42
3.4.1 การทดลองการกำจัดอดีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	42
3.4.2 การทดลองถึงผลของอดีทีเอต่อการกำจัดไซยาไนด์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	42
3.4.3 การทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ.....	43
3.4.4 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดอดีทีเอ และไซยาไนด์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	43
3.4.5 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบโลหะ.....	44
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	45
3.5.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์.....	45
3.5.1.1 การทดลองการกำจัดอดีทีเอโดยวิธีการ ออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	45
3.5.1.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการ ออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรด.....	47
3.5.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงชุบโลหะ ที่ผ่านการเจือจาง.....	
3.5.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบโลหะ.....	51

3.5.2.2 การศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์.....	51
3.6 วิธีการวิเคราะห์.....	54
3.6.1 วิธีการวิเคราะห์อิตีทีเอ.....	54

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการกำจัดอิตีทีเอ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต.....	55
4.1.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ.....	55
4.2 ผลการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอิตีทีเอ.....	58
4.2.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์.....	58
4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และอิตีทีเอและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	64
4.2.3 ผลของอิตีทีเอต่ออัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และ สารผลิตภัณฑ์.....	68
4.3 ผลการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ อิตีทีเอและนิเกิล.....	70
4.3.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ อิตีทีเอและนิเกิล ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์.....	70
4.4 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริง.....	71
4.4.1 ผลการตรวจวัดน้ำเสียจริง.....	71
4.4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ในน้ำเสียจริง.....	72

บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลการวิจัย	76
5.1.1	การกำจัดอดีทีที่เอ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต	76
5.1.2	ผลของอดีทีที่เอต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต	76
5.1.3	การทดลองกับน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง	76
5.2	ข้อเสนอแนะ	77
	รายการอ้างอิง	78
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	การศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต	85
ภาคผนวก ข.	การเก็บรักษาตัวอย่าง	88
ภาคผนวก ค.	การศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์	90
ภาคผนวก ง.	การศึกษาเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท	94
ภาคผนวก จ.	ผลการศึกษากำจัดอดีทีที่เอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต	97
ภาคผนวก ฉ.	ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นต่อการกำจัดไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์	101
ภาคผนวก ช.	ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์	105
ภาคผนวก ซ.	ผลการศึกษากำจัดอดีทีที่เอจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง	115
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	118

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	7
2.2 ค่าคงที่ของค่าความคงตัว (β) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	9
2.3 ค่าคงที่ของความคงตัว (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์.....	10
2.4 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ.....	11
2.5 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย.....	11
2.6 ลักษณะและคุณสมบัติของอิตีทีเอ.....	25
2.7 ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันใน ระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	29
2.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต.....	33
3.1 การผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของอิตีทีเอในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.....	41
3.2 การผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์กับอิตีทีเอในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.....	41
3.3 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง.....	42
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอ และไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ และไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์.....	43
3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลของเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอ ที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	44
3.6 ตัวแปรในศึกษาอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์.....	44
4.1 ผลการตรวจวัดอิตีทีเอที่พีเอชต่างๆ.....	57
4.2 แสดงคุณลักษณะของน้ำเสียจริง.....	72
ค.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เวลา 0 และ 30 นาทีในภาชนะปิดฝา พีเอช 8 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ต่างๆ.....	93
จ.1 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดอิตีทีเอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์.....	98
จ.2 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดอิตีทีเอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์.....	99
จ.3 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดอิตีทีเอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์.....	100

ตาราง	หน้า
ช.8 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วน โคลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์.....	113
ช.9 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วน โคลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอตอนิกิล และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์.....	114
ช.1 ผลการศึกษาการทดลองกับน้ำเสียจริง (หน่วย ไมโครโมลาร์).....	116



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.2	ขั้นตอนการชุบโลหะทั่วไป.....	4
2.3	ปริมาณไซยาไนด์ไอออน (CN-) กับกรดไซยานิค (HCN) ที่พีเอชต่างๆ.....	9
2.4	ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ ไปเป็นไซยาเนต.....	14
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไออาร์พีกับปริมาณไฮโปคลอไรท์ที่เติม.....	15
2.6	การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มก./ล.....	16
2.7	โครงสร้างของอิตีทีเอโดยทั่วไป และ เมื่อมีการจับโลหะหนัก.....	25
2.8	รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ.....	28
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์.....	30
3.1	เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	39
3.2	เครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ ลิกวิด โครมาโตกราฟี.....	39
3.3	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.....	46
3.4	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.1.....	48
3.5	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.2.....	50
3.6	แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.2.2.....	53
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอและพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:1.....	55
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ อิตีทีเอ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์.....	57
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1.....	59

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์กับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์.....	61
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1	61
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยากับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์	63
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10.....	65
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์กับอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์.....	66
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10.....	67
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ต่ออัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์.....	68
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีอิตีทีเอ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10.....	69
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอิตีทีเอ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10.....	69
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอต่ออนิเจนที่พีเอช 10 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์.....	70

รูปที่	หน้า	
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาต่อ อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออีดีทีเอตอนิเกิล ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์.....	71
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่ลดลง และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรดที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียจริง.....	73
ก.1	การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V).....	86
ค.1	สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	91
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไซยาไนด์กับพีเอช.....	92
ง.1	สัญญาณของคลอไรด์ ไนไตรท์ ไซยาเนต และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	95
ง.2	ตำแหน่งสัญญาณของไนไตรท์ โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไนไตรท์ และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	96
ง.3	ตำแหน่งสัญญาณของไซยาเนต โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไซยาเนต และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน.....	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยได้มีการเจริญเติบโตมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุตสาหกรรมชุบโลหะก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนั้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาหลังจากอุตสาหกรรมชุบโลหะได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนั้นมีการปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิดเช่น โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี หรือโลหะอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของการชุบ เมื่อมีโรงงานชุบโลหะเพิ่มมากขึ้นน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะผลที่ตามมาคือปริมาณน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

ในกระบวนการชุบโลหะจะมีการใช้ไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งไซยาไนด์มีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ไซยาไนด์เป็นสารพิษที่เข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก ทางการหายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนังและลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ จะเกิดอาการพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมองอาจปรากฏอาการทางโรคจิต ประสาทตาเสื่อม หรือฝอไปได้ ส่วนผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างมากจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยจะมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ ซึ่งอาจถือได้ว่าน้ำเสียที่ปนเปื้อนไซยาไนด์เป็นของเสียอันตรายได้ ดังนั้นโรงงานบางแห่งมีการได้หันมาให้ความสนใจที่จะหาน้ำยาที่ไม่มีส่วนประกอบของไซยาไนด์มาใช้ในกระบวนการชุบโลหะแทนโดยสารเคมีที่ถูกนำมาใช้แทนไซยาไนด์กันอย่างมาก ได้แก่ อีดีทีเอ (EDTA) มาใช้เป็นสารคีเลชั่นแทนไซยาไนด์ เนื่องจากอีดีทีเอสามารถจับกับโลหะหนัก และโลหะทรานซิชัน ทำให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้บางโรงงานยังใช้น้ำยาทำความสะอาดผิวที่มีอีดีทีเอ เป็นสารประกอบหลัก เพื่อใช้ในขั้นตอนการเตรียมผิวด้วยโลหะ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้น้ำเสียของโรงงานชุบโลหะมีองค์ประกอบของน้ำเสียที่มีทั้งไซยาไนด์ และอีดีทีเอผสมกันอยู่ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการบำบัดมากขึ้น คืออาจจะต้องเพิ่มปริมาณสารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งอีดีทีเอสามารถไปจับกับโลหะทำให้โลหะไม่สามารถตกตะกอนได้ ถ้าหากปล่อยน้ำทิ้งที่มีอีดีทีเอลงสู่สิ่งแวดล้อมอาจจะทำให้อีดีทีเอรวมตัวกับโลหะหนักที่อยู่ในตะกอนดิน ทำให้โลหะหนักละลายกลับกลายเป็นมาสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อคนหรือสัตว์ ที่ใช้แหล่งน้ำนั้นอุปโภคบริโภคอีกด้วย

เฟอร์ไรต์ (Fe^{++}) เป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากสามารถเก็บรักษาได้นานในสภาวะปกติในรูปของโพแทสเซียมเฟอร์ไรต์ (K_2FeO_4) เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง

มีความสามารถในการโคแอกกูเลชัน เป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยาซึ่งประหยัดกว่าสารที่ไม่เลือกทำปฏิกิริยา และไม่มีสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เพราะทำให้ใช้งานได้ง่ายและมีข้อจำกัดน้อยกว่า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอิตีทีเอต่อการกำจัดไชยาไนต์ ในน้ำเสียที่มีไชยาไนต์ และอิตีทีเอ โดยการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
2. เพื่อศึกษาผลของอิตีทีเอต่อการกำจัดไชยาไนต์ ในน้ำเสียที่มีไชยาไนต์ อิตีทีเอ และนิเกิล โดยการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
3. เพื่อศึกษาระดับพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดไชยาไนต์ในน้ำเสียที่มีไชยาไนต์ และอิตีทีเอ โดยการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch) ตลอดการวิจัย ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการทดลองจะเริ่มจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และนำผลที่ได้ไปใช้กับน้ำเสียจริง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองจะใช้ทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่ได้รับจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง และเก็บทั้งสิ้น 4 ครั้ง จากนั้นวิเคราะห์หาลักษณะของน้ำเสีย แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ 1. น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอิตีทีเออย่างเดียว 2. น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไชยาไนต์และอิตีทีเอ 3. น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไชยาไนต์ อิตีทีเอ และนิเกิล และ 4. น้ำเสียจริง เป็นการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพ ปริมาณเฟอร์เรตที่เหมาะสม พีเอชที่เหมาะสม ผลกระทบจากความเข้มข้นของไชยาไนต์ และผลกระทบจากปริมาณของอิตีทีเอ โดยอัตราส่วนปริมาณสารเคมีต่อไชยาไนต์ที่ใช้ หาได้จากการคำนวณตามสมการเคมีและแปรค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เหมาะสม พีเอชที่ใช้ในการทดลองใช้ค่าพีเอช 5 ค่า คือ 8.0 9.0 10.0 11.0 และ 12.0

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของอิตีทีเอต่อการกำจัดไชยาไนต์ด้วยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
2. ทราบถึงประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไชยาไนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของไชยาไนต์กับอิตีทีเอ ด้วยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต
3. นำแนวทางไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียของโรงงานเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

บทที่ 2

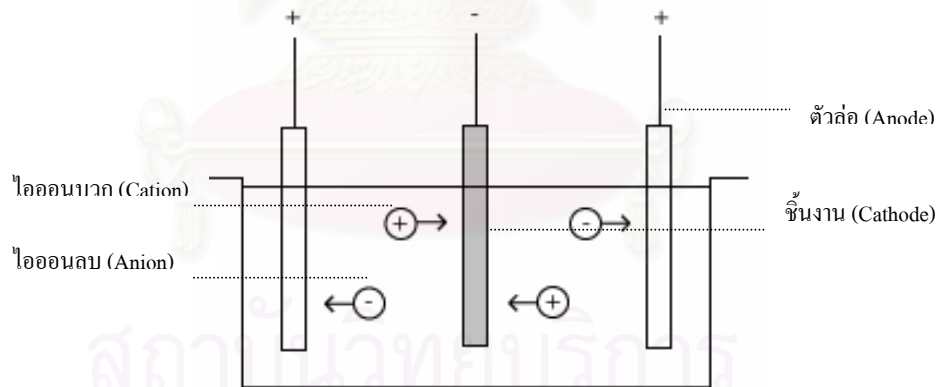
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการชุบโลหะแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะและข้อจำกัดของชิ้นงานที่นำมาชุบ วัตถุประสงค์ในการชุบ ลักษณะของงานชุบ และสารเคมีที่ใช้

2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยนำเอาชิ้นงานที่ทำการชุบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะไปเคลือบผิวชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วบวก ซึ่งเรียกว่า ตัวล่อ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบผิวเสมอไป แล้วนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มในน้ำยาชุบซึ่งมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ ปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบโลหะเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.1

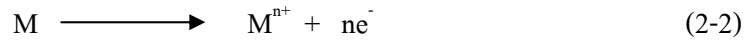


รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สาโรช, 2535)

ที่ขั้วลบ ไอออนของโลหะซึ่งเป็นไอออนบวกในสารละลายจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะเคลือบผิวที่ชิ้นงาน ดังสมการ

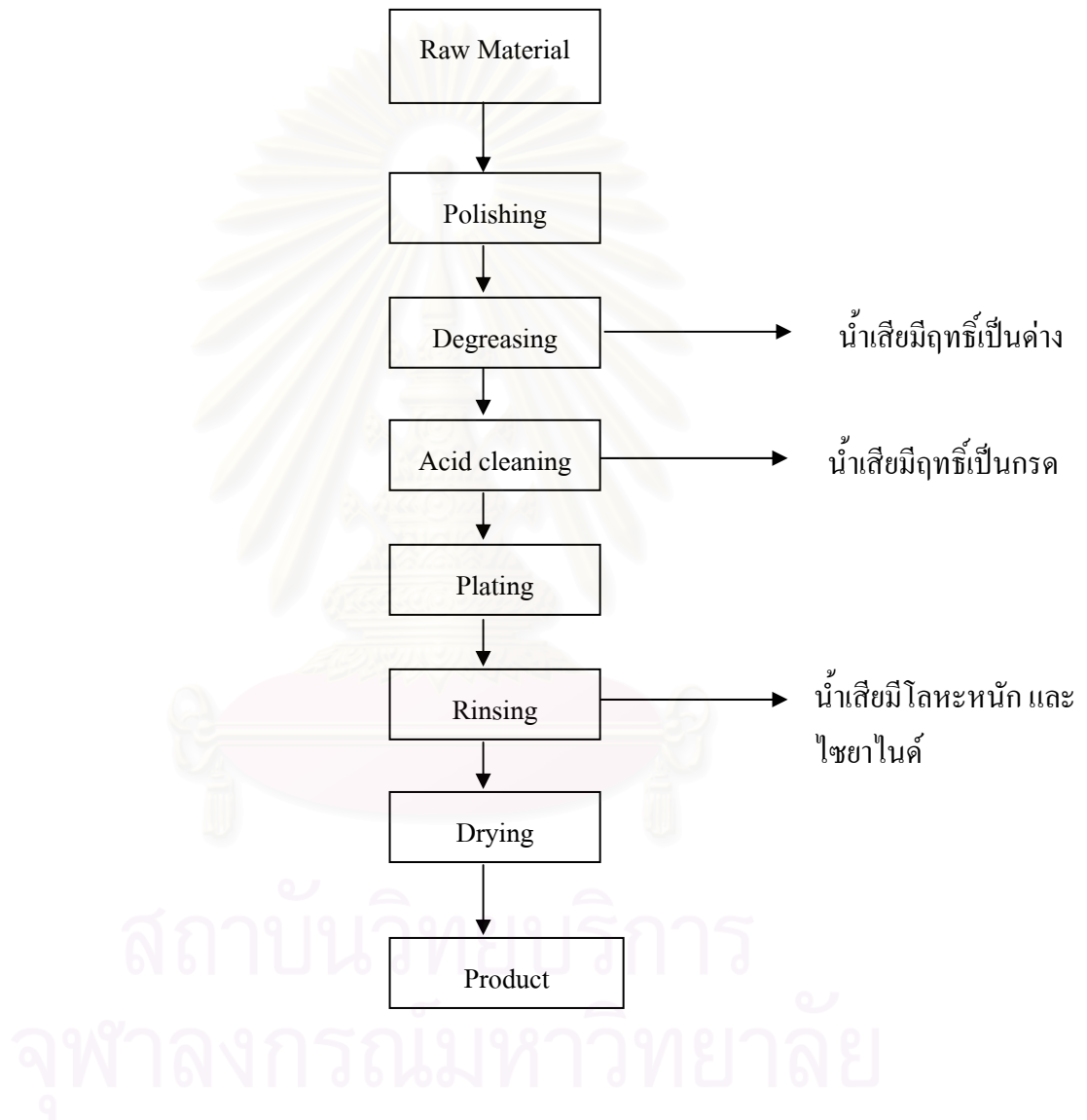


ที่ขั้วบวก ถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบบนชิ้นงาน โลหะนั้นก็จะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอนกับวงจรภายนอก และไอออนบวกจะสลายลงสู่สารละลาย ดังสมการ



2.1.2 ขั้นตอนในการชุบโลหะ

ขั้นตอนการชุบโลหะประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึงการขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ ทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน นำชิ้นงานไปจุ่มในกรดเพื่อเอาสนิมออก จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยาซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด ต่อไปจึงนำชิ้นงานไปล้างน้ำแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะทั่วไป (จารุวรรณ, 2542)

ความซับซ้อนของขั้นตอนการชุบโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นวัตถุดิบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการชุบ โดยวัตถุดิบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กท้อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม

2.1.1 การขัดชิ้นงานก่อนชุบ (Polishing) แบ่งออกเป็นการขัดหยาบ และการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยเอารอยขีดข่วนลึกๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อการเพื่อลบบรอยจากการขัดหยาบ ทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใช้อ่างหมุนซึ่งมีหินขัดบรรจุอยู่ภายใน

2.1.2.1 การกำจัดไขมัน (Degreasing) ทำโดยการใช้วิธีต่อไปนี้

- กำจัดโดยใช้ไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapor degreasing) ทำโดยการนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน และให้ความร้อนจนถึง 86 องศาเซลเซียส ซึ่งไตรคลอโรเอทิลีนจะกลายเป็นไอมากระทบกับท่อขุดทำความสะอาดบริเวณปากของถังและชิ้นงาน และกลั่นตัวจับอยู่บนผิวโลหะทำการชำระล้างไขมัน หรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soda clean) ทำโดยการแช่ชิ้นงานในถังเหล็กหรือถังสแตนเลสที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

2.1.2.2 การทำความสะอาดด้วยกรดจุ่มเงา (Pickling and dipping) เป็นการกัดเอาสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมอื่นออกจากผิวโลหะ โดยการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นประมาณ 5-10% หรืออาจจะใช้กรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ส่วนกรดอินทรีย์อื่นๆที่มีการใช้งาน ได้แก่ กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

โดยบ่อยครั้งอาจจะมีการใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดออกซาลิก และอิดีทีเอ มาใช้เป็นน้ำยาทำความสะอาดผิว (Moyer, 1994) ซึ่งกรดอินทรีย์นั้นจะมีสภาพความเป็นกรดน้อยกว่า ดังนั้นปัญหาเรื่องการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่าการใช้กรดอินทรีย์

2.1.2.3 การชุบโลหะประเภทต่างๆ (สารโรซ, 2535)

ก) การชุบทองแดง เป็นการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกก่อนนำไปชุบโลหะชนิดอื่น เช่น ชุบงานที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีผสมก่อนนำไปชุบนิกเกิล เพราะหากเอาชิ้นงานที่มีรอยบัดกรีหรืองานที่มีสังกะสีอยู่ไปชุบในน้ำยานิกเกิล สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที การชุบทองแดงแบ่งออกเป็น การชุบทองแดงแบบต่าง และแบบกรด การชุบแบบต่างนั้นจะมีกำลังการเคลือบผิวดีมาก และการเกาะจับติดแน่น เหมาะสำหรับการชุบรองพื้นชิ้นแรกก่อนการชุบแบบกรด และชุบนิกเกิลเงา ส่วนงานสังกะสีหล่อที่ไม่สามารถชุบทองแดงแบบกรดได้โดยตรง ก็ต้องนำมาชุบแบบต่างก่อน โดยทั่วไปการชุบทองแดงแบบต่าง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- แบบสไตรค์ (Strike Bath)
- แบบร็อกเชล (Rochelle Bath)
- แบบประสิทธิภาพสูง (High efficiency Bath)

ส่วนการชุบแบบกรดนั้นจะได้ชิ้นงานที่มีความเงางามมาก นิยมชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนทำการชุบด้วยนิกเกิลเงา

ข) การชุบนิกเกิล การชุบเคลือบนิกเกิลลงบนแผ่นเหล็ก ทองเหลือง และโลหะอื่นๆนั้น เพื่อทำการรักษาและป้องกันเนื้อโลหะ และยังทำให้ผิวดูสวยงาม โดยปกติแล้วจะตามด้วยการชุบโครเมียม เพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด การชุบนิกเกิลสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

- นิกเกิลด้าน (Dull Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลกึ่งเงา (Semi bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม ทอง หรือ ทองเหลือง
- นิกเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานซึ่งไม่ต้องการให้เกิดการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่นดำ
- นิกเกิลซาติน (Satin Nickel) ได้สีเหลืองเหมือนเพชร หรือผิวไข่มุกเงา
- นิกเกิลแบบหนา (Heavy electrodeposition of Nickel) ชุบงานที่สึกหรอ

ค) ชุบโครเมียม การชุบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดหนา (Hard Chromium) การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบางนั้น จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนทำการชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะบางมาก การชุบชนิดบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไป และทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดงก่อนการชุบนิกเกิล และรองพื้นด้วยนิกเกิลก่อนการชุบโครเมียม เหมาะสำหรับงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม ฯลฯ ตัวล่อโครเมียมใช้โลหะระหว่างตะกั่วกับดีบุก หรือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง โดยอัตราส่วนตะกั่ว 93 % กับดีบุก 7% หรือตะกั่ว 92 % กับพลวง 8 % ตามลำดับ

ส่วนการชุบชนิดแข็ง (Hard chromium) นั้นสามารถชุบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลรองพื้นก่อน โดยคุณสมบัติของชิ้นงานหลังการชุบโครเมียมจะเป็นดังนี้

- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำ
- มองดูสวยงาม
- ใช้แม่เหล็กดูดได้

ง) การชุบทอง ทองเป็นโลหะที่มีค่าสูง สามารถละลายน้ำได้ดีในกรดกัดทอง มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี สีสวยงาม นิยมชุบในชิ้นงานที่เป็นเครื่องประดับ หรือในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชุบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ต่อมาได้มีการปรับปรุงน้ำยาชุบโดยการผสมโลหะอื่นเข้าไป ทำให้ผิวชุบอยู่ในรูปของอัลลอยด์ ซึ่งมีผิวแข็งกว่าเนื้อทองธรรมดา ใช้ชุบบนเครื่องที่ต้องการให้ทนต่อการสัมผัสเสียดสี เช่น นาฬิกา ขอบแว่นตา หรือไฟแช็ค เป็นต้น น้ำยาชุบทองแบ่งออกเป็น น้ำยาชุบทองชนิดเป็นกลาง น้ำยาชุบทองแบบกรด และน้ำยาชุบทองแบบไม่มีไซยาไนด์

จ) การชุบสังกะสี นิยมใช้กับชิ้นส่วนของรถยนต์ การชุบชิ้นงานเป็นหลักสามารถทำได้โดยตรงไม่ต้องมีการชุบรองพื้น การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และการชุบสังกะสีแบบด่าง การชุบแบบด่างสามารถแบ่งได้เป็นแบบมีไฮยาไนด์สูง มีไฮยาไนด์ต่ำ และไม่มีไฮยาไนด์ การชุบแบบกรดนั้นจะไม่มีไฮยาไนด์เป็นส่วนผสม

2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากแหล่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมันและน้ำมัน
- น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- น้ำยาเสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ บริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานมีปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมันและไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้เกิดอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากการทิ้งน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลออกมาเนื่องจากอุบัติเหตุมีมลพิษสูง แต่นานๆจึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และปริมาณไม่มากนัก ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (วัลย์รัตน์, 2542)

สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมันของแข็งกรดต่างไฮยาไนด์	สารประเภทไขมัน ยาขัด, ทราซ กรดกำมะถัน, กรดเกลือ, กรดไนตริก, กรดกัดแก้ว, กรดฟอสฟอริก, กรดน้ำส้ม โซดาไฟ, โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมซัลเฟต, โซเดียมฟอสเฟต สารประกอบไฮยาไนด์ต่างๆ	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ การขัด การจุ่มกรดกระตุ้นผิว, การขัดเงาด้วยสารเคมี	การแยกไขมัน ตกตะกอน ทำให้เป็นกลาง ทำให้เป็นกลาง
โลหะหนักในรูปของไอออน	โลหะหนักที่มีค่า ทองแดง, นิกเกิล, เหล็ก, แคดเมียม, สังกะสี, อลูมิเนียม, แมงกานีส	ตั้งล้างไขมัน, ทำให้เป็นกลาง, กัดผิวอลูมิเนียม ล้างด้วยไฟฟ้า หรือจากถังชุบ อยู่ในน้ำยาจากการเตรียมก่อนชุบ	ทำการออกซิเดชันโดยใช้สารประเภทคลอรีน ใช้ด่าง
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบ, การทำโครเมต	การทำรีดักชันและการตกตะกอน
ไอออนเชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของทองแดงและนิกเกิล	น้ำยาชุบ	ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเกิดการแยกตัว ทำให้เป็นกลางแล้วจึงตกตะกอน

2.2 ไชยาไนต์

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์

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

2.2.2 การแบ่งประเภทของไชยาไนต์

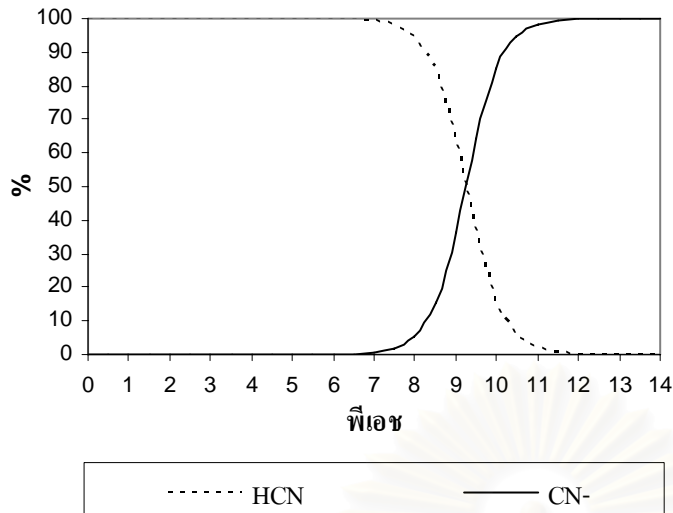
สารประกอบไชยาไนต์จะสามารถแบ่งออกเป็นประเภทได้ โดยใช้ลักษณะของโมเลกุลซึ่งจะแบ่งเป็น 1. สารประกอบไชยาไนต์เชิงเดี่ยว (Simple Cyanide) หมายถึง ไชยาไนต์อิสระ และ สารประกอบไชยาไนต์กับโลหะอัลคาไลน์ 2. สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน (Complex Cyanide) หมายถึง สารประกอบไชยาไนต์กับโลหะหนักทุกประเภท (Zheng และคณะ ,2003)

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

2.2.2.1 ไชยาไนต์อิสระ

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



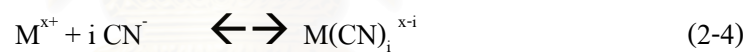


รูปที่ 2.3 ปริมาณไซยาไนด์ไอออน (CN-) กับกรดไซยานิก (HCN) ที่พีเอชต่างๆ

2.2.2.2 สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน

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

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์เกิดขึ้นจากการจับตัวกันของไซยาไนด์ไอออนกับโลหะหนัก (M) ที่ละลายอยู่ในน้ำดังสมการที่ (2-4)



สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนักมักพบมากในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เช่น การชุบสังกะสี จะพบสารประกอบเชิงซ้อนกับสังกะสี และการชุบโครเมียมก็จะมีพบสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมกับ ทองแดง และ นิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้รองพื้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กอีกด้วย เนื่องจากการล้างเหล็กด้วยไซยาไนด์เพื่อป้องกันสนิม

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

โลหะหนัก	$\log \beta$		
เหล็ก (Fe^{2+})	$Fe(CN)_6^{4-}$ 52.44	$FeH(CN)_6^{2-}$ 50	$FeH_2(CN)_6^-$ 45.61
เหล็ก (Fe^{3+})	$Fe(CN)_6^{3-}$ 52.63	-	-
ทองแดง (Cu^+)	$Cu(CN)_2^-$ 24.0	$Cu(CN)_3^{2-}$ 28.6	$Cu(CN)_4^{3-}$ 30.3
นิกเกิล (Ni^{2+})	$Ni(CN)_2$ 14.59	$Ni(CN)_3^-$ 22.64	$NiH_3(CN)_3^{2+}$ 43.95
สังกะสี (Zn^{2+})	$Zn(CN)_2$ 11.07	$Zn(CN)_3^-$ 16.05	$Zn(CN)_4^{2-}$ 16.72

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

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

2.2.2.3 สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ

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

2.2.3 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาอย่างต่อน้ำกับโปรตีนและเอนไซม์หลายชนิดในร่างกาย เช่น เอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส ที่จำเป็นต่อการหายใจในระดับเซลล์ในร่างกายสิ่งมีชีวิต และ ฮีโมโกลบิน ซึ่งจะมีผลทำให้เซลล์ขาดออกซิเจน เลื่อม หรือตายได้ (ประยูร ฟองสถิตย์กุล และคณะ, 2542) ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก ทางการหายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนังและลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณน้อย จะเกิดอาการพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมองอาจปรากฏอาการทางโรคจิต ประสาทตาเลื่อม หรือฝ่อไปได้ ส่วนผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างมากจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยจะมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงชีวิต (Rania และ Roldan, 2004) ระดับความเป็นพิษ

ของไซยาไนด์ได้มีการทดลองและกำหนดเป็นค่าระดับอันตรายไว้ดังตารางที่ 2.4 โดย TLV หมายถึง Threshold Limit Value คือ ความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสทางอากาศหลาย ๆ วัน ต่อเนื่องกัน โดยไม่เกิดผลเสียหรืออันตรายต่อสุขภาพ และ LD₅₀ หมายถึง Median Lethal Dose คือ ปริมาณสารที่เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วจะทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่มตายลงครึ่งหนึ่ง

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

สารประกอบ	สูตร	สถานะ	TLV	LD ₅₀
ไฮโดรเจนไซยาไนด์	HCN	ก๊าซ	5 มิลลิกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร	1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โพแทสเซียมไซยาไนด์	KCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โซเดียมไซยาไนด์	NaCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร	6.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
ไซยาโนเจนคลอไรด์	CNCl	ก๊าซ	0.3 ppm	
โซเดียมไซยาเนต	NaCNO	ของแข็ง		260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โพแทสเซียมไซยาเนต	KCNO	ของแข็ง		320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์	K ₃ [Fe(CN) ₆]	ของแข็ง		1600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)

TLV (Threshold Limit Value) : ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารมลพิษที่มนุษย์สามารถรองรับได้ โดยทั่วไปเป็นมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

LD₅₀ : ความเข้มข้นของสารมลพิษในรูปของมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักร่างกายที่ทำให้สัตว์ทดลองมีชีวิตเหลือรอดอยู่ร้อยละ 50 ภายหลังจากการสัมผัสในเวลาหนึ่งๆ

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ.2521))	มีค่าสูงสุด 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521))	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายจากโรงงาน (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539))	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับการบริโภค (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542))	ต้องไม่มีเลย แต่ได้กำหนดเกณฑ์อนุโลมสูงสุดไว้ให้มีได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย (ต่อ)

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539))	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ.2534))	ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537))	คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งประเภทที่ 2-4 กำหนดให้มีไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537))	แหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2-4 กำหนดให้มีค่าไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.4 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

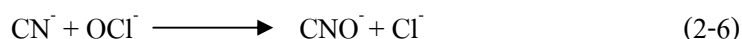
ในการกำจัดไซยาไนด์นั้น จะต้องอาศัยกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการเติมสารเคมีที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือไม่มีความเป็นพิษ ซึ่งวิธีการต่างๆที่มีการใช้กำจัดนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline chlorination)

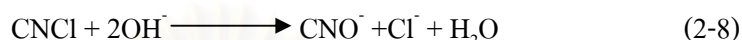
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือก๊าซคลอรีนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยานตอย่างรวดเร็ว เมื่อมีค่าพีเอชมากกว่า 10 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 30 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งไซยานตที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์อย่างมาก (ประมาณ 1000 เท่า) จากนั้นไซยานตจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปด้วยคลอรีนมากเกินไป กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่พีเอชตั้งแต่ 10 ขึ้นไป และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานหลายชั่วโมง แต่หากน้ำเสียมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 จะใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 1 ชั่วโมง กลไกของปฏิกิริยาดังกล่าวสรุปได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยานต ซึ่งสมการต่อไปนี้จะสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาขั้นตอนแรก





อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงนั้นซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาตามสมการที่ 2-5 และ 2-6 ซึ่ง Chamberlain และ Synder (1965) ได้เสนอว่าการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตนั้น จะเกิดขึ้นก่อนดังสมการต่อไปนี้

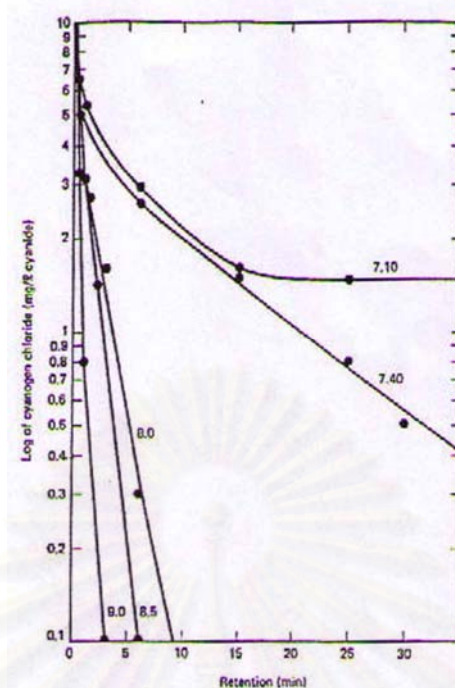


การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วทุกช่วงพีเอช แต่การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนต จะเกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 7 แต่จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 8.5-9.0 (รูปที่ 2.4) ดังนั้นปฏิกิริยาในขั้นแรก ควรจะมีพีเอชประมาณ 9-10 เพื่อให้มั่นใจว่าปฏิกิริยาตามสมการ 2-8 นั้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 การเปลี่ยนแปลงไซยาเนตไปเป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไนโตรเจน (N_2) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่พีเอช 8.5 และเมื่อคลอรีนมากเกินไป กลไกของปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ 2-11 และ 2-12

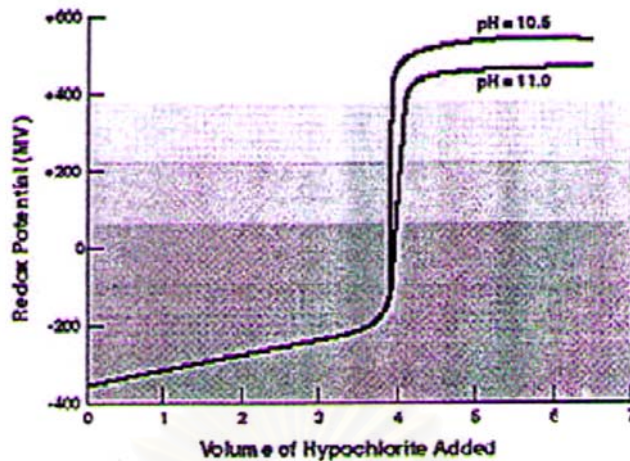


โดยกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) จะเป็น Active Chlorine Species ที่ไปทำลายไซยาเนต กรดไฮโปคลอรัสเพียงเล็กน้อยก็สามารถออกซิไดซ์ไซยาเนตได้ เช่น ที่พีเอช 8.5 (มีกรดไฮโปคลอรัสประมาณร้อยละ 10) ไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์เกือบจะทั้งหมดภายใน 10 นาที และถ้าหากพีเอชมีค่าลดลง จะทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นได้เร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.4 ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนต (Benfield และคณะ, 1982: 428)

นอกจากจะใช้ค่าพีเอชเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาแล้ว อีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมปฏิกิริยา คือ ค่า Oxidation-Reduction potential (โออาร์พี, ORP หรือ Redox potential) ในปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ค่าโออาร์พีควรอยู่ในช่วง +325 ถึง +400 มิลลิโวลต์ ส่วนในปฏิกิริยาขั้นที่ 2 โออาร์พีควรอยู่ในช่วง +600 ถึง +800 มิลลิโวลต์ (U.S. EPA, 2000) โออาร์พีจะวัดสถานะของปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายอิเล็กตรอน จากไอออนที่ถูกออกซิไดซ์ไปยังสารออกซิไดซ์ เช่น คลอรีนรับอิเล็กตรอนจากไซยาไนด์เพื่อที่จะออกซิไดซ์ไซยาไนด์ถ้าไอออนที่ออกซิไดซ์ เช่น ไฮโปคลอไรท์ รับอิเล็กตรอน จะทำให้ค่า โออาร์พีสูงขึ้น ในทางกลับกันไอออนที่รีดิวซ์ เช่น ไซยาไนด์ ให้อิเล็กตรอนจะทำให้ค่าโออาร์พีลดลง ค่าโออาร์พีของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนที่รีดิวซ์และไอออนที่ออกซิไดซ์ในสารละลาย



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโออาร์พีกับปริมาณไฮโปคลอไรท์ที่เติม (Honeywell, 2003)

2.2.4.2 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide oxidation)

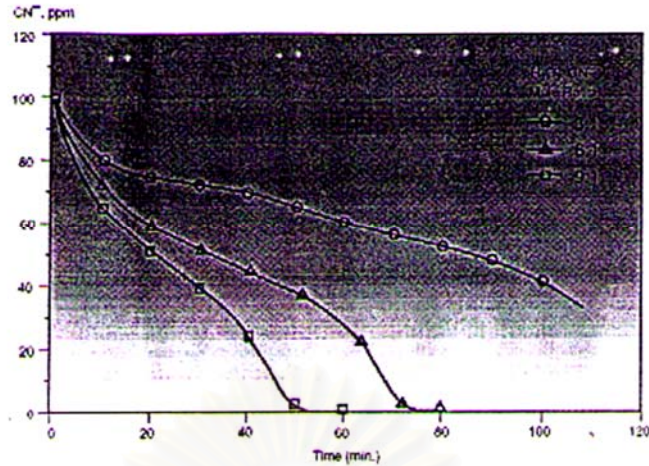
โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยานตังสมการ 2-13



ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 9 โดยมีช่วงที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10 ถึง 11 ดังนั้นจึงไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่เป็นพิษ

ในการกำจัดไซยาไนด์อิสระ จะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3-6 โมล ต่อ ไซยาไนด์ 1 โมล (Solvay Interlox, 2001) ซึ่งอัตราการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกิน และอุณหภูมิ โดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ทองแดง จะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

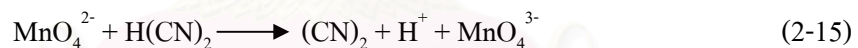
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



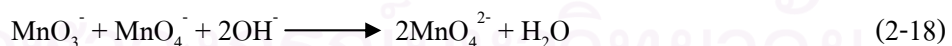
รูปที่ 2.6 การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มก./ล. (Solvay Intercox, 2001)

2.2.4.3 การออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Permanganate oxidation)

การทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ที่พีเอช 12-14 เนื่องจากที่พีเอชต่ำกว่า 6 จะไม่เกิดปฏิกิริยา และที่พีเอช 6-9 จะเกิดก๊าซไซยาโนเจน ($(\text{CN})_2$) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง กลไกของปฏิกิริยาที่พีเอช 6-12 จะเป็นไปตามสมการที่ 2-14 ถึง 2-16 (วิสิทธิ์, 2540)



เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช ที่พีเอช 12-14 กลไกของปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ 2-17 ถึง 2-18

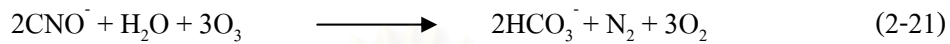


ที่พีเอช 12-14 เช่นเดียวกัน แต่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช จะเกิดแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้ตามสมการ 2-19

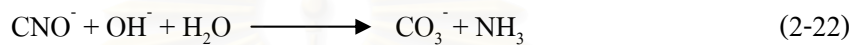


2.2.4.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozonation)

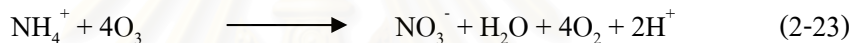
เป็นการทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการเติมโอโซน (O₃) โอโซนที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ให้เปลี่ยนเป็นก๊าซไซยาเนต ซึ่ง Selm (1959) และ Tyler และคณะ (1951) เชื่อว่าการออกซิไดซ์ไซยาเนตไปเป็นไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นไปตามปฏิกิริยาดังนี้



ในสารละลายที่มีสภาพเป็นด่างจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนตดังสมการ



แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไนเตรต ซึ่งปฏิกิริยาที่สังเกตได้โดย Singer และ Zili (1975) เป็นไปดังนี้



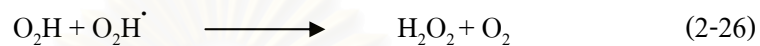
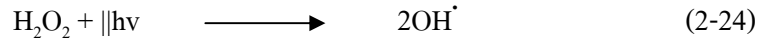
ที่พีเอช 9-12 จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10-15 นาที เมื่อเติมทองแดงลงไปเล็กน้อยจะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น (Patterson, 1985) วิธีนี้จะสามารถทำลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิเกิล สังกะสี แคดเมียม หรือทองแดงได้ แต่สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโคบอลต์ ทอง หรือเหล็กจะทำลายได้ยาก แม้ว่าจะมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง หรือแมงกานีส แต่การใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะช่วยให้สามารถออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ได้อย่างสมบูรณ์

2.2.4.5 การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV oxidation)

การใช้รังสียูวีจะทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะละลายน้ำได้บางส่วน เนื่องจากน้ำเสียจะต้องไหลผ่านเพื่อรับรังสียูวีเข้มข้น ทำให้ใช้ได้กับเฉพาะสารละลายที่ค่อนข้างใส วิธีนี้จึงมีข้อจำกัด ส่วนการออกซิไดซ์ด้วยรังสียูวีร่วมกับการใช้โอโซนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะช่วยให้สามารถออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ การใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูล OH[•] (Hydroxyl Radical) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง U.S. EPA (2000) แนะนำว่าแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมจะให้ช่วงแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 280 นาโนเมตร ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซนจะดูดซับรังสีช่วงนี้ไว้ ข้อดีของการออกซิไดซ์ด้วยรังสียูวี/โอโซน และรังสียูวี/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ ไม่เกิดสารที่ไม่ต้องการ (เช่น แอมโมเนีย) นอกจากนี้การออกซิไดซ์ด้วยรังสียูวียังสามารถที่จะใช้ร่วมกับ Fenton's reagent และไททานเนียมไดออกไซด์ได้ด้วย

สมการด้านล่างได้สรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซน ร่วมกับรังสียูวี (U.S. EPA, 2000)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ :



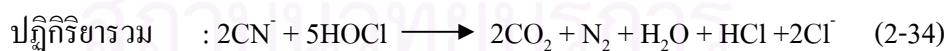
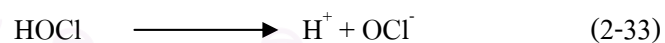
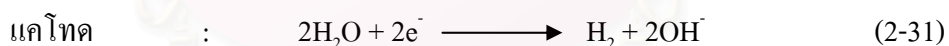
โอโซน :



2.2.4.6 การสลายตัวด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Decomposition)

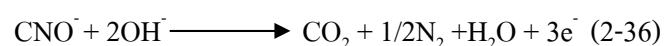
สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

1. วิธีการไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม ซึ่งเป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ (OCI) โดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ ไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นจะไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป วิธีนี้สามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปดังนี้

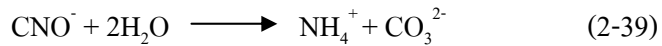
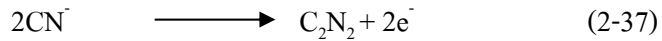


2. การออกซิเดชันที่แอโนดโดยตรง โดยจะเปลี่ยนไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งจะถูกละลายต่อไปได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซาเลตไอออนขึ้นอยู่กับพีเอช (Hwang และคณะ, 1987) เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงๆ (มากกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

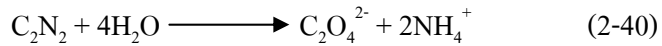
ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเป็นด่างสูง (พีเอช 12) :



ในสารละลายที่เป็นกลางและเป็นด่างอ่อน (พีเอช 7.0-11.7)

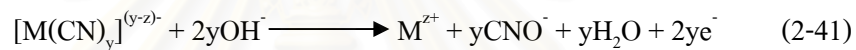


ในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน (พีเอช 5.2-6.8)

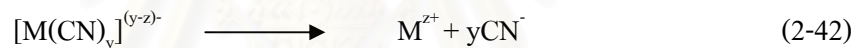


น้ำเสี้ยวอุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยโลหะหนักและไซยาไนด์ จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ เช่น แคลเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และเหล็ก ไซยาไนด์จะรวมตัวอย่างรวดเร็วกับไอออนของโลหะหนัก, M^{z+} ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร, $[\text{M}(\text{CN})_y]^{(y-z)-}$ กลไกในการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนนี้ยังไม่มี การยืนยัน แต่ได้เสนอไว้อยู่ 2 กลไกคือ

1. การออกซิไดซ์โดยตรงของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ไปเป็นไซยานेट (เกิดขึ้นที่ แอนไอค)



2. การแตกตัวทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ในสารละลาย



จากนั้นจึงเกิดการออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยานेट ดังสมการที่ 2-35 ถึง 2-40 ผลกระทบของโลหะหนักต่อการออกซิเดชันของไซยาไนด์ ได้มีการรายงานไว้หลายราย (Dart และคณะ, 1963; El-Ghaoui และคณะ, 1982; Hine และคณะ, 1986; Ho และคณะ, 1990) สามารถสรุปได้ว่า สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และแคลเมียม จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้นในขณะที่เหล็กจะส่งผลเสียต่อกาเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไซยาไนด์

2.2.4.7 วิธีอื่นๆ ที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์ แต่มีการใช้งานอยู่น้อย มีดังต่อไปนี้

- กระบวนการคาสโตน (Kastone process) (Patterson, 1985)
- การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Patterson, 1985)
- การทำลายด้วยอัลดีไฮด์ (Eilbeck และ Mattock, 1987)
- การทำลายด้วย Fenton's Reagent (Eilbeck และ Mattock, 1987)
- การทำลายด้วย SO_2/Air (INCO, 1993)
- การออกซิไดซ์ด้วยความร้อน (Hartinger, 1994)
- การตกตะกอนไซยาไนด์ด้วยเกลือของ Fe(II) (Hartinger, 1994)
- การทำลายด้วยออกซิเจน (Hartinger, 1994)

2.2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์

สาโรช (2535) ได้ศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ครอบคลุมการชุบโครเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี และน้ำเสียจริงจากโรงงานเป็นกรณีตัวอย่าง โดยการเปรียบเทียบการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรด์และแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ในการออกซิไดซ์ตัวอย่างไซยาไนด์ ให้เป็นไซยาเนต โดยไซยาไนด์ในน้ำเสียมีความเข้มข้น 200 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 11 ซึ่งผลการทดลองพบว่าโซเดียมไฮโปคลอไรด์และแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ 1.25 เท่าของปริมาณที่ใช้ในทางทฤษฎี สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดพบว่า การใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรด์ ประมาณร้อยละ 50

Futakawa และคณะ (1994) ได้สรุปการดำเนินงานตั้งแต่ปี 1991 ของโรงงานนำร่องที่ Sendai ของบริษัท NPC Sendai Works โดยใช้ระบบ OG-CWO (catalytic wet oxidation) ในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าซีไอดีสูง ซึ่งองค์ประกอบหลักของน้ำเสีย คือ โพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ ($K_4[Fe(CN)_6]$) หรือ โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ ($K_3[Fe(CN)_6]$) มีค่าไซยาไนด์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 10,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสามารถในการบำบัด 2 ตัน/วัน รับน้ำเสียทั้งหมดจากกระบวนการผลิต Tufftride ซึ่งผลการดำเนินงานพบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้เหลือน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชลชัย และคณะ (2540) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีการปนเปื้อนของโลหะหนักและไซยาไนด์ ซึ่งผลการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบทองที่พีเอช 11 มีความเข้มข้นของไซยาไนด์เท่ากับ 58.78 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ประมาณ 2.26 เท่าของที่ใช้ในทางทฤษฎี ในการกำจัดไซยาไนด์และตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนักโดยทำการขยายเวลาของการออกซิไดซ์ขึ้นที่หนึ่งจากเดิม 20 นาที เป็น 1 ชั่วโมงจะทำให้โลหะหนักทั้งคอปเปอร์ และนิกเกิล มีปริมาณที่เหลืออยู่ต่ำกว่ามาตรฐานและสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้หมด

มงคล และ จารุวรรณ (2542) แนะนำให้ใช้วิธีอัลคาไลน์ คลอรีเนชัน ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบของไซยาไนด์อิสระ โดยการเติมไฮโปคลอไรต์ในสารละลายต่าง โดยแนะนำให้ใช้ค่าพีเอชและค่า ORP (Oxidation reduction potential) ในปฏิกิริยาขั้นแรก และขั้นที่สองเป็น $10.5 \geq 300$ mv และ 7,600 mv ตามลำดับและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาแต่ละขั้นมากกว่า 10 นาที

Rader, W.S. และคณะ (1995) ศึกษาการบำบัดน้ำจากเหมืองขุดแร่ (Precious-Metal Mill Tailing) โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในการทดลองที่พีเอช 11 พื้นที่ผิวน้ำ 350 ตารางเซนติเมตร ลึก 3 เซนติเมตร และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ทุกชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยไซยาไนด์อิสระและ

สารประกอบเชิงซ้อนส่วนหนึ่งถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก ทองแดง สังกะสี พรอท และสารหนูจะถูกทำให้เสถียรในรูปของตะกอน

Sharma, V.K. และคณะ (1998) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโพตัสเซียมเปอร์เรต ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆกัน พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นมีค่า Energy of activation 38.9 ± 1.0 กิโลจูลต่อโมลที่พีเอช 9.0 และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-42)



การทดลองที่พีเอช 7.5 9.0 และ 12.0 พบว่าที่พีเอช 9.0 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ปริมาณโดยโมลของเปอร์เรตกับไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่พีเอช 7.5 จะพบไซยาเนตและไนไตรท์เป็นสารผลิตภัณฑ์และที่พีเอช 9.0 และ 12.0 จะพบเพียงไนไตรท์โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ที่ถูกออกซิไดซ์ต่อไนไตรท์เป็น 1 ต่อ 1 สำหรับการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงชุบโลหะพบว่ามีประสิทธิภาพดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆได้

Dursun, A.Y. Calik, A. และ Aksu, Z. (1999) ศึกษาการย่อยสลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก (II) หรือ เฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanide) โดยใช้จุลินทรีย์ *Pseudomonas Fluorescens* ในสภาพที่มีกลูโคสและออกซิเจน โดยเป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากพีเอชความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ ความเข้มข้นของกลูโคส และอัตราการเติมอากาศทดลองในถังหมักแบบ batch ผลการทดลองโดยใช้เฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดี่ยวพบว่าไม่เกิดการเติบโตของจุลินทรีย์ ส่วนการทดลองโดยใช้กลูโคสร่วมกับเฟอร์โรไซยาไนด์ โดยมีเฟอร์โรไซยาไนด์เป็นแหล่งอาหารเดี่ยวพบว่าจะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้และเกิดการย่อยสลายของเฟอร์โรไซยาไนด์ โดยที่สภาวะที่มีพีเอช 5 อัตราการกวน 150 รอบต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.15 vvm พบว่ามีอัตราการย่อยสลายสูงสุด 30.7 มิลลิกรัมต่อกลูโคสต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของเฟอร์โรไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลูโคส 465 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจุลินทรีย์จะใช้กลูโคสเป็นสารอาหารหลัก การขาดขบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์จะเริ่มต้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โมเดลทางคณิตศาสตร์แบบ Non-com inhibition ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากเฟอร์โรไซยาไนด์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และพารามิเตอร์ที่พอดีที่สุดคำนวณโดยใช้วิธี Non-linear regression

Lukey, G. C. และคณะ (1999) ศึกษาหาชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับทองแดง (I) ในสารละลายที่มีความเค็มสูง พบว่าชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลของไซยาไนด์ต่อโมลของทองแดง สำหรับสารละลายที่มีความเค็มสูง ซึ่งหากมีสัดส่วนโมลของไซยาไนด์ต่อโมลของทองแดงเท่ากับ 2.2 ถึง 2.5 จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดงในรูปของ $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^-$ แต่สำหรับสารละลายที่ไม่มี

ความเค็ม จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดงในรูปของ $[Cu(CN)_2]$ และ $[Cu(CN)_3]^-$ มากที่สุด แต่หากมีปริมาณไซยาไนด์อยู่มากกว่าปกติคือมีปริมาณ 200 มก./ล. จะสามารถพบสารประกอบเชิงซ้อนทองแดงไซยาไนด์ในรูปของ $[Cu(CN)_4]^{3-}$ อย่างเดียวเท่านั้น

Kurama, H. และ Catalsarik, T. (2000) ศึกษาการใช้เรซิน Lewatit MP62 กำจัดสารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีออกจากน้ำยาชะแร่ การทดลองทำโดยใช้คอลัมน์แก้วและใช้น้ำตัวอย่างจากบริษัท 100th Year Silver Cyanidation Plant ประเทศตุรกี น้ำตัวอย่างมีปริมาณสังกะสี 474 มิลลิกรัมต่อลิตร และไซยาไนด์ 720 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความจุของเรซินและผลกระทบเนื่องจากฟิออร์ที่มีต่อ Loading capacity ได้ศึกษาโดยใช้ Breakthrough curve ผลการทดลองพบว่า สารประกอบของไซยาไนด์กับสังกะสีถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์จนกว่าระบบจะถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough point)

Adhoum, N. และ monser, L. (2002) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยเงิน และนิเกิล พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับเงินได้ 45.7 มก./ก. และนิเกิล 4.3 มก./ก. และได้นำถ่านที่ดูดซับเงินและนิเกิลแล้วไปทำการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยระบบแบบคอลัมน์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเงินมีความจุมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับนิเกิล 2 เท่า และมากกว่าถ่านเปล่าๆถึง 4 เท่า ซึ่งคาดว่ากำจัดไซยาไนด์เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูป $Ag(CN)_2$ และ $Ni(CN)_4$ ผลการทดลองกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ Calaination ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

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

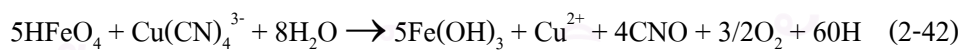
Aksu, Z. และ Gulen, H. (2002) ศึกษาการกำจัดเหล็ก (III) และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก (III) โดยวิธี Biosorption ด้วยเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* ในระบบแบบทีละเทที่มีค่าพีเอช 2 เพื่อดูความสามารถในการดูดซับสารทั้ง 2 ชนิดนี้ในลักษณะการดูดซับสารเดี่ยว (Single Component) และการดูดซับสองสาร (Dual Component) ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารสูงขึ้นถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับเหล็ก (III) และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็ก (III) ในการทดลองการดูดซับสารเดี่ยวพบว่า ค่า Biosorption rate และค่า Equilibrium uptake เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นและผลการทดลองที่ได้เข้ากันได้พอดี กับ Langmuir Model และ Redlich –Peterson Model และในการทดลองการดูดซับสองสารพบว่า ค่า equilibrium uptake ของเหล็ก (III) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของ

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

Chiang, K. Amal, R. และ Tran, T. (2003) ได้ศึกษากลไกในการออกซิไดซ์ไซยาไนด์โดยการใช้อัลตราไวโอเลต ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ โดยทดลองการแทนที่ กลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวไทเทเนียมด้วยฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ทราบว่า การออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ไม่ได้เกิดขึ้นโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH) แต่เกิดขึ้นโดยเรดิคัลของพื้นผิวไทเทเนียม ($\equiv \text{TiO}^\bullet$) และที่ความเร็วในการลดของไซยาไนด์ต่ำเนื่องจาก 1. การดูดซับของไซยาไนด์ที่พื้นผิวของไททาเนียมต่ำ 2. ไม่มีปฏิกิริยาที่เกิดจากไซยาไนด์กับไฮดรอกซิลเรดิคัล 3. เกิดการรวมตัวกันใหม่ของเรดิคัลของพื้นผิวไทเทเนียมอย่างรวดเร็ว

Parg, J. R. Shukl, S.S. และ Carrillo – Pedroza, F. R. (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้วิธีการออกซิไดซ์ โดยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนและการออกซิไดซ์ด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า การใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ดีทุกพีเอช ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง การใช้โอโซนสามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ดีและอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราการเติม โอโซนเท่านั้น และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีโดยเฉพาะเมื่อใช้แสงอาทิตย์

Sharma, V.K และคณะ (2005) ศึกษาการใช้เฟอร์เรตกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองแดง (I) หรือ คอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ ซึ่งพบได้มากในน้ำเสียจากเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งมีความคงตัวสูงกว่าไซยาไนด์อิสระ และมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และได้สมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-42) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ 5:1



ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของเหมืองแร่ทองคำที่สังเคราะห์จาก โซโอไซยาเนต ไซยาไนด์ และคอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ พบว่า เฟอร์เรตทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ผลการทดลองกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ ที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด 17.2 มก./ล. พบว่า สามารถกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดได้ประมาณ 70% ที่เฟอร์เรต 10 มก./ล. และต้องใช้เฟอร์เรต ถึง 1200 มก./ล. เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99%

คีลาซุซ คาร์บอซิ (2548) ศึกษาผลของสังกะสีในการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต โดยได้แบ่งการทดลองเป็นสามส่วน ส่วนแรกได้ทำการศึกษาถึงผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 85-100% ที่พีเอช 9 10 และ 11 ส่วนที่สองได้ทำการศึกษาถึงผลของสังกะสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและ อัตราการเกิดปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าสังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ในส่วนสุดท้าย เป็นการทดลองกับน้ำเสียโรงชุบสังกะสี ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงชุบสังกะสี ผลการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 100%

2.3 อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra-acetic acid, EDTA)

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ

อีดีทีเอเป็นสารคีเลตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะ การทำน้ำอ่อน สิ่งทอ และการผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ (Davis และ Green, 1999) หรืออาจจะมีการใช้ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดออกไซด์ของผิวโลหะออกจากผิวที่ต้องการถ่ายเทความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ หรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากอีดีทีเอมีความสามารถในการที่จะสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ (Madden et al., 1997) อีกทั้งยังมีการใช้อีดีทีเอเป็นน้ำยาแก๊สนิมในกระบวนการชุบโลหะอีกด้วย เนื่องจากอีดีทีเอจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ซึ่งลักษณะและสมบัติโดยทั่วไปของอีดีทีเอ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-6 และลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอีดีทีเอได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-6

2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ

สำหรับผลกระทบของอีดีทีเอต่อมนุษย์นั้น จะไม่มีผลกระทบโดยตรง แต่จะมีผลกระทบทางอ้อมมากกว่า เนื่องจากอีดีทีเอเป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น อีดีทีเอยังสามารถที่จะทำจับตัวกับโลหะหนักที่เป็นพิษจากดิน และตะกอน ทำให้สามารถละลายลงสู่ม่าน้ำ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่โลหะหนักจะเข้าไปยังสิ่งมีชีวิตมีเพิ่มมากขึ้น (Ramo และ Sillanpaa, 2001)

2.3.3 การกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสีย

วิธีการกำจัดอีดีทีเอที่มีการรายงานไว้มีอยู่หลายวิธี ได้แก่

การใช้โอโซน (Gilbert และ Hoffmann-Glewe, 1990)

การทำลายโดยใช้ความร้อน (Motekaitis et al. 1982)

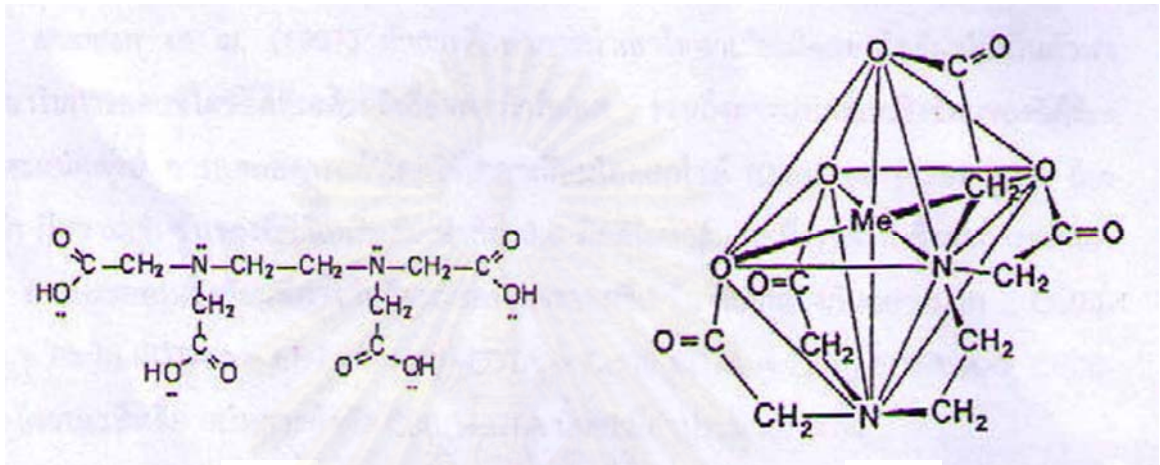
การออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยา (Davis และ Green, 1999; Vohra และ Davis, 2000)

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ramo และ Sillanpaa, 2001)

การออกซิเดชันด้วยสารเคมีเป็นสารออกซิเดนต์ผสม (Tucker et al. 1999)

การใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับ Fenton's reagent หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Chitra et al. 2003)



ก.

ข.

รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างของอีดีทีเอโดยทั่วไป และ (ข) เมื่อมีการจับโลหะหนัก

ตารางที่ 2.6 ลักษณะและคุณสมบัติของอีดีทีเอ

ลักษณะที่ปรากฏ	ผงสีขาว
สูตร โมเลกุล	$C_{10}H_{16}O_8N_2$
น้ำหนักโมเลกุล	292.25
ค่า Chelation	3.39 มิลลิโมล / กรัม
พีเอช	2.5-3.0 (สารละลายอิ่มตัว)
การละลายน้ำสูงสุด	0.1% โดยน้ำหนักที่ 25 องศาเซลเซียส

2.3.4 ทบทวนเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดอีดีทีเอ

Gilbert และ Hoffmann-Glewe, (1990) ทำการศึกษาการทำลายอีดีทีเอด้วยการเติมโอโซน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิโมล/ลิตร และอัตราการเติมโอโซน 10 มิลลิกรัม/ลิตร-นาท) ในสารละลายเป็นฟังก์ชันของพีเอช ที่พีเอช 3 ได้ทำการตรวจพบ Ethylenediamine diacetic acid, Iminodiacetic acid, Nitrilotriacetic acid, Glyoxylic-, Glycine, กรดฟอรั่มิก, แอมโมเนีย, ไนเตรท และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พร้อมทั้งวัดความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของอัตราการเติมโอโซนอีกด้วย

ส่วนที่พีเอช 7 ผลผลิตกันซ์ของการออกซิเดชันก็จะเหมือนกับพีเอช 3 ยกเว้นจะไม่เกิดครดฟอร์มิค และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้น

การทำคูลมวลคาร์บอนแสดงว่า ที่พีเอช 3 84 % และที่พีเอช 7 68-81 % ของคาร์บอนอินทรีย์อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่สามารถ ตรวจวัดได้ หลังจากออดีทีที่ถูกทำลายไป 100 % แล้วผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถที่จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ ในขณะที่เมื่อมี Ca^{2+} และ Cd^{2+} จะมีผลกระทบการกำจัดออดีทีที่เอเพียงเล็กน้อย ส่วน Fe^{3+} นั้นจะไม่มีผลใด ๆ ต่ออัตราการทำลายออดีทีที่เอ

Madden et al. (1997) ทำการศึกษาการนำเอาไททานเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์ออดีทีที่เอด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของออดีทีที่เอหรือกับโลหะหนักด้วย การทดลองการกระทำโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) 0.1% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นของออดีทีที่เอเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 มิลลิโมลาร์ และพีเอชคงที่ ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่ต่างกันก็จะมีอัตราการออกซิเดชันที่ แตกต่างกันอย่างมาก : $\text{Cu(II)-EDTA} > \text{Pb(II)-EDTA} > \text{EDTA} > \text{Ni(II)-EDTA} \approx \text{Cd(II)-EDTA} \approx \text{Zn(II)-EDTA} > \text{Cr(III)-EDTA}$ โดยประสิทธิภาพในการกำจัด Cu(II)-EDTA นั้นมีค่าประมาณ 60 %

อัตราการกำจัดที่โอซี และการเกิดฟอร์มาลดีไฮด์ ระหว่างการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าใกล้เคียงกับการออกซิไดซ์ออดีทีที่เอด้วยไฟฟ้า ได้มีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิเดชันของ Ni(II)-EDTA ซึ่งเกิดการย่อยสลายได้ช้า ซึ่งการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างต่อเนื่อง จะช่วยเพิ่มอัตราการออกซิเดชัน Ni(II)-EDTA ได้อีกทั้งการที่มี Cu(II) อยู่ในน้ำเสียก็จะมีส่วนช่วยในการเร่งให้เกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์อย่างรวดเร็ว จาก Ni(II)-EDTA ไปอยู่ในรูป Cu(II)-EDTA ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า

Tucker et al. (1999) ได้ทำการทดลองทำลายออดีทีที่เอ โดยการใช้ Fenton's reagent และสารออกซิเดนต์ผสม (ประกอบไปด้วย Cl_2 , HOCl , ClO_2 และ H_2O_2) ร่วมกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งผลที่ได้พบว่าการใช้สารออกซิเดนต์ผสมจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ Fenton's reagent อีกทั้งยังพบว่า ถ้ามี Mn^{2+} , Cr^{3+} หรือ Fe^{3+} ที่มีระดับความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นของออดีทีที่เอ การทำลายออดีทีที่เอจะเกิดได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} หรือ Mn^{2+} สูงกว่าออดีทีที่เอ อัตราการทำลายออดีทีที่เอจะมีค่าลดลง ในกรณีที่มีการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการใช้สารออกซิเดนต์ผสมในการบำบัดสารประกอบเชิงซ้อน $\text{Co}^{2+}-\text{EDTA}$ หรือ $\text{Cu}^{2+}-\text{EDTA}$ จะส่งผลให้ออดีทีที่เอสูญเสียความสามารถในการจับโลหะหนักไป

Rodriguez et al. (1999) ทำการทดลองทำลายออดีทีที่เอในน้ำทิ้งที่ไม่มีคลอรีน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบไปด้วย Vanillin, Glyxol, Sodium formate, Sodium acetate และออดีทีที่เอ ส่วนวิธีการใช้ ได้แก่ การใช้โอโซน การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7

และ 11 ผลการทดลองพบว่า การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน นั้นจะมีประสิทธิภาพดี ที่สุด การใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำลายอีดีทีเอได้ การใช้กระบวนการร่วมกันระหว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซน (พีเอช 7 นาน 15 นาที) และการบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพอย่าง มากในการกำจัดทั้งคีแลนซ์ (98%) และซีโอดี (95%)

Korhonen et al. (2000) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสียจากการ ฟอกขาว ซึ่งในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัด Na-EDTA สารประกอบเชิงซ้อน Fe^{3+} -EDTA และสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว ซึ่งผลการ ทดลองพบว่า การใช้โอโซนเพียงเล็กน้อยจะสามารถทำลาย Na-EDTA ได้ในสัดส่วนที่มาก ซึ่งผลนี้ จะหายไปเมื่ออีดีทีเอรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ส่วนสารประกอบเชิงซ้อน ในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว พบว่าสามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าสารละลายของ Fe^{3+} -EDTA เพียง อย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพีเอชเริ่มต้น ไม่มีผลอย่างชัดเจนในการกำจัด Na-EDTA การเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะไม่เพิ่มอัตราการย่อยสลายของอีดีทีเอในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว

Ramo และ Sillanpaa, (2001) ทำการศึกษาการทำลายอีดีทีเอ ด้วยระบบไหลต่อเนื่องที่พีเอช เป็นค่า (พีเอช 10-11) และมีสภาวะเหมือนกับที่ใช้ในการฟอกขาวกระดาษ ผลการทดลองซึ่งวัด โดยก๊าซโครมาโตกราฟี ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าเปอร์เซ็นต์ของอีดีที เอที่เหลืออยู่ที่คำนวณจากหลักการนี้เช่นกัน มีการประเมินปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ สลายไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ เหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 94% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 79% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สลายไประหว่าง การทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26%

Emilio et al. (2002) ศึกษาการย่อยสลายของอีดีทีเอที่พีเอช 3 โดยใช้กระบวนการ ferrioxalate/ H_2O_2 และมีการรับแสงจากดวงอาทิตย์ พบว่าในทุกกรณีจะเกิดการกำจัดที่โอซีอย่างรวดเร็ว มีค่าเกือบถึง 100% เมื่อเวลารับแสงผ่านไป 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด เพื่อที่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีดีที่สุดจะต้องมีการควบคุมพีเอชให้คงที่ อัตราการ เกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ว่าการเพิ่มความ เข้มข้นของเฟอร์ริกออกไซด์จะมีผลให้อัตราการกำจัดอีดีทีเอลดลง เนื่องจากอาจจะเกิดการแข่งขัน กันในการแย่งออกไซด์ระหว่างอีดีทีเอ กับผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลาย เมื่อไม่มีการเติมออกไซด์ อีดีทีเอสามารถที่จะเกิดการย่อยสลายได้อย่างดี และมีอัตราการกำจัดโอซีที่น้อยกว่าเมื่อใช้ เฟอร์ริกออกไซด์เพียงเล็กน้อย อีกทั้งยังพบว่าความเข้มข้นของแสงอาทิตย์เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากใน การปรับปรุงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

Kunz et al. (2002) ทำการศึกษาวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวช่วยในการย่อยสลายอีดีทีเอ ซึ่งได้ทำการประเมินผลกระทบของพี เอช และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออีดีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการย่อย

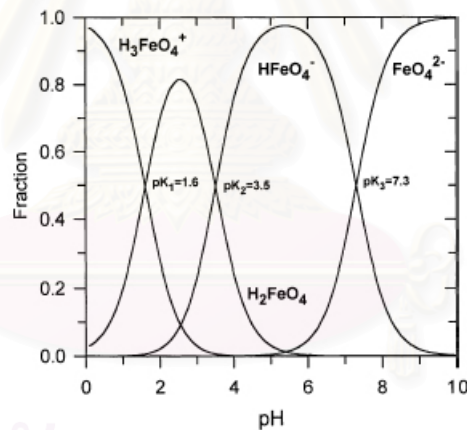
สลายอดีทีเอ การทำงานที่สภาวะทดลองที่เหมาะสม (พีเอช 2 และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออดีทีเอ เท่ากับ 10) และใช้ Microwave-activated photochemical reactor และตรวจวัดการย่อยสลายอดีทีเอ โดยทำการวัดค่าที่ไอซีพบว่าอัตราการย่อยสลายจะมีค่าสูงกว่า 90% เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น 6 นาที

2.4 เฟอร์เรต

2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต

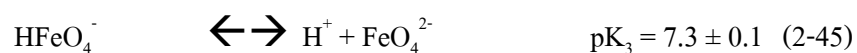
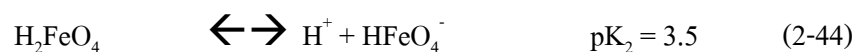
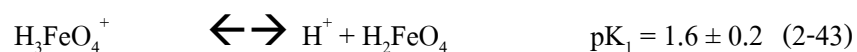
เมื่อโปตัสเซียมเฟอร์เรตถูกเติมลงในน้ำจะแตกตัวออกได้เฟอร์เรต (Fe^{6+}) มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ และเป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา และ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้สามารถผลิตขึ้นใช้ที่หน้างานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ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

2.4.1.1 การแตกตัวของเฟอร์เรต



รูปที่ 2.8 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ

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



เมื่อนำค่าคงที่การแตกตัว (pK) มาคำนวณจะได้กราฟการแตกตัวของเฟอร์เรตดังรูปที่ 2.8 จากกราฟจะเห็นว่าในน้ำธรรมชาติและน้ำที่เป็นด่างจะพบเฟอร์เรตอยู่ในรูป HFeO_4^- และ FeO_4^{2-} เป็นส่วนมาก

2.4.1.2 กำลังในการออกซิไดซ์

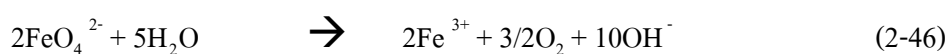
กำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของเฟอร์เรตมีค่าสูงโดยมีค่าระหว่าง +0.7 V ถึง +2.2 V ในสารละลายเบสและกรดตามลำดับ ซึ่งนับว่าแรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 2.6

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

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

2.4.1.3 ความเสถียรของเฟอร์เรต

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

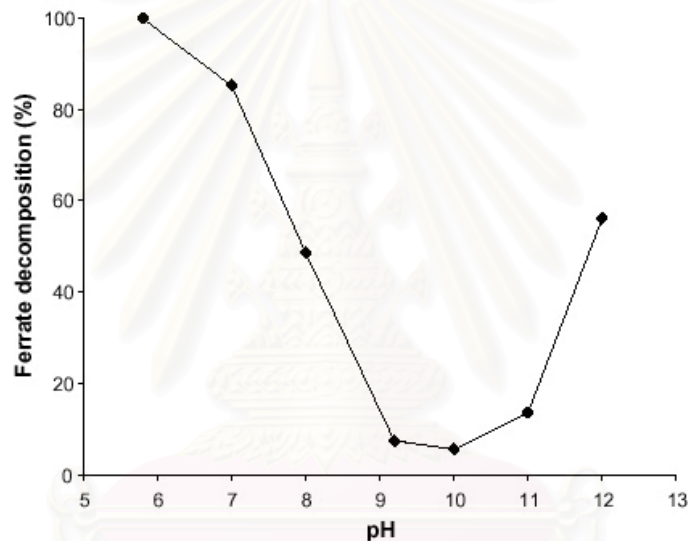


2.4.1.3.1 ผลของความเข้มข้นต่อความเสถียร

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

2.4.1.3.2 ผลของพีเอชต่อความเสถียร

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



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ (Graham และคณะ, 2004)

2.4.1.3.3 ผลของไอออนต่อความเสถียร

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ KOH ในสารละลายมีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต โดยเมื่อความเข้มข้นของ KOH สูงขึ้นค่าความเสถียรจะมีค่ามากขึ้น สำหรับสารอื่นๆ เช่น เกลือของไนเตรท กับ ทองแดง เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แบนเรียม 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 การเตรียมเฟอร์เรต

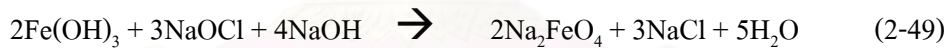
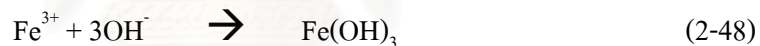
2.4.2.1 วิธีการ Dry Oxidation

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



2.4.2.2 วิธีการ Wet Oxidation

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยการออกซิไดซ์เฟอร์ริกให้กลายเป็นเฟอร์เรตภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง โดยเฟอร์เรตที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการล้างและทำให้แห้งอีกครั้งเพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความเสถียรสูง ในระยะแรกเป็นการเตรียมในรูปแบบของ โซเดียมเฟอร์เรต ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากโซเดียมเฟอร์เรตมีความสามารถในการละลายสูง ต่อมาจึงได้พัฒนามาเป็นรูปของโปตัสเซียมเฟอร์เรต ที่เตรียมได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่า การเตรียมโปตัสเซียมเฟอร์เรตทำได้ตามสมการที่ (2-48) ถึง (2-50)

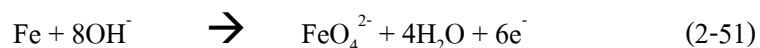


ภายหลังได้มีการใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสมการที่ (2-49) ทำให้ได้เฟอร์เรตในปริมาณที่มากขึ้น

2.4.2.3 วิธีการ Electro-Chemical

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

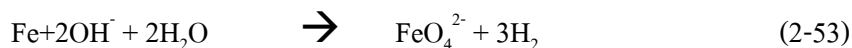
Anode reaction



Cathode reaction



Overall reaction



การเตรียมเฟอร์เรตในรูปแบบของโซเดียมเฟอร์เรตทำได้ยากเนื่องจากความสามารถในการละลายสูง ซึ่งการเตรียมในรูปแบบของโปตัสเซียมเฟอร์เรตทำได้ง่ายกว่า การเตรียมเฟอร์เรตในปริมาณมากทำได้ยากเนื่องจากความต้องการความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นสูงและยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่างเช่น ชนิดของขั้วแอโนดในวิธีการ Electrochemical เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ การแยกส่วนที่ตกตะกอน (Isolation process) ในวิธีการ Wet Oxidation นอกจากนี้การใช้วิธี ยังมีการเกิดก๊าซคลอรีนเนื่องจากไฮโปคลอไรต์ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ดังนั้นการเตรียมเฟอร์เรตจึงต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวัง

2.4.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

2.4.3.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิดดังตารางที่ 2.8 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับพีเอชเป็นอย่างมาก และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้

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

ตารางที่ 2.8 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

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

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

2.4.3.2 การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีน เป็นวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ มีการทดลองการใช้สารอื่น ๆ ในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไอโอดีน และโอโซน พบว่ามีสารผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน

มีรายงานการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการฆ่าเชื้อโรคพบว่า สำหรับแบคทีเรีย เฟอร์เรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียโดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในอีกการทดลองหนึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้น 8 มก./ล. (as FeO_4^{2-}) เฟอร์เรตสามารถกำจัด Total Coli form ได้ 99.9% และกำจัด Total Viable Bacteria ได้ 97.0% (Jiang และ Lloyd, 2002)

สำหรับไวรัส ได้มีการทดลองกำจัด (Inactivate) f2 Coliphage (Jiang และ Lloyd, 2002) ซึ่งเป็นไวรัสที่พบได้ทั่วไปในท่อระบายน้ำและมีความคงทนต่อคลอรีน พบว่า ที่ 1 มก./ล. (as K_2FeO_4) เฟอร์เรตสามารถกำจัดไวรัสได้ถึง 99% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งคือ เฟอร์เรตจะไม่มีสารตกค้าง (Residual) เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

2.4.3.3 การโคแอกกูเลชัน

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



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

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

2.4.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต

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

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

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

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

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

Chao, A.C. Luca, S.J. และ Idle, C.N. (1996) ได้ศึกษาการเติมเฟอร์เรตลงในตะกอนอินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งในการจัดการตะกอนจะมีปัญหาเรื่องกลิ่น พบว่าสามารถลดสารที่

จะทำให้เกิดกลิ่นได้โดยเฉพาะ แอมโมเนีย และ ซัลไฟด์ โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท และ ซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟต ทำให้สามารถนำตะกอนอินทรีย์ไปจัดการต่อไปได้โดยไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น

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

Sharma, V.K. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเฟอร์เรตพบว่า เฟอร์เรตที่ได้จากการแตกตัวของโปตัสเซียมเฟอร์เรตมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรสูง มีกำลังในการออกซิไดซ์สูง มีความเลือกทำปฏิกิริยา และได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้โปตัสเซียมเฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ปลอดภัยสำหรับน้ำธรรมชาติ ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรม เฟอร์เรตมีกำลังในการออกซิไดซ์ +2.2 ถึง +0.7 โวลต์ ในสารละลายกรดและเบสตามลำดับ การสลายตัวของเฟอร์เรตเป็นเฟอร์ริกและออกซิเจนเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรดและสลายตัวได้ช้าที่พีเอช 10 และในสารละลายเจือจาง การสลายตัวจะเกิดได้ช้าที่สุดที่พีเอช 9.4-9.7 เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่เลือกทำปฏิกิริยาและสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารอินทรีย์หลายชนิดโดยที่ยังคงได้เฟอร์ริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ เฟอร์เรตเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเทคโนโลยีสะอาด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำ Super-iron Batteries และการบำบัดน้ำเสีย สารปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียสามารถกำจัดได้โดยใช้เฟอร์เรตโดยใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาที่โดยที่ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ยังเป็นสารฆ่าเชื้อโรค Antifulant และสารรวมตะกอน จึงนับได้ว่าเป็นสารที่สามารถใช้งานในทางบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Jiang, J.Q. และ Lloyd, B. (2002) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเตรียม และการใช้เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์และสารรวมตะกอน ในงานด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า จากคุณสมบัติที่พิเศษ(กำลังในการออกซิไดซ์สูง และ การเกิดเฟอร์ริกที่เป็นสารรวมตะกอน ทำให้เฟอร์เรตสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ลดรูป (Degrade) หรือกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้โดยการทำงานเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามยังไม่พบการใช้งานเฟอร์เรตในแบบ Full-Scale ในงานเกี่ยวกับน้ำ เนื่องจาก ความยุ่งยากในการเตรียม อัตราการเกิด (Yield) ต่ำการเกิดความ

ไม่เสถียรที่เป็นผลจากเทคนิคการเตรียม และ การศึกษาที่จะชี้แนะถึงความสามารถและข้อดีของมัน ในงานด้านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาขั้นพื้นฐานจำเป็นต่อการค้นหาวิธีการผลิตแบบใหม่ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดและความเสถียรสูง และการหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรต์และคลอรีนในการผลิต ทั้งนี้ประโยชน์ของเฟอร์เรตในงานด้านการผลิตน้ำดื่มยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบและงานด้านนี้เป็นส่วนที่น่าสนใจในอนาคต

2.5 การทำงานกับสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันสูง (APHA, 1998)

ตัวอย่างของสารเคมีกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดไอโซโพรพิลฟลูออโรฟอสเฟต (Diisopropylfluorophosphate) กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) และ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) ซึ่งนอกเหนือจากกฎทั่วไปที่ต้องปฏิบัติในห้องปฏิบัติการแล้วจะต้องมีข้อควรระวังเพิ่มเติม ซึ่งวัตถุประสงค์ก็คือ ลดการสัมผัสกับสารพิษไม่ว่าจะสัมผัสทางใดก็ตามให้น้อยที่สุด โดยข้อควรระวังมีดังนี้

1. สถานที่ : ใช้และเก็บสารเหล่านี้ในพื้นที่ที่ควบคุมเท่านั้น และต้องมีการติดป้ายเตือนไว้อีก ทั้งเมื่อต้องทำการทดลองใดๆที่จะทำให้เกิดละอองลอย (Aerosol) หรือไอของสารนั้นๆจะต้องทำในตู้ดูดควัน (Hood) เสมอ

2. การป้องกันส่วนบุคคล : หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสาร โดยการสวมถุงมือ เสื้อแขนยาว และอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆที่เหมาะสม ล้างมือ และแขนทันทีหลังจากที่มีการทำงานกับสารเหล่านั้นเสมอ

3. บันทึก : ต้องทำการบันทึกปริมาณของสารที่มีอยู่ ปริมาณสารที่ใช้ไป และชื่อของบุคคลที่ใช้สารนั้น

4. การป้องกันการหก และอุบัติเหตุ : ต้องมีการเตรียมตัวเมื่อเกิดการหก หรือเกิดอุบัติเหตุขึ้น ต้องแน่ใจว่ามีคนอยู่ในบริเวณนั้น อย่างน้อย 2 คน เมื่อสารที่ใช้มีความเป็นพิษสูงหรือไม่ทราบความเป็นพิษ

เก็บขวดสารเคมีที่สามารถแตกได้ในถาดที่ทนสารเคมี ถ้ามีสารเคมีเกิดหกภายนอกตู้ดูดควันให้ทำการอพยพคนออกจากบริเวณนั้น และต้องแน่ใจว่าบุคคลที่เข้าไปทำความสะอาดสวมชุดป้องกัน และใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม

5. ของเสีย : ต้องทำการกำจัดสาร หรือเผาเสีย และรองเท้ายกที่สัมผัสกับสารอย่างทันทีถ้าเป็นไปได้ควรกำจัดสารโดยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ทำการเก็บของเสียที่ปนเปื้อนในภาชนะที่ปิด มีป้ายที่เหมาะสมและน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (เช่น แก้ว หรือขวดพลาสติกสำหรับของเหลว)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการวิจัย

3.1.1 การเตรียมเครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2 การเตรียมน้ำเสียจริง น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลาย

3.1.3 การดำเนินการวิจัย และการวิเคราะห์

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1.1 เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatography, IC) ยี่ห้อ Dionex รุ่น ICS-2500 Automated IC System (รูปที่ 3.1)

3.2.1.2 เครื่องไฮเพอร์ฟอแมนซ์ ลิกวิดโครมาโตกราฟี (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1100 (รูปที่ 3.2)

3.2.1.3 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) ยี่ห้อ Denver Instrument, Model 215

3.2.1.4 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS (Atomic Absorbtion Spectrophotometer, AAS)

3.2.1.5 เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer) :Thermo electron corporation, Helios Alpha

3.2.1.6 เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (DI Water 18.2 Ω m) :ELGA, Purelab Maxima

3.2.1.7 Hyperclean Syringe Filter :Target, Nylon 0.45 μ m 17mm

3.2.1.8 กระดาษกรองใยแก้ว (Glass Microfiber) : Whatman, GF/C

3.2.1.9 ตู้อบความร้อน (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115 (E2)

3.2.1.10 อ่างควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องเขย่า ยี่ห้อ

3.2.1.11 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digit Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204

3.2.1.12 อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป

3.2.1.13 ภาชนะพลาสติกคุณภาพสูง

3.2.1.14 หน้ากากกันสารเคมียี่ห้อ 3M รุ่น 6006



รูปที่ 3.1 เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี



รูปที่ 3.2 เครื่องไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ ดิวทิดโครมาโตกราฟี

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.2.1 โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN)
- 3.2.2.2 โพแทสเซียมไซยาเนต (KCNO)
- 3.2.2.3 อีดีทีเอ ไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรต ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$)
- 3.2.2.4 โพแทสเซียมเฟอร์เรต (K_2FeO_4)
- 3.2.2.5 โซเดียมเมตาอาร์เซนัท ($NaAsO_2$)
- 3.2.2.6 โซเดียมฟอร์มเมต (HCOONa)
- 3.2.2.7 กรดฟอร์มิก (HCOOH)
- 3.2.2.8 เฟอร์ริกไนเตรต ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$)
- 3.2.2.9 เตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ($C_{16}H_{36}BrN = TBA-Br$)
- 3.2.2.10 อะซิโตนไนตราย (CH_3CN)
- 3.2.2.11 เอทิลีนไดเอมีน ($C_2H_6N_2$)
- 3.2.2.12 กรดไนตริก (HNO_3)
- 3.2.2.13 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.2.2.14 โซเดียมเตตระบอร์เรต ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)
- 3.2.2.15 นิกเกิล

3.3 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต

3.3.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ

เตรียมสารละลายๆไว้เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ และการหยุดปฏิกิริยา โดยสารละลายที่เตรียมไว้มีดังนี้

1. สารละลายไซยาไนด์ ความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 10,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโพแทสเซียมไซยาไนด์มาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (พีเอชประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
2. สารละลายอีดีทีเอ ความเข้มข้น 1,000 2,000 และ 10,000 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำอีดีทีเอ ไดโซเดียมซอลท์ไดไฮเดรตมาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.6 และ 1.2 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้เก็บรักษาตัวอย่าง

4. สารละลายอาร์เซนัท โดยความเข้มข้นอาร์เซนัท 7500 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยนำโซเดียมอาร์เซนัทมาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้หุคปฏิบัติกรร

5. สารละลายบัฟเฟอร์ บัฟเฟอร์ที่ใช้ในการทดลองกับน้ำเสียดังเคราะห์ของไฮยาไนด์คือ สารละลายบอเรตความเข้มข้น 0.010 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอเรตมาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

3.3.2 การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์

ในการทดลอง การผสมไฮยาไนด์กับเฟอร์เรตจะทำโดยการผสมสารละลายทั้งสองในปริมาณ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์และสารละลายเฟอร์เรตในแต่ละครั้งจึงต้องเตรียมความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ เพื่อให้มีความเข้มข้นเท่าที่ต้องการเมื่อมีการผสมกัน การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์จะเตรียมขึ้นจากสารละลายเข้มข้นและสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ โดยจะเตรียมก่อนการใช้งานแต่ละครั้งจะต้องปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย โดยมีวิธีการผสมดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การผสมน้ำเสียดังเคราะห์ของอิดีทีเอในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.

ความเข้มข้นที่กำหนด		สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า				
ไฮยาไนด์	อิดีทีเอ	สารละลายอิดีทีเอ		โซเดียมไฮดรอกไซด์	สารละลายบัฟเฟอร์	
ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มล.	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.
0	50	1,000	5	5	0.01	40
0	100	2,000	5	5	0.01	40
0	250	5,000	5	5	0.01	40
0	500	10,000	5	5	0.01	40

ตารางที่ 3.2 การผสมน้ำเสียดังเคราะห์ของไฮยาไนด์กับอิดีทีเอในการทดลอง ปริมาตร 50 มล.

ความเข้มข้นที่กำหนด		สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า					
ไฮยาไนด์	อิดีทีเอ	สารละลายไฮยาไนด์		สารละลายอิดีทีเอ		สารละลายบัฟเฟอร์	
ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.	ไมโครโมลาร์	มล.
500	500	10,000	5	10,000	5	0.01	40
500	500	10,000	5	10,000	5	0.01	40
500	500	10,000	5	10,000	5	0.01	40
500	500	10,000	5	10,000	5	0.01	40
500	500	10,000	5	10,000	5	0.01	40

3.3.3 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตจะเตรียมในน้ำปราศจากไอออนและไม่ต้องปรับพีเอช เพื่อให้เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงสุด และจะเตรียมสารละลายก่อนใช้งานเท่านั้นเพราะเฟอร์เรตมีการสลายตัวเร็วและสลายไปตลอดเวลา โดยเตรียมความเข้มข้น 2 เท่าเนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

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

ตารางที่ 3.3 ค่าการดูดซับแสงสำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง

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

3.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองต่างๆจะเป็นลักษณะการทดลองที่ต่อเนื่องกัน โดยการทดลองชุดถัดไปจะใช้ตัวแปรคงที่ที่เหมาะสมจากการทดลองชุดก่อนหน้า ขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

3.4.1 การทดลองการกำจัดอดีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

1. ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอ

3.4.2 การทดลองถึงผลของอดีทีเอต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

1. ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์
2. ศึกษาผลของอดีทีเอต่ออัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่ออดีทีเอที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

3.4.3. การทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ

1. ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบโลหะ
2. ศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ในน้ำเสียจริง

การทดลองแต่ละชุดจะมีตัวแปรคงที่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามที่แตกต่างกันตามแต่วัตถุประสงค์ในการทดลองนั้นๆ โดยมีตัวแปรสำคัญต่างๆ ดังหัวข้อที่ 3.3.4 ถึง 3.3.6

3.4.4 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดอิตีทีเอ และไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอ และไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ และไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอ	1. 1:1
2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	2. 1:1
3. บัฟเฟอร์	3. บอร์เรต
4. เวลา	4. สิ้นสุดปฏิกิริยา
5. อุณหภูมิ	5. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช	1. พีเอช 8 9 10 11 และ 12
2. ความเข้มข้นอิตีทีเอ	2. ความเข้มข้นของอิตีทีเอ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์
3. ความเข้มข้นไซยาไนด์	3. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. พีเอช
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ	2. ความเข้มข้นของอิตีทีเอ
3. ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	3. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยานเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. พีเอช 2. บัฟเฟอร์ 3. เวลา 4. อุณหภูมิ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. พีเอชเหมาะสม 2. บอร์เรต 3. สิ้นสุดปฏิกิริยา 4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> 1. อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 2. อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ 3. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 0.2:1 0.4:1 0.6:1 0.7:1 0.8:1 0.9:1 และ 1:1 2. 1:0.5 1:1 1:2 และ 1:4 3. ความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
<ol style="list-style-type: none"> 1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

3.4.5 ตัวแปรในการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในศึกษาอัตราส่วนปริมาณเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริง 2. เวลา 3. อุณหภูมิ 	<p>เจือจางตัวอย่างเพื่อทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์ ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. สิ้นสุดปฏิกิริยา 2. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นเฟอร์เรต 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 0 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	1. พีเอช
2. ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	2. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท
3. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	3. โลหะหนัก

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

3.5.1.1 การทดลองการกำจัดอิตีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของพีเอช และผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอในน้ำเสียสังเคราะห์

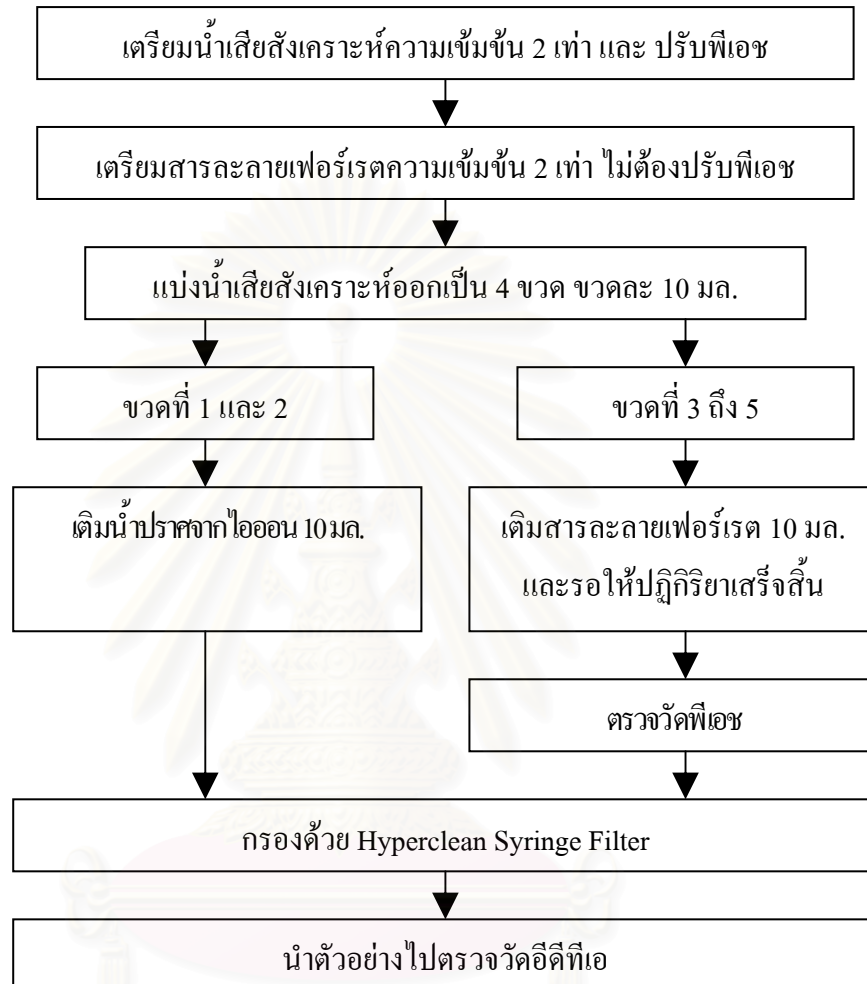
3.5.1.1.1 ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ

เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอที่แต่ละพีเอชเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดอิตีทีเอ และศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของอิตีทีเอ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของอิตีทีเอ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ละความเข้มข้นทำการแปรพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นตัวกลาง และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:1

การทดลองที่ 3.5.1.1.1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของอิตีทีเอให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 30 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 5 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 และ 2 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. ให้ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 3 ถึง 5 เติมสารละลายเฟอร์เรต 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของอิตีทีเอ ด้วยเครื่องเครื่องไฮเพอร์ฟอแมนซ์ ลิวิดโครมาโตกราฟี
8. นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของพีเอช และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของอิตีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอิตีทีเอ



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.1.1

3.5.1.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

การทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของพีเอช และ ผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอิตีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์

3.5.1.2.1 ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ที่แต่ละพีเอชเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไซยาไนด์ และศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ละความเข้มข้นทำการแปรพีเอชเป็น 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นตัวกลาง และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอิตีทีเอเท่ากับ 1:1:1

การทดลองที่ 3.5.1.2.1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังนี้

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



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.1

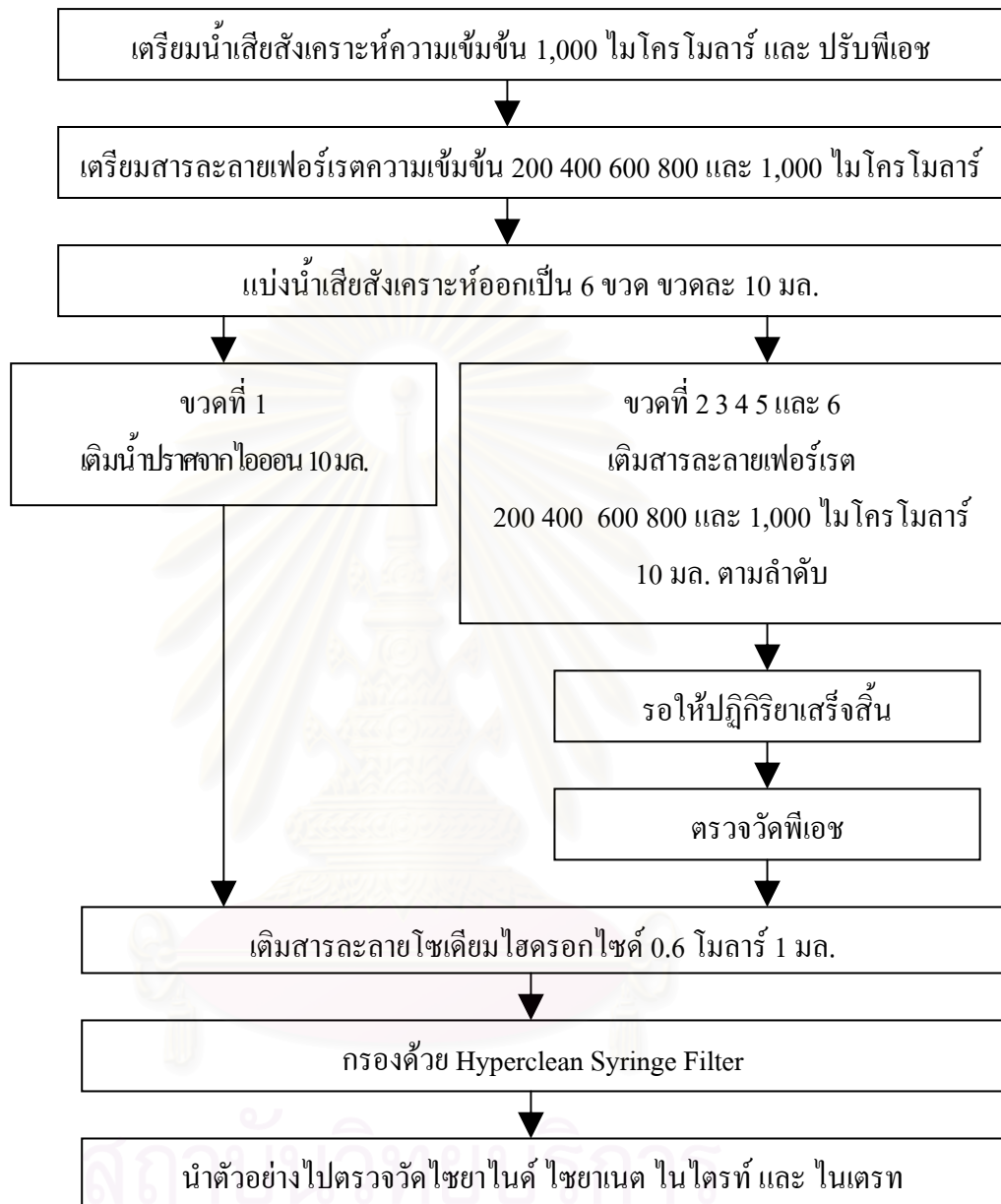
รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.1

3.5.1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอิตีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพและสารผลิตภัณฑ์

เป็นการทดลองศึกษาถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออิตีทีเอที่เพิ่มขึ้น ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ และแต่ละความเข้มข้นไซยาไนด์ จะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 1:2 และ 1:4 และในแต่ละอัตราส่วนจะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เป็น 0.2:1 0.4:1 0.6:1 และไปจนกว่าเฟอร์เรตจะสามารถกำจัดไซยาไนด์หมด โดยการทดลองกระทำที่พีเอชเหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.2.1 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ รวมมีการทดลอง 24 ชุด

การทดลองที่ 3.5.1.2.2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของไซยาไนด์ให้มีความเข้มข้น 100 200 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 50 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร ความเข้มข้นละ 10 มล.
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 9 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 และ 2 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 4 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 200 400 600 800 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 4 มล. เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไซยาไนด์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท กับความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของอิตีทีเอต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.1.2.2

3.5.1.2.3 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ อีดีทีเอและนิเกิล ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

เป็นการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ อีดีทีเอ และนิเกิล ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์และอีดีทีเอเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ และความเข้มข้นของนิเกิลอิมตัว อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 0.2:1 0.4 :1 0.6:1 0.8:1 และ 1:1 ซึ่งคิดเป็นค่าความเข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ และใช้ค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.5.1.2.1 และ 3.5.1.2.2 การทดลองนี้ใช้ค่าความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดในการทดลอง เพื่อให้สามารถแปรค่าอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ได้มาก

วิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะเหมือนกับการทดลองที่ 3.5.1.2.2 แตกต่างกันที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้โดยการทดลองนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้จะมีส่วนประกอบของไซยาไนด์ อีดีทีเอ และนิเกิล จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

3.5.2 การทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโรงชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

3.5.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงชุบโลหะ

เป็นการศึกษาโดยการเก็บน้ำตัวอย่างจากโรงงานชุบโลหะและนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรท โลหะหนัก และ พีเอช

3.5.2.2 ศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ในน้ำเสียจริง

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพ ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริง โดยการเจือจางตัวอย่างเพื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ประมาณ 100 ไมโครโมลาร์ และนำมาทดลองโดยปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็น 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

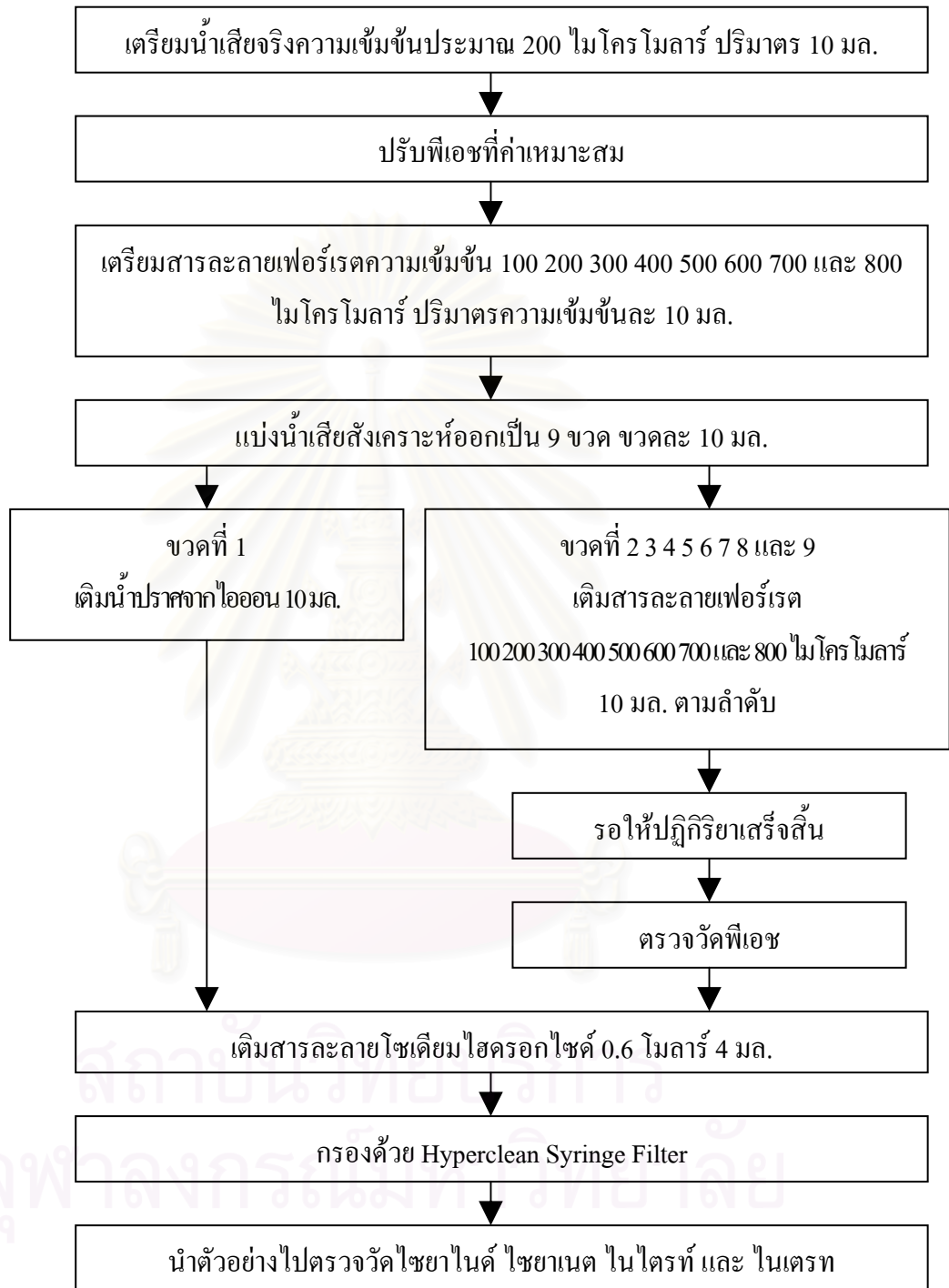
การทดลองที่ 3.5.2.2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เจือจางน้ำเสียด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์ประมาณ 200 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 100 มล.
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 100 200 300 400 500 600 700 และ 800 ไมโครโมลาร์ ปริมาตรความเข้มข้นละ 10 มล.

3. แบ่งน้ำเสียออกเป็น 9 ขวด ขวดละ 10 มล.
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มล. และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 4 มล. ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น blank
5. ขวดที่ 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 เติมสารละลายเฟอร์เรตเข้มข้น 100 200 300 400 500 600 700 และ 800 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตรขวดละ 10 มล. ปิดฝาทันทีและเขย่าให้เข้ากัน และรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปจนหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 4 มล. เพื่อปรับพีเอช ไม่ให้โซยาไนต์ระเหยออก
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นโซยาไนต์ โซยานิต ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดย ความเข้มข้นจริงเท่ากับ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นโซยาไนต์ โซยานิต ไนไตรท์ ไนเตรท กับ ความเข้มข้นเฟอร์เรต เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนและนิเกิลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อโซยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดโซยาไนต์ และ สารผลิตภัณฑ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนการทดลองที่ 3.5.2.2

3.6 วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ไซยาไนด์	IC : Ion Chromatography
ไซยาเนต	IC : Ion Chromatography
EDTA	High Performance Liquid Chromatography
เฟอร์เรต	UV Spectrophotometer
พีเอช	pH Meter
โลหะหนัก	Atomic Absorbtion

3.6.1 วิธีการวิเคราะห์อิตีทีเอ (Nowack, 1996)

1. นำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้ง ใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง
3. เติมฟอร์เมตบัฟเฟอร์ (0.005M HCOONa : 0.015M HCOOH) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร และเฟอร์ริกไนเตรด (0.001M + 0.01M HNO₃) ปริมาณ 20 ไมโครลิตร
4. นำตัวอย่างไปเข้าอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง
5. ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
6. เติมสารละลายเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TBA-Br) ในฟอร์เมตบัฟเฟอร์ (0.05M) ปริมาณ 40 ไมโครลิตร
7. ดูดตัวอย่างใส่ลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง HPLC และปิดฝาให้เรียบร้อย
8. วัดด้วยเครื่อง HPLC โดยมีสภาวะดังนี้
 - 8.1 คอลัมน์ C-18 ขนาด 4 x 125 mm., column packing Inertsil ODS-3 5 µm
 - 8.2 Detector : UV Detecetr โดยใช้ความยาวคลื่น 258 นาโนเมตร
 - 8.3 อัตราส่วน A:B = 50:50
 - 8.4 อัตราการไหลรวม : 1 มิลลิลิตรต่อนาที
 - 8.5 Inject Volume : 20 ไมโครลิตร
 - 8.6 ใช้เวลาในการวัดตัวอย่าง 30 นาที

บทที่ 4

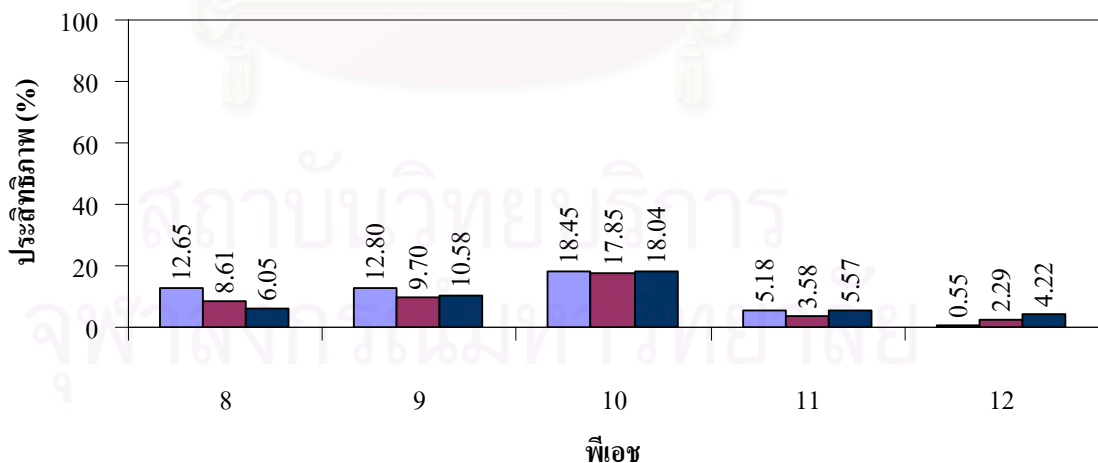
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองการกำจัดอดีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

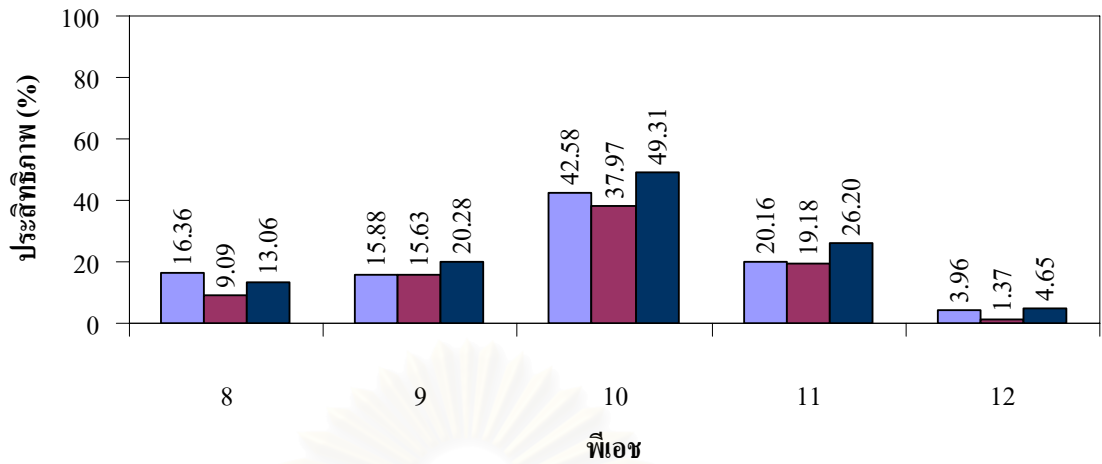
4.1.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของอดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอ

ในการทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของอดีทีเอเท่ากับ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ความเข้มข้นมีการแปรค่าพีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นตัวกลาง และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออดีทีเอเท่ากับ 1:1

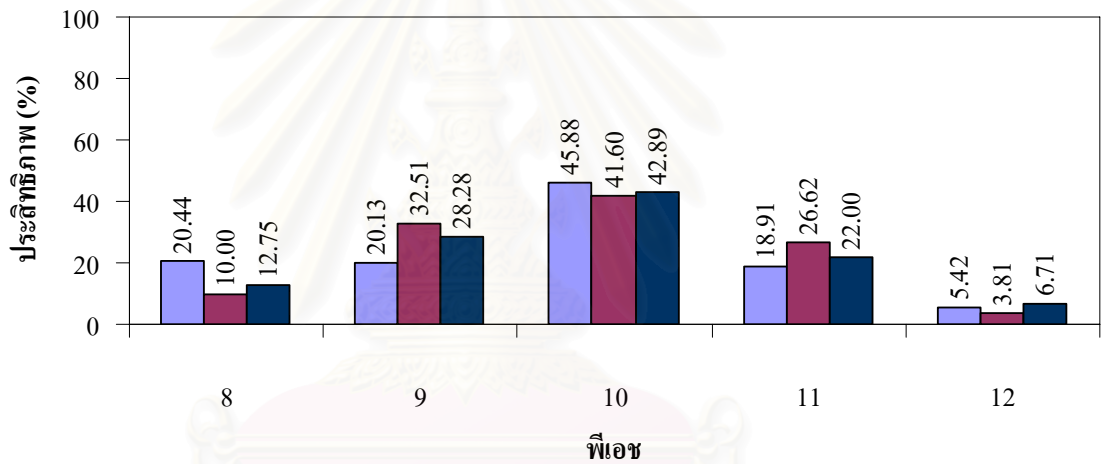
ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อโมลอดีทีเอเท่ากับ 1:1 พีเอช 8 9 10 11 และ 12 มีประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอดีทีเอ 50 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9.10 11.03 18.12 4.78 และ 2.35 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอดีทีเอ 100 ไมโครโมลาร์ ดังรูป 4.1 ข. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 26.82 17.26 43.48 31.79 และ 11.87 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของอดีทีเอ 500 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ค. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.50 26.97 42.44 18.84 และ 2.80 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ก. ความเข้มข้นอดีทีเอเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.1 ข. ความเข้มข้นอีดี้ทีเอเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

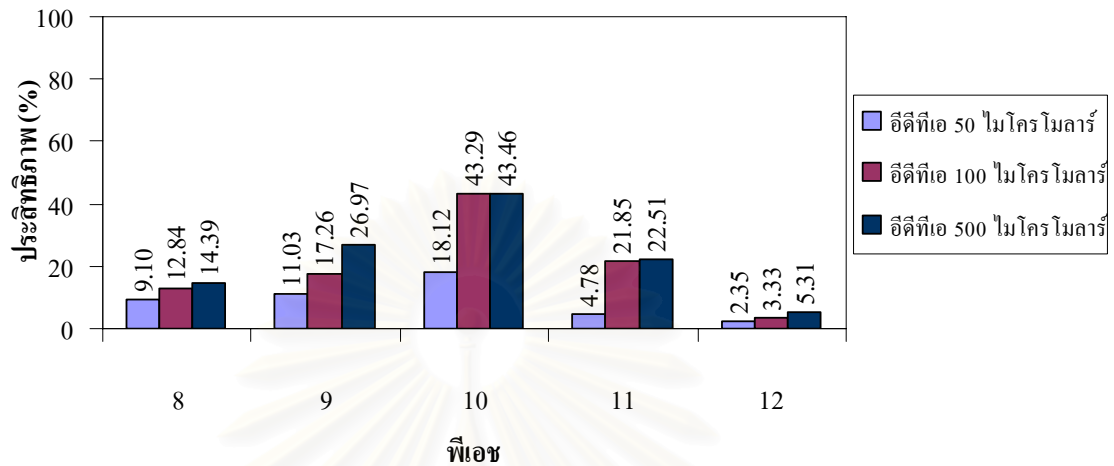


รูปที่ 4.1 ค. ความเข้มข้นอีดี้ทีเอเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดอีดี้ทีเอและปุ๋ย ที่อัตราส่วนโดยโมล เฟอร์เรตต่ออีดี้ทีเอเท่ากับ 1:1

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.2 พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดอีดี้ทีเอก่อนข้างต่ำ และเมื่อพิจารณาผลของปุ๋ยพบว่าที่ปุ๋ย 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดอีดี้ทีเอได้สูงสุด ที่ความเข้มข้นอีดี้ทีเอเริ่มต้น 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ โดยสามารถกำจัดอีดี้ทีเอได้ถึงร้อยละ 18.12 43.28 และ 42.44 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของปุ๋ยของในแต่ละความเข้มข้นอีดี้ทีเอเริ่มต้น พบว่าที่ปุ๋ย 10 จะมีการกำจัดอีดี้ทีเอสูงกว่าทุกปุ๋ย จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีค่าปุ๋ยที่เปลี่ยนแปลงไป ความสามารถในการกำจัดอีดี้ทีเอก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งที่ปุ๋ย 10 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดอีดี้ทีเอได้ดีที่สุด ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองของอู่แก้ว

เอี่ยมสำอาง (2547) ที่พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอโดยวิธีอัลตราไคน์คลอรีนชั้นและวิธีออกซิไคซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอค่อนข้างต่ำเช่นกัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดอดีทีเอกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่ออดีทีเอเท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของอดีทีเอ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

เนื่องจากการตรวจวัดค่าอดีทีเอ ค่าที่ได้จากการตรวจวัดนั้นมีความแปรปรวน จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมถึงผลของพีเอชต่อการตรวจวัดอดีทีเอ โดยทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นอดีทีเอ 1000 ไมโครโมลาร์ แปรค่าพีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นตัวกลาง จากนั้นนำไปทำการตรวจวัดอดีทีเอตามวิธีของ Nowack และคณะ (1996)

ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 10 มีการตรวจพบอดีทีเอได้มากที่สุด และการตรวจพบอดีทีเอส่วนใหญ่สามารถตรวจพบปริมาณอดีทีเอมากกว่า 85% ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวัดอดีทีเอที่พีเอชต่างๆ

พีเอช	ตัวอย่าง	ผลการตรวจวัดอดีทีเอ		
		ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย
8	ตัวอย่างที่ 1	883.76	88.38 ± 0.92	89.11
	ตัวอย่างที่ 2	901.44	90.14 ± 0.92	
	ตัวอย่างที่ 3	888.18	88.82 ± 0.92	
9	ตัวอย่างที่ 1	926.12	92.61 ± 0.96	93.38
	ตัวอย่างที่ 2	944.64	94.46 ± 0.96	
	ตัวอย่างที่ 3	930.75	93.07 ± 0.96	

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวัดอีดีทีเอที่พีเอชต่างๆ (ต่อ)

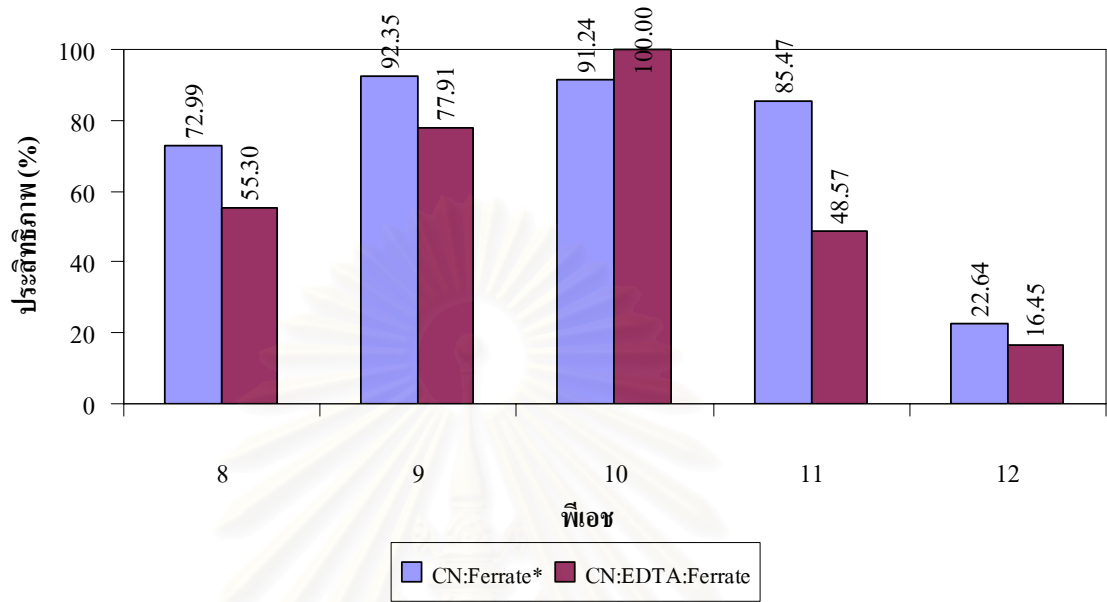
พีเอช	ตัวอย่าง	ผลการตรวจวัดอีดีทีเอ		
		ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย
10	ตัวอย่างที่ 1	955.29	95.33 ± 1.07	96.32
	ตัวอย่างที่ 2	974.40	97.44 ± 1.07	
	ตัวอย่างที่ 3	960.07	96.01 ± 1.07	
11	ตัวอย่างที่ 1	890.27	89.03 ± 0.92	89.77
	ตัวอย่างที่ 2	908.02	90.80 ± 0.92	
	ตัวอย่างที่ 3	894.75	89.47 ± 0.92	
12	ตัวอย่างที่ 1	905.90	90.59 ± 0.94	91.35
	ตัวอย่างที่ 2	924.02	92.40 ± 0.94	
	ตัวอย่างที่ 3	910.43	91.04 ± 0.94	

4.2 ผลการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ไฮยาไนต์และอีดีทีเอ

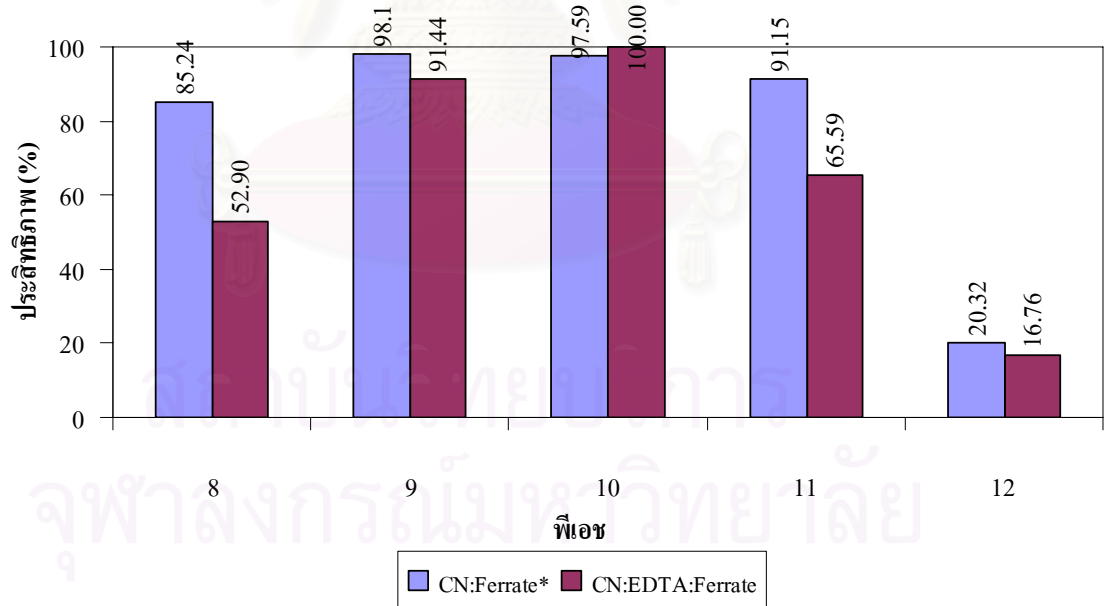
4.2.1 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของไฮยาไนต์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์

ในการทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮยาไนต์เท่ากับ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ แต่ละความเข้มข้นมีการแปรค่าพีเอช 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นตัวกลาง และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์ต่ออีดีทีเอเท่ากับ 1:1:1

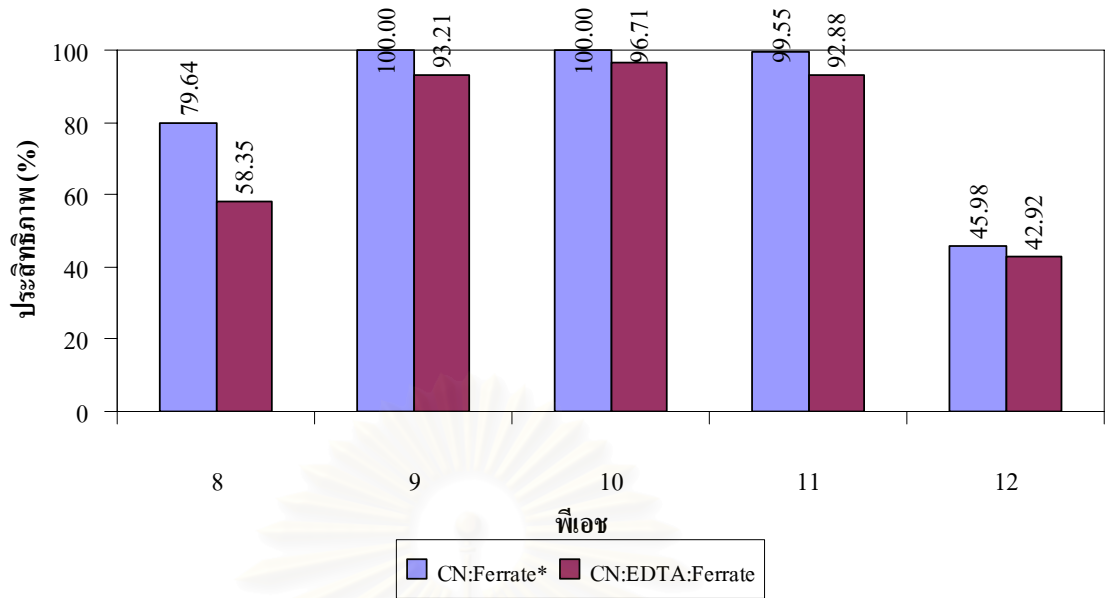
ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์ต่ออีดีทีเอเท่ากับ 1:1:1 พีเอช 8 9 10 11 และ 12 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮยาไนต์ 50 ไมโครโมลาร์ ดังรูป 4.3 ก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 55.30 77.91 100.00 45.57 และ 16.45 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮยาไนต์ 100 ไมโครโมลาร์ ดังรูป 4.1 ข. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 52.90 91.44 100.00 65.59 และ 16.76 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮยาไนต์ 500 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.1 ค. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 58.35 93.21 96.71 92.88 และ 42.92 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ก. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.3 ข. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

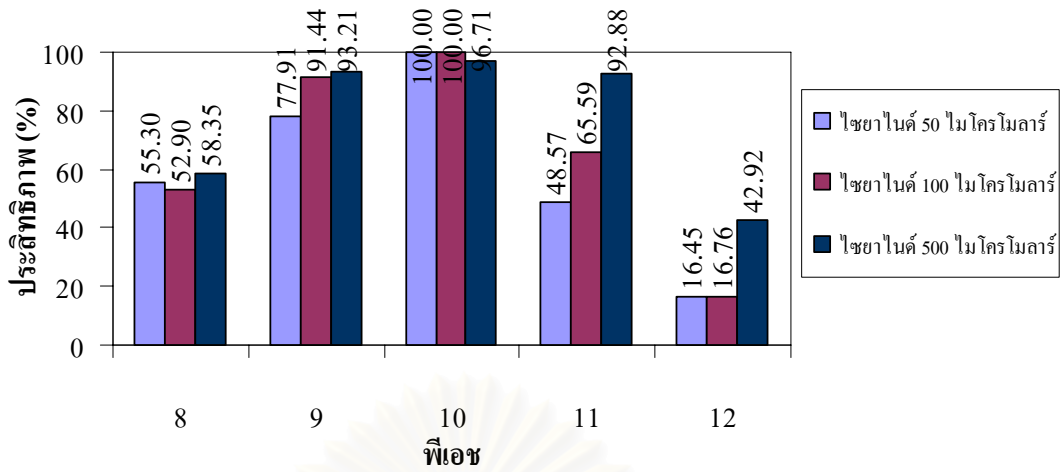


รูปที่ 4.3 ค. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และฟิเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1:1

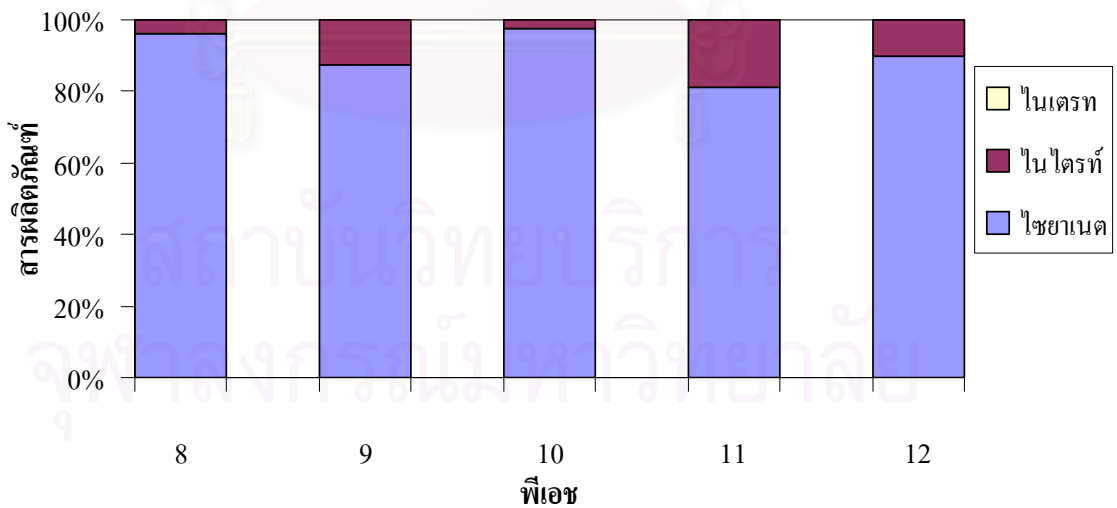
*ที่มา: ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่ฟิเอช 10 ทุกความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูงสุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 90-100% และจากการสังเกต พบว่า สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา คือ ไซยาเนต ทุกฟิเอช และทุกความเข้มข้นจะตรวจพบ ไนไตรท์และไนเตรทเพียงเล็กน้อย

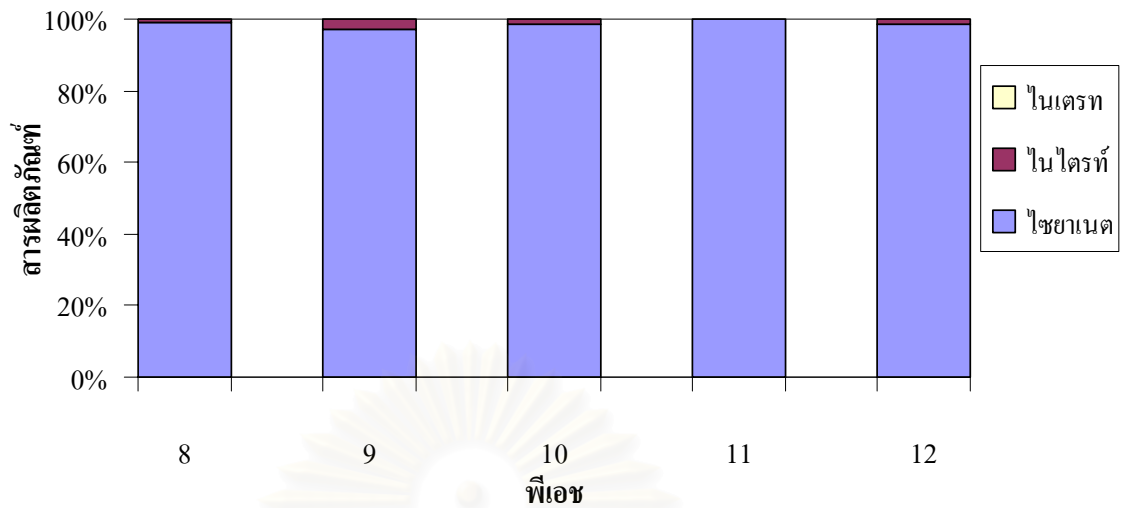


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์กับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนต์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

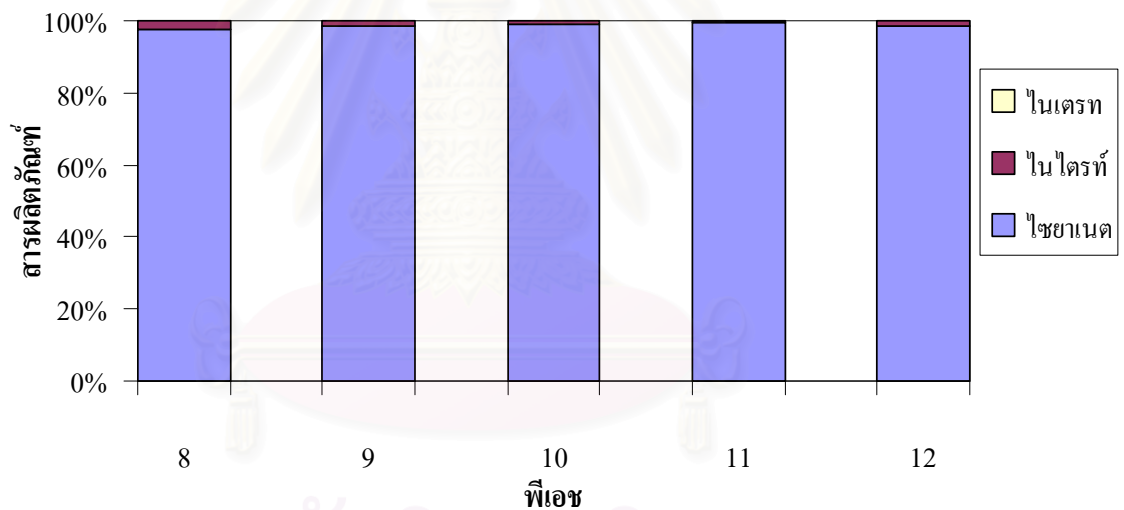
ผลการทดลองในส่วนของผลของพีเอชต่อสารผลิตภัณฑ์พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1:1 สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ไชยานेत ทุกๆพีเอช และทุกความเข้มข้นเริ่มต้น โดยตรวจพบไนเตรทและไนเตรทเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ก. ความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์



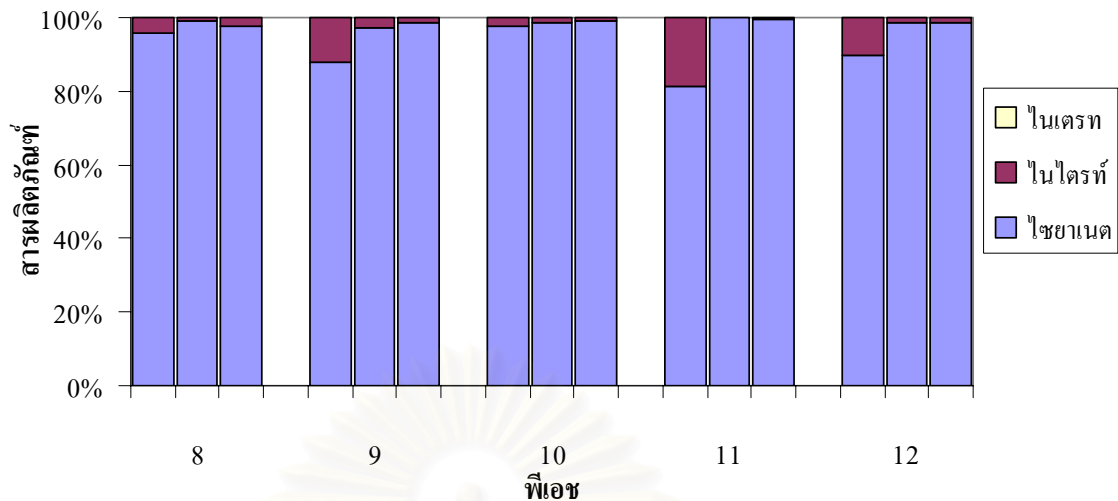
รูปที่ 4.5 ข. ความเข้มข้นไชยานัตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.5 ค. ความเข้มข้นไชยานัตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับฟิเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอไรต์ต่อไชยานัตเท่ากับ 1:1

เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับดังรูปที่ 4.6 พบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอไรต์กับไชยานัตเป็นไชยานัตเกือบ 100 % ทุกฟิเอช



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยากับพืเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนด์เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนด์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

จากการทดลองที่ 4.2.1 ในส่วนของผลของพืเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดไชยาไนด์พบว่า ในช่วงพืเอช 10 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์สูงที่สุด เนื่องจากที่พืเอชดังกล่าวอัตราการสลายตัวของเฟอร์เรตต่ำจึงทำให้มีความเสถียรสูง (Graham และคณะ, 2004) จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์สูงถึงร้อยละ 90-100 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (1998) และ สีลาวัช ดำรงศิริ (2548) ที่พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ในช่วงพืเอชดังกล่าวสูงถึงร้อยละ 90-100 เช่นกัน และสารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยา คือ ไชยาเนต ทุกพืเอช สารผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไชยาไนด์ คือ ไชยาเนต ทุกพืเอช ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (2005) และคาดว่าเฟอร์เรตไม่ทำปฏิกิริยากับไชยาเนต

ในส่วนของความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนด์ พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนด์ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ที่เพิ่มขึ้นด้วย และพบว่าอีดีทีเอไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ทุกค่าพืเอช และทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนด์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอู่แก้ว เอี่ยมสำอาง (2547) ซึ่งศึกษาผลของอีดีทีเอในการกำจัดไชยาไนด์ในน้ำเสีย โดยวิธีอัลคาไลน์คลอรีนชันและออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยผลการศึกษพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์มากกว่าร้อยละ 90 ทั้งสองวิธี โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนด์ใกล้เคียงกับการทดลองโดยวิธีออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต แสดงว่าอีดีทีเอไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไชยาไนด์

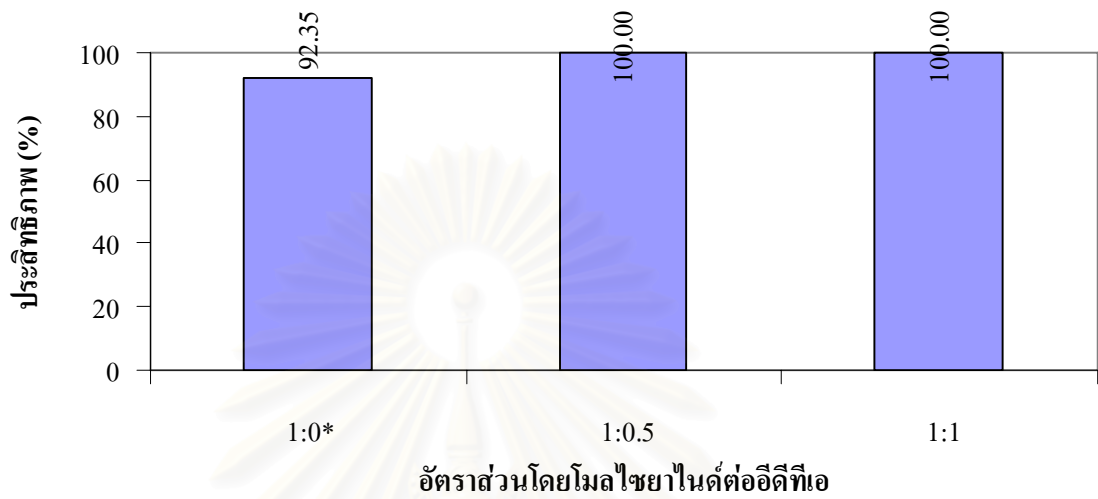
4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์และอิตีทีเอและความเข้มข้นของไซยาไนต์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์

ในการทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนต์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์ โดยแต่ละค่าความเข้มข้นมีการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเป็น 1:0.5 1:1 1:2 และ 1:4 โดยทำการทดลองที่พีเอช 10 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2.1 และในแต่ละอัตราส่วนจะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์เป็น 0.2:1 0.4:1 0.6:1 และไปจนกว่าเฟอร์เรตจะสามารถกำจัดไซยาไนต์หมด

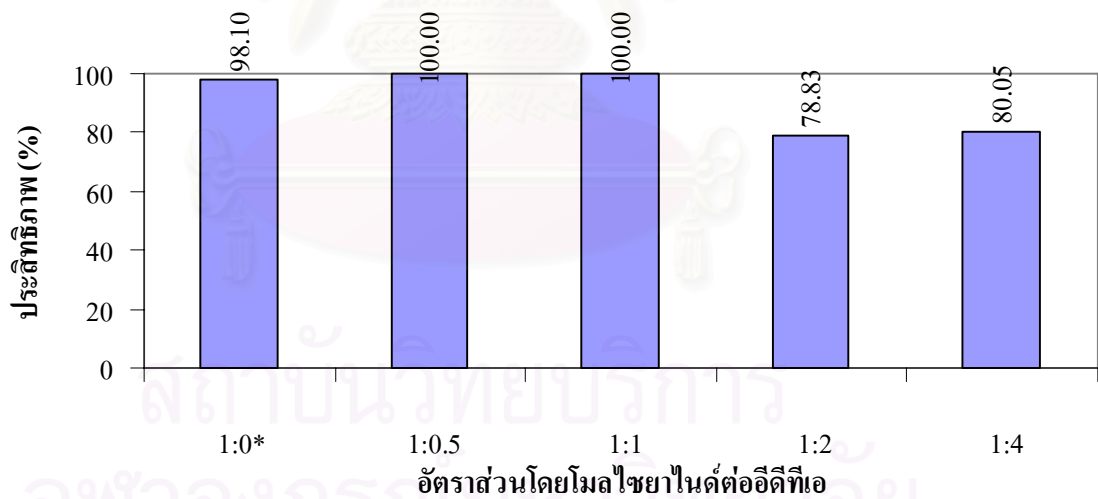
ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วน โดยโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนต์และอิตีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์พบว่าที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:0.5 1:1 1:2 และ 1:4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ จะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเป็น 1:0.5 และ 1:1 ดังรูปที่ 4.5 ก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 100 และ 100 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ จะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเป็น 1:0.5 1:1 1:2 และ 1:4 ดังรูปที่ 4.5 ข. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 100 100 78.83 และ 80.05 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์จะแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเป็น 1:0.5 และ 1:1 ดังรูปที่ 4.5 ค. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 100 และ 97.16 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอเท่ากับ 1:0.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ $\geq 99\%$ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอิตีทีเอเท่ากับความเข้มข้นของไซยาไนต์จะทำให้ความสามารถในการกำจัดไซยาไนต์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการทดลองของ สีลาวัฐ ดำรงศิริ (2548) ได้แสดงว่าการกำจัดไซยาไนต์เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนต์จะอยู่ระหว่าง 90-100% พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณอิตีทีเอน้อยกว่าหรือเท่ากับความเข้มข้นของไซยาไนต์ (อัตราส่วนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1:1) ปริมาณของอิตีทีเอจะไม่มีผลต่อการกำจัดไซยาไนต์ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน โดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอ เท่ากับ 1:2 และ 1:4 พบว่าความเข้มข้นของไซยาไนต์มีค่าลดลงใกล้เคียงกันคือร้อยละ 21.17 และ 19.95 ตามลำดับ เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออิตีทีเอ เท่ากับ 1:0.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ได้สูงที่สุด ซึ่งสามารถกำจัดไซยาไนต์ได้ $\geq 99\%$ และใช้ความเข้มข้นของเฟอร์เรตน้อยที่สุดด้วย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอิตีทีเอทำให้ต้องการสารเคมีที่มาบำบัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิตีทีเอในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าความเข้มข้นของไซยาไนต์ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์ลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองของอู่แก้ว เอี่ยม

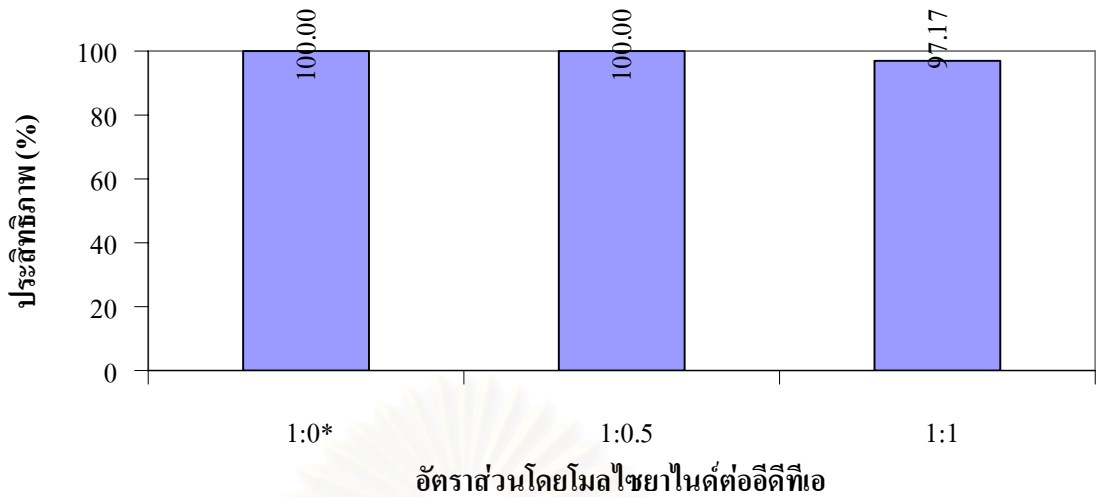
ลำอาจ (2547) ที่พบว่าอีดีทีเอไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และเมื่อเพิ่มปริมาณอีดีทีเอมากกว่าไซยาไนด์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ก. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 50 ไมโครโมลาร์



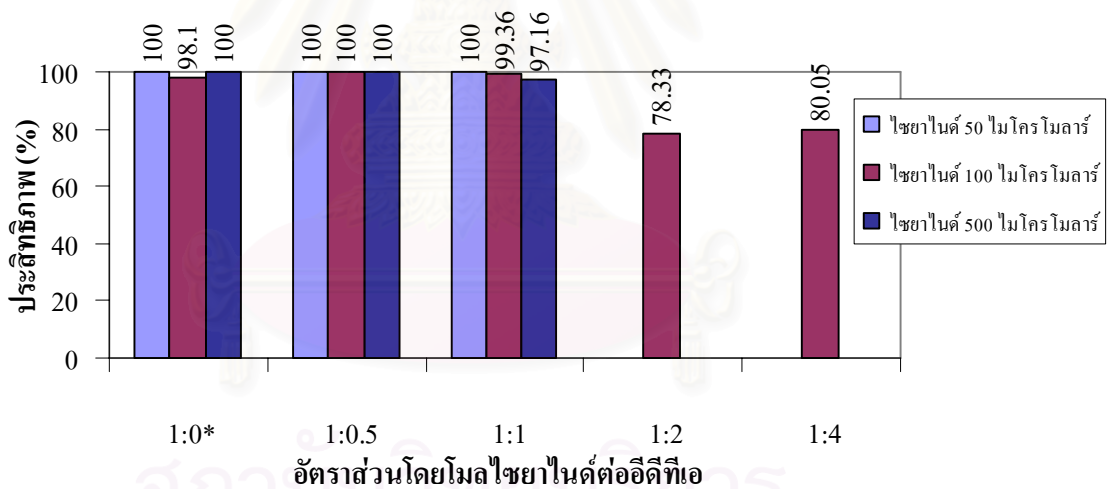
รูปที่ 4.7 ข. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 100 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.7 ค. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนต์ 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์และอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออีดีทีเอ ที่พีเอช 10

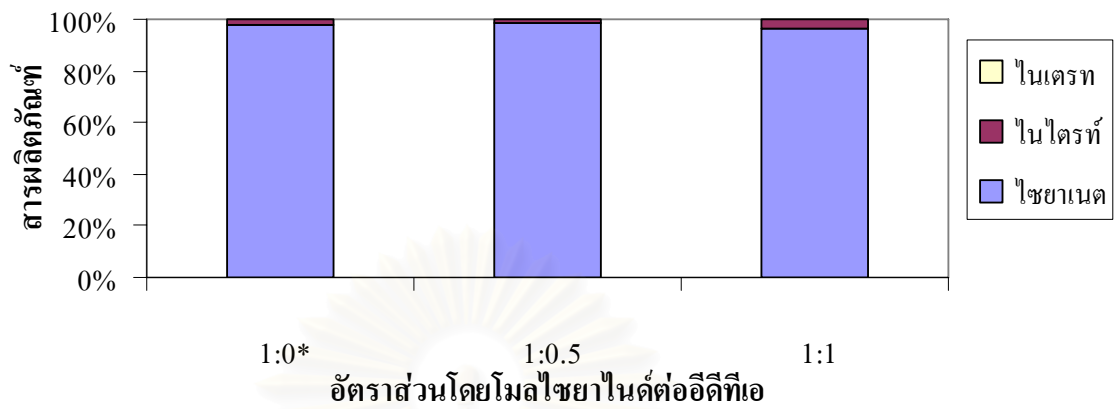
*ที่มา: ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548)



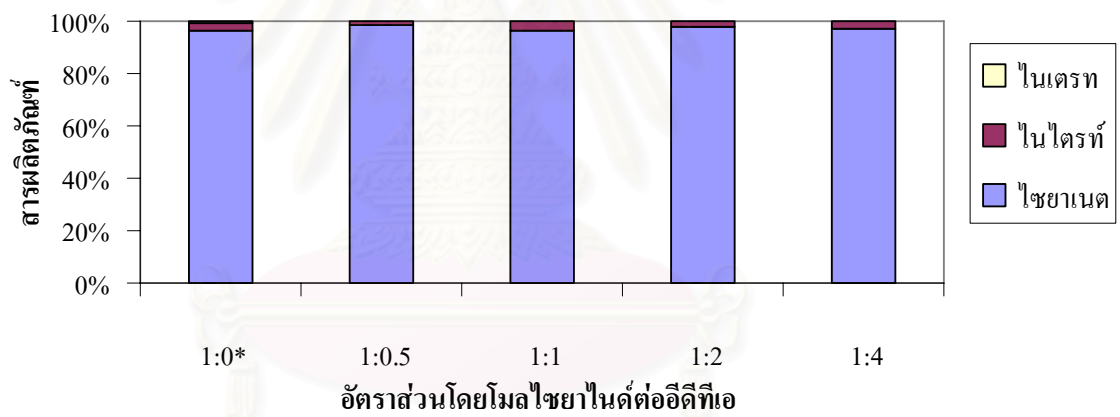
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนต์กับอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออีดีทีเอ ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนต์ 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

*ที่มา: ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548)

ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนต์และอีดีทีเอต่อสารผลิตภัณฑ์ ที่พีเอช 10 พบว่า สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ไซยาเนตทุกค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนต์ต่ออีดีทีเอ และทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (2005) โดยตรวจพบไนไตรท์และไนเตรทเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.1 ดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

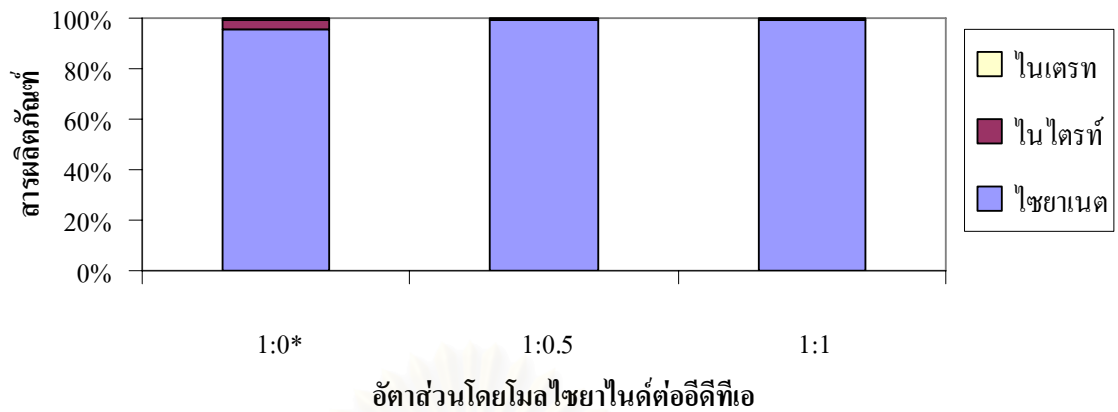


รูปที่ 4.9 ก. ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไนต์ 50 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 4.9 ข. ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมไนต์ 100 ไมโครโมลาร์

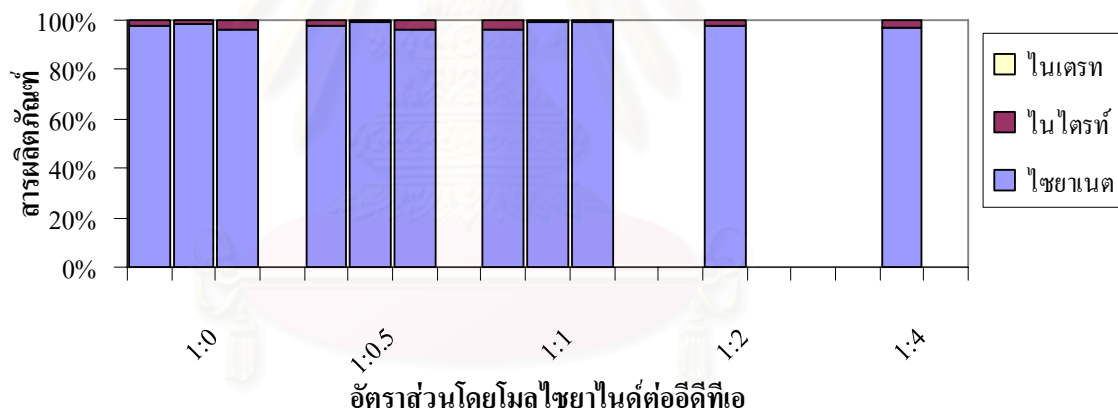
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ก. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยานต 500 ไมโครโมลาร์

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลไชยานตต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10

*ที่มา: ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548)

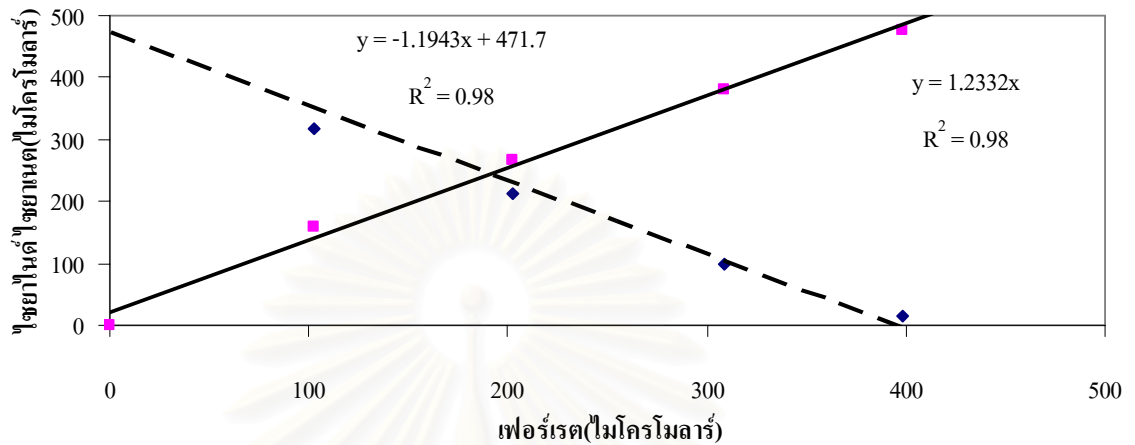


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของสารผลิตภัณฑ์ต่ออัตราส่วน โดยโมลไชยานตต่ออิตีทีเอ ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยานต 50 100 และ 500 ไมโครโมลาร์

4.2.3 ผลของอิตีทีเอต่ออัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไชยานตในการทำปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดไชยานตและสารผลิตภัณฑ์

ทดลองที่พีเอช 10 นำเสียดังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยานต 500 ไมโครโมลาร์ มีอิตีทีเอและไม่มีอิตีทีเอ โดยนำเสียดังเคราะห์ที่ไม่มีอิตีทีเอใช้ผลการทดลองของ ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) โดยใช้สารละลายบอร์เรต 0.01 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ อัตราส่วนโดยโมลไชยานตต่ออิตีทีเอ เป็น 1:1 และแปรค่าความเข้มข้นของเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์

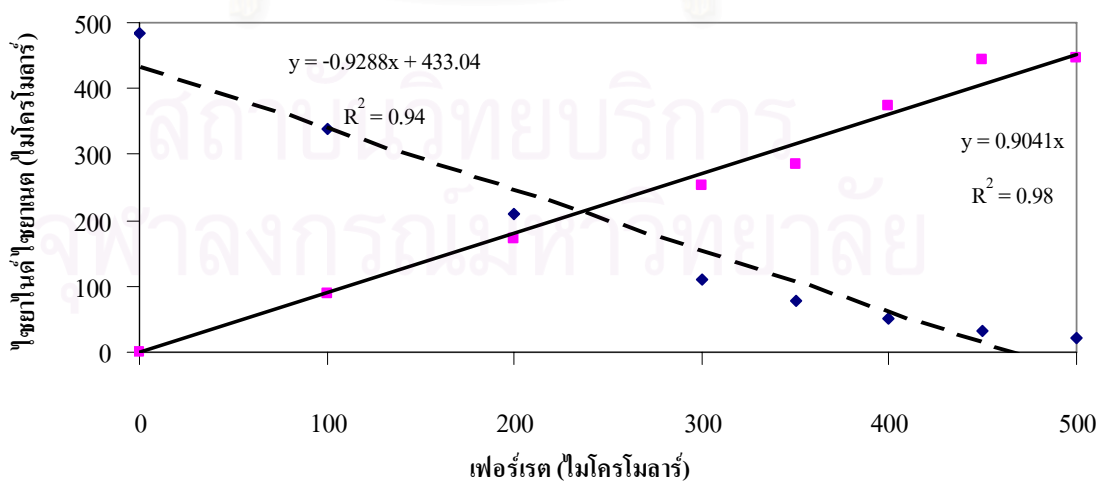
ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีอีดีทีเอ โดยการทดลองของสีลาวัช ดำรงศิริ (2548) พบว่า อัตราส่วนไซยาไนด์ที่ลดลงต่อเฟอร์เรตที่ใช้ที่พีเอช 10 มีค่าเท่ากับ 1.1943 และ อัตราส่วนไซยานเนตที่เกิดขึ้นกับเฟอร์เรตที่ใช้ที่พีเอช 10 มีค่าเท่ากับ 1.2332. ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยานเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีอีดีทีเอ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10

*ที่มา:สีลาวัช ดำรงศิริ (2548)

ผลการทดลองกับน้ำเสียที่มีอีดีทีเอพบว่า อัตราส่วนไซยาไนด์ที่ลดลงต่อเฟอร์เรตที่ใช้ที่พีเอช 10 มีค่าเท่ากับ 0.9288 และอัตราส่วนไซยานเนตที่เกิดขึ้นกับเฟอร์เรตที่ใช้ที่พีเอช 10 มีค่าเท่ากับ 0.9041 ดังรูปที่ 4.12



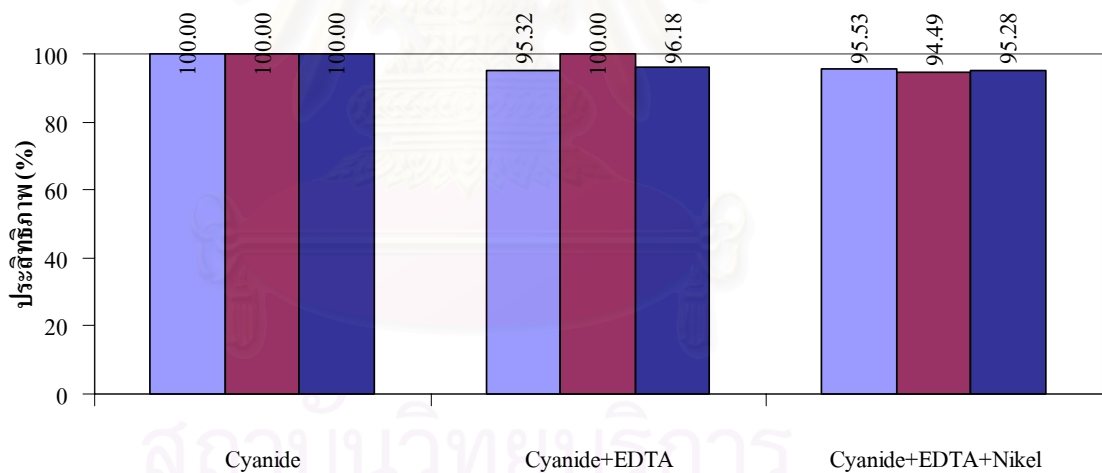
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่เหลือ และไซยานเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอีดีทีเอ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ที่พีเอช 10

4.3 ผลการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ อีดีทีเอและนิเกิล

4.3.1 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ อีดีทีเอและนิเกิล ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ในการทดลองใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของอีดีทีเอ 500 ไมโครโมลาร์ และค่าความเข้มข้นของนิเกิลอิ่มตัว ซึ่งที่พีเอช 10 ค่าความเข้มข้นของนิเกิลอิ่มตัวเท่ากับ 100 ไมโครโมลาร์ โดยมีการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เป็น 0.2:1 0.4:1 0.6:1 และไปจนกว่าเฟอร์เรตจะสามารถกำจัดไซยาไนด์หมด โดยทำการทดลองที่พีเอช 10 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2.1 โดยในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออีดีทีเอต่อนิเกิลอิ่มตัวเท่ากับ 1:1:0.2

ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อโมลไซยาไนด์ อีดีทีเอและนิเกิล ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์พบว่าที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออีดีทีเอต่อนิเกิลอิ่มตัวเท่ากับ 1:1:0.2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ ดังรูปที่ 4.13 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.53 94.49 และ 95.28 ตามลำดับ



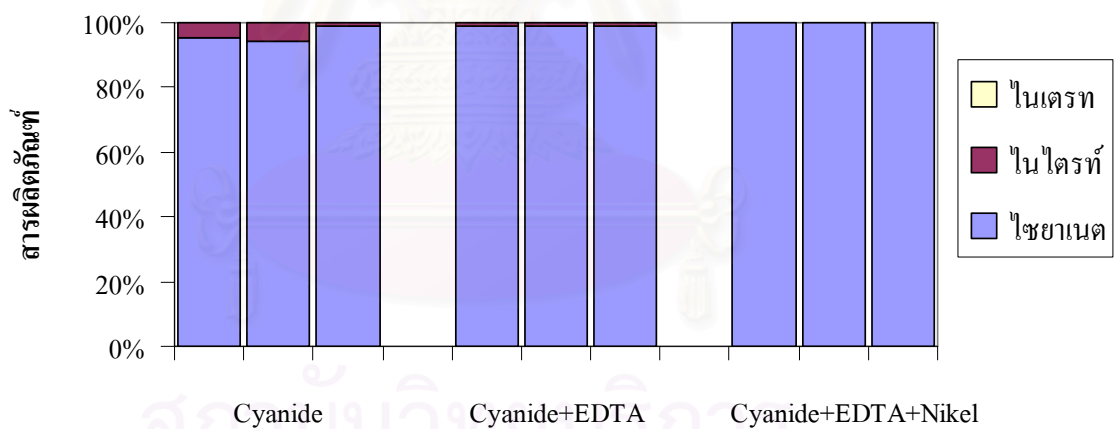
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออีดีทีเอต่อนิเกิลที่พีเอช 10 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าเมื่อเพิ่มสารอีดีทีเอและนิเกิลลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะลดลงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเทียบกับการทดลองของ ศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 10 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูงถึง $\geq 99\%$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (1998) แต่เมื่อเติมสารอีดีทีเอและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลงร้อยละ 2.83 และ 4.90 ตามลำดับ เนื่องจากในการทำ

ปฏิกิริยาของอิตีทีเอจะทำปฏิกิริยากับนิเกิลได้เร็วกว่าที่ไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับนิเกิล ซึ่งดูได้จากค่า K_f ของการทำปฏิกิริยาของสารทั้งสองชนิด ค่า K_f ของ $NiCN_4^{2-}$ เท่ากับ 2×10^{31} และค่า K_f ของ $NiEDTA^{2-}$ เท่ากับ 3.6×10^{18} จึงอธิบายได้ว่านิเกิลจะทำปฏิกิริยาได้กับอิตีทีเอได้เร็วกว่าไซยาไนด์ ซึ่งถือได้ว่าอิตีทีเอและนิเกิลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์

รูปแบบของไซยาไนด์สามารถคำนวณได้ตามทฤษฎี ไซยาไนด์ในสารละลายที่มีอิตีทีเอและนิเกิลอิ่มตัว จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับอิตีทีเอและนิเกิล หมายความว่าไซยาไนด์ที่เติมลงไปจะ ไปจับกับไอออนของสารทั้งสอง และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของนิเกิลกับไซยาไนด์และนิเกิลกับอิตีทีเอ โดยที่พีเอช 10 ไซยาไนด์ส่วนมากจะอยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระ และจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของ $Ni(CN)_4^{2-}$

ผลการทดลองในส่วนของผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ อิตีทีเอและนิเกิลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 10 พบว่า สารผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ไซยาเนตทุกค่าอัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอ และทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sharma และคณะ (2005) โดยตรวจพบไนไตรท์และไนเตรทเล็กน้อยเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.1 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนโดยโมลไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอต่อนิเกิล ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์

4.4 ผลการทดลองกับน้ำเสียจริง

4.4.1 ผลการตรวจวัดน้ำเสียจริง

นำน้ำเสียจริงที่ได้รับจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม 5 ตัวอย่าง เก็บเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2549 มาตรวจวัดคุณลักษณะของน้ำเสีย ซึ่งผลการตรวจวัดสามารถแสดงดังตารางที่ 4. 2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงคุณลักษณะของน้ำเสียจริง

ลักษณะน้ำเสีย	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5
ไซยาไนด์	541.392	503.174	447.415	653.595	674.607
โครเมียม	26.58	8.85	30.21	0.697	37.97
ทองแดง	28.67	12.432	3.8304	12.68	19.288
เหล็ก	0.784	2.492	0.74	0.141	2.37
นิกเกิล	30.06	17.56	4.55	2.30	28.95
สังกะสี	1.32	8.169	0.53	3.08	0.144
อีดีทีเอ	N.D	N.D	N.D	13.48	N.D

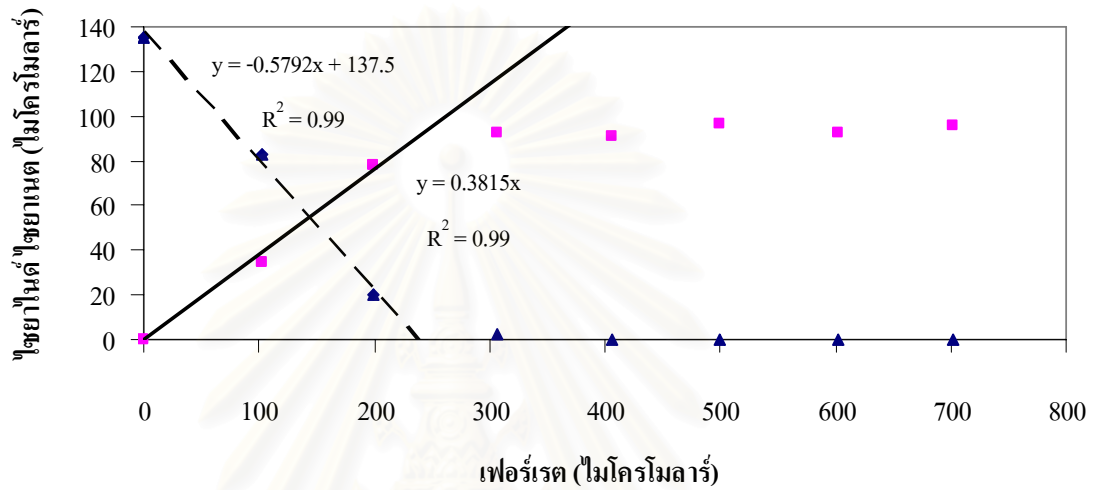
4.4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ในน้ำเสียจริง

ทดลองบำบัดน้ำเสียจริงโดยการเจือจางตัวอย่างละ 100 เท่า หลังการเจือจางค่าความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น เท่ากับ 135.22 108.60 93.68 110.56 และ 107.56 ตามลำดับ ปรับพีเอชเป็น 10.01 10.02 10.10 10.09 และ 10.05 ตามลำดับ แปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเป็น 50 100 150 200 250 300 350 และ 400 ไมโครโมลาร์

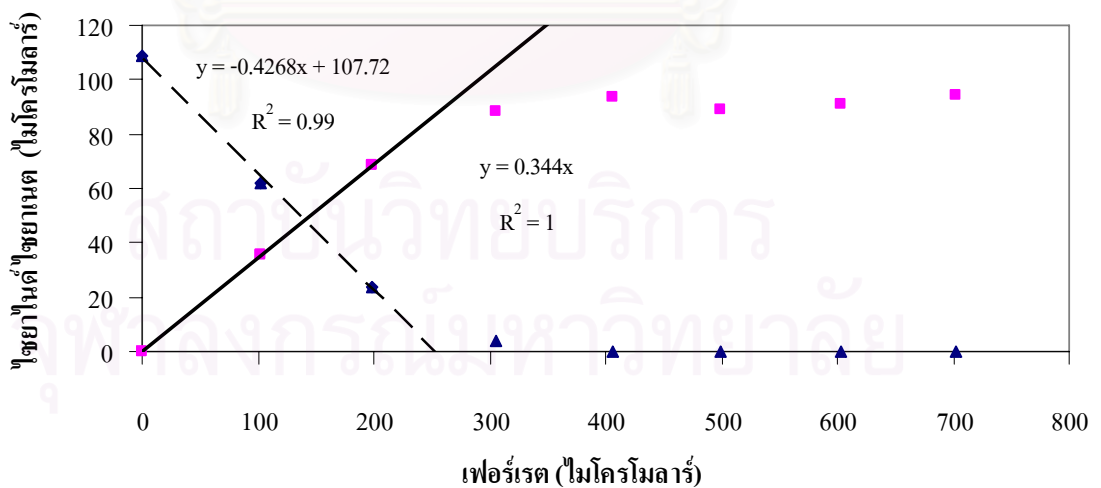
ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่เฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลงมีค่าเท่ากับ 0.5792 0.4268 0.4159 0.4024 และ 0.4009 ตามลำดับ อัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.3815 0.3440 0.3054 0.3091 และ 0.2873 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่ลดลง กับอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้ต่อไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น ประมาณ 1:0.3853 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เท่ากับ $\geq 99\%$ คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ประมาณ 2.41 เท่าของค่าจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเป็นไซยาเนตทั้งหมด

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนแผนภูมิ โดยให้ความเข้มข้นเฟอร์เรตที่ใช้เป็นแกน X และให้ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลือและไซยาเนตที่เกิดขึ้นเป็นแกน Y และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ความชันจากกราฟทั้ง 2 จะเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา การทดลองกับน้ำเสียจริง มีผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.15 และเนื่องจากไซยาเนตเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากไซยาไนด์ จึงสามารถนำอัตราส่วนไซยาไนด์ที่เหลือต่อเฟอร์เรตที่ใช้ และ อัตราส่วนไซยาเนต ที่เกิดขึ้นกับเฟอร์เรตที่ใช้ มาเฉลี่ยกันเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น ซึ่งพบว่าอัตราส่วนทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน

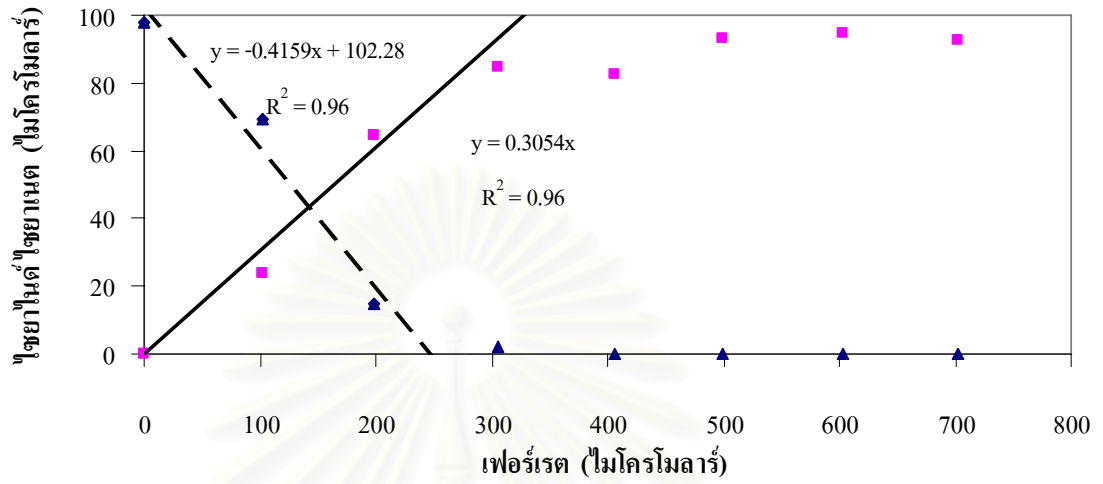
ภายหลังการทดลองที่ความเข้มข้นเฟอร์เรต 203.476 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเฟอร์เรตที่ต่ำที่สุดที่สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ทั้งหมด พบว่าพีเอชของน้ำตัวอย่างมีค่าลดลงเล็กน้อยซึ่งจะอยู่ในช่วง 9.80-9.95 และความเข้มข้นของเฟอร์เรตสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองคือ 403.04 ไมโครโมลาร์



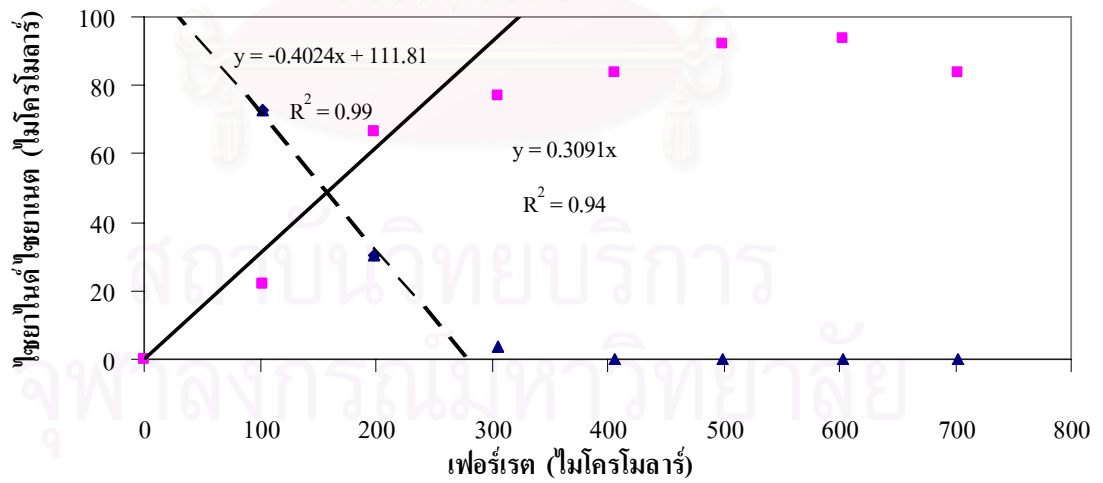
รูปที่ 4.15 ก.



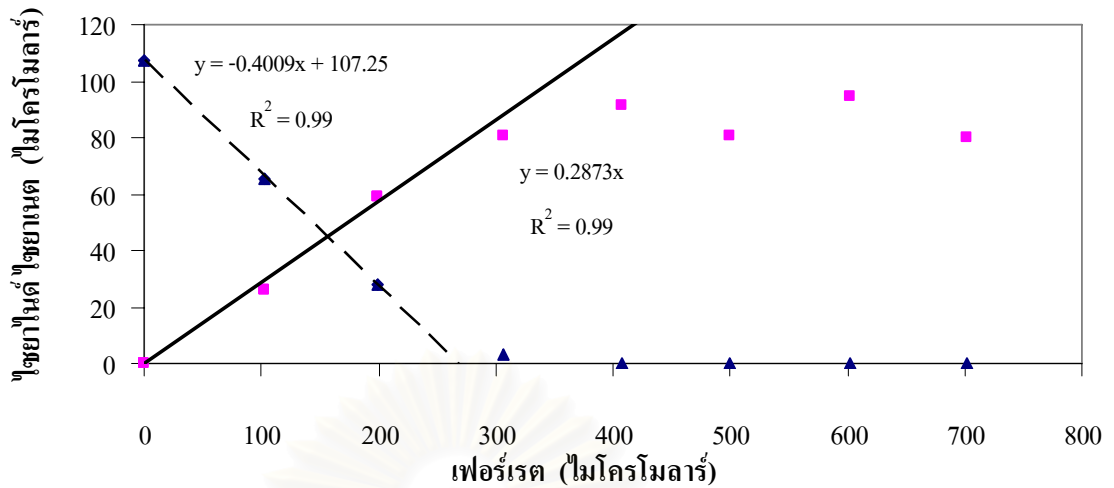
รูปที่ 4.15 ข.



รูปที่ 4.15 ก.



รูปที่ 4.15 ง.



รูปที่ 4.15 จ.

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ที่ลดลง และไซยาเนตที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียจริง

จากการทดลองข้างต้น ไซยาเนตเป็นสารผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวที่เกิดขึ้น ไซยาไนด์ที่ลดลงจึงสัมพันธ์กับไซยาเนตที่เพิ่มขึ้นโดยตรง ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองข้างต้น สามารถคิดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใส่ต่อไซยาไนด์ที่ลดลง กับอัตราส่วนเฟอร์เรตที่ใช้กับไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในน้ำเสียจริง ที่พีเอช 10 ได้เท่ากับ 0.3853

จากผลการทดลองที่ 4.4.1 พบว่าน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงมากและมีองค์ประกอบหลักที่เป็นโลหะคือ นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จากการทดลองที่ 4.4.2 พบว่าเฟอร์เรตสามารถใช้กำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ในปริมาณมากกว่าค่าจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 2.41 เท่า คาดว่าการใช้ปริมาณของเฟอร์เรตที่เพิ่มขึ้นนั้น เกิดจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นสูงจะมีผลทำให้พีเอชของน้ำตัวอย่างหลังการบำบัดมีค่าลดลงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของการกำจัดไชยาไนต์และอิดีทีเอในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ในด้านของประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์และอิดีทีเอ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกำจัดไชยาไนต์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 ใช้บอร์เรต 0.01 ไมโครโมลาร์เป็นบัฟเฟอร์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของไชยาไนต์และอิดีทีเอ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

5.1.1 การกำจัดอิดีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของอิดีทีเอ โดยใช้กระบวนการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรตนั้น สามารถกำจัดอิดีทีเอได้เพียงเล็กน้อย พบว่าที่พีเอช 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดอิดีทีเอได้สูงสุด ซึ่งสามารถกำจัดอิดีทีเอได้ประมาณร้อยละ 40 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอิดีทีเอในแต่ละพีเอชมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป

5.1.2 ผลของอิดีทีเอต่อการกำจัดไชยาไนต์โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดไชยาไนต์ คือพีเอช 10 โดยตรวจสอบจากประสิทธิภาพการกำจัดไชยาไนต์สูงสุด คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์มากกว่าร้อยละ 95 สอดคล้องกับการทดลองของสีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) และผลการทดลองพบว่า อิดีทีเอไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ และ สารผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อมีปริมาณอิดีทีเอมากกว่าความเข้มข้นของไชยาไนต์จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ลดลง โดยถ้ามีความต้องการกำจัดไชยาไนต์มากกว่าร้อยละ 99 จะต้องเพิ่มปริมาณเฟอร์เรตมากกว่าความเข้มข้นของไชยาไนต์ เมื่อเพิ่มนิเกลือลงไป ในน้ำเสียสังเคราะห์ มีผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก คือสามารถกำจัดไชยาไนต์มากกว่าร้อยละ 90

5.1.3 การทดลองกับน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

ตัวอย่างน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่นำมามีความเข้มข้นไชยาไนต์เฉลี่ยสูงถึง 564.04 มก./ล. หรือ คิดเป็น 21,693.72 ไมโครโมลาร์ และมีความเข้มข้นอิดีทีเอ 13.48 มก./ล. หรือคิดเป็น 46.12 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นของไชยาไนต์ในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีค่ามากกว่าความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ทดลองมาก ในการทดลองโดยการเจือจาง 100 เท่า ทำให้ความเข้มข้นต่างๆลดลงโดยเหลือ

ความเข้มข้นไซยาไนด์ 108.46 ไมโครโมลาร์ และ อีดีทีเอ 0.46 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นค่าอีดีทีเอที่น้อยกว่าที่ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์มาก

การกำจัดไซยาไนด์ด้วยเฟอร์เรตในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ มีประสิทธิภาพสูงถึง 100 % โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับประมาณ 1:0.45 หรือ ซึ่งคิดเป็น 2.41 เท่าจากผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากผลจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆที่เจือปนอยู่ในน้ำที่อาจส่งผลโดยการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตโดยตรง หรือส่งผลให้ค่าความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง หรือมีผลทำให้ปฏิกิริยาช้าลงมากทำให้เฟอร์เรตบางส่วนสลายตัวไป ซึ่งทำให้ต้องการเฟอร์เรตในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

เปรียบเทียบการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีอัลคาไลน์ คลอรีนชัน วิธีออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ในกรณีที่มีอีดีทีเอ โดยสองวิธีแรกจะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งสองวิธีนี้จะมีข้อจำกัดในการทดลองโดยจะต้องทำในสภาวะที่เหมาะสม เพราะถ้าสภาวะในการทดลองไม่เหมาะสมสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจะเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง ส่วนวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรตนั้น ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ 500 ไมโครโมลาร์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ $\geq 99\%$ โดยถ้าไม่ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมก็จะไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ จึงเป็นวิธีที่ปลอดภัยและเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยถึงการกำจัดไซยาไนด์และอีดีทีเอในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

- 1.ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของอีดีทีเอ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถกำจัดอีดีทีเอได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม โดยหาอัตราส่วนเฟอร์เรตต่ออีดีทีเอที่เหมาะสม และเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสีย ด้วยวิธีอื่นๆ
- 2.ศึกษาปริมาณของอีดีทีเอที่อยู่ในน้ำเสีย ว่าสามารถมีค่าได้มากสูงสุดเท่าไรจะทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดไซยาไนด์ลดลงมาก
- 3.ศึกษาถึงผลของโลหะหนักอื่นๆ มากกว่าสองชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จารุวรรณ วิระวษัญสูตร. 2542. การบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ. วารสารโรงงาน ปีที่ 17 เล่มที่ 3 : 28-32.

ชลชัย โพธิพันธ์, นันทนา ศิริพันธ์ และ ประทีน กุลละวณิชย์. 2540. การหาสถานะที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะหนักและกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ. งานวิจัยสำหรับหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานน้ำทิ้ง[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/?=1.02411305\[2548,พ.ศ. 31\]](http://www.pcd.go.th/?=1.02411305[2548,พ.ศ. 31]) :

ประยูร ฟองสติกข์กุล, ชลาชัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และ วิสิทธิ์ สุขป้อม. การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยสารโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต. วารสารสาธารณสุขศาสตร์ ปีที่ 29 ฉบับที่ 2 (2542): 38-47.

มงคล สุทธิวัฒนกุล และ จารุวรรณ วิระวษัญสูตร. 2542. วิธีกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้ง. วารสารโรงงาน ปีที่ 7 ฉบับที่ 3 : 25-27.

มันสิน ดัชนีกุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ:

โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วิสิทธิ์ สุขป้อม. 2540. การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต. วิทยานิพนธ์สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสุขภาพสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมษายน 2542 : 4-8.

ศีลาวุธ ดำรงศิริ. 2548. ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2535. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนันต์ ทองมอญ. 2527. ชุบโลหะ-ชุบโครเมียม. กรุงเทพมหานคร : เรือนแก้วการพิมพ์.

อู่แก้ว เอี่ยมสำอางค์. 2547. ผลของอัตราที่เอื้อต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยวิธีอัลคาไลน์คลอริเนชันและปฏิกิริยาการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย

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

ภาษาอังกฤษ

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

Adhoum,N.; and Monser, L. 2002. Modified Activated Carbon for 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., and Wend, B. L. 1982. Process Chemistry for water and
wastewater treatment. NJ : Prentice-Hall.

Benjamin, M. M.. 2002. Water chemistry. Ny : McGraw-Hill,

Botz, M. M. 2001. Overview of Cyanide Treatment Method. Mining Environmental
Management,. UK : Mining Journal,

Chao, A. C.; Luca, S. J.; and Idleal, C. N. 1996. Quality Improvement of Biosolids by Ferrate
(VI) Oxidation of Offensive Odour Compound. Water Science and Technology 33 : 119-
130.

Chamberlian, N. S., and Synder, H.B. 1965. Technology of treating plating wastes. Proc. Tenth
Purdue Industrial Conference : 227.

Chemicaland21. 2003. Chelating Agent. Available from:

<http://www.chemicaland21.com/arokorhi/speciallychem/perchem/CHEALATING%20AGENTS.html> [2004, November 18]

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.

- Chitra, S.; Paramasivan, K.; Sinha, P. K.; and Lal, K. B. 2004. Ultrasonic treatment of liquid waste containing EDTA. J.Cleaner Production 12 : 429-435.
- Dart, M. C.; Gentles, J. D.; and Renton, D. G. 1963. Electrolytic Oxidation of Strong Cyanide Waste. J.Appl.Chem 17 : 55-64.
- Davis P.; and Green, D. L. 1999. Photocatalytic oxidation of Cadmium-EDTA with Titanium dioxide. Environ. Sci. Technol. 12 : 669-673.
- Dionex Corporation. Direct Determination Of Metal Cyanides by Ion Chromatography with UV Absorbance Detection. Application update 147.
- Dursun, A. Y.; Calik, A.; and Aksu, Z. 1999. Degradation of Ferrous(II) Cyanide complex Ion By Pseudomonas Fluorescens. Process Biochemistry 34 : 901-908.
- Ebbs, S. 2004. Biological degradation of Cyanide Compound. Current option in biotechnology 15 : 1-6.
- El-Ghaoui, E. A.; Jansson, R. E. W.; and Moreland, C. 1982. Application of the Trickle Tower to Problema of Pollution Control.II. The Direction and Indirect Oxidation of Cyanide. J.Appl.Electrochem 12 : 669-673.
- Emilio, C. A., Jardim, W. F. ., Litter M. I., and. Mansilla H. D.. 2002. EDTA destruction using the solar ferrioxalate advanced oxidation technology (AOT)Comparison with solar photo-Fenton treatment. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 151 : 121-127.
- Gherrou, A.; and Kerdjoudj, H. 2002. Specific Membrane Transport of Silver and Copper as $\text{Ag}(\text{CN})_3^{2-}$ and $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$ Ions through a Supported Liquid Membrane using K^+ -crown Ether as a Carrier". Desalination 151 : 87-94.
- Gillbert, E.; and Hoffmann-Glewe, S. 1990. Ozonation of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) in aqueous solution, influence of pH value and metal ions. Water Research 24 : 39-44.
- Gislaine, G.; Wilson, F. J.; Marta, I. L.; and Hector, D. M. 2004. Destruction of EDTA using Fenton and photo-Fenton-like reactions under UV-A irradiation. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 167 : 59-67.
- Graham, N.; Jiang, C. C.; Li, X. Z.; Jiang, J. Q.; Ma, J. 2004. The Influence of pH on The Degradation of Phenol and Chlorophenols by Potassium Ferrate. Chemosphere 56 : 949-956.

- Hattinger, L. Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry. 2nd ed. Finishing Publications, 1994
- Hine, F.; Yasuda, M.; Lida, T.; and Ogata, Y. 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 Oxidant and Coagulant for Water and Wastewater Treatment. Water Research 36 : 1397-1408.
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., and Duran, N. 2002. Hydrogen peroxide assisted photochemical degradation of ethylenediaminetetraacetic acid. Advances in Environmental Research 7 : 197-202.
- Kurama, H.; and Catalarik, T. 2000. Removal 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.
- Lukey, G. C.; Van Deventer J. S. J.; Huntington, S. T.; Chowdhury, R. L.; and Shallcross, D. C. 1999. Raman Study on the Speciation of Copper Cyanide Complexes in Highly Saline Solutions. Hydrometallurgy 53 : 233-244.
- 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 Liu, W. 2002. Effectiveness and Mechanism of Potassium Ferrate(VI) Preoxidation for Algae Removal by Coagulation. Water Research 36 : 871-878.
- Madden, T. H.; Datye, A. K.; Fulton, M. R.; Majumdar, S. A.; and Stange, B. M. 1997. Oxidant of metal-EDTA complexes by TiO₂ photocatalysis. Environ. Sci. Technol. 31 : 3475-3481.
- Mallinckrodt Baker. 2004. MSDS: Potassium Cyanate[online]. Available from:
<http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/p5697.htm>[2005, September 14]
- Motekaitis, R. J.; Cox, B.; Taylor, P.; and Matel, A. E. 1982. Thermal degradation of EDTA chelates in aqueous solution. Canadian Journal of Chemistry 6 : 1207.

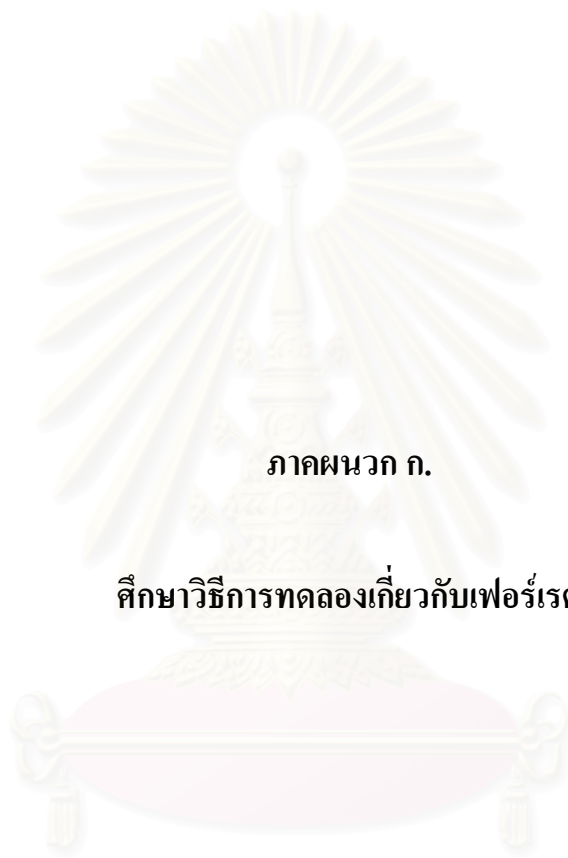
- Moyer, H.R. (1994). Cleaning and degreasing technology report [Online]. Available from :
<http://www.dppr.ctc.com/msds/clndegre/tr050494.htm>[2005, September 14]
- Nation Institute For Occupational Safety and Health. 2002. International Chemical Safety Card : EDTA. [Online]. Available from: <http://www.cdc.gov/nioshi/ipcsneng/neng0886.html>
[2005,September 13]
- Ogutveren, U. B.; Toru, E.; and Koparal, S. 1999. Removal 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.
- Patterson, J. W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. 2nd ed. Butterworth.
- 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.
- Rämo, J.R.; and Sillanpää, M. 2001. Degradation of EDTA by hydrogen peroxide in alkaline conditons. Journal of cleaner Production 9 : 191-195.
- Rania, H.; and Roldan, C. J. Toxicity Cyanide[online]. 2003. Available from:
<http://www.emedicine.com/cgi-bin/foxweb.exe/screen@d:/em/ga?book=med&authored=2689&topicid=487>[2004, June 10]
- Rodriguez, J.B.; Mutis, A.; Yeber, M.C.; Freer, J.; Baeza, J.; and Mansilla, S.D.. 1999. Chemical degradation of EDTA and DTPA in totally chlorine free (TCF) effluent. Wat.Sci. Tech 40 : 267-272.
- Schreyer, J. M.; and Ockerman, L. T. 1951. Stability of the ferrate(VI) ion in aqueous solution. Anal. Chem 23 : 1312-1314.
- Selm, R. P. 1959. Ozone oxidation of aqueous cyanide waste solution in stirred batch reactors and packed tower. Ozone Chemistry and Technology Washington : American chemical Society.
- 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.
- Singer, P. C; and Zilli, W. B. 1975. Ozonation of ammonia in waste water. Water Research 9 : 127-134.
- Solvay Interlox. Cyanide detoxification with hydrogen peroxide [online]. 2001. Available from: <http://www.solvayinterlox.com>[2005, June 10]
- Tyler, R. R., Maske, W., Westin, M. J., and Matthews, W. 1951. Ozonation of cyanide wastes. Sewage industrial Wastes 23 : 1150-1153.
- Tucker, M.D.; Barton, L.L.; Thomas, B.M.; Wangener, B.M.; and Aragon, A.. 1999. Treatment of waste containing EDTA by chemical oxidation. Waste management 19 : 477-482.
- U.S. EPA. 2000. Office of Research and Development. Capsule Report Managing Cyanide in Metal Finishing. EPA625/R-99/009. Cincinnati Ohio,;
- Vohra, M.S.; and Davis, A.P. 2000. TiO₂-assisted photocatalysis of lead-EDTA. Water Research 34 : 952-964.
- White, D. M.; Pilon, T. A.; and Woolard, C. 2000. Biological Treatment of Cyanide Containing Wastewater. Water Research 34, 7 : 2105-2109.
- Yuan, B. L.; Qu, J. H.; and Fu, M. L. 2002. Removal of Cyanobacterial 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.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

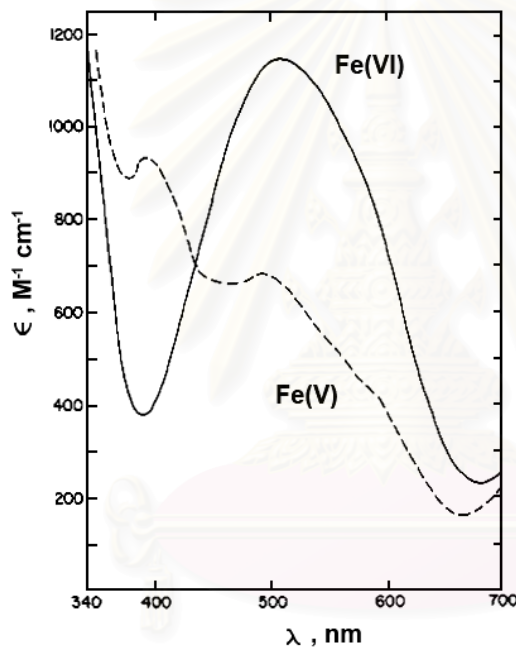
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

ก.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตมีเป็นสารละลายที่มีสีม่วงและสามารถตรวจวัดได้โดย Spectroscopy Method โดยเฟอร์ค่าการดูดซับแสงของเฟอร์เรต มีค่าสูงสุดที่ 510 นาโนเมตร (nm) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ $\epsilon = 1150 \pm 25$ โมลาร์⁻¹เซนติเมตร⁻¹ ($M^{-1}cm^{-1}$) 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

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

เมื่อ

A = ค่าการดูดซับแสง ที่ตรวจวัดได้ ไม่มีหน่วย

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

C = ความเข้มข้นของเฟอร์เรต หน่วย โมลาร์

L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวกลาง มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร สำหรับเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ก.2 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

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

ก.4 การหยุดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์

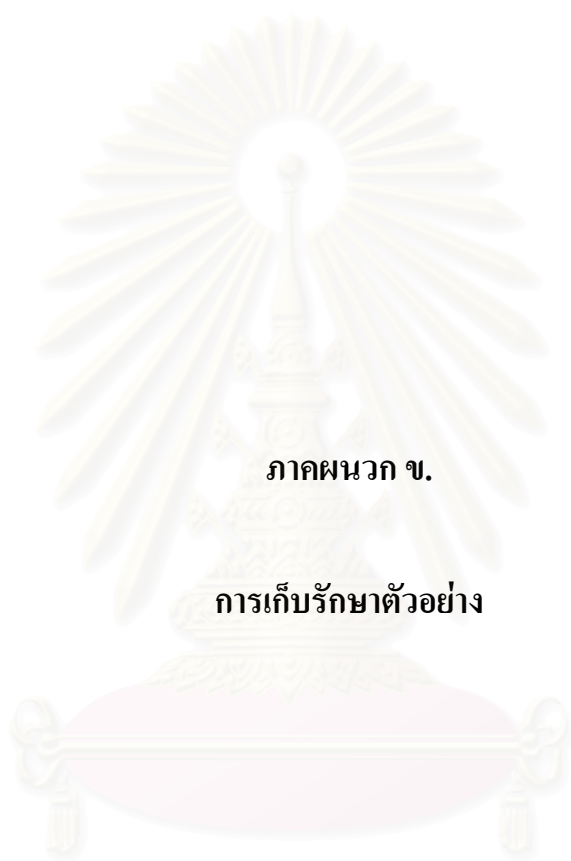
ในการทดลองเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะหยุดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไซยาไนด์ การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยการทำให้เฟอร์เรตหายไปจากตัวอย่างในเวลาที่ต้องการ โดยวิธีการหยุดปฏิกิริยาวิธีหนึ่ง คือการหาสารอื่นๆที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าไซยาไนด์อย่างมาก เติมนลงในตัวอย่างที่ต้องการ

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



ในการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเฟอร์เรต 500 ไมโครโมลาร์ จะใช้ความเข้มข้นอาร์เซไนท์ในการหยุดปฏิกิริยา 750 ไมโครโมลาร์ ซึ่งกระทำโดยเติมสารละลายอาร์เซไนท์ 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มล. ต่อตัวอย่าง 10 มล. สารละลายหลังผสมจะมีเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนท์เท่ากับ 2:3 พอดี

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายอาร์เซไนท์ลงในสารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 8 9 10 11 และ 12 พบว่าสารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซไนท์หมดทันทีโดยสังเกตจากสีม่วงของสารละลายที่หายไปทันที ซึ่งเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดกับไซยาไนด์มาก



ภาคผนวก ข.

การเก็บรักษาตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การเก็บรักษาตัวอย่าง

ข.1 ข้อควรระวังในการเก็บรักษาไซยาไนด์ ไนไตรท์ และไนเตรท

ข้อควรระวังในการเก็บรักษาตัวอย่างมีดังนี้

ข.1.1 การระเหย

เป็นข้อควรระวังที่สำคัญที่สุดสำหรับไซยาไนด์ การระเหยจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อสารละลายมีพีเอช ต่ำกว่า 12

ข.1.2 การเกิดการออกซิไดซ์

การเกิดการออกซิไดซ์ เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารที่มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับ ไซยาไนด์ ไซยาเนต และ ไนไตรท์

ข.1.3 การเกิดปฏิกิริยากับสารเจือปนอื่นๆ

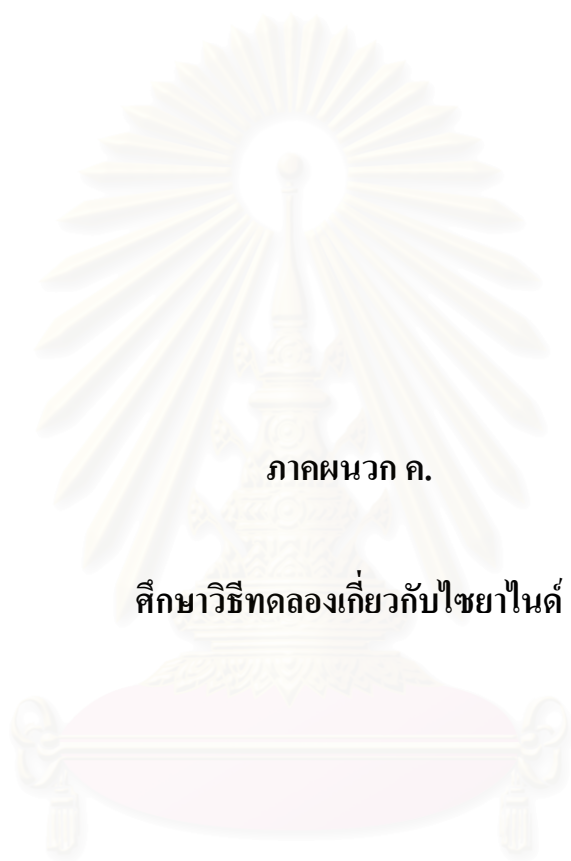
เป็นข้อควรระวังอีกข้อหนึ่งสำหรับไซยาไนด์ เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ (S^{2-}) กลายเป็นไซโอไซยาเนต (SCN⁻) (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2546)

ข.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ

ไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

ข.2 การเก็บรักษาตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ไซยาไนด์ ไนไตรท์ และไนเตรท

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



ภาคผนวก ค.

ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับใยยาไนต์

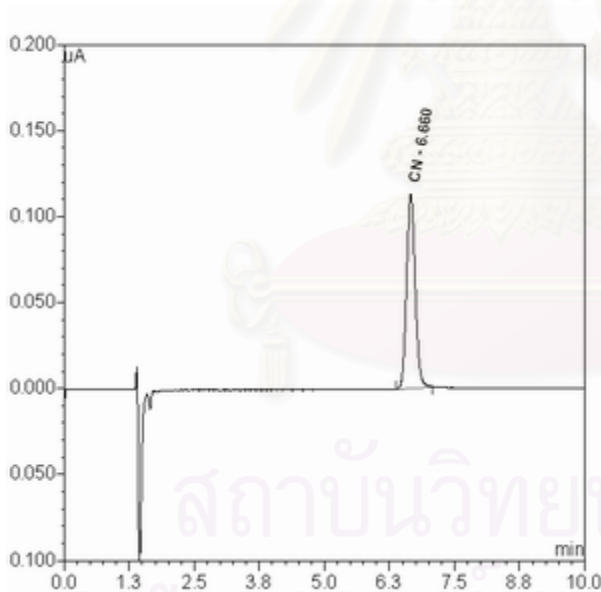
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ศึกษาวิธีทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

ค.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

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



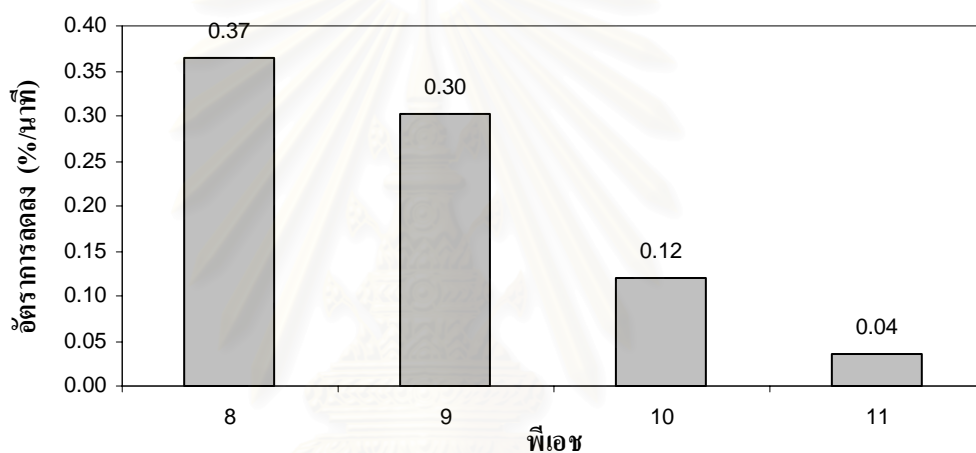
รูปที่ ค.1 สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ

ค.2 การระเหยของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถระเหยได้เมื่ออยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ดังนั้นจึงควรทราบถึงลักษณะในการระเหยของไซยาไนด์เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถทำการทดลองได้อย่างเหมาะสม

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

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลต่ออัตราการระเหยที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การระเหยได้ใกล้เคียงกัน และ การระเหยมีค่าลดลงจากพีเอช 8 ถึง 12 ดังรูปที่ ค.2



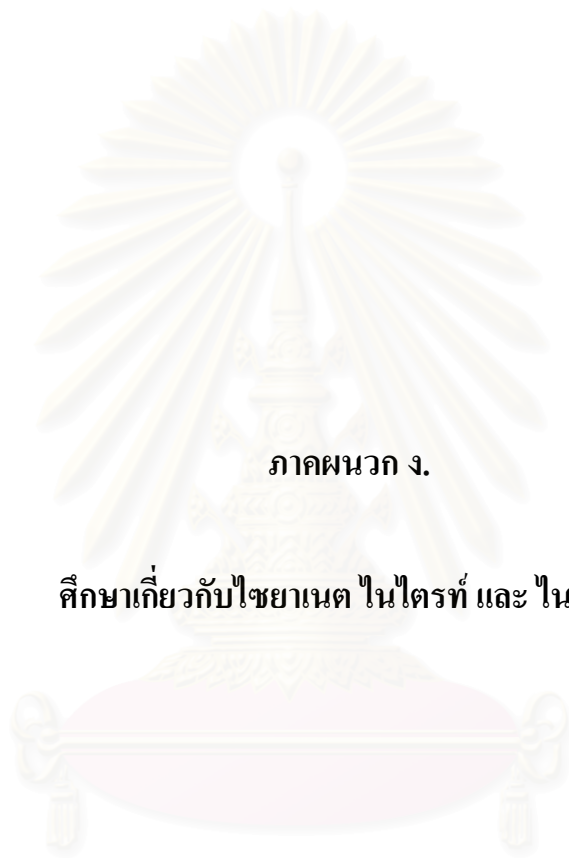
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไซยาไนด์กับพีเอช

ค.3 การเตรียมสารละลายไซยาไนด์

สารละลายไซยาไนด์จะเตรียมโดยผสมโปตัสเซียมไซยาไนด์ 0.064 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ เพื่อให้สารละลายมีพีเอชมากกว่า 12 ปริมาตร 100 มล. ซึ่งจะได้สารละลายไซยาไนด์เข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับสารละลายไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นอื่นให้เจือจางลงมาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ สารละลายที่เตรียมแต่ละครั้งไม่ควรเก็บไว้ใช้งานเกิน 1 สัปดาห์ เนื่องจากสารละลายนี้ใช้ในการทำสารละลายมาตรฐานในการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟด้วย

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะเปิดฝา พีเอช 8 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ต่างๆ

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



ภาคผนวก ง.

ศึกษาเกี่ยวกับไซยานต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

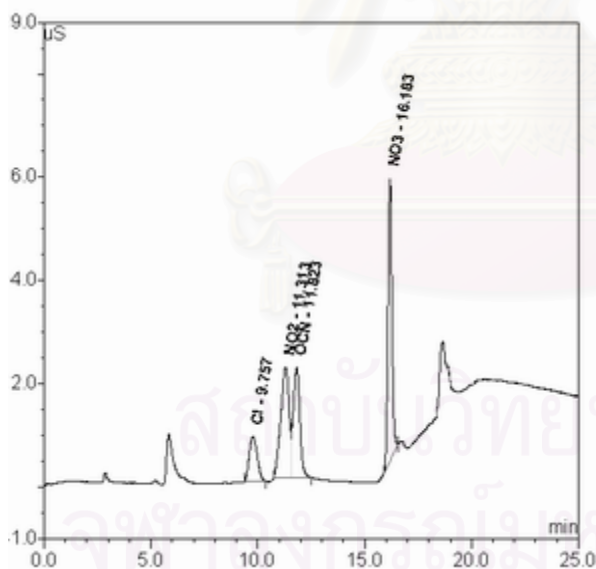
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ศึกษาเกี่ยวกับไซยานเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท

ง.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

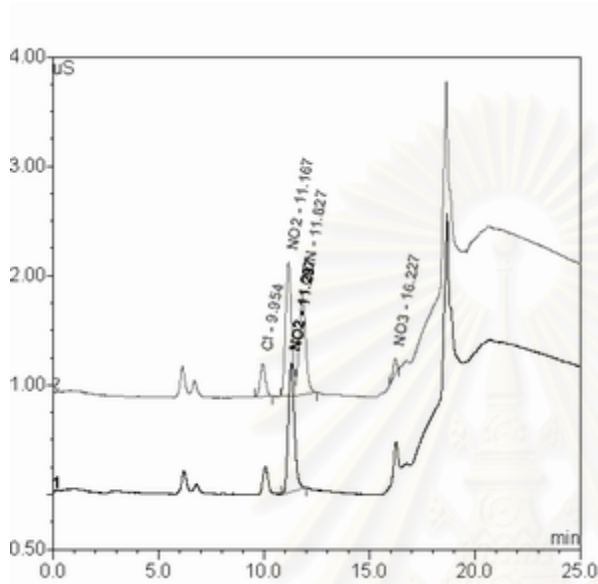
ไซยานเนต ไนไตรท์ และ ไนเตรท สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสารคือ คอลัมน์ AS16 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Suppressor รุ่น ASRS 4 mm โดยใช้ Mode : Conductivity SRS current เท่ากับ 137 mA อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส Mobile phase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



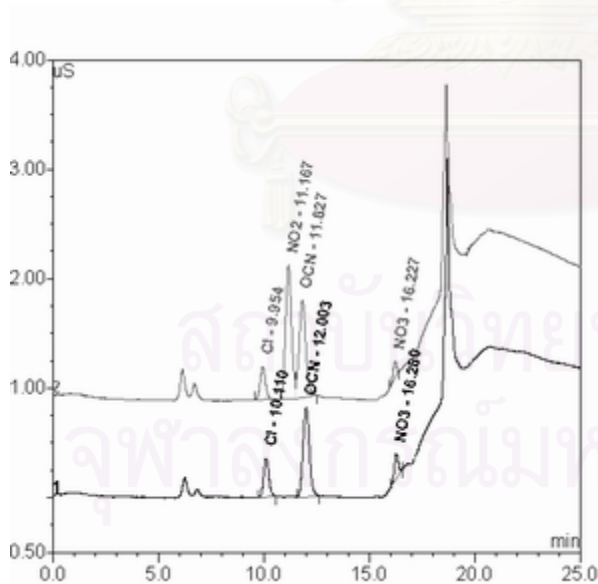
รูปที่ ง.1 สัญญาณของคลอไรด์ ไนไตรท์ ไซยานเนต และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ

ไซยานเนตและไนไตรท์จะมีสัญญาณติดกันโดยไนไตรท์จะปรากฏสัญญาณก่อน ดังรูปที่ ง.2 และ ไซยานเนต เป็นสัญญาณถัดไปดังรูปที่ ง.3 สัญญาณทั้ง 2 มีเวลาปรากฏใกล้กันมาก และเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย จากการทดลองพบว่า สัญญาณของคลอไรด์ จะปรากฏก่อนสัญญาณของไนไตรท์เล็กน้อยและสามารถใช้คลอไรด์เป็นสัญญาณอ้างอิงได้ ตัวอย่างสัญญาณจากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างจริงที่มีการเติมคลอไรด์ลงไปเล็กน้อย ดังรูปที่ ง.4 หรือ อีกวิธีหนึ่งสามารถตรวจความ

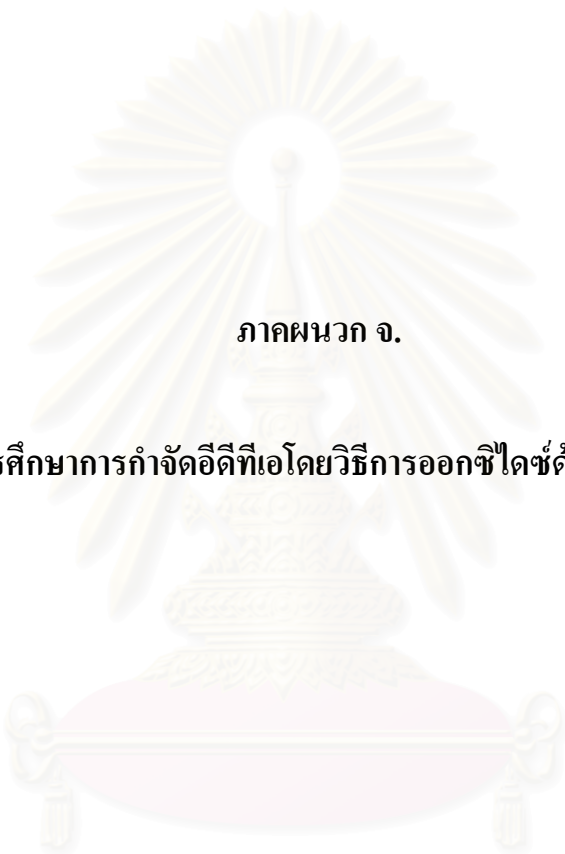
แน่นอนได้ว่าเป็นสัญญาณของไนไตรท์หรือไซยานेटได้ โดยการเติมสารละลายมาตรฐานที่ใช้ลงไป ตัวอย่าง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐานดังรูปที่ ๓.5 จะเห็นได้ชัดว่า สัญญาณของไซยานेटมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ ๓.2 ตำแหน่งสัญญาณของไนไตรท์ โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไนไตรท์ และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ๓.3 ตำแหน่งสัญญาณของไซยานेट โดยเส้นสีเข้มคือ สัญญาณของไซยานेट และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษากำจัดอีดีทีเอโดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

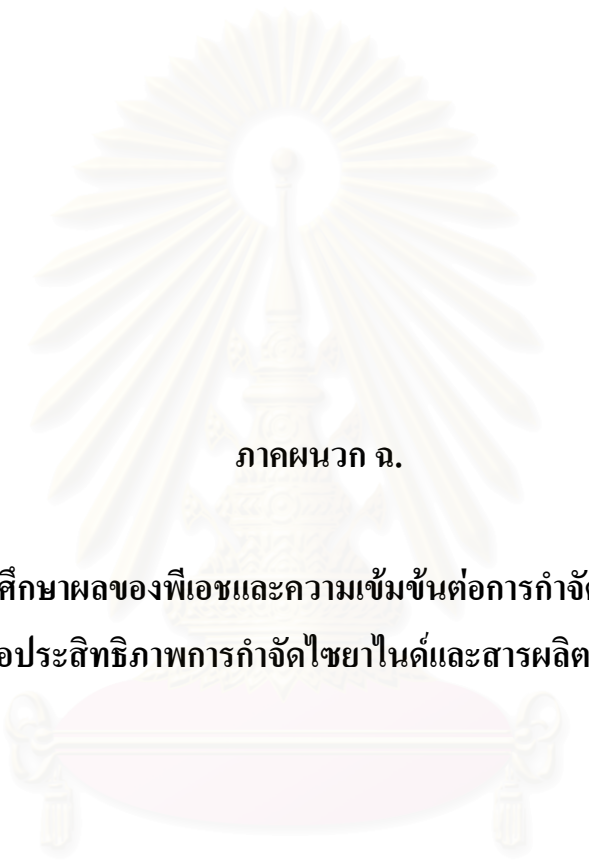
ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง		ประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	อีดีทีเอไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	S.D.
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.03	52.10			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	8.01	45.51	12.65	9.10	3.33
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	8.04	47.61	8.61		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	7.98	48.95	6.05		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.92	55.35			
	ตัวอย่างที่ 1	50.86	9.11	9.02	48.26	12.80	11.03	1.60
	ตัวอย่างที่ 2	50.86	9.11	9.05	49.98	9.70		
	ตัวอย่างที่ 3	50.86	9.11	9.02	49.49	10.58		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		10.00	53.98			
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.14	9.96	44.02	18.45	18.12	0.31
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.14	9.95	44.35	17.85		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.14	9.96	44.24	18.04		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank			11.07	46.26			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	10.90	43.86	5.18	4.78	1.05
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	10.94	44.60	3.58		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	10.92	43.68	5.57		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank			12.03	47.53			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	11.78	47.27	0.55	2.35	1.84
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	11.83	46.44	2.29		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	11.98	45.52	4.22		

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ
ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง		ประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	อีดีทีเอไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	S.D.
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.03	84.51			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	8.01	70.68	16.36	12.84	3.64
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	8.04	76.83	9.09		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	7.98	73.47	13.06		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.92	102.02			
	ตัวอย่างที่ 1	50.86	9.11	9.02	85.82	15.88	17.26	2.61
	ตัวอย่างที่ 2	50.86	9.11	9.05	86.07	15.63		
	ตัวอย่างที่ 3	50.86	9.11	9.02	81.33	20.28		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		10.00	128.86			
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.14	9.96	73.99	42.58	43.29	5.70
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.14	9.95	92.82	37.97		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.14	9.96	65.32	49.31		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank			11.07	88.58			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	10.90	70.72	20.16	21.85	3.80
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	10.94	71.59	19.18		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	10.92	65.37	26.20		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank			12.03	82.60			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	11.78	79.33	3.96	3.33	1.73
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	11.83	81.47	1.37		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	11.98	78.76	4.65		

ตารางที่ 3.3 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของอีดีทีเอต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง		ประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอ		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	อีดีทีเอไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	S.D.
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.03	415.88			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	8.01	330.87	20.44	14.39	5.41
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	8.04	374.30	10.00		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	7.98	362.88	12.75		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.92	464.51			
	ตัวอย่างที่ 1	50.86	9.11	9.02	371.00	20.13	26.97	6.29
	ตัวอย่างที่ 2	50.86	9.11	9.05	313.52	32.51		
	ตัวอย่างที่ 3	50.86	9.11	9.02	333.15	28.28		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		10.00	519.10			
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.14	9.96	280.93	45.88	43.46	2.20
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.14	9.95	303.14	41.60		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.14	9.96	296.48	42.89		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank			11.07	442.49			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	10.90	358.80	18.91	22.51	3.88
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	10.94	324.69	26.62		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	10.92	345.15	22.00		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank			12.03	438.86			
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.07	11.78	415.08	5.42	5.31	1.45
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.07	11.83	422.16	3.81		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.07	11.98	409.42	6.71		



ภาคผนวก ฉ.

ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นต่อการกำจัดไซยาไนต์
ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนต์และสารผลิตภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.1 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัด		สารผลิตภัณฑ์					
				พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท	ไซยาไนด์		ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท	
		ไมโครโมลาร์	พีเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.03	47.08	0.00	0.00	0.00								
	ตัวอย่างที่ 1	99.12	9.07	8.01	24.34	1.25	11.53	0.00	48.29 ± 9.11	55.30	9.78 ± 5.11	4.03	90.21 ± 5.11	95.97	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	99.12	9.07	8.04	16.19	0.56	23.54	0.00	65.60 ± 9.11		2.32 ± 5.11		97.67 ± 5.11		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	99.12	9.07	7.98	22.60	0.00	10.73	0.00	52.01 ± 9.11		0.00 ± 5.11		100.00 ± 5.11		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.92	47.16	0.00	0.00	0.00								
	ตัวอย่างที่ 1	101.72	9.11	9.02	11.22	2.45	29.32	0.00	76.21 ± 3.09	77.91	7.71 ± 5.97	12.36	92.29 ± 5.97	87.64	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	101.72	9.11	9.05	11.30	5.86	24.83	0.00	76.02 ± 3.09		19.09 ± 5.97		80.91 ± 5.97		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	101.72	9.11	9.02	8.74	3.46	30.25	0.00	81.47 ± 3.09		10.26 ± 5.97		89.74 ± 5.97		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		10.00	47.96	0.00	0.00	0.00								
	ตัวอย่างที่ 1	96.52	9.14	9.96	0.00	0.00	30.89	0.00	100 ± 0	100.00	0 ± 4.24	2.45	100 ± 4.24	97.55	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	96.52	9.14	9.95	0.00	2.87	36.21	0.00	100 ± 0		7.34 ± 4.24		92.66 ± 4.24		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	96.52	9.14	9.96	0.00	0.00	33.87	0.00	100 ± 0		0 ± 4.24		100 ± 4.24		0.00	
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank	0.00		11.07	46.90	0.00	0.00	0.00								
	ตัวอย่างที่ 1	99.12	9.07	10.90	24.35	7.42	26.53	0.00	48.08 ± 2.28	48.57	21.86 ± 3.28	18.69	78.14 ± 3.28	81.31	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	99.12	9.07	10.94	25.06	3.95	21.84	0.00	46.56 ± 2.28		15.32 ± 3.28		84.68 ± 3.28		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	99.12	9.07	10.92	22.96	5.63	24.15	0.00	51.05 ± 2.28		18.91 ± 3.28		81.09 ± 3.28		0.00	
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank	0.00		12.03	47.08	0.00	0.00	0.00								
	ตัวอย่างที่ 1	99.12	9.07	11.78	43.54	1.75	15.63	0.00	7.51 ± 7.83	16.45	10.07 ± 5.54	10.20	89.93 ± 5.54	89.80	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	99.12	9.07	11.83	36.69	0.93	18.72	0.00	22.06 ± 7.83		4.73 ± 5.54		95.27 ± 5.54		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	99.12	9.07	11.98	37.76	4.21	22.44	0.00	19.79 ± 7.83		15.80 ± 5.54		84.20 ± 5.54		0.00	

ตารางที่ ๑.2 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัด		สารผลิตภัณฑ์						
				พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท	ไซยาไนด์		ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.02	86.54	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	204.34	9.45	8.01	44.26	0.00	46.25	0.00	48.86 ± 4.40	52.90	0 ± 1.31	1.16	100.00	98.84	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	204.34	9.45	8.00	36.69	1.42	53.42	0.00	57.60 ± 4.40		2.59 ± 1.31		97.41		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	204.34	9.45	8.03	41.34	0.45	49.37	0.00	52.23 ± 4.40		0.90 ± 1.31		99.10		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.92	86.94	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	196.52	10.01	8.97	22.34	2.65	78.21	0.00	74.31 ± 14.83	91.44	3.28 ± 0.42	2.96	96.72	97.04	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	196.52	10.01	8.95	0.00	1.87	73.58	0.00	100 ± 14.83		2.48 ± 0.42		97.52		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	196.52	10.01	9.03	0.00	2.23	69.41	0.00	100 ± 14.83		3.11 ± 0.42		96.89		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		9.99	83.25	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	204.34	9.45	10.00	0.00	2.30	79.68	0.00	100 ± 0	100.00	2.81 ± 1.40	1.42	97.19	98.58	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	204.34	9.45	10.02	0.00	0.00	84.26	0.00	100 ± 0		0 ± 1.40		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	204.34	9.45	10.01	0.00	1.11	74.83	0.00	100 ± 0		1.46 ± 1.40		98.54		0.00		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank	0.00		11.08	85.15	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	204.34	9.45	11.06	29.53	0.00	63.12	0.00	65.32 ± 0.67	65.59	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	204.34	9.45	11.09	28.65	0.00	59.21	0.00	66.35 ± 0.67		0.00		100.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	204.34	9.45	11.06	29.73	0.00	53.64	0.00	65.09 ± 0.67		0.00		100.00		0.00		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank	0.00		12.21	82.37	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	196.52	10.01	12.08	71.11	0.25	40.25	0.00	13.67 ± 9.11	16.76	0.62 ± 1.77	1.32	99.38 ± 1.77	98.68	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	196.52	10.01	12.09	60.12	1.25	36.29	0.00	27.01 ± 9.11		3.33 ± 1.77		96.67 ± 1.77		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	196.52	10.01	12.08	74.47	0.00	44.12	0.00	9.58 ± 9.11		0 ± 1.77		100 ± 1.77		0.00		

ตารางที่ ๓.3 ผลการศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรด		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัด		สารผลิตภัณฑ์						
				พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท	ไซยาไนด์		ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท		
		ไมโครโมลาร์	พีเอช		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 8)	Blank	0.00		8.01	487.78	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	997.04	10.59	8.02	177.81	7.21	234.16	0.00	63.55 ± 4.63	58.35	2.99 ± 0.65	2.37	97.01 ± 0.65	97.63	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	997.04	10.59	8.02	210.55	4.35	253.68	0.00	56.84 ± 4.63		1.69 ± 0.65		98.31 ± 0.65		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	997.04	10.59	8.02	221.18	6.06	243.92	0.00	54.66 ± 4.63		2.42 ± 0.65		97.58 ± 0.65		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 9)	Blank	0.00		8.97	462.07	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	991.40	10.60	9.05	31.09	12.56	421.17	0.00	93.27 ± 0.11	93.21	2.90 ± 1.48	1.25	97.1 ± 1.48	98.75	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	991.40	10.60	9.13	31.00	0.00	431.60	0.00	93.29 ± 0.11		0 ± 1.48		100 ± 1.48		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	991.40	10.60	9.01	32.00	3.87	442.22	0.00	93.08 ± 0.11		0.87 ± 1.48		99.13 ± 1.48		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 10)	Blank	0.00		10.06	471.55	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	993.92	10.63	10.07	23.94	4.56	417.60	0.00	94.92 ± 2.85	96.71	1.08 ± 0.74	1.16	98.92 ± 0.74	98.84	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	993.92	10.63	10.07	22.64	1.59	341.99	0.00	95.2 ± 2.85		0.46 ± 0.74		99.54 ± 0.74		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	993.92	10.63	9.87	0.00	6.95	350.33	0.00	100 ± 2.85		1.95 ± 0.74		98.05 ± 0.74		0.00		
ชุดที่ 4 (พีเอช 11)	Blank	0.00		11.09	445.70	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	973.92	10.63	11.04	33.99	2.73	403.69	0.00	92.37 ± 0.61	92.88	0.67 ± 0.51	0.56	99.33 ± 0.51	99.44	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	973.92	10.63	10.99	28.73	4.29	423.87	0.00	93.55 ± 0.61		1 ± 0.51		99.00 ± 0.51		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	973.92	10.63	10.98	32.46	0.00	413.78	0.00	92.72 ± 0.61		0 ± 0.51		100 ± 0.51		0.00		
ชุดที่ 5 (พีเอช 12)	Blank	0.00		12.11	461.76	0.00	0.00	0.00									
	ตัวอย่างที่ 1	989.56	10.61	11.99	385.25	1.56	376.33	0.00	16.57 ± 22.86	42.92	0.41 ± 0.76	1.26	99.59 ± 0.76	98.74	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	989.56	10.61	11.98	209.45	5.28	358.40	0.00	54.64 ± 22.86		1.45 ± 0.76		98.55 ± 0.76		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	989.56	10.61	12.07	196.00	7.12	367.37	0.00	57.55 ± 22.86		1.90 ± 0.76		98.10 ± 0.76		0.00		



ภาคผนวก ข.

ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์

และความเข้มข้นของไซยาไนด์

ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีลิตีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีลิตีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์									
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท					
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ			
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.11	47.76	0.00	0.00	0.00	100.00	1.61	98.39	0.00	0.00	0.00	0.00				
	1:0.5:0.2	21.74	9.28	9.98	31.12	0.00	4.94	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.4	40.00	9.28	9.95	24.53	0.00	14.46	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.6	58.26	9.28	10.00	19.83	0.00	24.79	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.7	70.43	9.28	9.96	0.00	0.00	28.00	0.00								5.16	94.84	0.00	0.00
	1:0.5:0.8	80.87	9.28	10.04	0.00	1.87	34.39	0.00								6.08	93.92	0.00	0.00
	1:0.5:0.9	88.70	9.28	10.01	0.00	2.39	36.92	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:1.0	99.13	9.28	10.02	0.00	0.00	39.43	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.32	10.05	48.56	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-				
	1:0.5:0.2	21.73	9.32	10.03	35.28	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.4	40.00	9.32	10.00	26.21	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.6	59.13	9.32	10.02	18.59	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.7	69.56	9.32	10.01	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.8	81.73	9.32	10.04	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.9	90.00	9.32	9.98	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:1.0	99.13	9.32	10.02	0.00	-	-	-								-	-	-	-
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.27	10.06	46.97	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-				
	1:0.5:0.2	20.86	9.27	10.04	33.24	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.4	39.13	9.27	10.01	26.19	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.6	58.26	9.27	10.01	20.84	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.7	70.43	9.27	10.05	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.8	78.26	9.27	10.02	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:0.9	89.56	9.27	10.04	0.00	-	-	-								-	-	-	-
	1:0.5:1.0	100.86	9.27	10.00	0.00	-	-	-								-	-	-	-

* ทำการตรวจวัดค่าไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์							
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท			
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.04	48.68	0.00	0.00	0.00									
	1:1:0.2	21.74	9.39	10.02	30.49	0.54	4.37	0.00	100.00	11.00	3.67	89.00	96.33	0.00	0.00		
	1:1:0.4	42.60	9.39	10.03	25.89	0.00	12.80	0.00		0.00		100.00		0.00			
	1:1:0.6	59.13	9.39	9.98	0.00	1.24	21.94	0.00		5.35		94.65		0.00			
	1:1:0.7	69.56	9.39	9.98	0.00	1.15	24.78	0.00		4.43		95.57		0.00			
	1:1:0.8	81.73	9.39	10.01	0.00	0.92	30.43	0.00		2.93		97.07		0.00			
	1:1:0.9	89.56	9.39	9.98	0.00	0.65	32.67	0.00		1.95		98.05		0.00			
	1:1:1	98.26	9.39	9.98	0.00	0.00	34.89	0.00		0.00		100.00		0.00			
Blank	0.00	9.30	10.02	47.27	-	-	-										
ชุดที่ 2	1:1:0.2	21.73	9.30	10.04	31.91	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-		
	1:1:0.4	40.00	9.30	10.01	23.16	-	-	-		-		-					
	1:1:0.6	59.13	9.30	10.00	18.52	-	-	-		-		-					
	1:1:0.7	69.56	9.30	9.97	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.8	81.73	9.30	10.05	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.9	90.00	9.30	10.03	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:1	99.13	9.30	10.02	0.00	-	-	-		-		-					
	Blank	0.00	9.35	10.06	47.76	-	-	-									
ชุดที่ 3	1:1:0.2	20.86	9.35	10.00	33.58	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-		
	1:1:0.4	39.13	9.35	10.02	25.14	-	-	-		-		-					
	1:1:0.6	58.26	9.35	10.05	19.28	-	-	-		-		-					
	1:1:0.7	70.43	9.35	10.08	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.8	78.26	9.35	9.98	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.9	89.56	9.35	10.02	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:1	100.86	9.35	10.06	0.00	-	-	-		-		-					

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วน ไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพใน	สารผลิตภัณฑ์										
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท	การกำจัดไซยาไนด์	ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท						
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ				
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.00	88.49	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.10	100.00	98.90	0.00	0.00					
	1:0.5:0.2	41.74	9.28	9.94	43.05	0.00	9.08	0.00								0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.4	81.74	9.28	9.94	34.17	0.00	19.87	0.00								0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.6	120.00	9.28	9.99	24.33	0.00	40.06	0.00								5.51	94.49	98.90	0.00	0.00
	1:0.5:0.7	139.13	9.28	9.97	0.00	2.39	41.02	0.00								2.17	97.83	98.90	0.00	0.00
	1:0.5:0.8	160.00	9.28	9.94	0.00	1.07	48.34	0.00								0.00	100.00	98.90	0.00	0.00
	1:0.5:0.9	176.52	9.28	10.01	0.00	0.00	54.98	0.00								0.00	100.00	98.90	0.00	0.00
	1:0.5:1.0	200.00	9.28	9.99	0.00	0.00	56.20	0.00								0.00	100.00	98.90	0.00	0.00
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.31	10.02	92.45	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-					
	1:0.5:0.2	44.34	9.31	10.00	61.56	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.4	80.00	9.31	10.04	49.94	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.6	119.13	9.31	10.03	30.43	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.7	139.13	9.31	9.99	19.05	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.8	160.00	9.31	10.02	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.9	180.00	9.31	10.01	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:1.0	200.86	9.31	9.98	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.27	10.05	89.64	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-					
	1:0.5:0.2	41.73	9.27	10.01	64.73	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.4	81.73	9.27	10.04	46.82	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.6	118.26	9.27	9.99	28.64	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.7	137.39	9.27	10.06	18.45	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.8	160.86	9.27	10.03	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:0.9	182.60	9.27	10.02	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:0.5:1.0	202.60	9.27	10.01	0.00	-	-	-								-	-	-	-	-

* ทำการตรวจวัดค่าไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์							
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท			
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ	
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.04	82.26	0.00	0.00	0.00									
	1:1:0.2	40.86	9.30	10.10	55.52	0.70	10.00	0.00	100.00	6.54	3.38	93.46	96.62	0.00	0.00		
	1:1:0.4	83.47	9.30	10.00	36.45	2.40	21.90	0.00		9.88		90.12		0.00			
	1:1:0.6	118.26	9.30	10.01	23.50	0.00	44.13	0.00		0.00		100.00		0.00			
	1:1:0.7	141.72	9.30	10.02	21.64	0.00	45.19	0.00		0.00		100.00		0.00			
	1:1:0.8	156.52	9.30	10.00	0.00	1.13	53.25	0.00		2.08		97.92		0.00			
	1:1:0.8	181.73	9.30	10.04	0.00	3.29	60.57	0.00		5.15		94.85		0.00			
	1:1:1	200.86	9.30	10.01	0.00	0.00	61.92	0.00		0.00		100.00		0.00			
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.36	10.02	88.12	-	-	-									
	1:1:0.2	38.26	9.36	10.05	61.50	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-		
	1:1:0.4	76.52	9.36	10.00	46.44	-	-	-		-		-					
	1:1:0.6	122.60	9.36	10.03	32.91	-	-	-		-		-					
	1:1:0.7	142.59	9.36	10.03	21.83	-	-	-		-		-					
	1:1:0.8	159.13	9.36	10.01	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.9	177.39	9.36	10.00	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:1	199.13	9.36	10.03	0.00	-	-	-		-		-					
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.33	10.04	91.65	-	-	-									
	1:1:0.2	40.86	9.33	10.02	64.37	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-		
	1:1:0.4	80.00	9.33	10.01	43.83	-	-	-		-		-					
	1:1:0.6	119.13	9.33	9.99	32.48	-	-	-		-		-					
	1:1:0.7	142.59	9.33	10.02	24.81	-	-	-		-		-					
	1:1:0.8	163.47	9.33	10.05	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:0.9	181.73	9.33	10.02	0.00	-	-	-		-		-					
	1:1:1	203.47	9.33	10.05	0.00	-	-	-		-		-					

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.06	75.64	0.00	0.00	0.00	76.37	2.29	97.71	0.00	0.00	0.00	0.00
	1:2:0.2	40.86	9.39	10.04	58.58	0.12	13.19	0.00							
	1:2:0.4	80.86	9.39	9.98	43.76	1.42	16.57	0.00							
	1:2:0.6	119.13	9.39	9.97	30.47	0.00	32.15	0.00							
	1:2:0.7	139.13	9.39	9.99	25.59	2.08	40.32	0.00							
	1:2:0.8	160.00	9.39	10.02	23.46	1.16	48.09	0.00							
	1:2:0.9	182.60	9.39	10.00	20.94	0.00	53.29	0.00							
	1:2:1	202.60	9.39	9.98	17.87	0.00	54.72	0.00							
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.36	10.08	93.28	-	-	-	79.98	-	-	-	-	-	-
	1:1:0.2	38.26	9.36	10.02	74.32	-	-	-							
	1:1:0.4	82.60	9.36	10.05	48.98	-	-	-							
	1:1:0.6	124.34	9.36	10.03	32.35	-	-	-							
	1:1:0.7	137.40	9.36	10.00	26.17	-	-	-							
	1:1:0.8	160.86	9.36	10.05	20.08	-	-	-							
	1:1:0.9	182.60	9.36	10.01	19.38	-	-	-							
	1:1:1	202.60	9.36	10.04	18.67	-	-	-							
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.33	10.06	90.26	-	-	-	80.15	-	-	-	-	-	-
	1:1:0.2	41.73	9.33	10.02	68.79	-	-	-							
	1:1:0.4	79.13	9.33	10.02	49.53	-	-	-							
	1:1:0.6	120.00	9.33	10.03	35.47	-	-	-							
	1:1:0.7	142.59	9.33	9.98	26.87	-	-	-							
	1:1:0.8	156.52	9.33	10.01	21.53	-	-	-							
	1:1:0.9	178.26	9.33	10.03	19.41	-	-	-							
	1:1:1	198.26	9.33	10.02	17.92	-	-	-							

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์										
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยานต		ไนเตรท						
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ				
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.01	91.66	0.00	0.00	0.00	78.14	10.24	2.81	89.76	97.19	0.00	0.00					
	1:4:0.2	41.73	9.39	9.89	56.79	1.17	10.25	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00	
	1:4:0.4	79.13	9.39	10.00	55.94	0.00	19.40	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00	
	1:4:0.6	120.86	9.39	9.95	33.89	0.00	22.19	0.00								5.80	94.20	0.00	0.00	
	1:4:0.7	141.73	9.39	9.92	33.18	2.36	38.33	0.00								3.61	96.39	0.00	0.00	
	1:4:0.8	161.73	9.39	10.05	32.61	1.58	42.13	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00	
	1:4:0.9	178.26	9.39	9.96	22.55	0.00	57.87	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00	
	1:4:1	200.00	9.39	9.95	20.03	0.00	71.56	0.00								0.00	100.00	0.00	0.00	
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.31	10.08	90.40	-	-	-	80.94	-	-	-	-	-	-					
	1:1:0.2	44.34	9.31	10.02	64.84	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:0.4	80.00	9.31	10.01	35.25	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:0.6	119.13	9.31	9.97	29.53	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:0.7	139.13	9.31	9.99	24.54	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:0.8	160.00	9.31	10.03	19.25	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:0.8	180.00	9.31	10.00	18.77	-	-	-								-	-	-	-	-
	1:1:1	200.86	9.31	10.00	17.24	-	-	-								-	-	-	-	-
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.27	10.09	89.27	-	-	-	81.08	-	-	-	-	-	-					
	1:1:0.2	41.73	9.27	10.04	65.76	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:0.4	81.73	9.27	10.01	34.18	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:0.6	118.26	9.27	10.00	29.58	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:0.7	137.39	9.27	9.96	22.55	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:0.8	160.86	9.27	10.05	18.94	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:0.8	182.60	9.27	10.01	17.46	-	-	-								-	-	-	-	
	1:1:1	202.60	9.27	10.03	16.89	-	-	-								-	-	-	-	

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลเปอร์เซ็นต์ต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วน ไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เปอร์เรต	สารละลายเปอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพใน	สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	การกำจัดไซยาไนด์	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.11	485.66	0.00	0.00	0.00	100.00	0.64	99.36	0.00	0.00	0.00	0.00
	1:0.5:0.2	204.34	9.28	9.98	274.25	3.87	246.64	0.00							
	1:0.5:0.4	405.21	9.28	9.95	173.87	2.10	264.59	0.00							
	1:0.5:0.6	600.00	9.28	10.00	68.25	0.00	298.55	0.00							
	1:0.5:0.7	701.73	9.28	9.96	26.25	1.09	326.32	0.00							
	1:0.5:0.8	800.00	9.28	10.04	0.00	3.80	348.84	0.00							
	1:0.5:0.9	899.13	9.28	10.01	0.00	2.56	354.57	0.00							
	1:0.5:1.0	1001.73	9.28	10.02	0.00	0.00	366.49	0.00							
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.32	10.05	474.30	0.00	0.00	0.00	100.00	-	-	-	-	-	-
	1:0.5:0.2	206.95	9.32	10.01	266.34	-	-	-							
	1:0.5:0.4	392.22	9.32	10.03	143.30	-	-	-							
	1:0.5:0.6	606.95	9.32	9.98	66.64	-	-	-							
	1:0.5:0.7	691.30	9.32	9.99	36.54	-	-	-							
	1:0.5:0.8	800.00	9.32	10.02	0.00	-	-	-							
	1:0.5:0.9	900.00	9.32	10.01	0.00	-	-	-							
	1:0.5:1.0	1000.00	9.32	10.00	0.00	-	-	-							
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.29	10.07	457.12	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-
	1:0.5:0.2	202.60	9.29	10.02	268.26	-	-	-							
	1:0.5:0.4	395.68	9.29	10.10	156.57	-	-	-							
	1:0.5:0.6	599.13	9.29	9.97	64.61	-	-	-							
	1:0.5:0.7	700.86	9.29	10.05	33.47	-	-	-							
	1:0.5:0.8	806.08	9.29	10.03	0.00	-	-	-							
	1:0.5:0.9	904.34	9.29	10.01	0.00	-	-	-							
	1:0.5:1.0	1003.47	9.29	10.04	0.00	-	-	-							

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.8 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์และอีดีทีเอ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์

ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

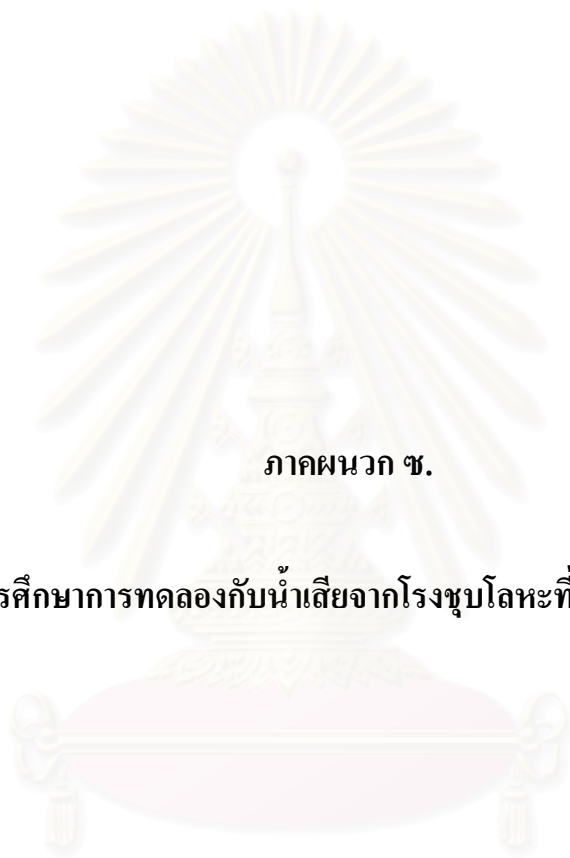
ชุดการทดลอง	อัตราส่วนไซยาไนด์:อีดีทีเอ:เฟอร์เรต	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์	สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยานเนต	ไนเตรท	%	ไนไตรท์		ไซยานเนต		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	%	% เหลือ	%	% เหลือ	%
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.19	483.96	0.00	0.00	0.00	95.32	1.04	98.96	0.00	0.00	0.00	0.00
	1:1:0.2	202.60	9.28	10.01	337.62	2.56	89.74	0.00							
	1:1:0.4	396.54	9.28	10.01	210.45	4.92	171.38	0.00							
	1:1:0.6	596.52	9.28	10.02	110.09	0.00	251.75	0.00							
	1:1:0.7	698.26	9.28	10.03	78.18	3.18	286.03	0.00							
	1:1:0.8	806.95	9.28	9.98	51.66	0.00	372.63	0.00							
	1:1:0.9	895.65	9.28	9.97	33.40	2.68	443.98	0.00							
	1:1:1	1000.00	9.28	10.03	22.67	0.00	446.69	0.00							
ชุดที่ 2	Blank	0.00	9.32	10.06	489.73	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-
	1:1:0.2	200.86	9.32	10.04	286.73	-	-	-							
	1:1:0.4	402.68	9.32	10.02	167.57	-	-	-							
	1:1:0.6	598.26	9.32	10.03	89.32	-	-	-							
	1:1:0.7	699.13	9.32	10.00	59.50	-	-	-							
	1:1:0.8	804.34	9.32	10.01	39.25	-	-	-							
	1:1:0.9	898.26	9.32	10.05	22.57	-	-	-							
	1:1:1	1002.60	9.32	9.98	0.00	-	-	-							
ชุดที่ 3	Blank	0.00	9.27	10.07	478.26	-	-	-	96.18	-	-	-	-	-	-
	1:1:0.2	198.26	9.27	10.02	342.49	-	-	-							
	1:1:0.4	401.73	9.27	10.05	185.24	-	-	-							
	1:1:0.6	600.86	9.27	10.03	115.73	-	-	-							
	1:1:0.7	702.60	9.27	10.05	68.42	-	-	-							
	1:1:0.8	797.39	9.27	10.03	43.51	-	-	-							
	1:1:0.9	901.73	9.27	10.01	28.62	-	-	-							
	1:1:1	998.26	9.27	10.04	18.28	-	-	-							

* ทำการตรวจวัดค่าไซยานเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ๙ ผลการศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลเปอร์เซ็นต์ต่อไซยาไนด์ต่ออิตีทีเอตอนิเกล และความเข้มข้นของไซยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์และสารผลิตภัณฑ์
ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์

ชุดการทดลอง	อัตราส่วน ไซยาไนด์:อิตีทีเอ:นิเกล:เปอร์เรต	สารละลายเปอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ %	สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์	ไนไตรท์	ไซยาเนต	ไนเตรท		ไนไตรท์		ไซยาเนต		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์		%	% เหลือ	%	% เหลือ	%	% เหลือ
ชุดที่ 1	Blank	0.00		10.03	511.38	0.00	0.00	0.00	95.53	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
	1:1:1:0.2	205.21	9.39	10.01	363.94	0.00	104.50	0.00							
	1:1:1:0.4	403.47	9.39	10.09	261.80	0.00	175.16	0.00							
	1:1:1:0.6	596.52	9.39	10.06	175.15	0.00	268.98	0.00							
	1:1:1:0.8	800.00	9.39	10.09	63.42	0.00	336.80	0.00							
	1:1:1:1	998.26	9.39	10.10	22.88	0.00	383.70	0.00							
ชุดที่ 2	Blank	0.00		10.00	500.99	-	-	-	94.49	-	-	-	-	-	-
	1:1:1:0.2	201.73	9.30	10.05	383.28	-	-	-							
	1:1:1:0.4	430.43	9.30	10.14	268.61	-	-	-							
	1:1:1:0.6	603.47	9.30	10.19	175.53	-	-	-							
	1:1:1:0.8	800.00	9.30	10.15	63.14	-	-	-							
	1:1:1:1	1000.87	9.30	10.08	27.61	-	-	-							
ชุดที่ 3	Blank	0.00		10.01	501.99	-	-	-	95.28	-	-	-	-	-	-
	1:1:1:0.2	204.34	9.33	10.03	386.69	-	-	-							
	1:1:1:0.4	405.21	9.33	10.05	256.33	-	-	-							
	1:1:1:0.6	600.00	9.33	10.09	180.65	-	-	-							
	1:1:1:0.8	792.17	9.33	10.09	64.19	-	-	-							
	1:1:1:1	1001.73	9.33	10.10	23.68	-	-	-							

* ทำการตรวจวัดค่าไซยาเนต ไนไตรท์ ไนเตรต 1 ชุดการทดลอง



ภาคผนวก ซ.

ผลการศึกษการทดลองกับน้ำเสียจากโรงชุบโลหะที่ผ่านการเจือจาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ในน้ำเสียโรงชุบโลหะ

(หน่วย ไมโครโมลาร์)

เฟอร์เรต	พีเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	10.01	135.22	0.00	0.00	0.00
102.60	9.83	82.80	34.78	0.00	0.00
199.13	9.88	19.74	78.21	0.00	0.00
306.08	9.92	2.25	92.49	0.00	0.00
406.95	9.85	0.00	90.68	0.00	0.00
499.13	9.80	0.00	96.56	0.00	0.00
602.60	9.88	0.00	92.87	0.00	0.00
701.73	9.93	0.00	95.43	0.00	0.00
806.08	9.90	0.00	89.77	0.00	0.00

เฟอร์เรต	พีเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	10.02	108.60	0.00	0.00	0.00
102.60	9.88	62.11	35.49	0.00	0.00
199.13	9.79	23.67	68.39	0.00	0.00
306.08	9.85	3.80	88.52	0.00	0.00
406.95	9.89	0.00	93.81	0.00	0.00
499.13	9.86	0.00	89.00	0.00	0.00
602.60	9.89	0.00	90.81	0.00	0.00
701.73	9.93	0.00	94.26	0.00	0.00
806.08	9.90	0.00	91.85	0.00	0.00

เฟอร์เรต	พีเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	10.10	97.68	0.00	0.00	0.00
102.60	9.94	69.11	23.92	0.00	0.00
199.13	9.95	14.57	64.63	0.00	0.00
306.08	9.88	2.31	84.49	0.00	0.00
406.95	9.91	0.00	82.74	0.00	0.00
499.13	9.89	0.00	93.03	0.00	0.00
602.60	9.84	0.00	94.96	0.00	0.00
701.73	9.89	0.00	92.80	0.00	0.00
806.08	9.94	0.00	88.76	0.00	0.00

เฟอร์เรต	พีเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	10.09	110.68	0.00	0.00	0.00
102.60	10.00	72.87	21.75	0.00	0.00
199.13	9.86	30.48	66.68	0.00	0.00
306.08	9.89	3.55	76.73	0.00	0.00
406.95	9.85	0.00	83.86	0.00	0.00
499.13	9.89	0.00	92.17	0.00	0.00
602.60	9.87	0.00	93.70	0.00	0.00
701.73	9.83	0.00	83.86	0.00	0.00
806.08	9.86	0.00	89.75	0.00	0.00

เฟอร์เรต	พีเอช	ไซยาไนด์	ไซยานต	ไนไตรท์	ไนเตรท
0.00	10.05	107.56	0.00	0.00	0.00
102.60	9.88	65.49	25.79	0.00	0.00
199.13	9.85	27.75	59.10	0.00	0.00
306.08	9.89	2.90	80.78	0.00	0.00
406.95	9.92	0.00	91.37	0.00	0.00
499.13	9.81	0.00	80.72	0.00	0.00
602.60	9.84	0.00	94.80	0.00	0.00
701.73	9.89	0.00	79.93	0.00	0.00
806.08	9.83	0.00	94.36	0.00	0.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย