

การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต  
จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต



นางสาวประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF TETRACYANONICKELATE AND HEXACYANOCOBALTATE  
FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION



Miss Prapaporn Chatchaitanawat

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต  
จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

โดย

นางสาวประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

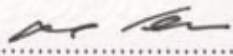
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธุ์

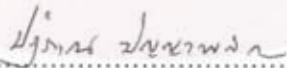
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

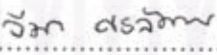
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiruwongศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธุ์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

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

ศูนย์วิทยุโทรทัศนวิทยา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์ : การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (REMOVAL OF TETRACYANONICKELATE AND HEXACYANOCOBALTATE FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY FERRATE OXIDATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. เขมรัฐ โอสถาปนบุรี, 162 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต การทดลองจะทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกันระหว่างเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลตและเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต เพื่อศึกษาถึงผลของพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมดประมาณ 80 ถึง 95% ที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลตไม่มีผลต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ ไม่มีผลต่อสัดส่วนในการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่เตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง โดยเกิดปฏิกิริยารวดเร็วที่พีเอช 9 และและมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์เท่ากับ 0.99 ต่อ 1 โดยสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไฮยาเนต

ส่วนที่สอง จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไฮยาไนด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมดประมาณ 55 ถึง 60% ที่พีเอช 9 10 และ 11 ซึ่งเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ลดลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลงที่ทุกๆ พีเอช แต่ไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไฮยาเนต

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....ประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2552.....



## 5070692121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CYANIDE / CYANIDE COMPLEX / TETRACYANONICKELATE /  
HEXACYANOCOBALTATE / FERRATE / OXIDATION

PRAPAPORN CHATCHAITANAWAT : REMOVAL OF TETRACYANONICKELATE  
AND HEXACYANOCOBALTATE FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY  
FERRATE OXIDATION. THESIS ADVISOR : KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D.,  
162 pp.

This research studied the effects of removal of tetracyanonickelate and hexacyanocobaltate in synthetic wastewater by ferrate oxidation. The experiment were done on synthetic wastewater (tetracyanonickelate, tetracyanonickelate and hexacyanocobaltate). It is to study the effect of pH and the increased mole fractions of ferrate per cyanide to both of by products and cyanide complex removal efficiency.

From the first part, at the mole fraction of 1:1 ferrate per cyanide, total cyanide removal efficiency was 80-95% at pH 9, 10 and 11. The results indicated that tetracyanonickelate had no effect on cyanide removal efficiency and any mole fractions of ferrate per cyanide, but it retarded the chemical reaction rate. The ferrate molar consumption per oxidized cyanide was 0.99:1

From the second part, at the mole fraction of 1:1 ferrate per cyanide, the mole fraction of 2:1 tetracyanonickelate per hexacyanocobaltate, total cyanide removal efficiency was 55-60% at pH 9, 10 and 11. It was found that hexacyanocobaltate decreased the cyanide removal efficiency and slowed the chemical reaction rate for all pH, but had no effect on the reaction by-product, which was cyanate.

Department: .....Environmental Engineering Student's Signature ..... PRAPAPORN  
Field of Study: .....Environmental Engineering Advisor's Signature ..... K O S A P H A N  
Academic Year: .....2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โสสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง และคำแนะนำเป็นอย่างดีในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง และตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Virender K. Sharma ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีไปดัสเซียมเฟอร์เรต รวมทั้งคำแนะนำ แนวทาง และเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มเสนีย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีมา ชมสุรินทร์ ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และแนวทางที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สารเคมี สถานที่ และเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคน ทั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ห้องปฏิบัติการของโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย และเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง เป็นอย่างสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ และให้กำลังใจ ซึ่งทำให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ มาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 บทนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การชุกโบลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุกโบลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการชุกโบลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.1.3 แหล่งที่มา และลักษณะของน้ำเสีย.....	8
2.2 ไชยาไนต์.....	12
2.2.1 ประเภทของสารประกอบไชยาไนต์.....	12
2.2.2 ความเป็นพิษของสารประกอบไชยาไนต์.....	15
2.2.3 ค่ามาตรฐานของสารประกอบไชยาไนต์.....	17
2.2.4 การกำจัดสารประกอบไชยาไนต์ในน้ำเสีย.....	18
2.2.5 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด สารประกอบไชยาไนต์.....	24

2.3	เฟอร์เรต.....	26
2.3.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	26
2.3.2	การเตรียมเฟอร์เรต.....	29
2.3.3	ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ.....	30
2.3.4	ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต.....	33

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	37
3.1.1	เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	37
3.1.2	สารเคมี.....	37
3.2	การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต.....	38
3.2.1	การเตรียมสารละลายต่างๆ.....	38
3.2.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	39
3.2.3	การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต.....	40
3.3	ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	41
3.3.1	การกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชัน ด้วยเฟอร์เรต (ก).....	41
3.3.2	การกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข).....	41
3.4	ตัวแปรในการดำเนินการวิจัย.....	42
3.4.1	ตัวแปรในการทดลองการกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก).....	42
3.4.2	ตัวแปรในการทดลองการกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วย เฟอร์เรต (ข).....	46
3.5	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	50
3.5.1	การกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชัน ด้วยเฟอร์เรต (ก).....	50
3.5.2	การกำจัดเตรตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข).....	56



3.6	วิธีการวิเคราะห์.....	62
3.6.1	ไซยาไนด์อิสระ.....	62
3.6.2	ไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท.....	62
3.6.3	ไซยาไนด์เชิงซ้อน.....	62
3.6.4	เฟอร์เรต.....	62
3.6.5	พีเอช.....	62

**บทที่ 4 ผลการทดลอง**

4.1	ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ในน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก).....	64
4.1.1	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1).....	64
4.1.2	ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-2).....	73
4.1.3	ผลการทดลองการศึกษ้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต (ก-3).....	75
4.2	ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ในน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข).....	79
4.2.1	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-1).....	79
4.2.2	ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2).....	90

4.2.3 ผลการทดลองการศึกษ้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง เฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระ ไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (ข-3).....	93
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
5.1.1 การศึกษาผลของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อการกำจัดไซยาไนด์ เชิงซ้อน โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต .....	97
5.1.2 การศึกษาผลของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโน โคบอลเตต ต่อการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน โดยการออกซิเดชัน ด้วยเฟอร์เรต .....	98
5.1.3 การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง.....	98
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมศาสตร์.....	100
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	100
<b>รายการอ้างอิง</b> .....	101
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต.....	108
ภาคผนวก ข. การเก็บรักษาตัวอย่าง.....	112
ภาคผนวก ค. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์.....	114
ภาคผนวก ง. ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท.....	120
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษากำจัดเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต จากน้ำเสีย สังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต.....	124
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษากำจัดเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะ ไซยาโนโคบอลเตต จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชัน ด้วยเฟอร์เรต .....	139
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์</b> .....	162

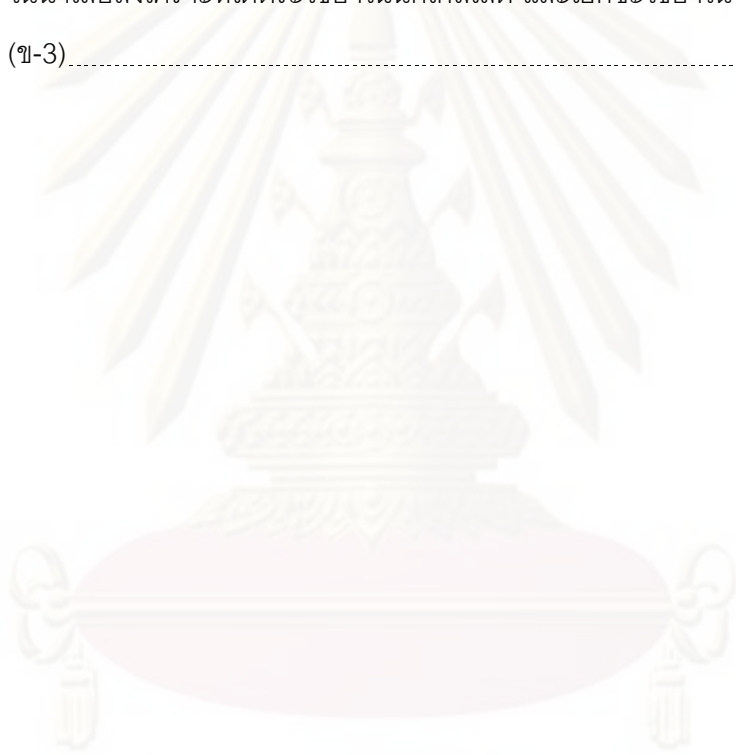
## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะ (วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์, 2542).....	10
2.2	ผลการตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ จากบริษัทกำจัดกาก อุตสาหกรรม (บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์, 2547).....	10
2.3	ผลการตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (ประยูร ฟองสถิตย์กุล และคณะ, 2542).....	11
2.4	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ.....	11
2.5	ค่าคงที่ของค่าความเสถียร ( $K_1$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Benjamin, 2002).....	14
2.6	ค่าความเสถียร ( $\log K$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (U.S.EPA, 1994 และ Meehan, 2000).....	15
2.7	ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Moran, 2000).....	16
2.8	ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ (U.S. EPA, 2000).....	16
2.9	ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆ ในประเทศไทย.....	17
2.10	ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Jiang และ Lloyd, 2002).....	27
2.11	ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอร์เรต (Sharma, 2002).....	31
3.1	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเลต ปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	39
3.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเลต และเฮกซะไฮยาโน โคบอลเตตปริมาตร 50 มิลลิลิตร.....	40
3.3	ค่าการดูดซึมแสงสำหรับการเตรียมน้ำละลายเฟอร์เรตในการทดลอง.....	41
3.4	ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1).....	43
3.5	ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระ ไฮยาโนนิกเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-2).....	44

ตารางที่	หน้า	
3.6	ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่ออัตรา การเกิดปฏิกิริยา (ก-3).....	45
3.7	ศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และ เฮกซะไฮยาโน โคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-1).....	46
3.8	ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ ความเข้มข้นเตตระ ไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2).....	47
3.9	ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และความเข้มข้นเฮกซะ ไฮยาโนโคบอลเตต ต่ออัตราการผลิตปฏิกิริยา (ข-3).....	48
3.10	วิธีที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	63
4.1	สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา จากน้ำเสีย สังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต.....	64
4.2	อัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา จากการทดลอง ก-2.....	73
4.3	สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา จากน้ำเสีย สังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต.....	80
ค.1	ความเข้มข้นไฮยาโนด์ ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะ เปิดฝา พีเอช 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	117
ค.2	ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะเปิดฝา พีเอช 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	118
จ.1	ผลการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ จากน้ำเสีย สังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต (ก-1).....	125
จ.2	ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ในการทำปฏิกิริยา จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัด ไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-2).....	133
จ.3	ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาโนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต (ก-3).....	136



ตารางที่		หน้า
ด.1	ผลการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนนิกเชิงซ้อนและสารผลิตภัณฑ์ จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต (ข-1) .....	140
ด.2	ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนนิกในการทำปฏิกิริยาจากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนนิกเชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2) .....	156
ด.3	ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาโนนิกเชิงซ้อนในน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต (ข-3) .....	159



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.3 ขั้นตอนการชุบโครเมียม (สารโฆษ บุญยกิจสมบัติ, 2535).....	9
2.4 ความเข้มข้นของไฮยาไนตอัสระ และไฮโดรเจนไฮยาไนต์ ที่พีเอชต่างๆ (Botz, 2001).....	12
2.5 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ.....	26
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช กับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือ ที่เวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ (Graham และคณะ, 2004).....	29
3.1 แผนผังการทดลอง.....	49
3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ก-1.....	52
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ก-3.....	55
3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ข-1.....	58
3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ข-3.....	61
4.1 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาไนกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	65
4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์ ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาไนกเกิดเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	67
4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์ ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาไนกเกิดเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	68
4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์ ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาไนกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	69

รูปที่	หน้า	
4.5	ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	70
4.6	ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	71
4.7	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นสารประกอบไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	72
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ทั้งหมดที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	74
4.9	ความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	76
4.10	ความเข้มข้นของไซยาไนด์เชิงซ้อนคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	77
4.11	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดคงเหลือกับเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) กับความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (สีลาจูด่างศิริ, 2548) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	78
4.12	สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 และ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	81

รูปที่	หน้า
4.13	82
4.14	83
4.15	85
4.16	86
4.17	87
4.18	87



รูปที่	หน้า
4.19	89
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้น สารประกอบไซยาไนด์เริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดย โมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโคร โมลาร์ (รูปไซยาไนด์) (การทดลองที่ ก-1) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดย โมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	
4.20	91
ความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ทั้งหมดที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำ ปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อ เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	
4.21	92
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างไซยาไนด์ทั้งหมดที่เหลือ และไซยาเนตที่ เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลต เริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโน นิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ กับ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) (การทดลองที่ ก-2) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	
4.22	94
ความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อ ไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	
4.23	95
ความเข้มข้นของไซยาไนด์เชิงซ้อนคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อ ไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	

รูปที่	หน้า	
4.24	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดคงเหลือกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ กับความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) (การทดลองที่ ก-3) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1.....	96
ก.1	การดูดซับแสงของ Fe(VI) และ Fe(V) (Bielski และ Thomas, 1987).....	109
ค.1	สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ	115
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไซยาไนด์อิสระ ในสารละลายต่างๆ กับพีเอช.....	116
ง.1	สัญญาณของคลอไรด์ ไนไตรท์ ไซยาเนต และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ).....	122
ง.2	ตำแหน่งสัญญาณของไนไตรท์ โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของไนไตรท์ และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน).....	122
ง.3	ตำแหน่งสัญญาณของไซยาเนต โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของไซยาเนต และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน).....	122
ง.4	เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากตัวอย่างน้ำจริงกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน).....	123
ง.5	เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เติมสารละลายมาตรฐาน ลงไปกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน).....	123

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย การกำจัดเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

ภาษาอังกฤษ Removal of Tetracyanonickelate and Hexacyanocobaltate from Synthetic Wastewater by Ferrate Oxidation

### 1.2 คำสำคัญ (Key word)

ไซยาไนด์ (Cyanide)

ไซยาไนด์เชิงซ้อน (Cyanide Complex)

เฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (Hexacyanocobaltate)

เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต (Tetracyanonickelate)

เฟอร์เรต (Ferrate)

การออกซิเดชัน (Oxidation)

### 1.3 บทนำ

อุตสาหกรรมการชุบโลหะ เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญอย่างมาก ซึ่งมีการกระจายอยู่ทั่วไปในประเทศไทย เช่น โรงงานชุบโลหะขนาดกลาง และขนาดเล็ก ในเขตอุตสาหกรรมวงแหวน และแสงประทีป ซึ่งอุตสาหกรรมประเภทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาเนื้อวัสดุ และเพื่อความสวยงาม ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆ หลายอย่าง ทั้งกระบวนการทางกายภาพทางเคมี และไฟฟ้าเคมี ในกระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ดังนั้นต้องมีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการที่เหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่สาธารณะ

กระบวนการชุบโลหะต้องใช้ไซยาไนด์ ซึ่งเป็นสารช่วยในการทำปฏิกิริยาความสะอาดผิวโลหะที่ต้องการชุบ และเป็นสารคีเลชัน เพื่อให้โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีการปนเปื้อนไซยาไนด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนัก ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษ โดยจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิต โดยมนุษย์สามารถรับไซยาไนด์เข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการกิน การหายใจ ทางผิวหนัง หรือปอดในรูปของฝุ่น และไอระเหย อาการที่เกิดขึ้นมีทั้งอาการระคายเคือง และเฉียบพลัน ซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิต อีกทั้งไซยาไนด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักก็ยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำอีกด้วย โดย

มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีการกำหนดค่าความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด (Total Cyanide) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 7.6 ไมโครโมลาร์ และมาตรฐานน้ำดื่มของ US EPA (The U.S. Environmental Protection Agency) ได้กำหนดปริมาณความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมดต้องมีค่าน้อยกว่า 200 ppb ซึ่งความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมดนั้น หมายถึงไซยาไนด์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักด้วย ผลจากการตรวจสอบน้ำเสียขั้นต้นจากโรงงานชุบโลหะขนาดกลาง และขนาดเล็กหลายแห่งพบว่า มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดอยู่ในปริมาณที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

วิธีการกำจัดไซยาไนด์จากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยอาจใช้วิธีการที่ไม่เหมือนกัน และมีการบำบัดหลายขั้นตอน วิธีที่นิยม คือ การออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Alkali Chlorine Method) นอกจากนี้ยังมีการกำจัดด้วยวิธีอื่นๆ อีก เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต การใช้โอโซน และการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า แต่ละวิธีที่กล่าวมาสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดี แต่จะมีข้อเสียต่างกันไป เช่น การออกซิเดชันด้วยคลอรีน จะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษเนื่องจากคลอรีน และทำให้น้ำเกิดความเป็นกรด การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตต้องมีเครื่องมือในการผลิตรังสี และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง และการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนัก ปัจจุบันจึงมีความพยายามอย่างมากที่จะค้นหากระบวนการที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

เฟอร์เรต ( $\text{Fe}^{6+}$ ) เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งที่ควรนำมาใช้แทนสารออกซิไดซ์อื่นๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ มีกำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) สูง มีความสามารถในการโคแอกกูเลชัน สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสารที่เลือกทำปฏิกิริยา ทำให้ประหยัดกว่าสารที่ไม่เลือกทำปฏิกิริยา และเฟอร์เรตสามารถเก็บรักษาได้นานในสภาวะปกติ ซึ่งจะอยู่ในรูปของโปตัสเซียมเฟอร์เรต ( $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ) ปัจจุบันมีการพัฒนาให้เฟอร์เรตสามารถผลิตขึ้นใช้ที่โรงงานจากสารเคมีพื้นฐาน คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย และเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เฟอร์เรตจึงเป็นสารเคมีที่น่าสนใจศึกษา

การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เฟอร์เรต ในการออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับนิกเกิล และโคบอลต์ ซึ่งโลหะทั้งสองประเภทนี้จะพบได้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เพื่อศึกษาหาพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยา และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



#### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยแห่งชาติ ด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ประเภท คือ น้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกันระหว่างเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตกับเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต

การทดลองในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น ความเข้มข้นเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเริ่มต้น และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน อัตราการเกิดปฏิกิริยา และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นของเฟอร์เรต และไฮยาโนด์ สูงสุดไม่เกิน 500 ไมโครโมลาร์ โดยทำการควบคุมพีเอชด้วยบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำ เพื่อให้รบกวนปฏิกิริยาน้อยที่สุด

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต
2. ทราบถึงประสิทธิภาพ และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต
3. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในเชิงทฤษฎี ในการบำบัดน้ำเสียที่มีเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต เป็นส่วนประกอบหลัก

## บทที่ 2

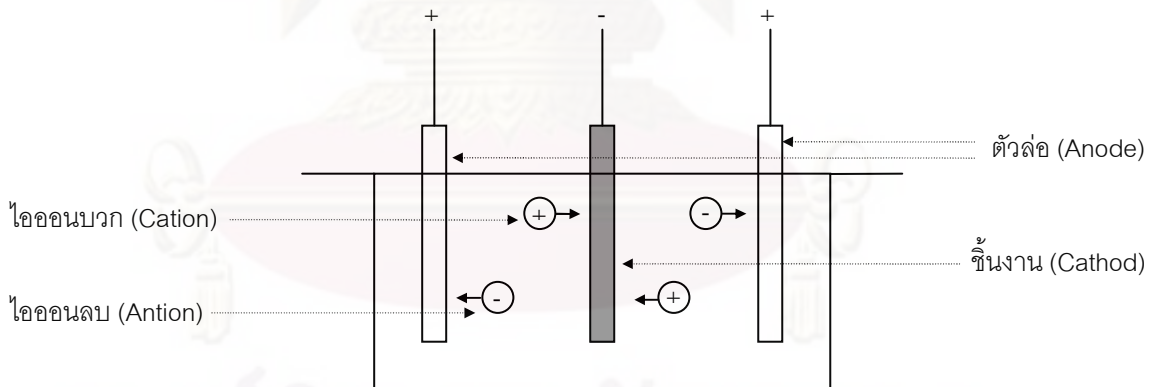
### เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

อุตสาหกรรมการชุบโลหะมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น การชุบเพื่อความสวยงาม การชุบเพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน และการชุบเพื่อรองพื้น หรือเพิ่มความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น โดยโลหะที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี โคบอลต์ และทองคำ เป็นต้น

##### 2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การนำชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการด้วยวิธีเคมี-ไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยนำชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วลบ (Cathode) และนำโลหะที่จะไปเคลือบผิวชิ้นงานต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) ซึ่งเรียกว่าตัวล่อ จากนั้นนำชิ้นงาน และตัวล่อจุ่มลงในน้ำยาชุบซึ่งมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ ปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบเกิดปฏิกิริยา (อนันต์ ทองมธู, 2527) ดังรูปที่ 2.1

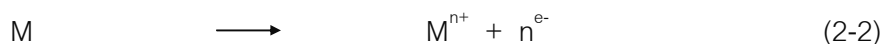


รูปที่ 2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

ที่ขั้วลบ ไอออนของโลหะซึ่งเป็นไอออนบวกในสารละลายจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงาน ดังสมการที่ (2-1)



ที่ขั้วบวก ถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่นำมาเคลือบผิวชิ้นงาน โลหะนั้นจะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอน และไอออนบวกจะละลายลงสู่สารละลาย ดังสมการที่ (2-2)



### 2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

รูปแบบขั้นตอนในการชุบโลหะอย่างง่ายประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงาน หมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาด และความเรียบตามต้องการ จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงาน เพื่อกำจัดไขมัน นำชิ้นงานไปจุ่มกรด เพื่อกำจัดสนิม แล้วนำชิ้นงานไปชุบน้ำยาที่ควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด ปล่อยให้แห้ง และสุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ (อนันต์ ทองมอดู, 2527) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นวัตถุชุบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการ โดยวัตถุชุบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และสังกะสี ซึ่งรายละเอียดแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

### 1. การเตรียมชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโดยการขัด แบ่งออกเป็นการขัดหยาบ และการขัดละเอียด ขั้นแรกเป็นการขัดหยาบ เพื่อขัดเอารอยขูดลึกๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ล้อขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อ เพื่อลบรอยจากการขัดหยาบ ทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ล้อขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใช้ถังหมุนซึ่งบรรจุหินขัดไว้ภายใน

### 2. การล้างไขมัน

เป็นขั้นตอนการล้างไขมัน และน้ำมัน ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- **ล้างไขมันด้วยไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapor Degreasing)**

โดยนำชิ้นโลหะที่ต้องการล้างไขมัน มาจุ่มลงในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน มีการให้ความร้อนสูงถึง 86 องศาเซลเซียส ซึ่งไตรคลอโรเอทิลีนจะระเหยกลายเป็นไอน้ำกระทบกับท่อขดทำความเย็นบริเวณปากขอบถัง และชิ้นงาน ไอระเหยของไตรคลอโรเอทิลีนจะควบแน่นบนผิวของชิ้นงาน และชำระล้างไขมัน หรือน้ำมันลงสู่ถัง

- **ล้างไขมันด้วยตัวล้างร้อน (Soak Clean)**

โดยนำชิ้นโลหะที่ต้องการล้างไขมัน มาแช่ลงในถังเหล็ก หรือสแตนเลส ที่บรรจุตัวล้าง และมีเครื่องมือทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

### 3. การล้างสนิม

เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยกรด หรือจุ่มเงา (Pickling and dipping) เพื่อกำจัดออกไซด์ต่างๆ ที่ผิวชิ้นงานออก ในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไอกรดระเหย โดยต้องมีการดูดไอพิษไปกำจัด ซึ่งทั่วไปจะใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดฟอริก กรดออกซาลิก และอดีทีเอ เป็นน้ำยาทำความสะอาดผิว (Moyer, 1994) แต่กรดอินทรีย์มีความเป็นกรดน้อย ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกัดกร่อนน้อยกว่าการใช้กรดอินทรีย์ และยังมีการล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อกันสนิมขึ้นซ้ำหลังการล้างด้วย



#### 4. การชุบโลหะ

เป็นขั้นตอนการชุบผิวชิ้นงานโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะแต่ละชนิดมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน และการชุบโลหะบางชนิดต้องมีการรองพื้นด้วยโลหะอีกชนิดก่อนด้วย

##### ● การชุบโครเมียม

การชุบโครเมียมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

- การชุบชนิดบาง (Decorative Chromium) เป็นการชุบเพื่อความสวยงาม จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไป ทำให้หลุดร่อนได้

- การชุบชนิดหนา (Hard Chromium) สามารถทำการชุบโดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลรองพื้น คุณสมบัติของชิ้นงานหลังชุบจะมีความแข็งแรง ทนต่อการเกิดสนิม ทนต่อความร้อน และมีสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำสามารถใช้แม่เหล็กดูดได้

##### ● การชุบทองแดง

การชุบทองแดงเป็นการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกก่อนนำไปชุบอย่างอื่น แบ่งเป็นการชุบทองแดงแบบต่าง และแบบกรด โดยการชุบทองแดงแบบต่างจะมีกำลังในการเคลือบผิวที่ดีมาก เหมาะสำหรับการชุบเพื่อรองพื้นชิ้นแรกก่อนการชุบแบบกรด และแบบนิกเกิลเงา ส่วนการชุบแบบกรดนั้น ผิวโลหะที่ชุบจะมีความเงางามมาก นิยมใช้ในการชุบโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนทำการชุบด้วยนิกเกิลเงา

##### ● การชุบนิกเกิล

การชุบนิกเกิลเป็นการชุบเพื่อรักษา และป้องกันเนื้อโลหะ ทำให้ผิวชิ้นงานดูสวยงาม ปกติการชุบนิกเกิลจะตามด้วยการชุบโครเมียม เพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด

##### ● การชุบสังกะสี

การชุบสังกะสีสามารถชุบได้โดยไม่ต้องมีการชุบรองพื้น นิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นเหล็กเพื่อป้องกันสนิม เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องมือในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

### ● การชุบโคบอลต์

การชุบโคบอลต์เป็นการชุบเคลือบผิวชั้นแรกก่อนนำไปชุบอย่างอื่น โดยการชุบโคบอลต์เป็นการชุบเพื่อรักษา และป้องกันเนื้อโลหะ เพื่อให้วัสดุมีความทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้น ส่วนมากใช้ในการชุบชิ้นส่วนของเครื่องบิน หรือชิ้นส่วนของวัสดุที่ต้องการให้โลหะคงสภาพในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

## 5. การล้างชิ้นงาน

เป็นขั้นตอนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดหลังการชุบ เพื่อล้างสารต่างๆ ออก ซึ่งน้ำล้างถือว่าเป็นน้ำเสียที่มีมลพิษต่างๆ ปนเปื้อนอยู่มาก

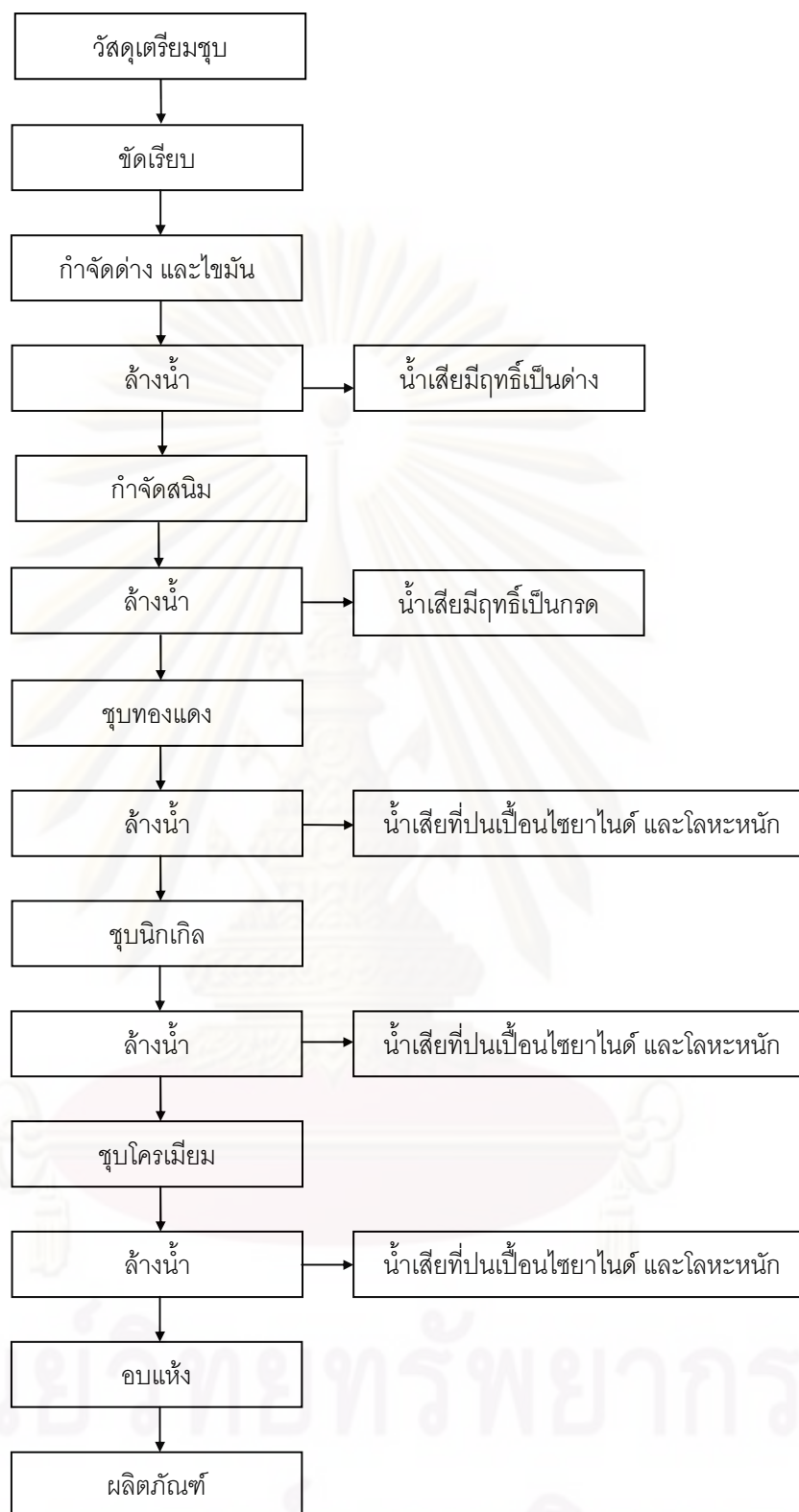
### 2.1.3 แหล่งที่มา และลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Nemerow, 1978)

- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน
- น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานในปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดสนิม และไขมัน น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และปริมาณไม่มากนัก แหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ ดังรูปที่ 2.3 และแหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะ ดังตารางที่ 2.1

มีผู้ศึกษาปริมาณ และลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะไว้มากมาย พบว่ามีการแปรเปลี่ยนทั้งปริมาณ และลักษณะน้ำเสียอย่างมาก เมื่อเปลี่ยนโรงงานสำรวจ หรือแม้แต่ว่าโรงงานเดียวกัน แต่เก็บตัวอย่างที่วันเวลาต่างกัน ลักษณะน้ำเสียก็ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของคนงาน รูปแบบการจับชิ้นงาน วิธีในการล้างชิ้นงานหลังการชุบ ประเภทผลการตรวจวัด ลักษณะของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการชุบโครเมียม (สาโรช บุญยกิจสมบัติ, 2535)

ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากระบบการชุบโลหะ (วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์, 2542)

สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมัน	สารประเภทไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ	แยกไขมัน
ของแข็ง	ยาขัด ทราาย	การขัด	ตกตะกอน
กรด	กรดกำมะถัน กรดเกลือ กรดไนตริก กรดกัดแก้ว กรดฟอสฟอริก กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดกระตุ้นผิว การขัดเงา	ทำให้เป็นกลาง
ด่าง	โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซิลิเกต โซเดียมฟอสเฟต	ต้มล้างไขมัน ทำให้เป็นกลาง กัดผิวอลูมิเนียม	ทำให้เป็นกลาง
ไซยาไนด์	สารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ	ล้างด้วยไฟฟ้า หรือจากถังชุบ	ออกซิเดชันโดยใช้ สารประเภทคลอรีน ใช้ต่าง
โลหะหนัก	โลหะที่มีค่า เช่น ทองแดง นิกเกิล	น้ำยาชุบ	
ในรูปไอออน	เหล็ก แคดเมียม สังกะสี อลูมิเนียม และแมงกานีส	การเตรียมก่อนชุบ	
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบ การทำโครเมต	ทำการรีดักชัน และตกตะกอน
ไอออนเชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของทองแดง และนิกเกิล	น้ำยาชุบ	ทำให้สารประกอบ เชิงซ้อนเกิดการแยกตัว ทำให้เป็นกลาง และ ตกตะกอน

ตารางที่ 2.2 ผลการตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ จากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม (บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์, 2547)

พารามิเตอร์	หน่วย	11/12/03	16/12/03	23/12/03	30/12/03
Conductivity	มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร	12.47	11.39	16.74	13.58
Total Dissolve Solids (TDS)	กรัมต่อลิตร	6.22	5.70	8.37	6.79
EDTA	กรัมต่อลิตร	11.75	13.48	15.17	18.87
Cyanide ion (CN <sup>-</sup> )	มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อลิตร	95.28	264.72	74.38	99.44
Cu	มิลลิกรัมต่อลิตร	12.69	28.68	3.87	12.47
Zn	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.51	1.33	8.17	1.25
Cr	มิลลิกรัมต่อลิตร	30.21	26.58	8.89	26.82
Ni	มิลลิกรัมต่อลิตร	30.06	9.37	17.92	31.16



ตารางที่ 2.3 ผลการตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ (ประยูร ฟองสถิติกุล และคณะ , 2542)

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ตรวจวัดได้
Temperature	°C	27-29
pH (Cyanide Contaminated WW)	มิลลิกรัมต่อลิตร	11.1-12.5
Cyanide ion (CN <sup>-</sup> )	มิลลิกรัมต่อลิตร	316-442
Suspended Solids	มิลลิกรัมต่อลิตร	290-430
Total Dissolve Solids (TDS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	4,490-6,170
COD	มิลลิกรัมต่อลิตร	299-473
Zn	มิลลิกรัมต่อลิตร	120-190

สารประกอบไซยาไนด์ และโลหะหนัก เป็นสารพิษที่เป็นส่วนประกอบหลัก และมีอันตรายสูง การปล่อยมลสารเหล่านี้เข้าสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมทั้งที่อาจเกิดผลกระทบต่อมนุษย์โดยทางอ้อม ปัญหาของมลพิษจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเป็นปัญหาหลักที่โรงงานต้องมีมาตรการควบคุมให้น้ำเสียที่ปล่อยออกสู่ชุมชนให้ได้มาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน <sup>1</sup>
1. ค่าความเป็นกรด และด่าง (pH Value)	-	5.5-9.0
2. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.2
3. สังกะสี (Zn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 5.0
4. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.25
5. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.75
6. นิกเกิล (Ni)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1.0

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)

## 2.2 ไชยาไนต์

### 2.2.1 ประเภทของสารประกอบไชยาไนต์

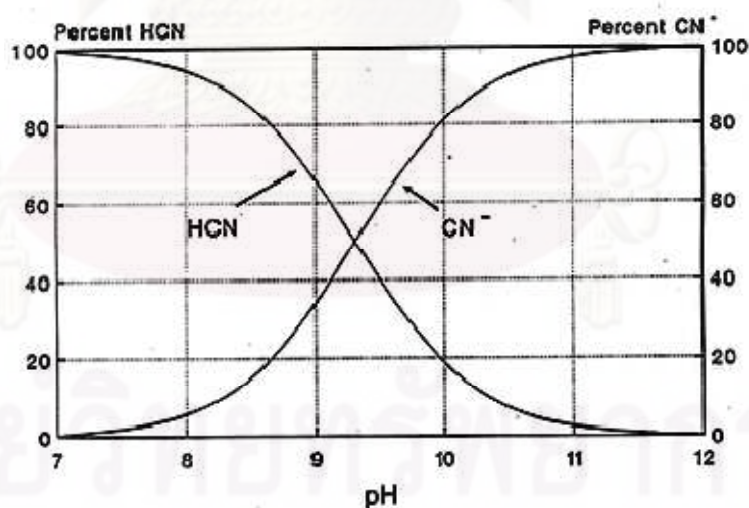
ไชยาไนต์ หมายถึง สารประกอบที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และไนโตรเจน 1 อะตอม ซึ่งมีหลายชนิด สามารถแบ่งสารประกอบดังกล่าว เป็น 4 กลุ่มหลัก ได้ดังนี้

#### 1. ไชยาไนต์อิสระ (Moran, 2000)

ไชยาไนต์อิสระ (Free Cyanide) ซึ่งอยู่ในรูปไชยาไนต์ไอออน (Cyanideion,  $\text{CN}^-$ ) และไฮโดรเจนไชยาไนต์ (Hydrogen cyanide,  $\text{HCN}$ ) ทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลาย และก๊าซ ดังสมการที่ (2-3) และ (2-4)



ที่พีเอช 9.3 ถึง 9.5 ไชยาไนต์ไอออน และไฮโดรเจนไชยาไนต์ จะอยู่ในภาวะสมดุล ถ้าพีเอช 11 สารละลายจะอยู่ในรูปไชยาไนต์ไอออนมากกว่า 99% แต่ถ้าพีเอช 7 สารละลายจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนไชยาไนต์มากกว่า 99% แม้ว่าไฮโดรเจนไชยาไนต์จะละลายน้ำได้ แต่ถ้าอุณหภูมิและความเค็มเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายน้อยลง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของไชยาไนต์อิสระ และไฮโดรเจนไชยาไนต์ที่พีเอชต่างๆ (Botz, 2001)

#### 2. เกลือไชยาไนต์ (Barnes et. al., 2000)

เกลือไชยาไนต์ (Simple Cyanide) หมายถึง สารประกอบโลหะไชยาไนต์ที่อยู่ในรูปของเกลือไชยาไนต์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการละลาย ได้แก่

- Soluble Simple Cyanide Complex

เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยมีโลหะหมู่ 1 และ 2 เป็นองค์ประกอบ เช่น โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide, NaCN) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide, KCN) แคลเซียม (Calcium Cyanide, Ca(CN)<sub>2</sub>) และปรอท (Mercury Cyanide, Hg(CN)<sub>2</sub>) เป็นต้น เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไซยาไนด์อิสระที่มีความเป็นพิษสูง

- Insoluble Simple Cyanide Complex

สารประกอบไซยาไนด์ที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้ยาก โดยมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น สังกะสี (Zinc Cyanide, Zn(CN)<sub>2</sub>) ทองแดง (Copper Cyanide, CuCN) นิกเกิล (Nickel Cyanide, Ni(CN)<sub>2</sub>) และเงิน (Silver Cyanide, AgCN) เป็นต้น

### 3. ไซยาไนด์เชิงซ้อน (Barnes, 2000)

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะอื่นๆ เช่น สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และแคดเมียม เป็นต้น ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการแตกตัว (Dissociation) ดังนี้

- Weak Acid Dissociable Cyanide

เป็นกลุ่มสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ปานกลางถึงง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น Zn(CN)<sub>4</sub><sup>2-</sup> Cd(CN)<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ Cd(CN)<sub>3</sub><sup>-</sup>

- Moderately Acid Dissociable Cyanide

เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้บ้างเล็กน้อย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น Cu(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup> Cu(CN)<sub>3</sub><sup>2-</sup> Ni(CN)<sub>4</sub><sup>2-</sup> และ Ag(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup>

- Strong Acid Dissociable Cyanide

เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ยาก เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถแตกตัวได้ดีขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่ และอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup> Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup> Co(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup> และ Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup>

แม้ว่า Hexacyanoferrate จะอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างเสถียร แต่สามารถแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระได้ เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง ดังสมการที่ (2-5) และ (2-6)



สารประกอบในกลุ่มนี้เมื่อรวมตัวกับโลหะอีกตัวหนึ่ง (Double Metallo-cyanide Complex) จะเกิดตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อน ดังสมการที่ (2-7)



ถ้าโลหะนั้นเป็นโลหะอัลคาไลด์ เช่น  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  ตะกอนที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้ อาจเกิดการแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระได้ แต่ถ้าเป็นโลหะหนัก เช่น  $\text{Cu}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  ตะกอนที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายน้ำ

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนัก เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี แต่จะมีสารประกอบบางรูปที่สามารถตกตะกอนได้เช่นกัน โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะหนักในแต่ละแบบจะมีค่าความเสถียร (K) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะโมเลกุล ดังตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.5** ค่าคงที่ของค่าความเสถียร (K) ของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Benjamin, 2002)

โลหะหนัก	Log K					
เหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$ )	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	52.44	$\text{FeH}(\text{CN})_6^{2-}$	50.00	$\text{FeH}_2(\text{CN})_6^-$	45.61
เหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ )	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	52.63	-	-	-	-
ทองแดง ( $\text{Cu}^+$ )	$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$	24.00	$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$	28.60	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	30.30
ทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	$\text{Cu}(\text{CN})_2$	-	$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$	-	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-}$	-
นิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ )	$\text{Ni}(\text{CN})_2$	14.59	$\text{Ni}(\text{CN})_3^-$	22.64	$\text{Ni}(\text{CN})_3^{2+}$	43.95
สังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ )	$\text{Zn}(\text{CN})_2$	11.07	$\text{Zn}(\text{CN})_3^-$	16.05	$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$	16.72

หมายเหตุ : สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ไม่มีการรวบรวมอย่างเป็นทางการ จึงไม่สามารถระบุค่าคงที่ของค่าความเสถียร (K) ได้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ตารางที่ 2.6** ค่าความเสถียร (log K) ของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (U.S.EPA, 1994 และ Meehan, 2000)

สารเคมี	สูตรเคมี	ค่าความเสถียร (log K)
Hexacyanocobaltate	$\text{Co}(\text{CN})_6^{3-}$	64.0
Hexacyanoferrate (III)	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	43.6
Mercurycyanide	$\text{Hg}(\text{CN})_4^{2-}$	41.4
Hexacyanoferrate (II)	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	35.4
Tetracyanonickelate	$\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$	31.8
Tetracyanocuprate	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	30.3
Dicyanoargentate	$\text{Ag}(\text{CN})_2^-$	21.0
Tetracyanozincate	$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$	16.9
Tetracyanocadmiate	$\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$	16.8
Zinc Cyanamide	$\text{Zn}(\text{CN})_2$	11.1
Cadmium Cyanide	$\text{Cd}(\text{CN})_2$	11.0
Hexacyanomanganate	$\text{Mn}(\text{CN})_6^{3-}$	9.7
Hydrogen Cyanide	HCN	9.2
Zinc Cyanide	$\text{ZnCN}^+$	5.3

#### 4. สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ

สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ เช่น ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride, CNCl) เกิดจากการบำบัดด้วยคลอรีน ไซยาเนต (Cyanate,  $\text{CNO}^-$ ) เกิดจากการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ ระหว่างการบำบัด และไทโอไซยาเนต (Thiocyanate,  $\text{SCN}^-$ ) ที่ใช้ในการชุบโลหะบางประเภท

#### 2.2.2 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่องกับโปรตีน และเอนไซม์หลายชนิดในร่างกาย ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก ทางการหายใจ หรือดูดซึมผ่านผิวหนัง และลูกตา การได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณเล็กน้อยจะเกิดอาการเป็นพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมอง อาจปรากฏอาการทางโรคจิต ประสาทตาเสื่อม หรือผ่อไปได้ ส่วนผู้ที่ได้รับพิษจากไซยาไนด์ในปริมาณมากจะเกิดอาการพิษแบบเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยจะมีอาการชักหมดสติ การหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันจะเป็นอันตรายถึงชีวิต (Rania

และ Roldan, 2004) ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้มีการทดลอง และกำหนดเป็นค่าระดับอันตรายไว้ ดังตารางที่ 2.7 และ 2.8

สำหรับไซยาเนต มักพบเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการบำบัดไซยาไนด์ และมีความเสถียรสูงกว่า ไซยาเนตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์มาก โดยการสัมผัสภายนอกจะเกิดอาการระคายเคือง การรับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยจะส่งผลเรื้อรังทำให้กล้ามเนื้ออ่อนแรง น้ำหนักลด และหากได้รับในปริมาณมากจะเกิดอาการอาเจียน อ่อนเพลีย ส่งผลต่อระบบประสาท และทำให้ระบบการหายใจหยุดทำงานได้ โดยไซยาเนตมีค่า LD<sub>50</sub> เท่ากับ 841 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Mallinckrodt และ Baker, 2004)

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Moran, 2000)

สารประกอบ	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Potassium cyanide	0.02-0.30
Zinc cyanide	0.02-0.30
Cadmium cyanide	0.02-0.30
Copper cyanide	0.40-4.00
Nickel cyanide	0.40-730
Iron cyanide	0.20-300

ตารางที่ 2.8 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ (U.S. EPA, 2000)

สารประกอบ	สูตรเคมี	สถานะ	TLV	LD <sub>50</sub>
Hydrogen cyanide	HCN	แก๊ส	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Potassium cyanide	KCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Sodium cyanide	NaCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Cyanogen chloride	CNCl	แก๊ส	0.3 พีพีเอ็ม	6.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Sodium cyanate	NaCNO	ของแข็ง		2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Potassium cyanate	KCNO	ของแข็ง		260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
Potassium ferricyanide	K <sub>3</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]	ของแข็ง		320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
				1,600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

หมายเหตุ : TLV = Threshold Limit Values

LD<sub>50</sub> = Lethal Dose 50% of population

### 2.2.3 ค่ามาตรฐานของสารประกอบไซยาไนด์

ค่าที่กำหนดของแต่ละสถาบันเป็นการกำหนดปริมาณไซยาไนด์ในรูปไซยาไนด์ทั้งหมด (Total Cyanide) แต่ไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะ (Metal Cyanide Complexes) อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยหลายท่านที่พยายามทำการทดลองหาความเป็นพิษของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะ โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะจัดเป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ในรูปอื่น อย่างไรก็ตามสารประกอบเหล่านี้สามารถแตกตัวให้สารประกอบไฮโดรเจนไซยาไนด์ ซึ่งทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้สารประกอบบางชนิดยังมีความเป็นพิษโดยตัวของโลหะเอง เช่น เงิน ทองแดง และนิกเกิล เป็นต้น สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็กเมื่อสัมผัสกับแสงแดดก็จะแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระพบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับโลหะต่อไปนี้จะทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันต่อสัตว์น้ำ (Moran, 2000)

ค่ามาตรฐานเกี่ยวกับการปนเปื้อนไซยาไนด์ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นในกฎหมายหลายฉบับซึ่งได้รวบรวมไว้ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ความเข้มข้นไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆ ในประเทศไทย

มาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ที่มา
1. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน	ไม่เกิน 0.2	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)
2. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน	แหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 ไม่เกิน 0.005	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)
3. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)
4. มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ไม่เกิน 0.1 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534)
5. มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ต้องไม่มี (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542)
6. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

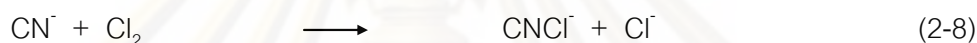
## 2.2.4 การกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ในน้ำเสีย

ในปัจจุบันวิธีการกำจัดไซยาไนด์มีอยู่หลายวิธี ทั้งวิธีการที่มีการใช้งานกัน และวิธีที่มีการศึกษากันอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

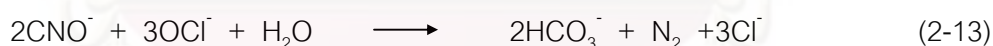
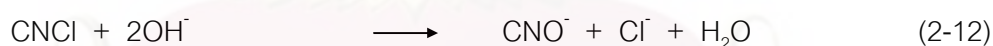
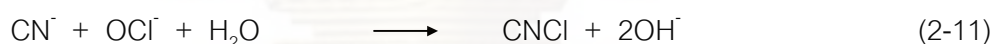
### 1. การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์ด้วยการออกซิไดซ์ด้วยไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือ ก๊าซคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ร่วมกับไฮดรอกไซด์ในขั้นที่ 1 ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-8) ถึง (2-10) (Botz, 2001) และสมการที่ (2-11) ถึง (2-13) (Parga, Shukla และ Carrillo, 2003)

เมื่อใช้ก๊าซคลอรีน



เมื่อใช้ไฮโปคลอไรต์



ก๊าซไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) เป็นก๊าซพิษที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และจะรวมกับไฮดรอกไซด์กลายเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-9) และ (2-12) ซึ่งเกิดขึ้นได้เร็วที่พีเอชสูง ดังนั้นปฏิกิริยาทั้งหมดในขั้นที่ 1 จึงควรทำที่พีเอชประมาณ 9.0 ถึง 10.0 เพื่อให้ปฏิกิริยาการเกิดไซยาเนตเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ต่อมาในขั้นที่ 2 กรณีการใช้ก๊าซคลอรีน ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และแอมโมเนีย (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) โดยมีคลอรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Botz, 2001) ดังสมการที่ (2-10)



ส่วนกรณีการใช้ไซเดียมไฮโปคลอไรด์ ไชยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นโบคาร์บอนเนต และ ก๊าซไนโตรเจน ดังสมการที่ (2-13) (Parga, Shukla และ Carrillo, 2003)

วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Acid Dissociable Cyanide ได้ดีตามทฤษฎี โดยใช้คลอรีนประมาณ 2.73 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้คลอรีน 3 ถึง 8 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม

## 2. การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

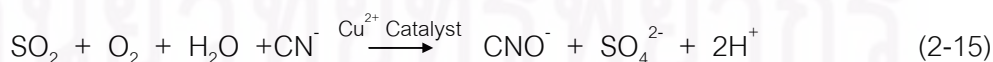
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไชยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไชยาเนต ดังสมการที่ (2-14)



สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับทองแดง และเหล็ก (Botz, 2001) ตามทฤษฎีใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 1.13 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 ถึง 8 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม ควรมีค่าประมาณ 9.0 ถึง 9.5 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด Weak Acid Dissociable Cyanide แต่จะกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็กได้น้อย เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับทองแดง และเหล็ก จะเกิดขึ้น และตกตะกอนได้มากกว่านี้

## 3. การออกซิไดซ์ด้วย INCO Sulfur Dioxide/Air

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยการออกซิเจน ร่วมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) และใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไชยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไชยาเนต ดังสมการที่ (2-15)

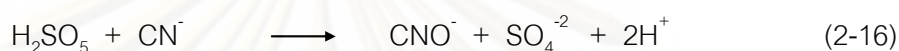


วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry) สามารถใช้ในการกำจัด Weak Acid Dissociable Cyanide ได้ดี และยังสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็กได้ โดยการตกตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับทองแดง และเหล็ก (Botz, 2001)

ตามทฤษฎีใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 2.46 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3.5 ถึง 4.5 กรัม ต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ค่าพีเอชที่เหมาะสม 8.0 ถึง 9.0 และควรเติมปูนขาว เพื่อปรับค่าพีเอช เนื่องจากในปฏิกิริยาจะเกิดไฮโดรเจนไอออนทำให้ค่าพีเอชต่ำลง

#### 4. การออกซิไดซ์ด้วย Caro's Acid

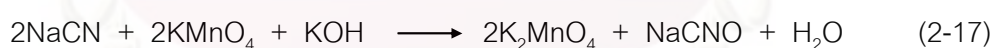
เป็นการออกซิไดซ์ด้วยกรดเพอร์ออกซีโมโนซัลฟูริก (Peroxymonosulfuric Acid) ( $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) หรือ Caro's Acid ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-16)



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

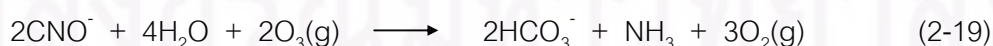
#### 5. การออกซิไดซ์ด้วยเปอร์มังกาเนต

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยการเติมโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-17) (อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539)



#### 6. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน

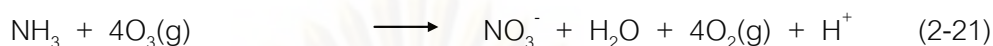
เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน ไซยาไนด์จะเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการที่ (2-18) และ (2-19) (Parga, Shukla และ Carrillo, 2003)



ในสารละลายที่มีพีเอชสูง จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนต ดังสมการที่ (2-20)



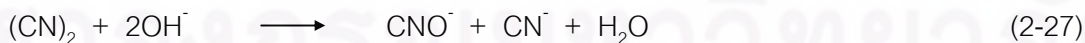
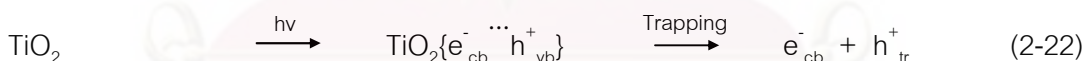
และจากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นไนเตรท ดังสมการที่ (2-21)



วิธีนี้สามารถใช้ในการกำจัด Weak Acid Dissociable Cyanide ได้ และยังสามารถใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ แต่สำหรับ Strong Acid Dissociable Cyanide จะทำลายได้น้อย แม้จะเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปก็ตาม (Botz, 2001) ปฏิกิริยาของไซยาเนต (สมการที่ 2-19) จะเกิดขึ้นช้าเมื่อเทียบกับไซยาไนด์ (สมการที่ 2-18) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณไซยาไนด์ แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซนเท่านั้น (Parga, Shukla และ Carrillo, 2003)

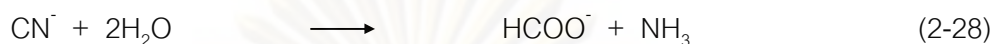
## 7. การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เป็นการออกซิไดซ์โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถทำให้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็กแตกตัวได้บางส่วน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะเกิดการออกซิไดซ์ โดยเรดิคอลลี่พื้นผิวไทเทเนียม ( $\equiv\text{TiO}^\cdot$ ) (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ดังสมการที่ (2-22) ถึง (2-27)

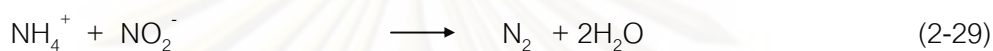


## 8. การออกซิไดซ์ด้วยความร้อน

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ระหว่าง 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส และพีเอช 8 แรงดันที่ใช้ต้องสูงถึง 100 บาร์ ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอร์มेट ( $\text{HCOO}^-$ ) และแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) (Hatinger, 1994) ดังสมการที่ (2-28)



และหากมีไนโตรเจนเข้ามาด้วย ฟอรัมेट และแอมโมเนียจะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ (2-29) และ (2-30)



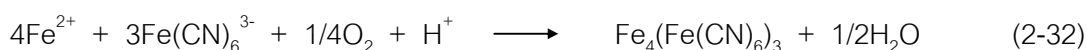
วิธีการนี้สามารถบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง และสามารถใช้น้ำล้างชิ้นงานที่เข้มข้นได้ด้วย

## 9. การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ปกติ และถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับแต่งพื้นผิว เช่น ปรับแต่งถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิว (Modified Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) และการเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยโลหะหนักบางชนิด (Impregnate Activated Carbon) (Adhoum และ Monser, 2002) วิธีนี้ใช้ได้ดี และมีราคาถูก มักใช้เป็นระบบสุดท้าย เพื่อลดปริมาณไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมักเหลือจากการบำบัดด้วยวิธีอื่น (Botz, 2001)

## 10. การตกตะกอนโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็ก

เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติม  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เพื่อให้ไซยาไนด์เปลี่ยนมาอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็ก และเกิดการตกตะกอน (Botz, 2001) ดังสมการที่ (2-31) และ (2-32)



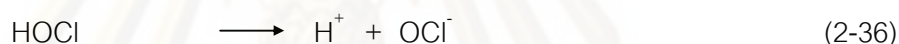
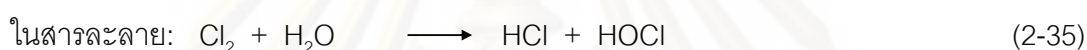
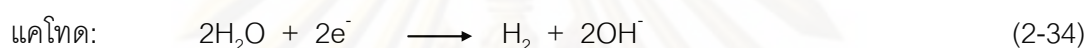
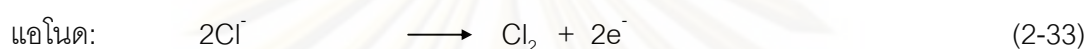


วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน ค่าพีเอชที่เหมาะสม 5 ถึง 6 ปริมาณ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้ประมาณ 0.5 ถึง 5 โมล ต่อไฮยาไนต์ 1 โมล

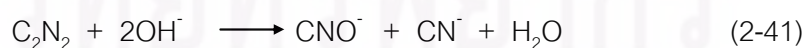
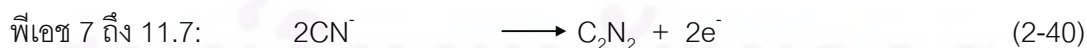
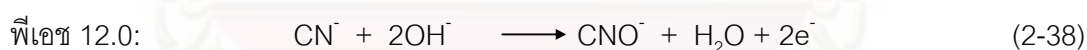
## 11. การสลายตัวด้วยไฟฟ้า

การสลายตัวด้วยไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

- การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ ( $\text{OCl}^-$ ) จากโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ที่เติมลงไป และไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นสารที่ไปทำลายไฮยาไนต์ต่อไป ดังสมการที่ (2-33) ถึง (2-37)



- การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยตรง ไฮยาไนต์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไฮยาเนตที่ขั้วแอนอดโดยตรง และจะถูกสลายต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซาลेटไอออน ขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย (Ogutveren, Toru และ Kopalal, 1999) ดังสมการที่ (2-38) ถึง (2-43)

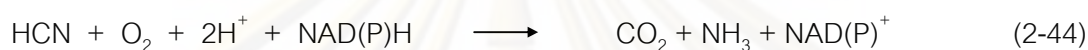


สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮยาไนต์กับโลหะหนัก ได้มีการศึกษาไว้หลายราย (El-Ghuaoui และคณะ, 1982) (Hine และคณะ, 1986) (Ho และคณะ, 1990) ซึ่งสามารถ

สรุปได้ว่าวิธีนี้สามารถใช้บำบัด Weak Acid Dissociable Cyanide ได้ดี แต่กับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็กจะไม่ได้ผลมากนัก

## 12. การใช้ระบบบำบัดโดยชีวภาพ

ระบบบำบัดทางชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่มากนัก (White, Pilon และ Woolard, 2000) มีการใช้กันในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพดี (Botz, 2001) การย่อยสลายไซยาไนด์โดยกระบวนการทางชีวภาพมีอยู่หลายวิถีทาง (Pathway) เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดทีฟ (Oxidative Reaction) ไซยาไนด์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย (Ebbs, 2004) ดังสมการที่ (2-44)



### 2.2.5 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารประกอบไซยาไนด์

Rader และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำจากเหมืองแร่ (Precious Metal Mill Tailing ) โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในการทดลองที่พีเอช 11 ที่พื้นผิวน้ำ 350 ตารางเซนติเมตร ลึก 3 เซนติเมตร และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ทุกชนิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยไซยาไนด์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อนส่วนหนึ่งถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรท ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับเหล็ก ทองแดง สังกะสี ปรอท และสารหนู จะถูกทำให้เสถียรในรูปของตะกอน

Sharma และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ โดยการออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์เรต ที่พีเอช และอุณหภูมิต่างๆ กันพบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น มีค่า Energy of activation  $38.9 \pm 1.0$  กิโลจูลต่อโมล ที่พีเอช 9.0 และได้สมการของปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2-45)



การทดลองที่พีเอช 7.5 9.0 และ 12.0 พบว่า ที่พีเอช 9.0 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด อัตราส่วนโดยโมลเปอร์เรตต่อไซยาไนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ที่พีเอช 7.5 จะพบไซยาเนต และไนเตรทเป็นสารผลิตภัณฑ์ ขณะที่พีเอช 9.0 และ 12.0 จะพบเพียงไนเตรทเป็นสารผลิตภัณฑ์เท่านั้น โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ที่ถูกออกซิไดซ์ต่อไนเตรทเป็น 1 ต่อ 1 สำหรับการทดลองกับน้ำเสียจริงจาก

โรงชุบโลหะพบว่า มีประสิทธิภาพดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ ในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

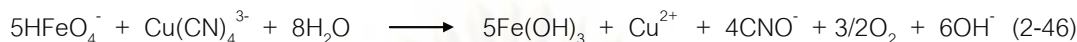
Adhoum และ Monser (2002) ได้ทำการศึกษากำจัดไซยาไนด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยเงิน และนึกเกิดพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับเงินได้ 45.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และนึกเกิด 4.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และได้นำถ่านที่ดูดซับเงิน และนึกเกิด แล้วไปทำการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยระบบแบบคอลัมน์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเงินมีความจุมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับนึกเกิด 2 เท่า และมากกว่าถ่านเปล่าๆ ถึง 4 เท่า ซึ่งคาดว่ากำจัดไซยาไนด์เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนในรูป  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  และ  $\text{Ni}(\text{CN})_4$  ผลการทดลองกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ Calcinations ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

Chiang, Amal และ Tran (2003) ได้ทำการศึกษากลไกการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ โดยการใช้อัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดลองการแทนกลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวไทเทเนียม ด้วยฟลูออไรด์ไอออน ทำให้ทราบว่า การออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ไม่ได้เกิดขึ้นโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $\text{OH}^\cdot$ ) แต่เกิดขึ้นโดยเรดิคัลของพื้นผิวไทเทเนียม ( $\equiv\text{TiO}^\cdot$ ) และที่ความเร็วในการลดของไซยาไนด์ต่ำ เนื่องจากการดูดติดของไซยาไนด์ที่พื้นผิวของไทเทเนียมต่ำ ไม่มีปฏิกิริยาที่เกิดจากไซยาไนด์กับไฮดรอกซิลเรดิคัล และเกิดการรวมตัวกันใหม่ของเรดิคัลของพื้นผิวไทเทเนียมอย่างรวดเร็ว

Parga, Shukla และ Carrillo (2003) ได้ทำการศึกษากำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วิธีการออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนไดออกไซด์ ( $\text{ClO}_2$ ) โอโซน และแสง โดยใช้ไทเทเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ทุกพีเอช ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง การใช้โอโซนสามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ดี และอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราเติมโอโซนเท่านั้น และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมสามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีโดยเฉพาะเมื่อใช้แสงอาทิตย์

Sharma และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษากำจัดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไซยาไนด์กับทองแดง (I) และคอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ ซึ่งพบได้มากในน้ำเสียจากเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งมีความเสถียรสูงกว่าไซยาไนด์อิสระ และมีความเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิตในน้ำพบว่า

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับสารทั้งสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น และได้สมการของปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2-46) โดยมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์เท่ากับ 5 ต่อ 1



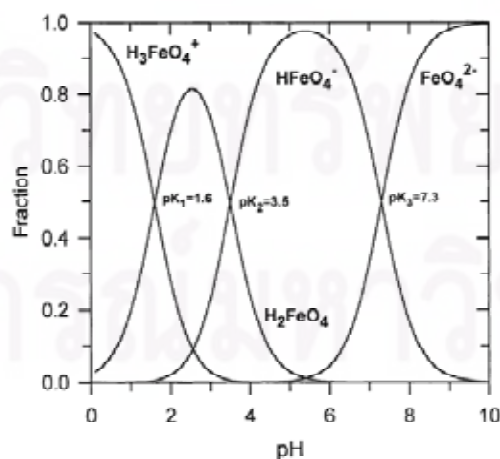
ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของเหมืองแร่ทองคำที่สังเคราะห์จากไฮโอไฮยาเนตไฮยาไนด์ และคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์พบว่า เฟอร์เรตทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์ในอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อคอปเปอร์ (I) ไฮยาไนด์ใกล้เคียงกับทฤษฎี ผลการทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ ที่มีความเข้มข้นไฮยาไนด์ทั้งหมด 17.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมดได้ประมาณ 70% ที่เฟอร์เรต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องใช้เฟอร์เรตถึง 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงถึง 99%

## 2.3 เฟอร์เรต

### 2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอร์เรต

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

#### 1. การแตกตัวของเฟอร์เรต



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเฟอร์เรตไอออนที่พีเอชต่างๆ



จากการศึกษารูปแบบของเฟอร์เรตไอออนในสารละลาย ที่พีเอชต่างๆ พบว่ามี 4 รูปแบบ ดังสมการที่ (2-47) ถึง (2-49) (Sharma, 2002)



เมื่อนำค่าคงที่การแตกตัว (pK) มาคำนวณจะได้กราฟการแตกตัวของเฟอร์เรต ดังรูปที่ 2.4 จากกราฟจะเห็นว่าในน้ำธรรมชาติ และน้ำที่เป็นด่าง จะพบเฟอร์เรตอยู่ในรูป  $\text{HFeO}_4^-$  และ  $\text{FeO}_4^{2-}$  เป็นส่วนมาก

## 2. กำลังในการออกซิไดซ์

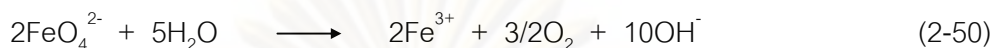
กำลังในการออกซิไดซ์ (Oxidizing Power) ของเฟอร์เรตมีค่าสูง โดยมีค่าระหว่าง + 0.7 โวลต์ ถึง +2.2 โวลต์ ในสารละลายเบส และกรดตามลำดับ ซึ่งนับว่าแรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรค ที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 2.10

**ตารางที่ 2.10** ค่า Redox Potential ของสารออกซิไดซ์ และสารฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันในระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Jiang และ Lloyd, 2002)

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

### 3. ความเสถียรของเฟอร์เรต

ความเสถียรของเฟอร์เรต คือ ความคงทนต่อการสลายตัวตามธรรมชาติ การสลายตัวของเฟอร์เรตเกิดจากการที่เฟอร์เรต ( $\text{Fe}^{6+}$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำ กลายเป็นเฟอร์ริค ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ดังสมการที่ (2-50) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

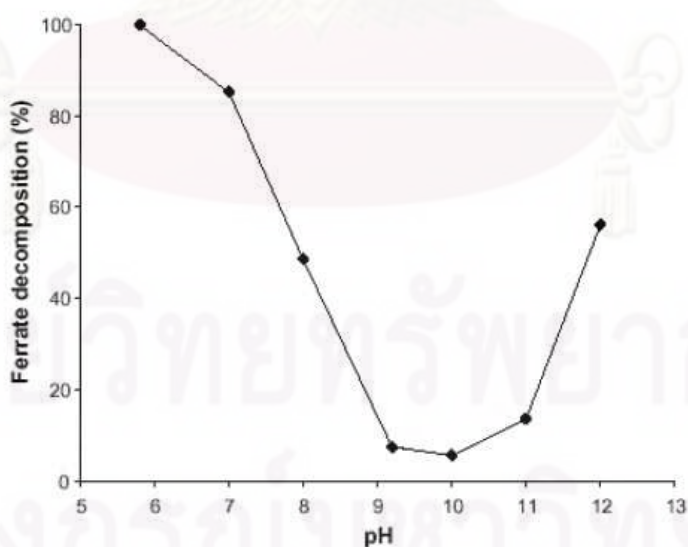


- ผลของความเข้มข้นต่อความเสถียร

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

- ผลของพีเอชต่อความเสถียร

มีรายงานว่าเฟอร์เรตจะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9.4 ถึง 9.7 (Sharma, 2002) แต่ยังไม่มีการรายงานถึงกลไก หรือเหตุผลที่เฟอร์เรตมีความเสถียรสูงสุดในช่วงพีเอชนี้ จากการทดลองของ Graham และคณะ (2004) ได้ผลดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช กับปริมาณเฟอร์เรตคงเหลือ ที่เวลา 10 นาที

ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.25 มิลลิโมลาร์ (Graham และคณะ, 2004)

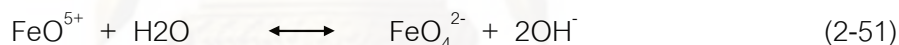
- ผลของไอออนต่อความเสถียร

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลาย มีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต โดยเมื่อความเข้มข้นโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ค่าความเสถียรจะมีค่ามากขึ้น สำหรับสารอื่นๆ เช่น เกลือของไนเตรท กับ ทองแดง เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แบริยม เซอร์เนียม แคลเซียม และแมกนีเซียม และเกลืออื่นๆ เช่น  $K_2Zn(OH)_4$   $KIO_4$   $K_2B_4O_9$   $K_3PO_4$   $Na_4P_2O_7$   $Na_2SiF_6$   $Na_2SiO_3$   $Na_2MoO_4$  และ  $Na_2WO_4$  ไม่มีผลต่อค่าความเสถียรของเฟอร์เรต (Sharma, 2002)

## 2.3.2 การเตรียมเฟอร์เรต

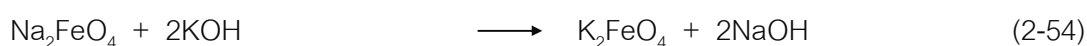
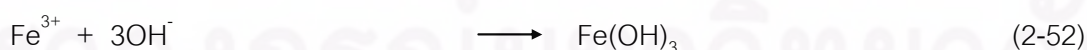
### 1. วิธีการ Dry Oxidation

เป็นวิธีการเก่าที่ยาก และอันตราย เพราะสามารถเกิดการระเบิดได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเตรียมเฟอร์เรตด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการผสมเฟอร์ริกออกไซด์กับโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $FeO^{5+}$  และจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น  $FeO_4^{2-}$  ดังสมการที่ (2-51)



### 2. วิธีการ Wet Oxidation

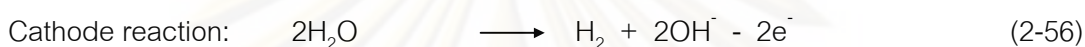
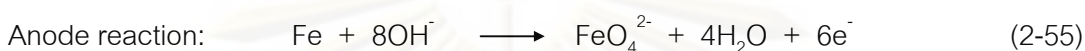
เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยการออกซิไดซ์เฟอร์ริกให้กลายเป็นเฟอร์เรต ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งเฟอร์เรตที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการล้าง และทำให้แห้งอีกครั้ง เพื่อให้ได้ของแข็งที่มีความเสถียรสูง ในระยะแรกเป็นการเตรียมในรูปของไฮเดรตเฟอร์เรต ซึ่งทำได้ยาก เนื่องจากไฮเดรตเฟอร์เรตมีความสามารถในการละลายสูง ต่อมาจึงได้พัฒนามาเป็นรูปของโปแตสเซียมเฟอร์เรต ที่เตรียมได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำกว่า การเตรียมโปแตสเซียมเฟอร์เรตทำได้ตามสมการที่ (2-52) ถึง (2-54)



ภายหลังได้มีการใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2-54) ทำให้ได้เฟอร์เรตในปริมาณที่มากขึ้น

### 3. วิธีการ Electro-Chemical

เป็นการเตรียมเฟอร์เรตโดยใช้กระแสไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนด และใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการที่ (2-55) ถึง (2-58) ปริมาณเฟอร์เรตที่ได้มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟ และชนิดของขั้วแอโนดเป็นอย่างมาก



การเตรียมเฟอร์เรตในรูปของโซเดียมเฟอร์เรตทำได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการละลายสูง ซึ่งการเตรียมในรูปของโปตัสเซียมเฟอร์เรตทำได้ง่ายกว่า การเตรียมเฟอร์เรตในปริมาณมากทำได้ยาก เนื่องจากความต้องการความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นสูง และยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่าง เช่น ชนิดขั้วแอโนดในวิธีการ Electrochemical เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และการแยกส่วนของตะกอน (Isolation process) ในวิธีการ Wet Oxidation นอกจากนี้การใช้วิธีนี้ยังเกิดก๊าซคลอรีน เนื่องจากไฮโปคลอไรต์ที่ใช้ในกระบวนการด้วย ดังนั้นการเตรียมเฟอร์เรตจึงต้องมีการควบคุมอย่างระมัดระวัง

#### 2.3.3 ประโยชน์ของเฟอร์เรต ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

##### 1. การออกซิไดซ์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิดดังตาราง ที่ 2.9 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับพีเอชเป็นอย่างมาก และประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณเฟอร์เรตที่ใช้

เฟอร์เรตมีความสามารถในการกำจัดสารพิษได้หลายชนิด และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย นอกจากนี้เฟอร์เรตยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้คลอรีน คือ การใช้คลอรีนจะ



เกิดสารผลิตภัณฑ์ของคลอรีน (Chlorinated by products) เช่น THM (Trihalomethanes) มีรายงานว่าการใช้เฟอรวเรตในการบำบัดน้ำจะมีค่า THM formation potential (THMFP, 4-h) น้อยกว่าการใช้คลอรีนถึง 75% (Jiang และ Lloyd, 2002)

ตารางที่ 2.11 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของเฟอรวเรต (Sharma, 2002)

Contaminant	pH	K, M <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	t <sub>1/2</sub>	Reference
Hydrogen Sulfide	9.0	7.4 x 10 <sup>5</sup>	2.70 ms	Sharma et al., 1997
Methylhydrazine	9.0	9.8 x 10 <sup>3</sup>	0.20 s	Johnson and Hornstein, 1994
Anifine	9.0	6.2 x 10 <sup>3</sup>	0.32 s	Sharma and Hollyfield, 1995
Hydrazine	9.0	5.6 x 10 <sup>3</sup>	0.35 s	Johnson and Hornstein, 1994
Thioacetamide	9.0	5.5 x 10 <sup>3</sup>	0.36 s	Sharma et al., 2000
Ferrocyanide	9.0	4.7 x 10 <sup>3</sup>	0.42 s	Johnson and Sharma, 1999
Thiourea	9.0	3.4 x 10 <sup>3</sup>	0.59 s	Sharma, 1999
Cysteine	12.4	7.6 x 10 <sup>2</sup>	2.60 s	Sharma and Bielski, 1991
Thiosulfate	9.0	7.2 x 10 <sup>2</sup>	2.80 s	Johnson and Read, 1996
Glyoxylic acid	8.0	7.0 x 10 <sup>2</sup>	2.90 s	Carr et al., 1985
Cyanide	9.0	6.2 x 10 <sup>2</sup>	3.20 s	Sharma et al., 1998a
Glyoxal	8.0	3.0 x 10 <sup>2</sup>	6.70 s	Carr et al., 1985
Dimethylamine	8.0	2.0 x 10 <sup>2</sup>	10.00 s	Carr et al., 1985
Benzenesulfinate	9.0	1.4 x 10 <sup>2</sup>	14.30 s	Johnson and Read, 1996
Methionine	9.0	1.3 x 10 <sup>2</sup>	15.40 s	Sharma and Bielski, 1991
Iminodiacetic acid	8.0	1.0 x 10 <sup>2</sup>	20.00 s	Carr et al., 1985
Glycine	8.0	1.0 x 10 <sup>2</sup>	20.00 s	Sharma and Bielski, 1991
Diethylsulfide	8.0	1.0 x 10 <sup>2</sup>	20.00 s	Carr et al., 1985
Thiodiethanol	8.0	1.0 x 10 <sup>2</sup>	20.00 s	Carr et al., 1985
Phenol	9.0	8.0 x 10 <sup>1</sup>	25.00 s	Carr et al., 1985
Thioxane	9.0	5.8 x 10 <sup>1</sup>	34.50 s	Read et al., 1998a
Methylamine	8.0	4.0 x 10 <sup>1</sup>	50.00 s	Carr et al., 1985
Chloral	8.0	6.0 x 10 <sup>0</sup>	5.55 min	Carr et al., 1985
Glycolaldehyde	8.0	3.0 x 10 <sup>0</sup>	11.10 min	Carr et al., 1985
Dimethylaldehyde	8.0	2.5 x 10 <sup>0</sup>	13.30 min	Carr et al., 1985
Trimethylaldehyde	8.0	2.0 x 10 <sup>0</sup>	16.70 min	Carr et al., 1985
Nitriloacetic acid	8.0	2.0 x 10 <sup>0</sup>	16.70 min	Carr et al., 1985
Nitrite	9.0	6.2 x 10 <sup>-1</sup>	37.00 min	Sharma et al., 1998a
Formaldehyde	8.0	5.0 x 10 <sup>-1</sup>	1.11 h	Carr et al., 1985
Acetaldehyde	8.0	4.0 x 10 <sup>-1</sup>	1.39 h	Carr et al., 1985
Formic acid	8.0	4.0 x 10 <sup>-1</sup>	1.39 h	Carr et al., 1985
Glycolic acid	8.0	4.0 x 10 <sup>-1</sup>	1.39 h	Carr et al., 1985
Ammonia	9.0	1.7 x 10 <sup>-1</sup>	3.27 h	Carr et al., 1985
Oxalic acid	8.0	1.0 x 10 <sup>-1</sup>	5.55 h	Carr et al., 1985
Ethyl alcohol	8.0	8.0 x 10 <sup>-2</sup>	6.94 h	Carr et al., 1985
Isopropyl alcohol	8.0	6.0 x 10 <sup>-2</sup>	9.26 h	Carr et al., 1985
Methyl alcohol	8.0	3.0 x 10 <sup>-2</sup>	18.50 h	Carr et al., 1985

<sup>a</sup> Based on five-fold higher concentration of Fe(VI) than contaminant (100 μM)

## 2. การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีน เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำ มีการทดลองการใช้สารอื่นๆ ในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไอโอดีน และโอโซน พบว่ามีสารผลิตภัณฑ์อื่นเกิดขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเช่นกัน

มีรายงานการทดลองการใช้เฟอร์เรตในการฆ่าเชื้อโรค พบว่าเฟอร์เรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย โดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในอีกการทดลองหนึ่งพบว่าที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (as  $\text{FeO}_4^{2-}$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัด Total Coli form ได้ 99.9% และกำจัด Total Viable Bacteria ได้ 97.0% (Jiang และ Lloyd, 2002)

สำหรับไวรัส ได้มีการทดลองการกำจัด (Inactivate) f2 Coliphage (Jiang และ Lloyd, 2002) ซึ่งเป็นไวรัสที่พบได้ทั่วไปในท่อระบายน้ำ และมีความคงทนต่อคลอรีน พบว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (as  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ) เฟอร์เรตสามารถกำจัดไวรัสได้ถึง 99% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่ง คือ เฟอร์เรตจะไม่มีสารตกค้าง (Residual) เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

## 3. การโคแอกกูเลชัน

เฟอร์เรตสามารถใช้ในการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อกำจัดความขุ่นได้ โดยเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่เกิดขึ้นจากเฟอร์เรต ซึ่งตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2-59)



มีรายงานว่า เฟอร์เรตสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ในเวลาเพียง 1 นาที ในขณะที่เกลือของเฟอร์ริกใช้เวลาถึง 30 นาที นอกจากนี้ยัง พบว่าสามารถใช้ในการกำจัดโลหะในน้ำได้หลายชนิด เช่น เฟอร์เรตสามารถใช้ในการบำบัดสารกัมมันตรังสี เช่น อะเมริซิยม (Americium) และพลูโตเนียม (Plutonium) ในน้ำได้อีกด้วย (Jiang และ Lloyd, 2002)

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

### 2.3.4 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเฟอร์เรต

Chao, Luca และ Idle (1996) ได้ทำการศึกษาการเติมเฟอร์เรตลงในตะกอนอินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในการจัดการตกตะกอนจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นพบว่า สามารถลดสารที่จะทำให้เกิดกลิ่นได้โดยเฉพาะแอมโมเนีย และซัลไฟด์ โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท และซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลเฟต ทำให้สามารถนำตะกอนอินทรีย์ไปจัดการต่อได้โดยไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น

Sharma และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไธโออะเซตามายด์ (Thioacetamide) โดยใช้เฟอร์เรตทำการทดลองที่พีเอช 9.14 ถึง 12.0 อุณหภูมิ 15 ถึง 35 องศาเซลเซียส ใน 0.01 โมลาร์ฟอสเฟต พบว่า ปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่ 1 ทั้ง 2 สารอัตราการเกิดปฏิริยาลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยไธโออะเซตามายด์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซัลฟีนิว (Sulfenyl) ซัลฟีนิก (Sulfinic) และกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) และสุดท้ายกลายเป็นซัลเฟต (Sulfate) และอะเซตามายด์ (acetamind)

Yuan, Qu และ Fu (2000) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารไมโครไซติน (Microcystin) ที่เกิดจากไซยาโนแบคทีเรีย โดยการใช้เฟอร์เรตพบว่า สามารถกำจัดสารไมโครไซตินได้เป็นอย่างดี โดยประสิทธิภาพจะแปรตามความเข้มข้นเฟอร์เรต พีเอช และระยะเวลาในการสัมผัส นอกจากนี้ยังได้สารผลิตภัณฑ์ คือ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ที่ไม่เป็นพิษ และยังช่วยเพิ่มตะกอนได้อีกด้วย

Ma และ Liu (2002) ได้ทำการศึกษาการใช้เฟอร์เรตในการออกซิไดซ์สารต่างๆ ในน้ำก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา โดยใช้ตัวอย่างน้ำ 3 ชนิด พบว่าการเติมเฟอร์เรตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และการกรอง (Filtration) โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์เรตเพียง 0.5 ถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อน้ำดิบมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์มากขึ้น

Sharma (2002) ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเฟอร์เรตพบว่า เฟอร์เรตที่ได้จากการแตกตัวของโพแทสเซียมเฟอร์เรตมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรสูง มีกำลังในการออกซิไดซ์สูง

มีการเลือกทำปฏิกิริยา และได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งทำให้โพแทสเซียมเฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ปลอดภัยสำหรับน้ำธรรมชาติ ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรม เฟอร์เรตมีกำลังในการออกซิไดซ์ +2.2 ถึง +0.7 โวลต์ในสารละลายกรด และเบสตามลำดับ การสลายตัวของเฟอร์เรตเป็นเฟอร์ริก และออกซิเจนเกิดได้เร็วในสภาวะที่เป็นกรด และสลายตัวได้ช้าที่พีเอช 10 และในสารละลายเจือจาง การสลายตัวจะเกิดได้ช้าที่สุดที่พีเอช 9.4 ถึง 9.7 เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ที่เลือกทำปฏิกิริยา และสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารอินทรีย์หลายชนิด โดยที่ยังคงได้เฟอร์ริกเป็นสารผลิตภัณฑ์ เฟอร์เรตเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเทคโนโลยีสะอาด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำ Super-iron Batteries และการบำบัดน้ำเสีย สารปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียสามารถกำจัดได้โดยใช้เฟอร์เรตใช้เวลาในหน่วยวินาทีถึงนาที โดยที่ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตราย นอกจากนี้ยังเป็นสารฆ่าเชื้อโรค (Antifulant) และสารรวมตะกอน จึงนับได้ว่าเป็นสารที่สามารถใช้งานในทางบำบัดน้ำเสียได้อย่างอเนกประสงค์

Jiang และ Lloyd (2002) ได้ทำการศึกษากระบวนการเตรียม และการใช้เฟอร์เรตเป็นสารออกซิไดซ์ และสารรวมตะกอน ในงานด้านสิ่งแวดล้อมพบว่า จากคุณสมบัติที่พิเศษ (กำลังในการออกซิไดซ์สูง และการเกิดเฟอร์ริกที่เป็นสารรวมตะกอน) ทำให้เฟอร์เรตสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อโรคลดรูป (Degrade) หรือกำจัดสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอนุภาคแขวนลอยได้ โดยการทำงานเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามยังไม่พบการใช้งานเฟอร์เรตในแบบ Full Scale ในงานเกี่ยวกับน้ำ เนื่องจากความยุ่งยากในการเตรียม อัตราการเกิด (Yield) ต่ำ การเกิดความไม่เสถียรที่เป็นผลจากเทคนิคการเตรียม และการศึกษาที่จะชี้แนะถึงความสามารถ และข้อดีในงานด้านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาขั้นพื้นฐานจำเป็นต้องการค้นคว้าวิธีการผลิตแบบใหม่ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิด และความเสถียรสูง โดยวิธีการผลิตจะหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรต์ และคลอรีน ทั้งนี้ประโยชน์ของเฟอร์เรตในงานด้านการผลิตน้ำดื่มยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ และงานด้านนี้เป็นส่วนที่น่าสนใจในอนาคต

Qu และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัดกรดฟูลวิก (Fulvic Acid) โดยใช้เฟอร์เรตพบว่า ความเข้มข้นของกรดฟูลวิก 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดถึง 90% โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์เรตต่อกรดฟูลวิกเท่ากับ 12 ต่อ 1 และยังพบว่าปริมาณกรดสามารถลดลงได้อีก

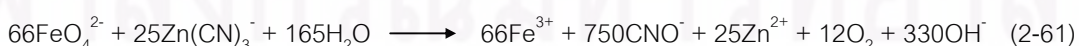
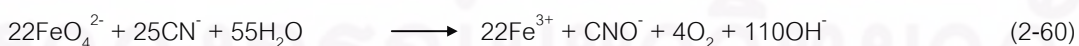


เนื่องจากการดูดติดในการตกตะกอนของเฟอร์ริก และเมื่อใช้ร่วมกับการตกตะกอนโดย โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือไฮดรอกไซด์ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 100%

Graham และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัดฟีนอล และคลอโรฟีนอล 3 ชนิด คือ 4-Chlorophenol (CP) 2,4-Dichlorophenol (DCP) และ 2,4,6-Trichlorophenol (TCP) ด้วยเฟอร์เรต เนื่องจากค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ความเสถียรของเฟอร์เรต และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวได้จะขึ้นอยู่กับพีเอช จึงทำการทดลองในช่วงพีเอช 5.8 ถึง 11.0 และอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์เรตต่อสารประกอบในช่วง 1 ต่อ 1 ถึง 8 ต่อ 1 และใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนสำหรับสารที่ไม่แตกตัว ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสารประกอบต่างๆ ด้วยเฟอร์เรตจะขึ้นอยู่กับพีเอชเป็นอย่างมาก โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมลดลงจากฟีนอล และคลอโรฟีนอล มีค่าอัตราการสลายตัวที่พีเอชเหมาะสมใกล้เคียงกัน ผลการทดลองกับฟีนอล และคลอโรฟีนอลชี้ให้เห็นว่า จำนวนอะตอมของคลอรีนโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ไม่แตกตัวเพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่แตกตัวลดลง

ศीलาลูธ ดำรงศิริ (2548) ได้ทำการศึกษาผลของสังกะสีต่อการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรตที่พีเอชต่างๆ กัน และที่อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วที่สุดที่พีเอช 9 แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าที่สุดที่พีเอช 11 สังกะสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ไม่มีผลต่ออัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา และไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แต่มีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง สารผลิตภัณฑ์หลัก คือ ไซยาเนต ซึ่งพบไนโตรเจน และไนเตรต เพียงเล็กน้อย

ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 9 10 และ 11 ที่มีสังกะสี และไม่มีสังกะสี มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 95 ถึง 100% และหลังการเกิดปฏิกิริยา น้ำเสียสังเคราะห์พีเอชจะสูงขึ้น ดังสมการที่ (2.60) และ (2.61)



ปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ (2549) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ และอีดีทีเอ ในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 10 อีดีทีเอไม่มีผลต่อ

ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ และสารผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมล ไซยาไนด์ต่ออีดีทีเอ ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะลดลง เมื่อค่าความเข้มข้นของอีดีทีเอมีมากกว่าไซยาไนด์ แต่เมื่อค่าความเข้มข้นของอีดีทีเอเท่ากับหรือน้อยกว่าไซยาไนด์จะมี ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ได้สูงถึง 100% โดยสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไซยาเนต

ภัทรวรรณ ตียนานท์ (2549) ได้ทำการศึกษาผลของนิกเกิลต่อการกำจัดไซยาไนด์ ในน้ำเสีย โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด ไซยาไนด์มีค่าประมาณ 58% ที่พีเอช 8 ประมาณ 50% ที่พีเอช 9 และ 10 ประมาณ 38% ที่พีเอช 11 โดยนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลงในทุกๆ พีเอช แต่ไม่มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ไซยาเนต



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatography, IC): Dionex ICS-2500
2. เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer):  
Thermo electron corporation, Helios Alpha
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter): Denver Instrument, model 215
4. เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (DI water 18.2 mΩ): ELGA, Purelab Maxima
5. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4-digits Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204
6. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer): Thermolyne Cimarec 2
7. ตู้อบความร้อน (Oven): Binder FD115 (E2)
6. Hyperclean Syringe Filter: Target, Nylon 0.45  $\mu\text{m}$  17 mm
7. อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
8. ภาชนะพลาสติกคุณภาพสูง

##### 3.1.2 สารเคมี

1. โปตัสเซียมเตตระไซยาไนด์นิกเกิลเลต (Potassium Tetracyanonickelate (II),  $\text{K}_2\text{Ni}(\text{CN})_4$ ): Aldrich, 99.99%
2. โปตัสเซียมเฮกซะไซยาไนด์โคบอลต์เตต (Potassium Hexacyanocobaltate (III),  $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$ ): Fluka, purum 95%
3. โปตัสเซียมเฟอร์เรต (Potassium Ferrate,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ): Dr. Sharma, 86%
4. โปตัสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide, KCN): Ajax, AR 96%
5. โปตัสเซียมไซยาเนต (Potassium Cyanate, KCNO): Aldrich, 96%
6. โปตัสเซียมไนไตรท์ (Potassium Nitrite,  $\text{KNO}_2$ ): Sigma-Aldrich, 96%

7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH): Fluka, 99%
8. โซเดียมเมตาอาร์เซไนท์ (Sodium meta Arsenite, NaAsO<sub>2</sub>): Fluka, purum 99%
9. โซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate, CH<sub>3</sub>COONa): BDH, AR 99%
10. โซเดียมเตตระโบรไรต์ (Sodium Tetraborate, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O): BDH, 99.5%
11. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl): Carlo ERBA, 37%
12. เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>): Panreac, 99%

### 3.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ น้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต

#### 3.2.1 การเตรียมสารละลายต่างๆ

เตรียมสารละลายไว้เพื่อใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ และการหยุดปฏิกิริยาโดยสารละลายที่เตรียมไว้มีดังนี้

##### 1. สารละลายเตตระไฮยานอนิกเกิลเลต

สารละลายเตตระไฮยานอนิกเกิลเลต เตรียมสารละลายโดยนำไปตัสเชื่อมเตตระไฮยานอนิกเกิลเลตมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (พีเอชประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 2. สารละลายเฮกซะไฮยานอนโคบอลเตต

สารละลายเฮกซะไฮยานอนโคบอลเตต เตรียมสารละลายโดยนำไปตัสเชื่อมเฮกซะไฮยานอนโคบอลเตตมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ (พีเอชประมาณ 12.5) สารละลายนี้ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ และ 1.2 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง

##### 4. สารละลายอาร์เซไนท์

สารละลายอาร์เซไนท์ ความเข้มข้น 7,500 ไมโครโมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมอาร์เซไนท์มาละลายในน้ำปราศจากไอออน สารละลายนี้ใช้ในการหยุดปฏิกิริยา



## 5. สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบอร์เรตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.010 และ 0.005 โมลาร์ เตรียมสารละลายโดยการนำโซเดียมเตตระบอร์เรต มาละลายในน้ำปราศจากไอออน

### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ น้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกันระหว่างเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตกับเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ซึ่งจะทำการทดลองโดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ผสมกับสารละลายเฟอร์เรต โดยจะผสมในปริมาณ 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรต ในแต่ละครั้ง จึงต้องเตรียมที่ความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ เพื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับที่ต้องการ เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรตมาผสมกัน การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะเตรียมขึ้นจากสารละลายเข้มข้น และสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดยจะเตรียมก่อนการใช้งานแต่ละครั้ง และปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย

ตารางที่ 3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นที่กำหนด	สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า				
	$K_2Ni(CN)_4$		น้ำปราศจากไอออน	สารละลายบัฟเฟอร์	
ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มิลลิลิตร	มิลลิลิตร	ไมโครโมลาร์	มิลลิลิตร
50	1,000	5	5	0.005	40
100	2,000	5	5	0.005	40
250	5,000	5	5	0.005	40
500	10,000	5	5	0.01	40

หมายเหตุ : หน่วยความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต อยู่ในรูปโซดาไนต์

**ตารางที่ 3.2** การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นที่กำหนด			สารละลายเพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 2 เท่า					
Ni : Co	$K_2Ni(CN)_4$	$K_3Co(CN)_6$	$K_2Ni(CN)_4$		$K_3Co(CN)_6$		สารละลายบัฟเฟอร์	
	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร	ความเข้มข้น	ปริมาตร
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	มิลลิลิตร	ไมโครโมลาร์	มิลลิลิตร	ไมโครโมลาร์	มิลลิลิตร
0.5 : 1	50	100	1,000	5	2,000	5	0.005	40
	100	200	2,000	5	4,000	5	0.01	40
1 : 1	50	50	1,000	5	1,000	5	0.005	40
	100	100	2,000	5	2,000	5	0.005	40
	250	250	5,000	5	5,000	5	0.01	40
2 : 1	50	25	1,000	5	500	5	0.005	40
	100	50	2,000	5	1,000	5	0.005	40
	250	125	5,000	5	2,500	5	0.01	40

หมายเหตุ : หน่วยของอัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต อยู่ในรูปไฮยาโนด์

### 3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เฟอไรต์

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟอไรต์ พบว่าเฟอไรต์จะมีความเสถียรสูงที่พีเอช 9 ถึง 11 และบัฟเฟอร์ หรือไอออนต่างๆ มีผลทำให้ความเสถียรของเฟอไรต์ลดลง (ศิลาวุธ, 2548) ดังนั้นวิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ดีที่สุดคือ การเตรียมในน้ำปราศจากไอออน และไม่ต้องปรับพีเอช เพื่อให้เฟอไรต์มีความเสถียรสูงที่สุด และจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนใช้งานเท่านั้น เพราะเฟอไรต์มีการสลายตัวเร็ว และสลายตัวไปตลอดเวลา ดังนั้นจึงเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 2 เท่า ดังตารางที่ 3.3

ความเข้มข้นของสารละลายเฟอไรต์ตรวจวัดด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จะแสดงเป็นค่าการดูดซึ่มแสง โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับสารละลายเฟอไรต์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 ไมโครโมลาร์ ค่าการดูดซึ่มแสงที่เทียบเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายเฟอไรต์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ค่าการดูดซึมแสง สำหรับการเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลอง

ความเข้มข้นที่กำหนด	ความเข้มข้น 2 เท่า	ค่าการดูดซึมแสง
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไม่มีหน่วย
50	100	0.115
75	150	0.173
100	200	0.230
150	300	0.345
200	400	0.460
250	500	0.575
300	600	0.690
375	750	0.863
400	800	0.920
500	1,000	1.150

### 3.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

การทดลองจะเป็นการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

#### 3.3.1 การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก)

ก-1 ศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

ก-2 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์ และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

ก-3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

#### 3.3.2 การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข)

ข-1 ศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

ข-2 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

ข-3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองแต่ละชุดจะมีตัวแปรคงที่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ที่แตกต่างกันตามแต่วัตถุประสงค์ในการทดลองนั้นๆ โดยมีตัวแปรสำคัญต่างๆ ดังหัวข้อที่ 3.4 และมีวิธีการทดลองดังหัวข้อที่ 3.5

### 3.4 ตัวแปรในการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก)

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ ดังตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.6



**ตารางที่ 3.4** ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์ 2. บัฟเฟอร์ 3. เวลา 4. อุณหภูมิ	1. 1 ต่อ 1 2. บอร์เรต 3. สิ้นสุดปฏิกิริยา 4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต	1. 9 10 และ 11 2. 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนด์)
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ทั้งหมด และประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์เชิงซ้อน	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไฮยาไนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

ตารางที่ 3.5 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไฮยาไนกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-2)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของเตตระไฮยาไนกิลเลต 2. บัฟเฟอร์ 3. เวลา 4. อุณหภูมิ	1. 500 (รูปไฮยาไนด์) 2. บอร์เรต 3. สิ้นสุดปฏิกิริยา 4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของเฟอร์เรต	1. 9 10 และ 11 2. 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไฮยาไนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

**ตารางที่ 3.6** ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกล็ด ต่ออัตรา  
การเกิดปฏิกิริยา (ก-3)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของเตตระไฮยาโนนิกเกล็ด 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ 3. บัฟเฟอร์ 4. อุณหภูมิ	1. 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) 2. 1 ต่อ 1 3. บอร์เรต 4. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. เวลา	1. 9 10 และ 11 2. 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราการเกิดปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไฮยาโนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

### 3.4.2 ตัวแปรในการทดลองการกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข)

ตัวแปรในการทดลองแสดงไว้ ดังตารางที่ 3.7 ถึงตารางที่ 3.9

**ตารางที่ 3.7** ศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-1)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์</li> <li>บัฟเฟอร์</li> <li>เวลา</li> <li>อุณหภูมิ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ต่อ 1</li> <li>บอร์เรต</li> <li>สิ้นสุดปฏิกิริยา</li> <li>อุณหภูมิห้อง</li> </ol>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
<ol style="list-style-type: none"> <li>พีเอช</li> <li>ความเข้มข้นของเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต</li> <li>อัตราส่วนโดยโมลของเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต ต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>9 10 และ 11</li> <li>50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)</li> <li>0.5 ต่อ 1 1 ต่อ 1 และ 2 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
<ol style="list-style-type: none"> <li>ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง</li> <li>ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมด และประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>พีเอช</li> <li>ความเข้มข้นไฮยาโนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนไตรท และไนเตรท</li> </ol>

ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ตารางที่ 3.8** ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต 2. อัตราส่วนโดยโมลของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต 3. บัฟเฟอร์ 4. เวลา 5. อุณหภูมิ	1. 250 (รูปไซยาไนด์) 2. 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ 3. บอร์เรต 4. สิ้นสุดปฏิกิริยา 5. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. ความเข้มข้นของเฟอร์เรต	1. 9 10 และ 11 2. 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไซยาไนด์อิสระ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท

**ตารางที่ 3.9** ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (ข-3)

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของเฟอร์เรต 2. ความเข้มข้นของเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต 3. อัตราส่วนโดยโมลของเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต ต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต 4. บัฟเฟอร์ 5. อุณหภูมิ	1. 500 ไมโครโมลาร์ 2. 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) 3. 1 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์ 4. บอร์เรต 5. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1. พีเอช 2. เวลา	1. 9 10 และ 11 2. 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง 2. อัตราการเกิดปฏิกิริยา	1. พีเอช 2. ความเข้มข้นไฮยาโนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนไตรท และไนเตรท



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลอง

### 3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.5.1 การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพีเอช อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนนิกเกิดเลต และอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาโนนิกเกิดเลต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนนิกเกิดเลตเชิงซ้อน และสภาวะที่เหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงชุมชนกิล

#### ก-1 ศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนนิกเกิดเลตเชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนนิกเกิดเลตเชิงซ้อนแต่ละพีเอช เพื่อเลือกพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไฮยาโนนิกเกิดเลตเชิงซ้อน และศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และสารผลิตภัณฑ์

ตัวแปรในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนนิกเกิดเลต) โดยแต่ละความเข้มข้นทำการแปรพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนนิกเกิดเลตเท่ากับ 1 ต่อ 1 การทดลองที่ ก-1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 3.2 และวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาตร 40 มิลลิลิตร
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 5 ขวด ขวดละ 10 มิลลิลิตร
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ปิดฝา และเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น Blank
5. ขวดที่ 2 3 4 และ 5 เติมสารละลายเฟอร์เรตขวดละ 10 มิลลิลิตร ปิดฝาทันที และเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปหมด
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอชไม่ให้ไฮยาโนนิกเกิดเลต

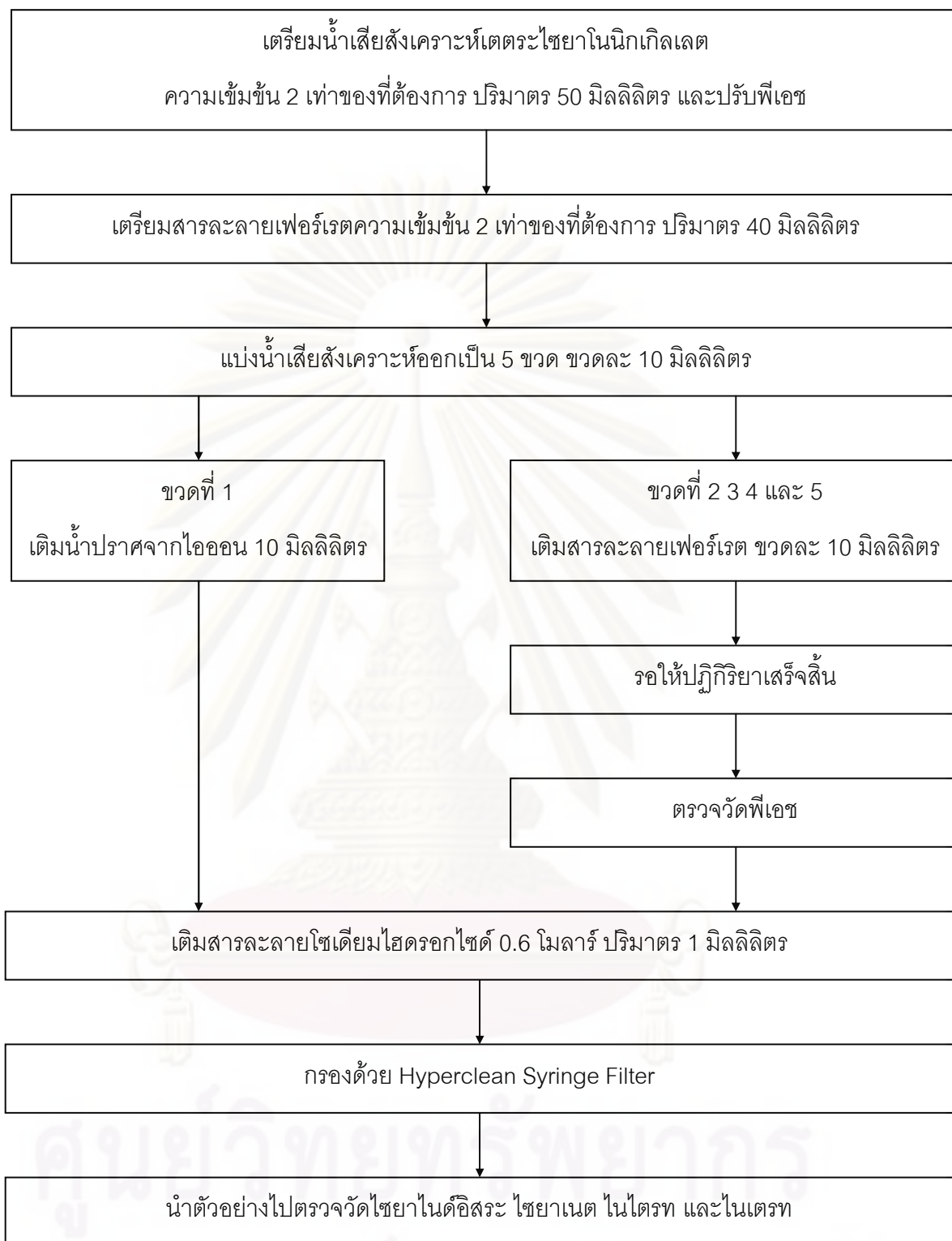


7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์ อีสาระ ไซยานต ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยความเข้มข้นจริงเท่ากับ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2

8. นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของพีเอช และผลของความเข้มข้นเตตระไซยาโน นิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และเลือกพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ก-1

## ก-2 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้น ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) แปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตเท่ากับ 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ ทำการทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

วิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะเหมือนกับการทดลองที่ ก-1 จะแตกต่างกันที่ความเข้มข้นเฟอร์เรตเท่านั้น จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

## ก-3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

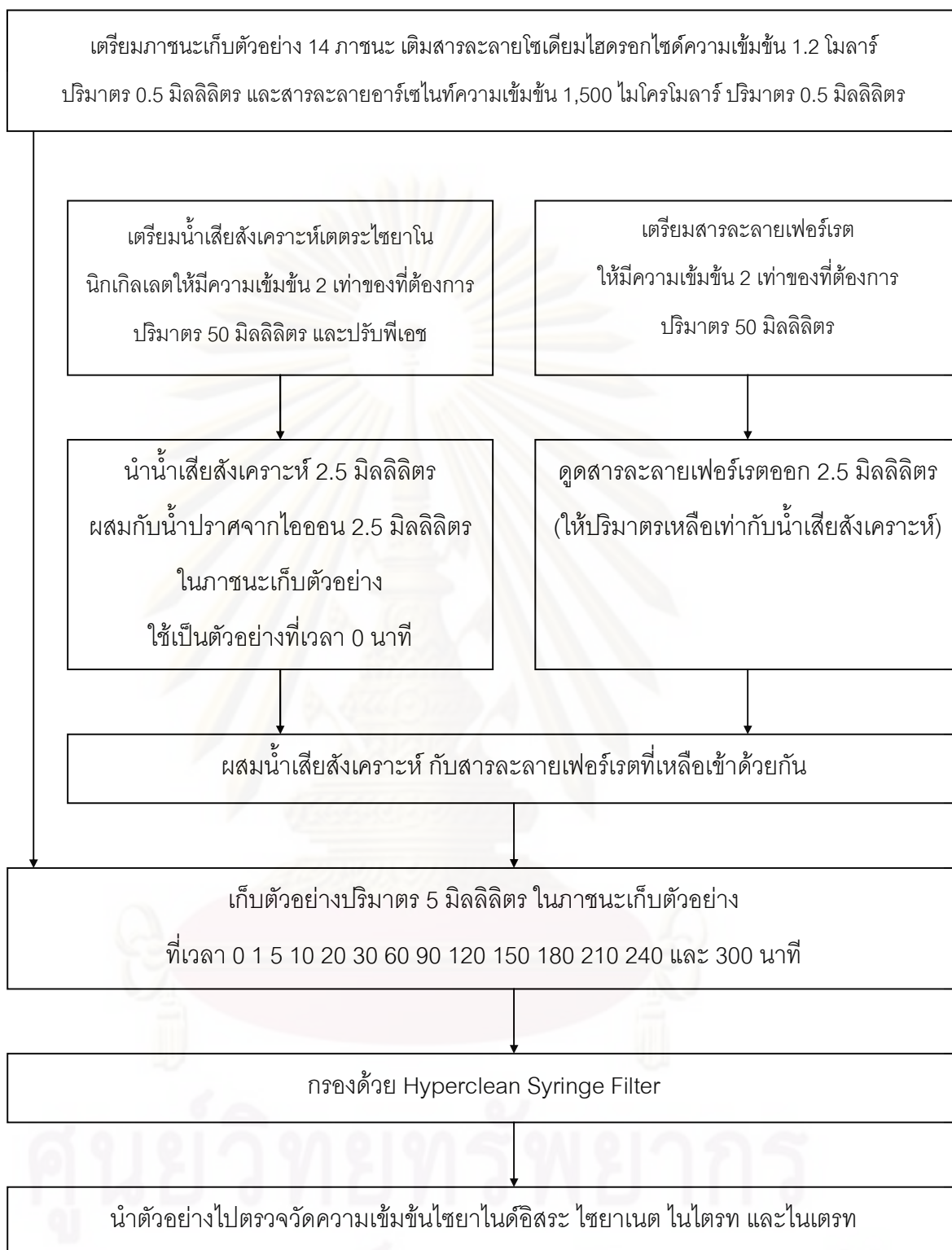
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตกับเฟอร์เรต โดยจะเปรียบเทียบกันในแต่ละพีเอช เพื่อเลือกพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) โดยทำการแปรพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ซึ่งจะทำให้การเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที การทดลองที่ ก-2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง 14 ภาชนะ โดยเติมสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 โมลาร์ 0.5 มิลลิลิตร และสารละลายอาร์เซนไนท์ 7,500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ไว้ในภาชนะ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลตในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช
3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ 2.5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 2.5 มิลลิลิตร ในภาชนะเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างนี้ใช้เป็นตัวตัวอย่างที่เวลา 0 นาที

4. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
5. ดูดสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มิลลิลิตร เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์
6. ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไซยาไนด์อิสระ ไซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยความเข้มข้นจริงเท่ากับ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด และเตตระไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นกับเวลา เพื่อวิเคราะห์ถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา





รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ก-3

### 3.5.2 การกำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลพีเอช อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาโนด์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลต์เตต เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสภาวะที่เหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงชุบนิเกิล และโคบอลต์

#### ข-1 ศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อนแต่ละพีเอช เพื่อเลือกพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน และศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต เฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต และสารผลิตภัณฑ์

ตัวแปรในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) อัตราส่วนโมลของเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 1 ต่อ 1 และ 2 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์ โดยแต่ละความเข้มข้นทำการแปรพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 การทดลองที่ ข-1 มีแผนผังขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 3.4 และวิธีการทดลองดังนี้

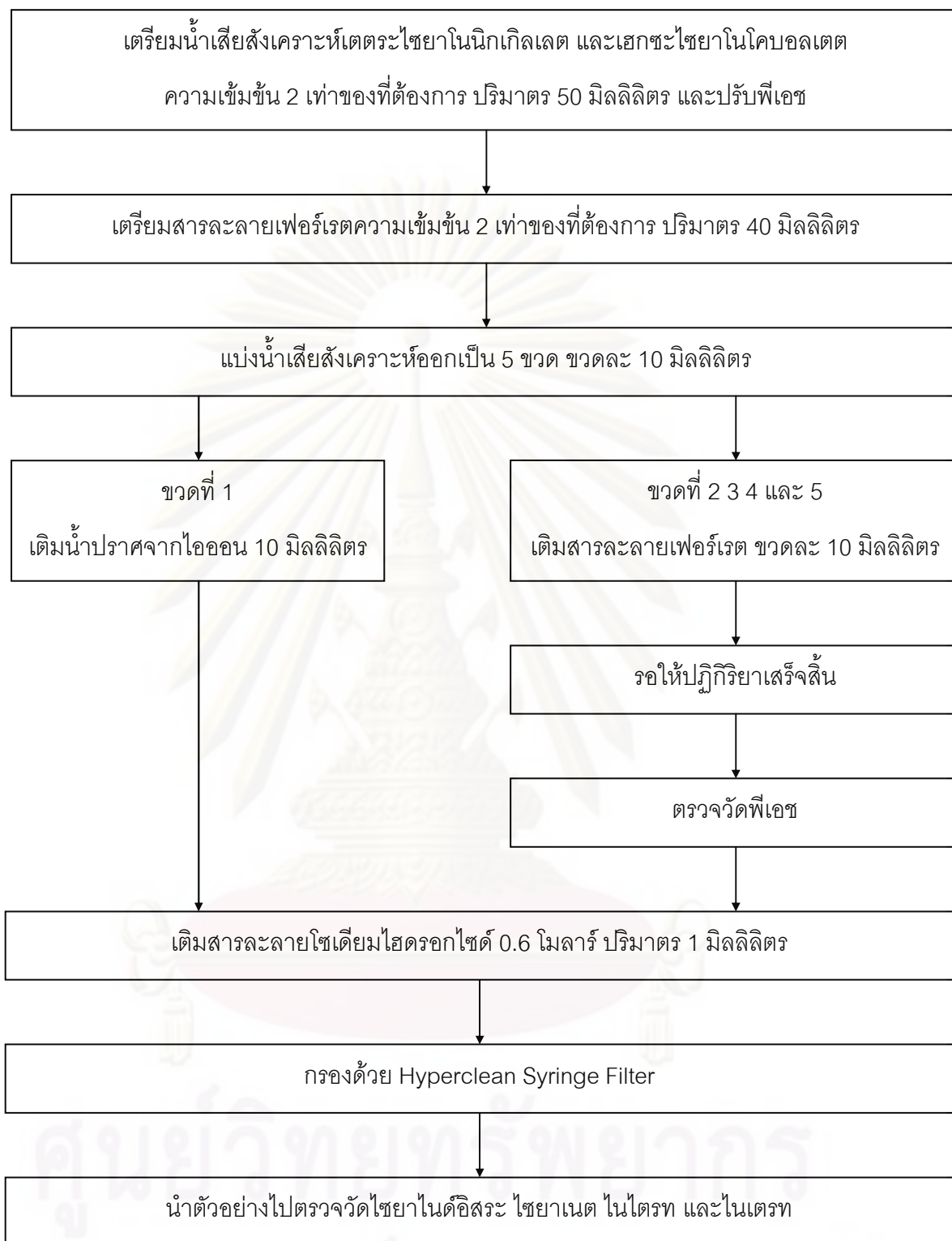
1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช
2. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. แบ่งน้ำเสียสังเคราะห์ออกเป็น 5 ขวด ขวดละ 10 มิลลิลิตร
4. ขวดที่ 1 เติมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ปิดฝา และเขย่าให้เข้ากัน ตัวอย่างนี้ใช้เป็น Blank

5. ขวดที่ 2 3 4 และ 5 เติมสารละลายเฟอร์เรตขวดละ 10 มิลลิลิตร ปิดฝาทันที และเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นรอให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สังเกตจากสีม่วงของเฟอร์เรตจะหายไปหมด

6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดพีเอช และ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอชไม่ให้โซยาไนต์ระเหยออก

7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นโซยาไนต์อิสระ โซยาเนต ไนไตรท์ และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยความเข้มข้นจริงเท่ากับ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ คูณด้วย 1.2

8. นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของพีเอช และผลของความเข้มข้นเตรโซยาไนต์ นิกเกิลเลต และเฮกซะโซยาไนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโซยาไนต์เชิงซ้อน และเลือกพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ข-1

## ข-2 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนและสารผลิตภัณฑ์

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้น ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโมลของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ แปรค่าความเข้มข้นของเฟอร์เรตเท่ากับ 100 200 300 400 และ 500 ไมโครโมลาร์ ทำการทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

วิธีการทดลองในหัวข้อนี้จะเหมือนกับการทดลอง ข-1 จะแตกต่างกันที่ความเข้มข้นของเฟอร์เรตเท่านั้น จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ถึงผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และผลของความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

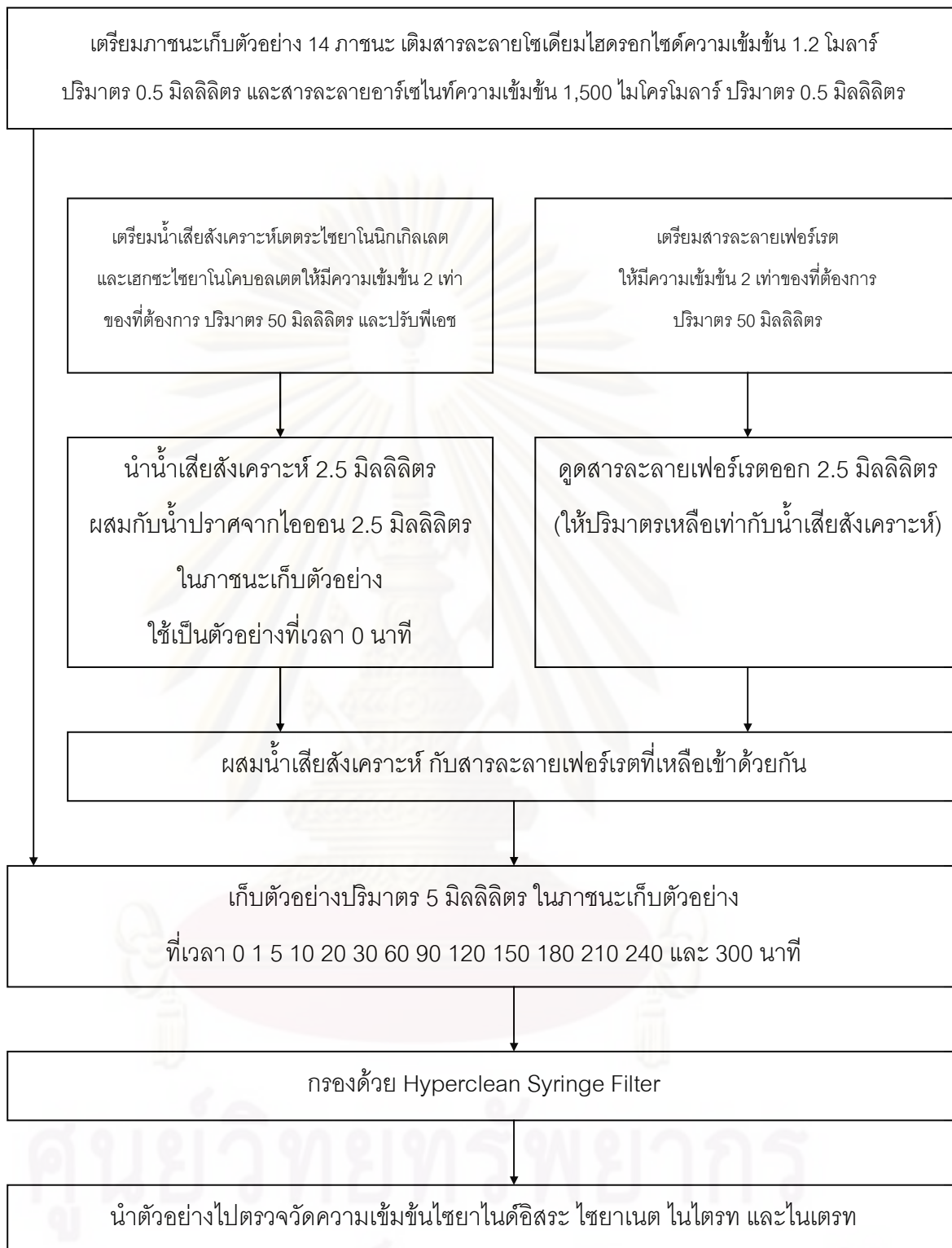
## ข-3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตกับเฟอร์เรต โดยจะเปรียบเทียบกันในแต่ละพีเอช เพื่อเลือกพีเอชที่เหมาะสม ต่อการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโมลของเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ โดยทำการแปรพีเอชเป็น 9 10 และ 11 ใช้สารละลายบอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์ และใช้ความเข้มข้นของเฟอร์เรตเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 180 240 และ 300 นาที การทดลองที่ ข-2 มีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้



1. เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง 14 ภาชนะ โดยเติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 โมลาร์ 0.5 มิลลิลิตร และสารละลายอาร์เซนัท 7,500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ไว้ในภาชนะ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตในสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับพีเอช
3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ 2.5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 2.5 มิลลิลิตร ในภาชนะเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างนี้ใช้เป็นตัวอย่างที่เวลา 0 นาที
4. เตรียมสารละลายเฟอร์เรตในน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 2 เท่าของที่ต้องการ ไม่ต้องปรับพีเอช ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
5. ดูดสารละลายเฟอร์เรตออก 2.5 มิลลิลิตร เพื่อให้มีปริมาตรเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์
6. ผสมน้ำเสียสังเคราะห์ของไฮยาโนด์และสารละลายเฟอร์เรตที่เหลือเข้าด้วยกัน ปิดฝาทันที เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในภาชนะเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ ที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที
7. กรองด้วย Hyperclean Syringe Filter และนำไปตรวจวัดความเข้มข้นไฮยาโนด์อิสระ ไฮยาเนต ไนโตรท และไนเตรท ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยความเข้มข้นจริงเท่ากับ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้คูณด้วย 1.2
8. นำผลการทดลองไปเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นไฮยาโนด์ทั้งหมด และไฮยาโนด์เชิงซ้อนกับเวลา เพื่อวิเคราะห์ถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดลอง ข-3

### 3.6 วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง มีวิธีวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 ไชยาไนต์อิสระ

วิธีการวิเคราะห์หาค่าไชยาไนต์อิสระ ทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph) ดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค.

#### 3.6.2 ไชยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

วิธีการวิเคราะห์หาค่าไชยาเนต ไนไตรท และไนเตรท ทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph) ดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง.

#### 3.6.3 ไชยาไนต์เชิงซ้อน

การวิเคราะห์หาค่าไชยาไนต์เชิงซ้อนไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นได้โดยตรง เนื่องจากเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph) ไม่สามารถตรวจวัดค่าเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ซึ่งเป็นสารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อนหลักในการทดลอง ดังนั้นค่าไชยาไนต์เชิงซ้อนจะวิเคราะห์หาความเข้มข้นทั้งก่อน และหลังทำปฏิกิริยาโดยใช้วิธี Mass Balance by Nitrogen ดังสมการที่ (3-1)

$$\text{ไชยาไนต์ทั้งหมด} = \text{ไชยาไนต์อิสระ} + \text{ไชยาไนต์เชิงซ้อน} + \text{สารผลิตภัณฑ์} \quad (3-1)$$

ความเข้มข้นไชยาไนต์อิสระ และสารผลิตภัณฑ์ สามารถตรวจวัดค่าได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph)

#### 3.6.4 เฟอ์เรต

วิธีการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารละลายเฟอ์เรต ทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer) ดังแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก.

#### 3.6.5 พีเอช

วิธีการวิเคราะห์หาพีเอช ทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

ตารางที่ 3.10 วิธีที่ใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้วิเคราะห์
ไซยาไนด์อิสระ	Ion Chromatography
ไซยาเนต	Ion Chromatography
ไนไตรท์	Ion Chromatography
ไนเตรท	Ion Chromatography
ไซยาไนด์เชิงซ้อน	Mass Balance
เฟอร์เรต	UV Spectrophotometer
พีเอช	pH meter

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ก)

4.1.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-1)

ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

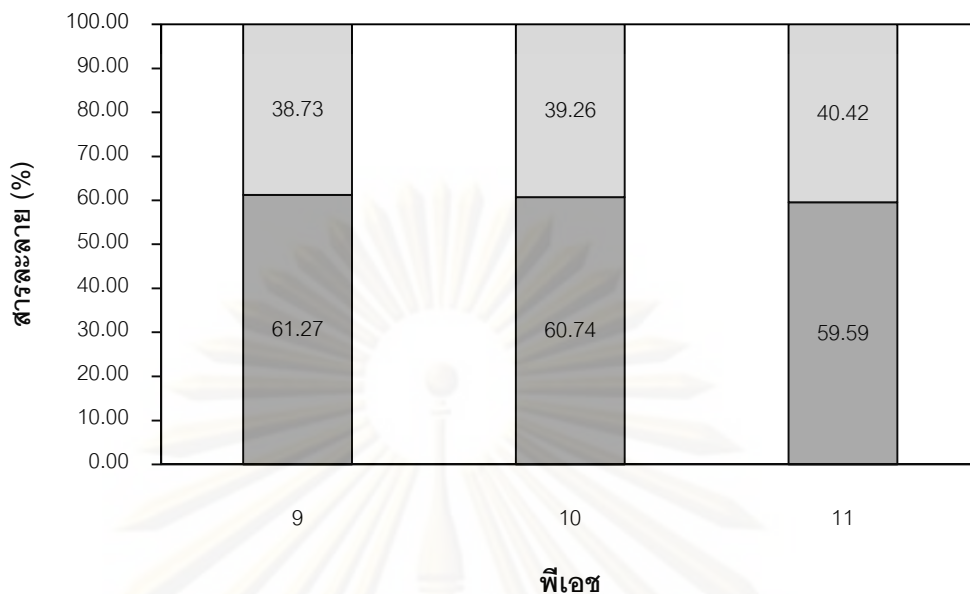
ผลการทดลองพบว่า ก่อนทำปฏิกิริยาสารละลายเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตจะแตกตัวเป็นไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อน โดยสัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น ก่อนทำปฏิกิริยา จะพบไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 60.53 และ 39.47% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1.ก และสัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต จะพบไซยาไนด์อิสระ ไซยาไนด์เชิงซ้อน และไซยาเนต ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1.ข

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต

เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต	ไซยาไนด์อิสระ (%)			ไซยาไนด์เชิงซ้อน (%)			ไซยาเนต (%)		
	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11
ก่อนทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	62.24	59.70	55.92	37.76	40.30	44.08	0.00	0.00	0.00
- 100 ไมโครโมลาร์	59.68	62.02	60.56	40.32	37.98	39.44	0.00	0.00	0.00
- 250 ไมโครโมลาร์	62.66	61.73	62.27	37.34	38.27	37.73	0.00	0.00	0.00
- 500 ไมโครโมลาร์	60.49	59.51	59.59	39.51	40.49	40.41	0.00	0.00	0.00
หลังทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	1.64	9.00	13.06	2.46	8.68	14.26	95.88	82.32	72.68
- 100 ไมโครโมลาร์	1.56	8.67	17.40	3.92	8.64	12.47	94.52	82.69	70.13
- 250 ไมโครโมลาร์	2.14	2.91	9.62	5.68	10.32	12.66	92.19	86.77	77.71
- 500 ไมโครโมลาร์	1.54	6.37	10.36	4.56	8.63	12.08	93.90	85.00	77.56

หมายเหตุ : หน่วยความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต อยู่ในรูปไซยาไนด์





รูปที่ 4.1.ก สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น ก่อนทำปฏิบัติการ



รูปที่ 4.1.ข สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิบัติการ

ไฮยาไนต์อิสระ
  ไฮยาไนต์เชิงซ้อน
  ไฮยาเน็ต

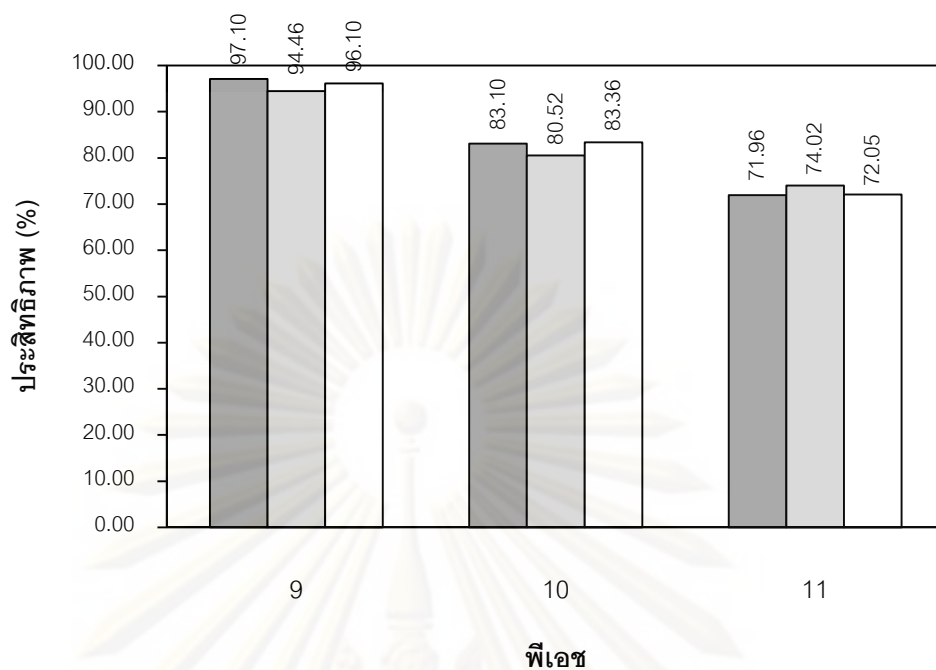
รูปที่ 4.1 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิบัติการ และหลังทำปฏิบัติการ ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1

ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดพบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 95.89 82.33 และ 72.68% ตามลำดับ ดังรูป 4.2.ก ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 94.52 82.69 และ 70.13% ตามลำดับ ดังรูป 4.3.ก ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 92.19 86.77 และ 77.71% ตามลำดับ ดังรูป 4.4.ก และที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 93.90 85.00 และ 77.56% ตามลำดับ ดังรูป 4.5.ก

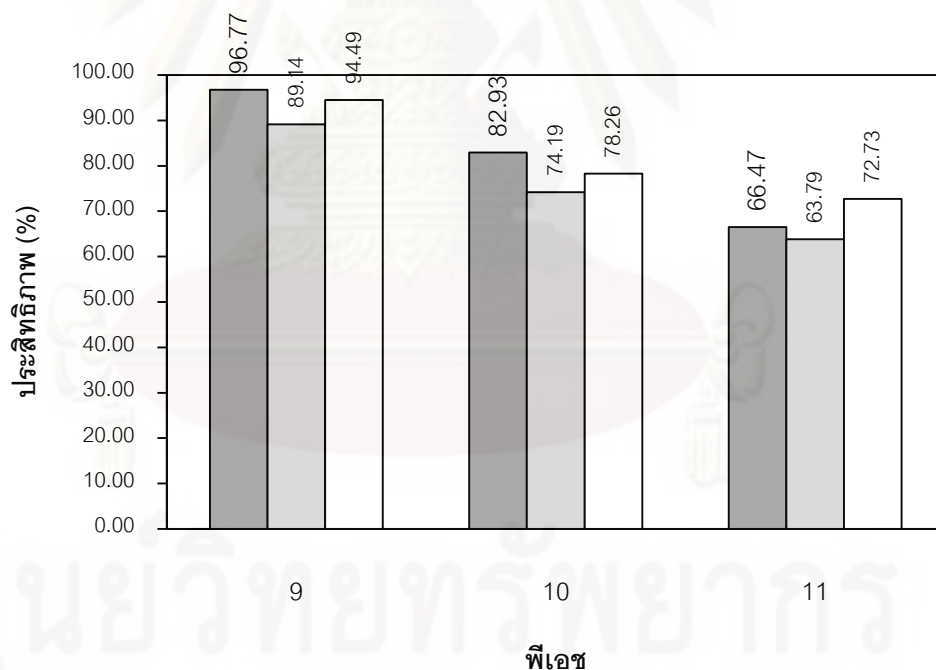
ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนพบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 93.47 78.46 และ 72.73% ตามลำดับ ดังรูป 4.2.ข ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 90.28 77.25 และ 68.28% ตามลำดับ ดังรูป 4.3.ข ที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 88.13 73.03 และ 66.43% ตามลำดับ ดังรูป 4.4.ข และที่พีเอช 9 10 และ 11 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 88.46 78.69 และ 70.12% ตามลำดับ ดังรูป 4.5.ข

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด และไซยาไนด์เชิงซ้อนสูงสุด คือ 94.12 และ 90.08% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sharma และคณะ (1998) ที่ว่าพีเอช 9 เฟอร์เรตสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ดีที่สุด

ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อสารผลิตภัณฑ์พบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไซยาเนต ทุกพีเอช และทุกความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น ซึ่งตรวจไม่พบไนไตรท และไนเตรท



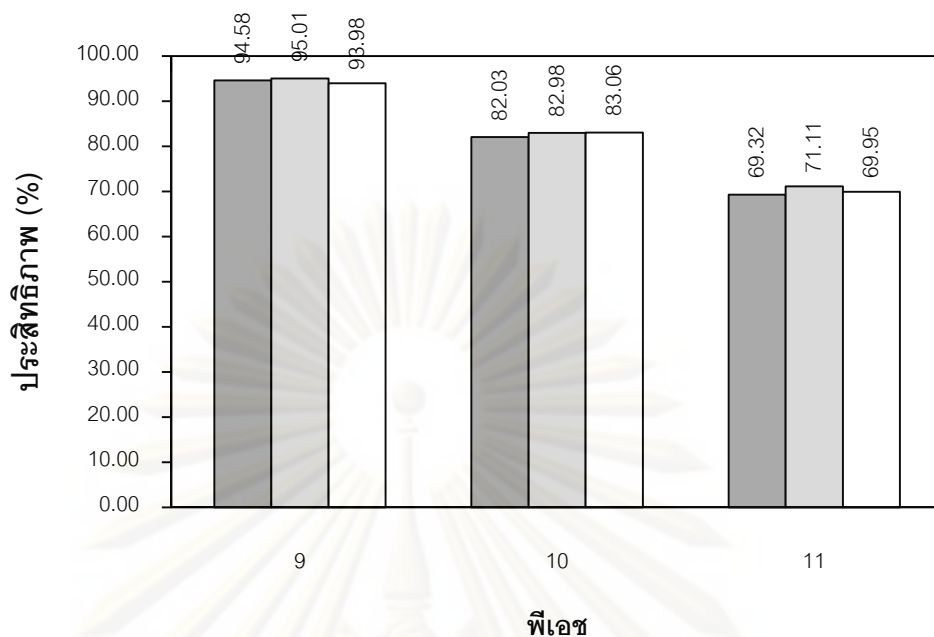
รูปที่ 4.2.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดใยขาดทั้งหมด



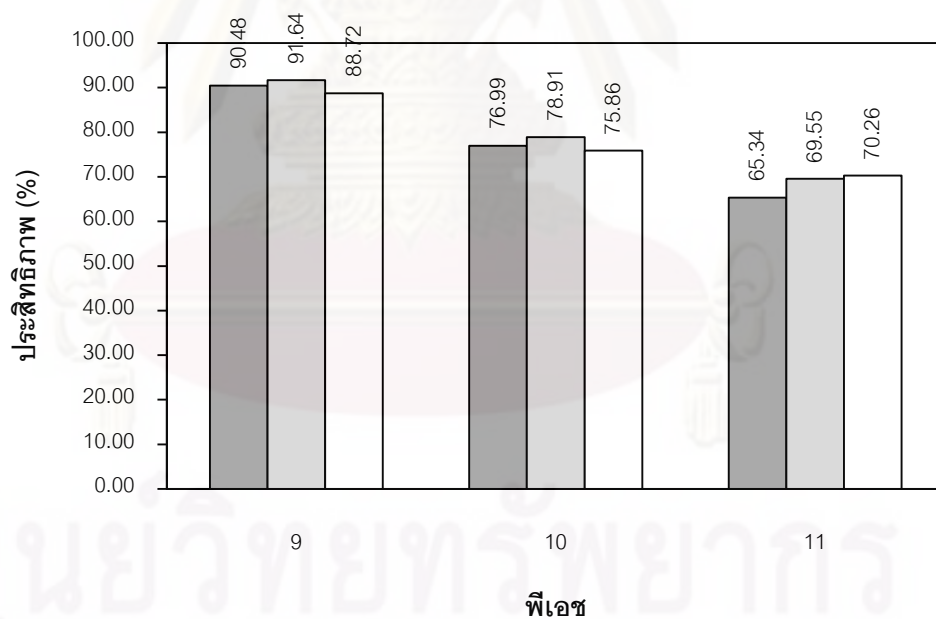
รูปที่ 4.2.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดใยขาดเชิงซ้อน

รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดใยขาด ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปใยขาด) ฟิเบอร์ 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อใยขาดเท่ากับ

1 ต่อ 1



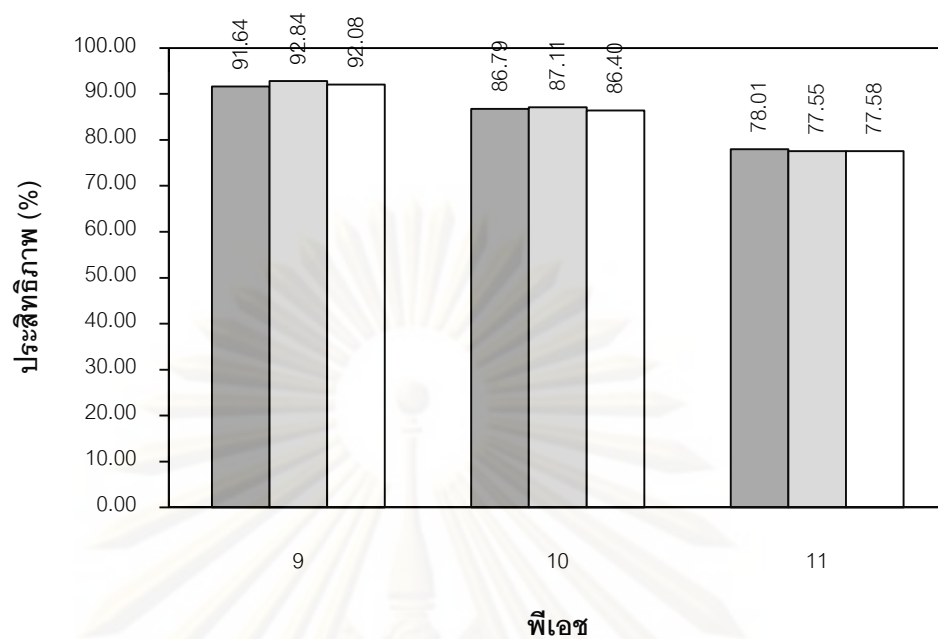
รูปที่ 4.3.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสงทั้งหมด



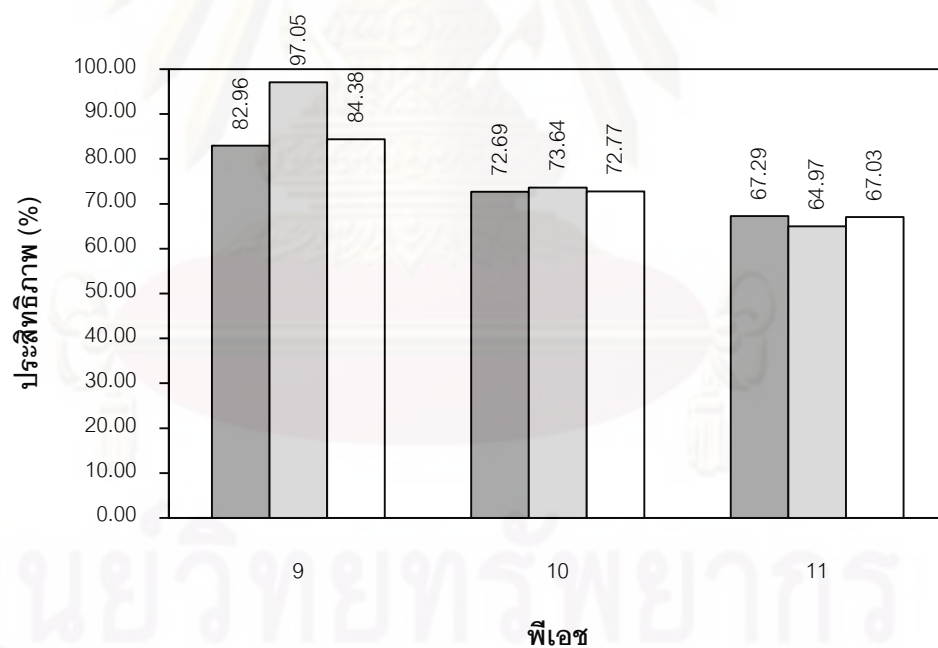
รูปที่ 4.3.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสงเชิงซ้อน

รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสง ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลดเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปใยแก้วนำแสง) ใยแก้วนำแสง 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อใยแก้วนำแสงเท่ากับ

1 ต่อ 1



รูปที่ 4.4.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสงทั้งหมด

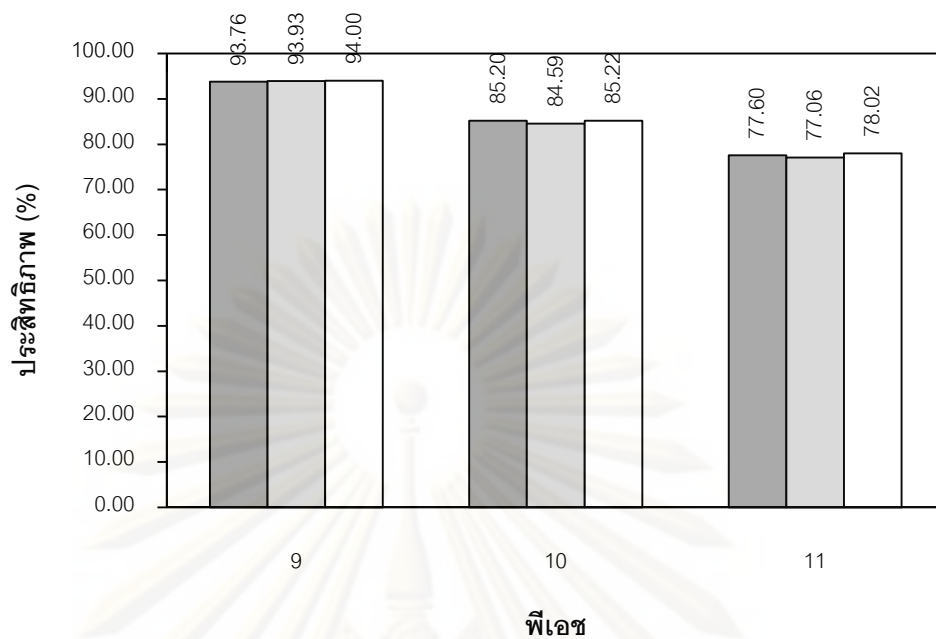


รูปที่ 4.4.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสงเชิงซ้อน

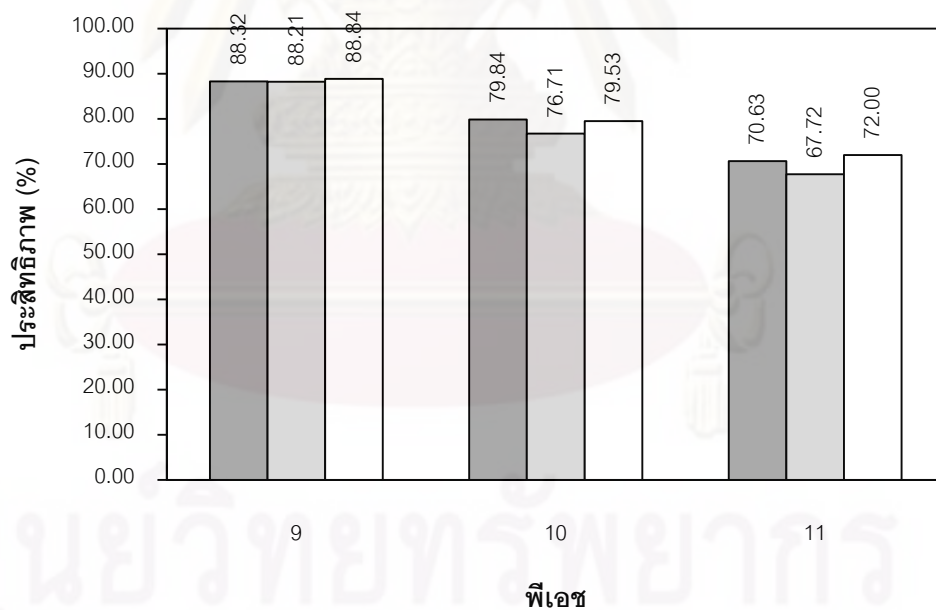
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำแสง ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกล็ดเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปใยแก้วนำแสง) ไฟเบอร์ 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อใยแก้วนำแสงเท่ากับ

1 ต่อ 1





รูปที่ 4.5.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำดีทั้งหมด

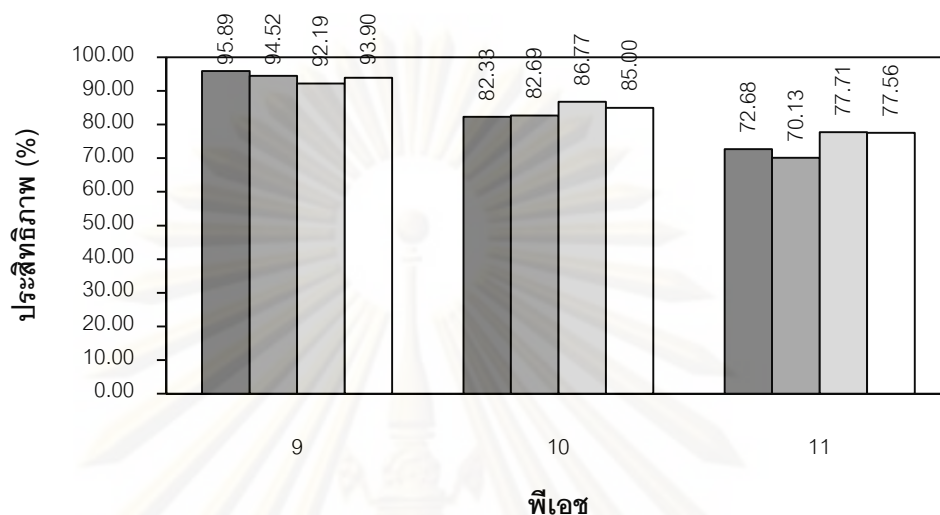


รูปที่ 4.5.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำดีเชิงซ้อน

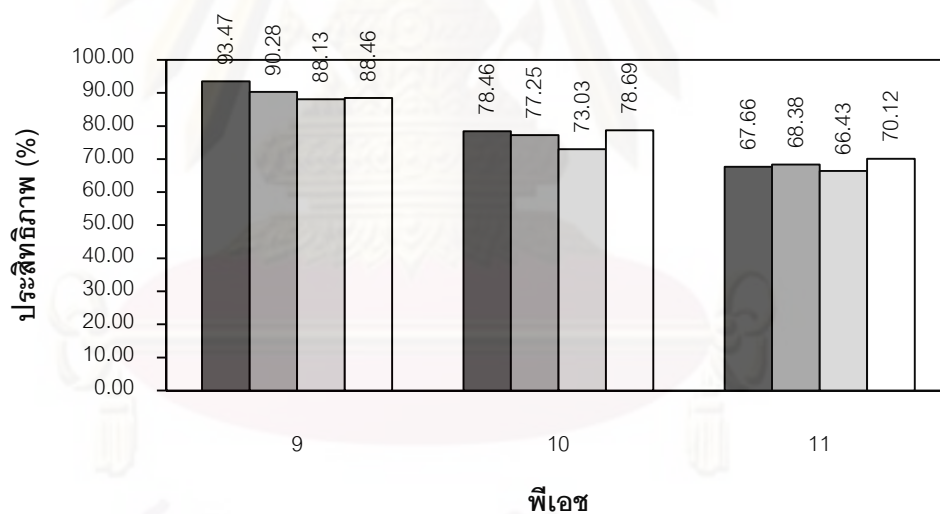
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดใยแก้วนำดี ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปใยแก้วนำดี) ไฟเบอร์ 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อใยแก้วนำดีเท่ากับ

1 ต่อ 1

ผลการทดลองในส่วนผลของความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์พบว่า ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้นเท่ากัน จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด และไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากัน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6.ก ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด

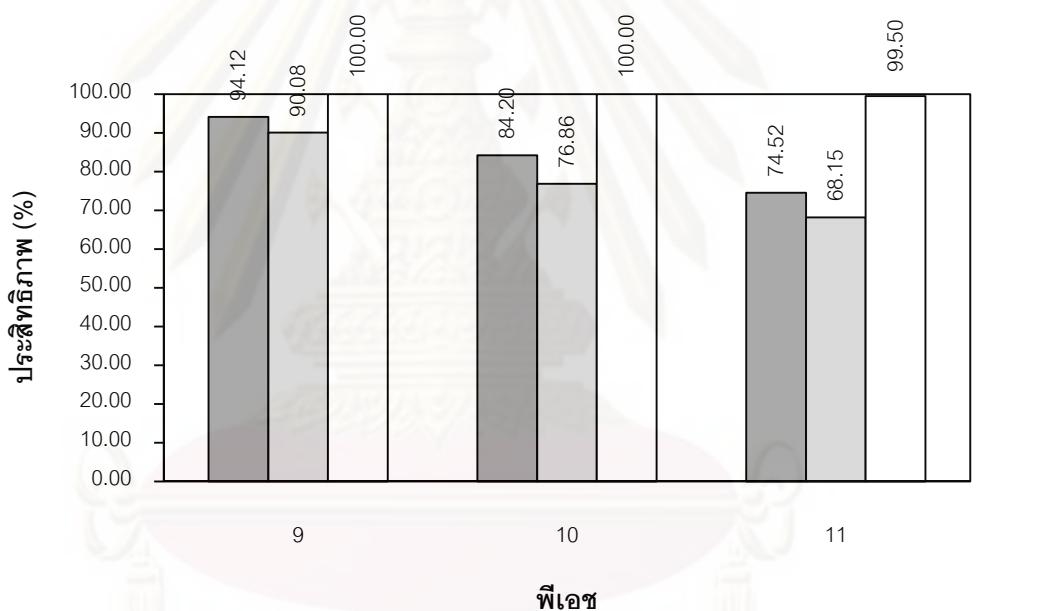


รูปที่ 4.6.ข ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน

- 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)
- 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)
- 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)
- 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1

เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของศีลารุณ ดำรงศิริ (2548) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารประกอบไฮยาโนด์เท่ากันพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมด จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต มีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์อิสระ จากน้ำเสียสังเคราะห์ไฮยาโนด์อิสระ ของศีลารุณ ดำรงศิริ (2548) ดังรูปที่ 4.7 แต่ที่พีเอช 10 และ 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมดมีค่าลดลงจากประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์อิสระ จากน้ำเสียสังเคราะห์ไฮยาโนด์อิสระ คาดว่าเนื่องจาก เฟอร์เรตมีความคงตัวสูงที่สุดในช่วงพีเอช 9 (Sharma และคณะ, 1998) ส่งผลให้ที่พีเอช 10 และ 11 เฟอร์เรตจะสลายตัวไประหว่างการทำปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาที่เฟอร์เรตจะเข้าไปสลายพันธะของสารประกอบไฮยาโนด์เชิงซ้อนให้อยู่ในรูปของไฮยาโนด์อิสระ จากนั้น เฟอร์เรตจะเข้าไปออกซิไดซ์ไฮยาโนด์อิสระไปเป็นไฮยาเนต ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่ตรวจพบ



- ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)
- ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)
- ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์อิสระ ที่ความเข้มข้นไฮยาโนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์\*

ที่มา : \*ศีลารุณ ดำรงศิริ, 2548

**รูปที่ 4.7** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ ที่ความเข้มข้นสารประกอบไฮยาโนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1

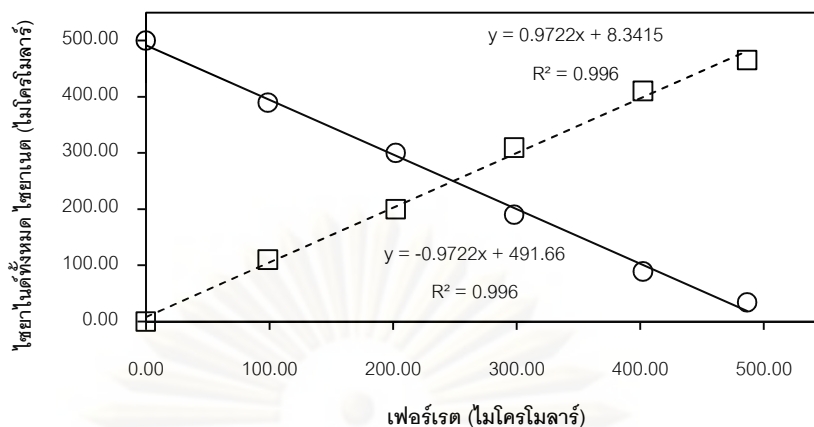
#### 4.1.2 ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนและสารผลิตภัณฑ์ (ก-2)

ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ใช้สารละลายเฟอร์เรต 0.01 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์

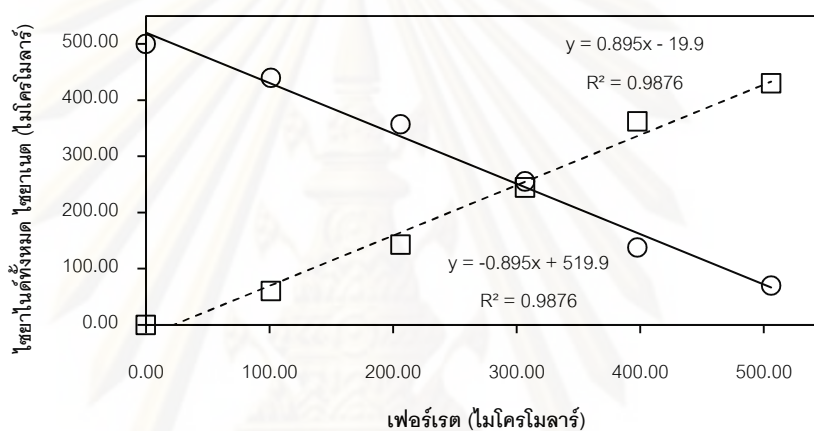
เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนแผนภูมิ โดยให้ความเข้มข้นเฟอร์เรตที่ใช้เป็นแกน X ความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมดที่เหลือ และไซยาเนตที่เกิดขึ้น เป็นแกน Y และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้น ความชันจากกราฟทั้ง 2 เส้น จะเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.8 และเนื่องจากไซยาเนตเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากไซยาไนด์ จึงสามารถนำอัตราส่วนไซยาไนด์ที่เหลือต่อเฟอร์เรตที่ใช้มาเฉลี่ยกัน เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น โดยค่าอัตราส่วนโดยโมลทั้งหมดแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่า อัตราส่วนทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันทุกพีเอช และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) ที่ทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไซยาไนด์อิสระอย่างเดียว ในความเข้มข้นเท่ากัน มีค่าอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาทั้งหมด ประมาณ 0.99 ต่อ 1

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา จากการทดลอง ก-2

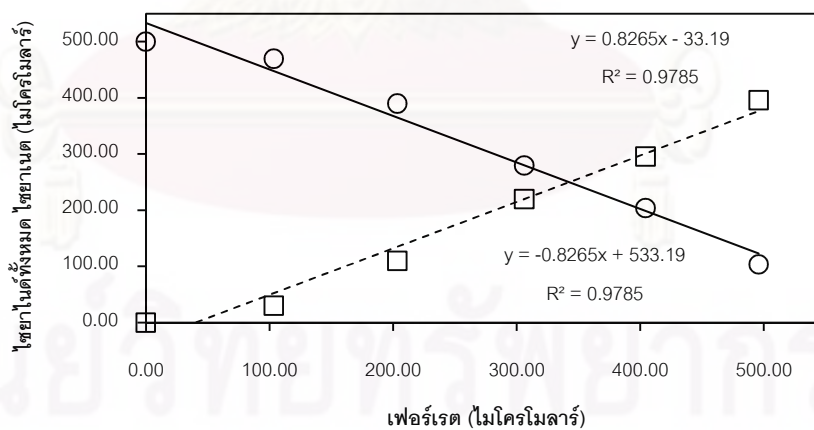
น้ำเสียสังเคราะห์		อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์	อัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาเนต	อัตราส่วนโดยโมลเฉลี่ย
ไซยาไนด์อิสระ (ศีลาวุธ, 2548)	พีเอช 9	1 ต่อ 1.18	1 ต่อ 0.98	1 ต่อ 1.09
	พีเอช 10	1 ต่อ 1.19	1 ต่อ 1.23	1 ต่อ 1.21
	พีเอช 11	1 ต่อ 1.13	1 ต่อ 1.21	1 ต่อ 1.17
เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต	พีเอช 9	1 ต่อ 0.97	1 ต่อ 0.97	1 ต่อ 0.97
	พีเอช 10	1 ต่อ 0.90	1 ต่อ 0.90	1 ต่อ 0.90
	พีเอช 11	1 ต่อ 0.83	1 ต่อ 0.83	1 ต่อ 0.83



4.8.ก พีเอช 9



4.8.ข พีเอช 10



4.8.ค พีเอช 11

○ ไชยาไนต์ทั้งหมด      □ ไชยาเนต

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างไชยาไนต์ทั้งหมดที่เหลือ และไชยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นแต่ละไชยาไนติกเกลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



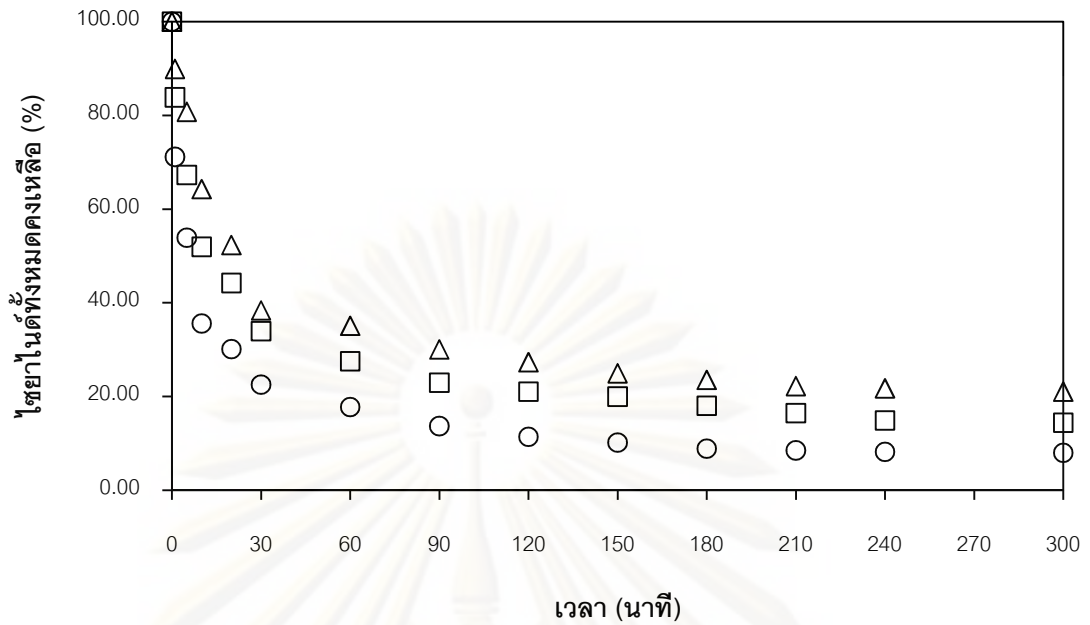
#### 4.1.3 ผลการทดลองการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต (ก-3)

ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ใช้สารละลายบอร์เรต 0.01 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที โดยมีอาร์เซนไนท์ ( $As^{3+}$ ) เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา

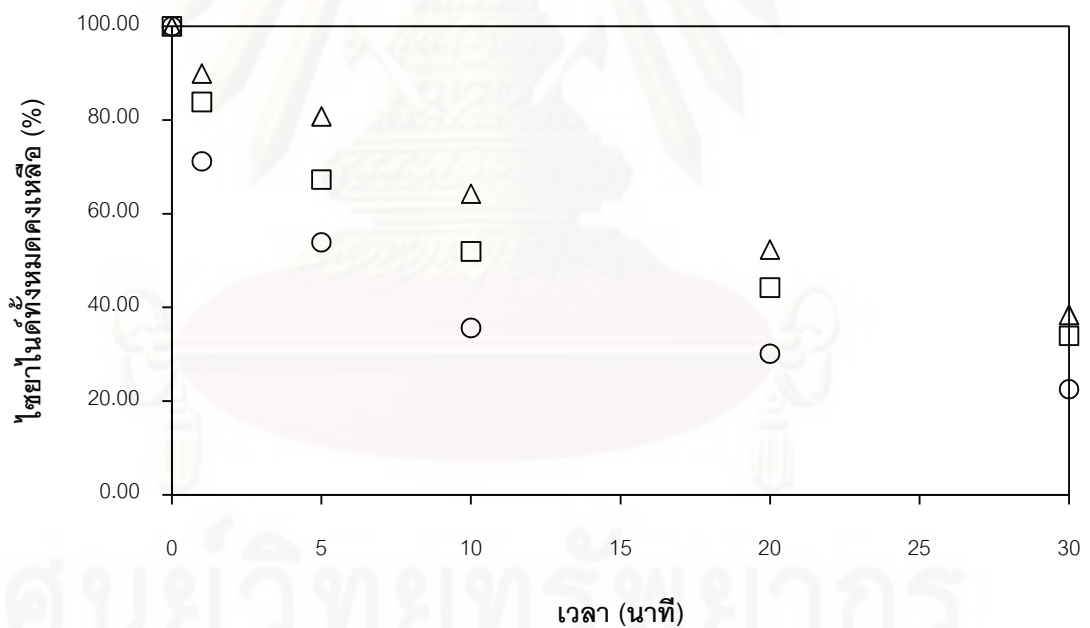
ผลการทดลองพบว่า พีเอช 11 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุด ในขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน พีเอช 9 และ 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.10 โดยปฏิกิริยาส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วง 60 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ช้าลง จนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งเฟอร์เรตมีความคงตัวมากที่สุดที่ช่วงพีเอช 9.4 ถึง 9.7 และสลายตัวได้เร็วที่พีเอช 11 ดังนั้นถึงแม้ว่าเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาจะใช้ความเข้มข้นเฟอร์เรตเท่ากัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของเฟอร์เรตก็จะต่างกัน เนื่องมาจากความคงตัวของเฟอร์เรต ทำให้เฟอร์เรตสลายตัวไปก่อน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) ที่ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อิสระพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลตมีแนวโน้มของกราฟใกล้เคียงกับผลการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อิสระ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเสียไซยาไนด์อิสระ ในทุกพีเอช ดังรูปที่ 4.11

ผลการทดลองพบว่า พีเอชมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดที่พีเอช 9 ช้าลงที่พีเอช 10 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของศีลาวุธ ดำรงศิริ (2548) และ Sharma (2005) ที่พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง และเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ช้าลงในทุกพีเอชเช่นเดียวกัน และสารผลิตภัณฑ์ที่พบ คือ ไซยาเนต



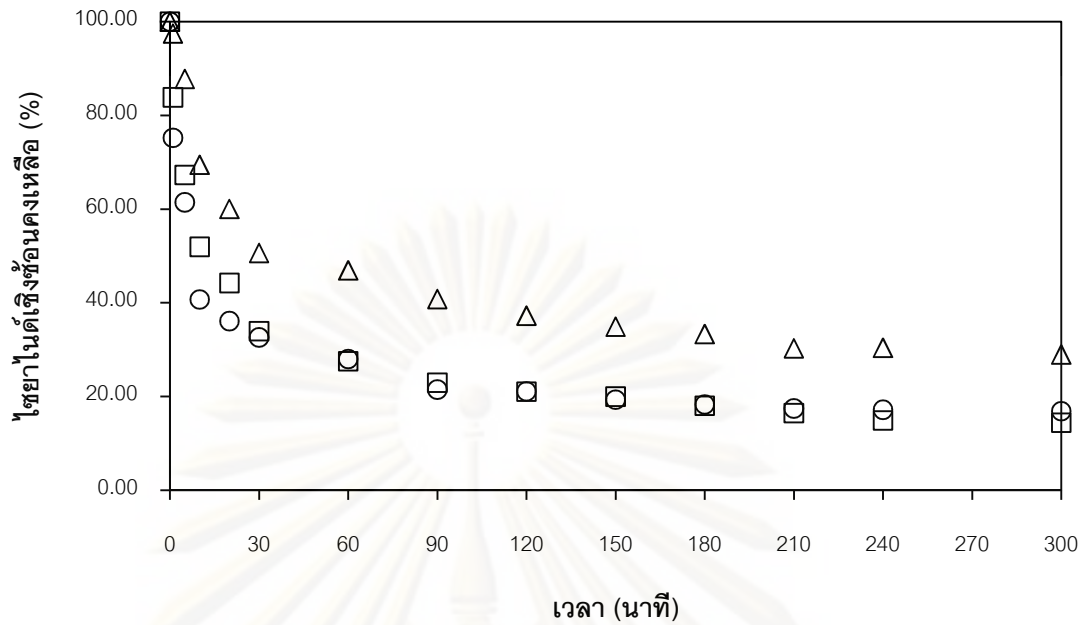
รูปที่ 4.9.ก ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที



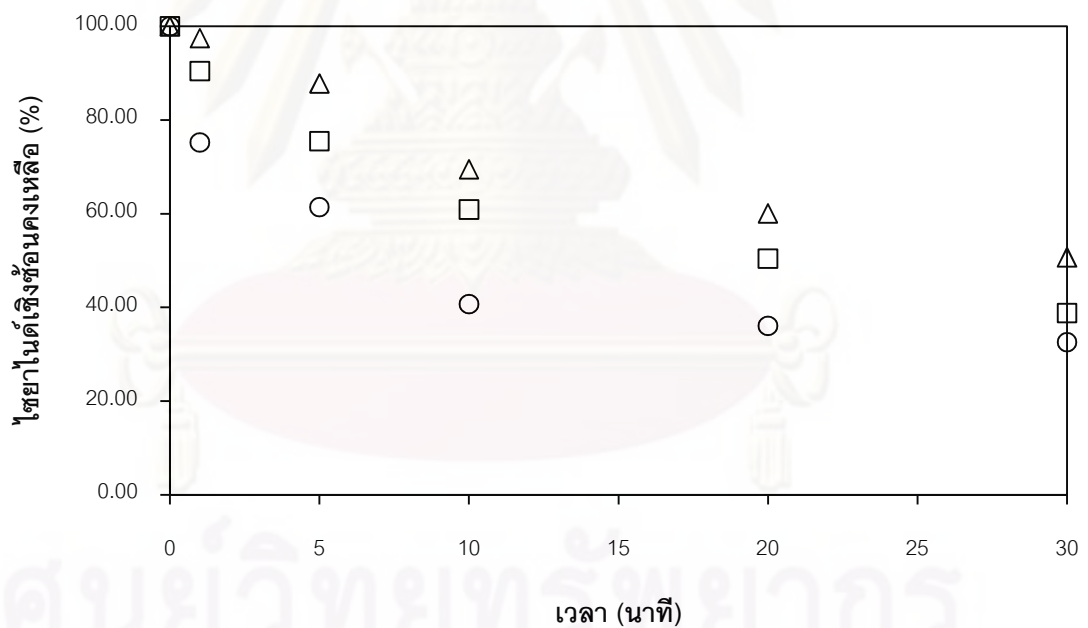
รูปที่ 4.9.ข ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

○ พีเอช 9      □ พีเอช 10      △ พีเอช 11

รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของไชยาไนต์ทั้งหมดคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



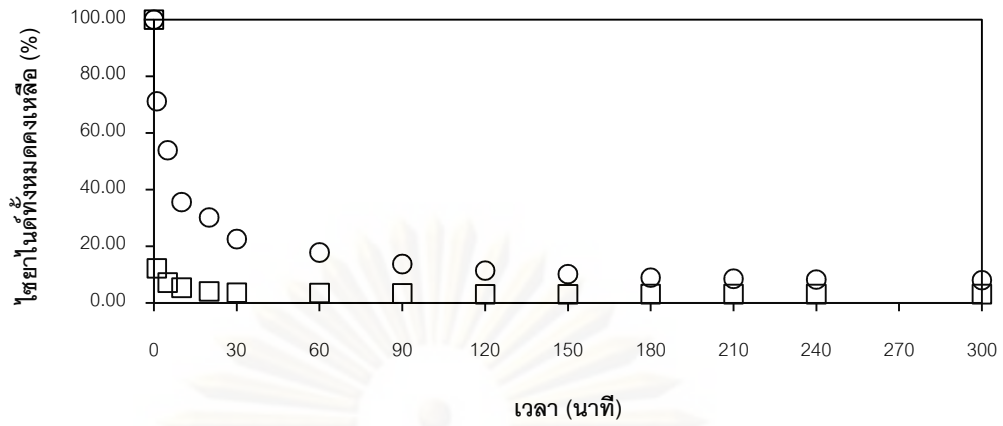
รูปที่ 4.10.ก ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที



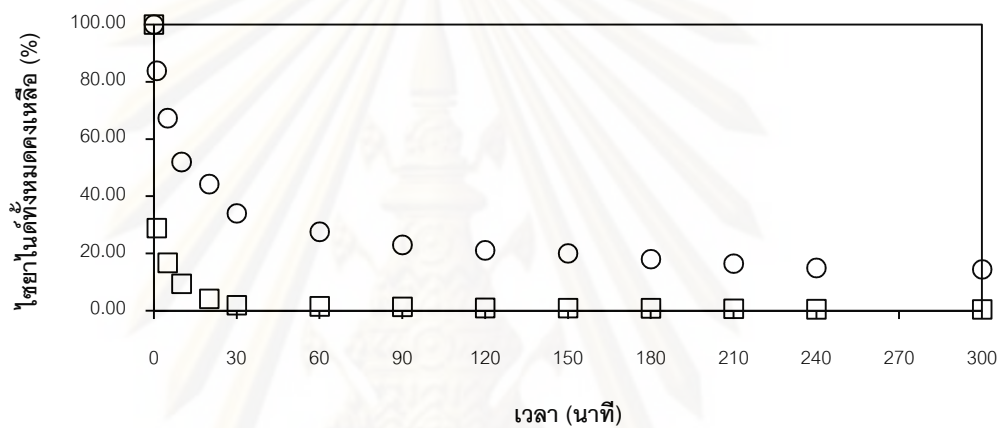
รูปที่ 4.10.ข ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

○ พีเอช 9      □ พีเอช 10      △ พีเอช 11

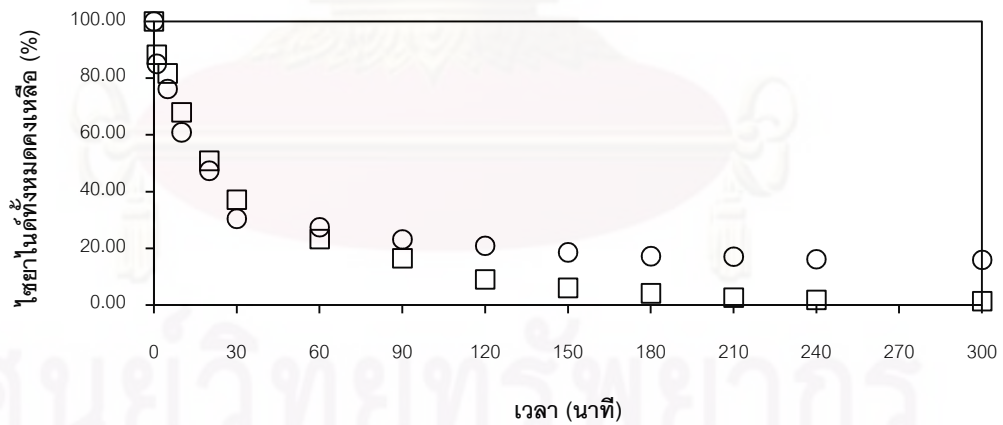
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของไซยาไนด์เชิงซ้อนคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาไนด์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1



รูปที่ 4.11.ก พีเอช 9



รูปที่ 4.11.ข พีเอช 10



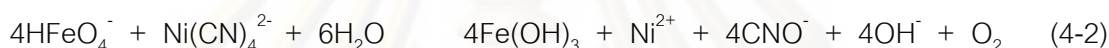
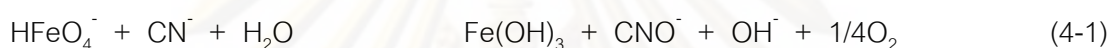
รูปที่ 4.11.ค พีเอช 11

○ เตระะไชยาไนต์นิกเกิดเลต      □ ไชยาไนต์อึสระ

รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไชยาไนต์ทั้งหมดคงเหลือกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาไนต์นิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) กับความเข้มข้น ไชยาไนต์เริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (สีลาอูอ ดำรงศิริ, 2548) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดย โมลเฟออร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1

จากการทดลองที่ 4.1 สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูงที่สุด โดยไซยาไนด์ทั้งหมดจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยาเนต และเฟอร์เรตจะสลายตัวไปเป็นเฟอร์ริค โดยเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา และสารผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.99 ต่อ 1 หรือประมาณ 1 ต่อ 1

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาที่เฟอร์เรตจะเข้าไปสลายพันธะของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนให้อยู่ในรูปของไซยาไนด์อิสระ จากนั้นเฟอร์เรตจะเข้าไปออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยาเนต และในการทดลองพบว่า หลังการเกิดปฏิกิริยา น้ำเสียสังเคราะห์จะมีพีเอชสูงขึ้น และจากผลการศึกษาของ Sharma (2005) พบว่า การเกิดปฏิกิริยาจะได้ออกซิเจนเป็นสารผลิตภัณฑ์ด้วย จึงคาดว่าสมการของปฏิกิริยาจะคำนวณได้ดังสมการที่ (4-3) และ (4-4)



#### 4.2 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต (ข)

##### 4.2.1 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-1)

ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ใช้สารละลายเฟอร์เรตเป็นบัฟเฟอร์

ผลการทดลองพบว่า ก่อนทำปฏิกิริยาสารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนจะแตกตัวเป็นไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อน โดยมีสัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ จะพบไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 82.33 และ 17.67% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12.ก ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ จะพบไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 72.30 และ 27.70% ตามลำดับดังรูปที่ 4.13.ก โดยที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ จะพบไซยาไนด์อิสระ และไซยาไนด์เชิงซ้อน

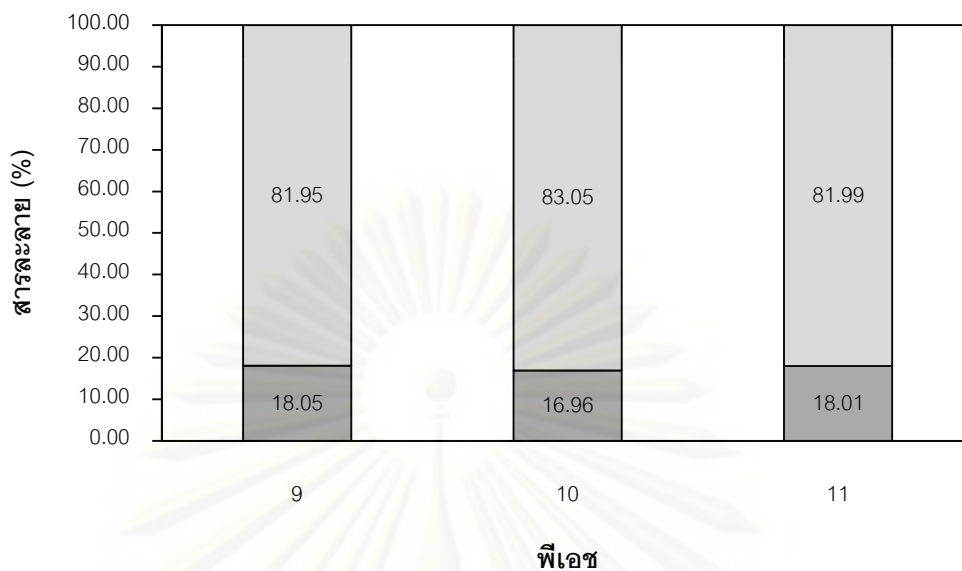


เท่ากับ 63.47 และ 36.53% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14.ก โดยไม่พบสารผลิตภัณฑ์ในสารละลายใน  
 ทุกๆ ความเข้มข้นเริ่มต้น และสัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิกิริยา  
 กับเฟอร์เรต จะพบไซยาไนด์อิสระ ไซยาไนด์เชิงซ้อน และไซยาเนต ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.12.  
 ข ถึง 4.14.ข

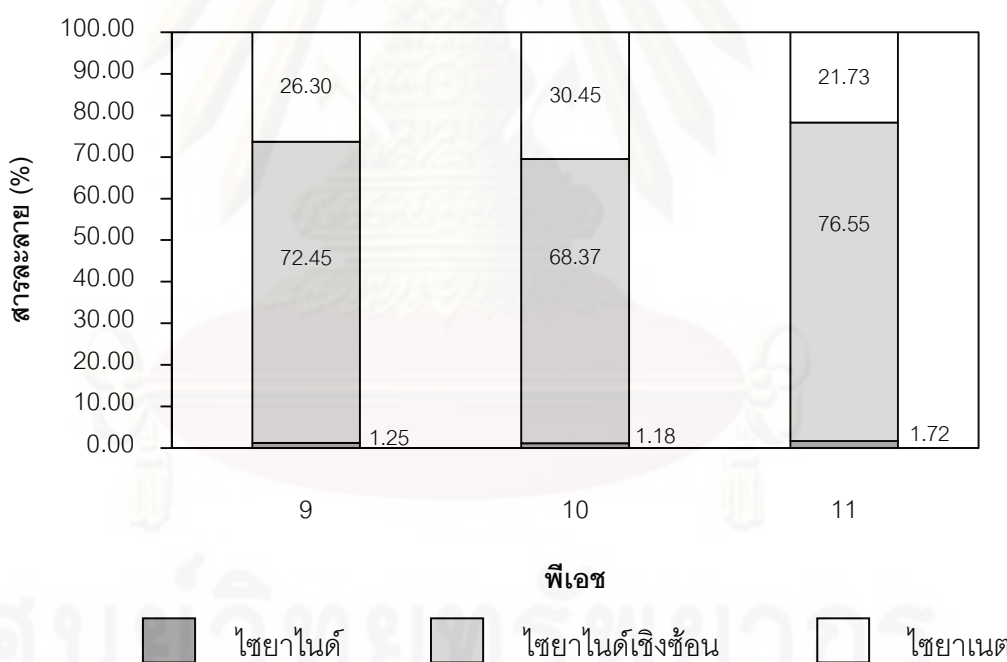
**ตารางที่ 4.3** สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา จากน้ำเสีย  
 สังเคราะห์เตตระไซยาไนด์นิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาไนด์โคบอลเตต

สารละลาย	ไซยาไนด์อิสระ (%)			ไซยาไนด์เชิงซ้อน (%)			ไซยาเนต (%)		
	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11	พีเอช 9	พีเอช 10	พีเอช 11
0.5 ต่อ 1									
ก่อนทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	17.76	16.68	18.02	82.24	83.32	81.98	0.00	0.00	0.00
- 100 ไมโครโมลาร์	18.35	17.23	18.00	81.65	82.77	82.00	0.00	0.00	0.00
หลังทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	1.63	1.75	2.25	71.49	67.97	76.29	26.87	30.28	21.45
- 100 ไมโครโมลาร์	0.87	0.62	1.19	73.41	68.76	76.81	25.72	30.62	22.00
1 ต่อ 1									
ก่อนทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	28.65	27.32	26.66	71.35	72.68	73.34	0.00	0.00	0.00
- 100 ไมโครโมลาร์	27.99	28.32	30.01	72.01	71.69	70.00	0.00	0.00	0.00
- 250 ไมโครโมลาร์	26.81	27.32	26.22	73.19	72.68	73.78	0.00	0.00	0.00
หลังทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	1.89	1.89	2.68	54.77	54.61	57.54	43.34	43.50	39.78
- 100 ไมโครโมลาร์	1.03	1.28	1.59	55.26	52.39	57.54	43.72	46.34	40.88
- 250 ไมโครโมลาร์	0.77	0.57	1.08	55.14	53.84	58.92	44.09	45.59	40.00
2 ต่อ 1									
ก่อนทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	36.60	36.43	35.55	63.40	63.57	64.45	0.00	0.00	0.00
- 100 ไมโครโมลาร์	36.52	35.76	38.51	63.48	64.24	61.49	0.00	0.00	0.00
- 250 ไมโครโมลาร์	37.51	37.03	34.84	62.49	62.97	65.16	0.00	0.00	0.00
หลังทำปฏิกิริยา									
- 50 ไมโครโมลาร์	2.53	2.39	4.31	41.12	36.28	42.35	56.35	61.33	53.35
- 100 ไมโครโมลาร์	1.68	1.00	2.11	37.59	34.89	42.48	60.73	64.11	55.41
- 250 ไมโครโมลาร์	0.71	0.73	1.14	39.81	38.11	43.97	59.48	61.17	54.88

หมายเหตุ : หน่วยความเข้มข้นเตตระไซยาไนด์นิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาไนด์โคบอลเตต อยู่ในรูปไซยาไนด์

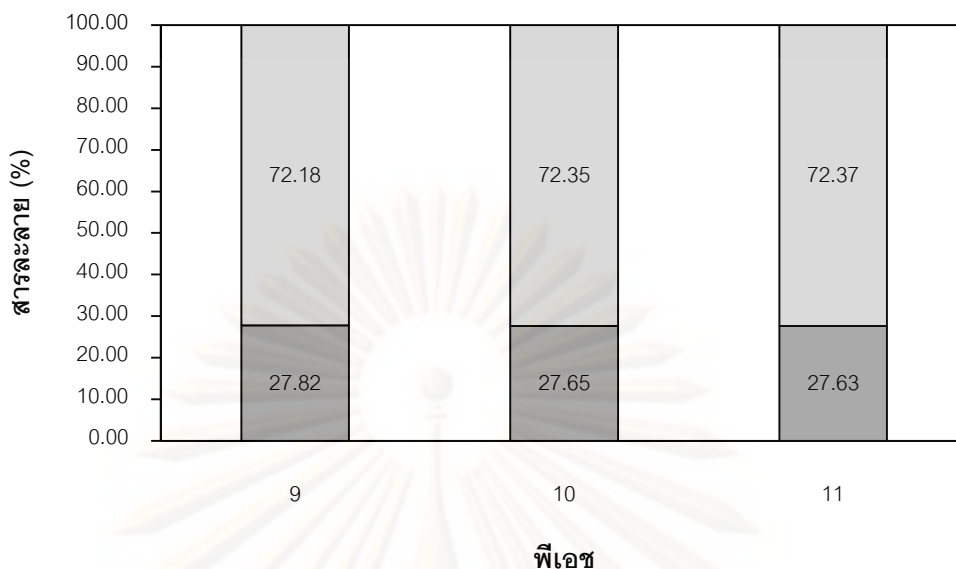


รูปที่ 4.12.ก สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น ก่อนทำปฏิกิริยา

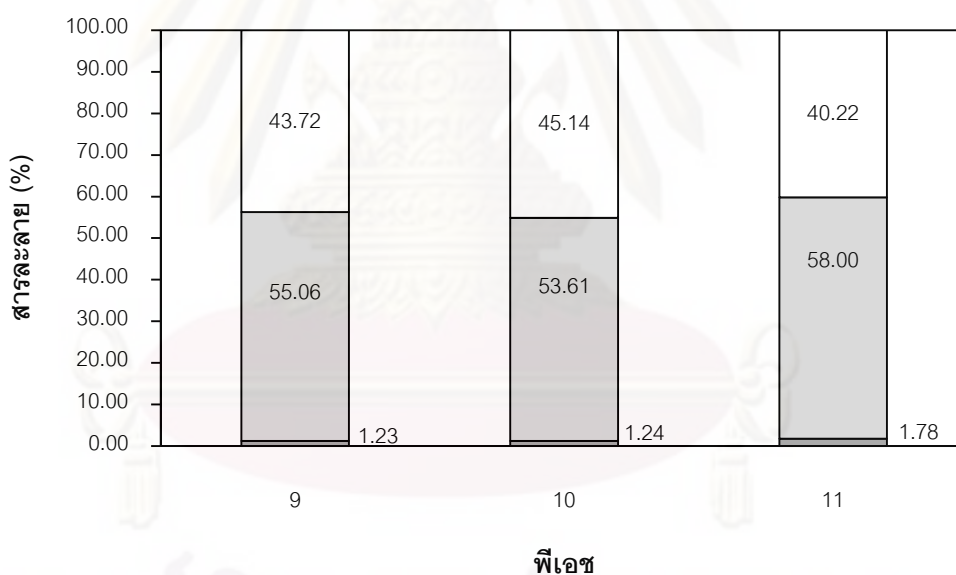


รูปที่ 4.12.ข สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิกิริยา

รูปที่ 4.12 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 และ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1

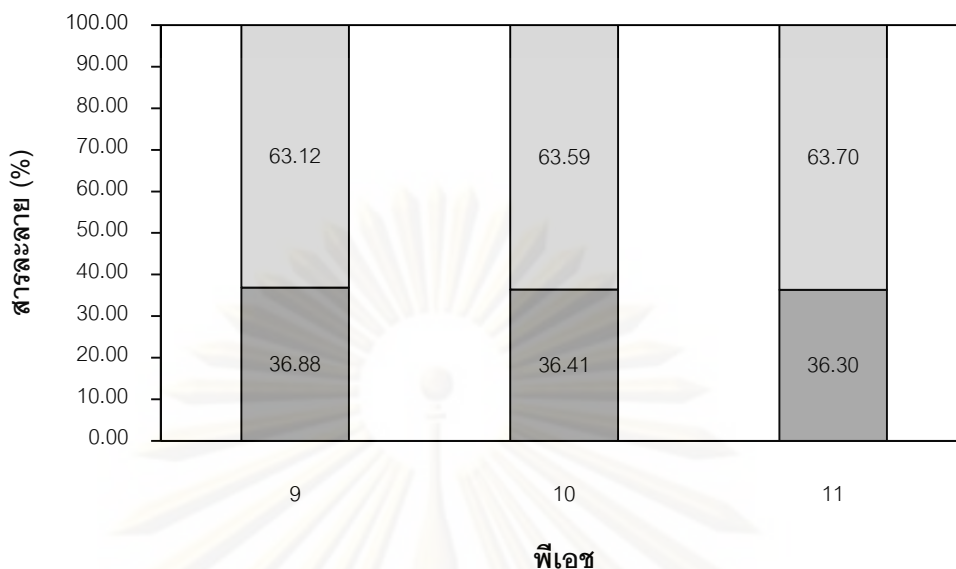


รูปที่ 4.13.ก สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น ก่อนทำปฏิกิริยา

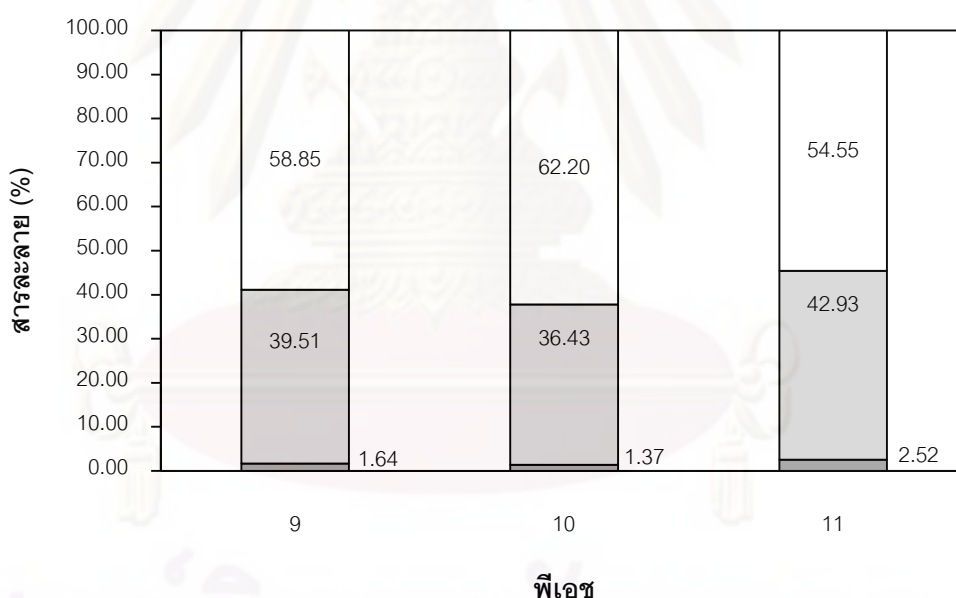


รูปที่ 4.13.ข สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิกิริยา

รูปที่ 4.13 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1



รูปที่ 4.14.ก สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น ก่อนทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.14.ข สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ทุกความเข้มข้น หลังทำปฏิกิริยา

รูปที่ 4.14 สัดส่วนเฉลี่ยของสารละลายต่างๆ ก่อนทำปฏิกิริยา และหลังทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1

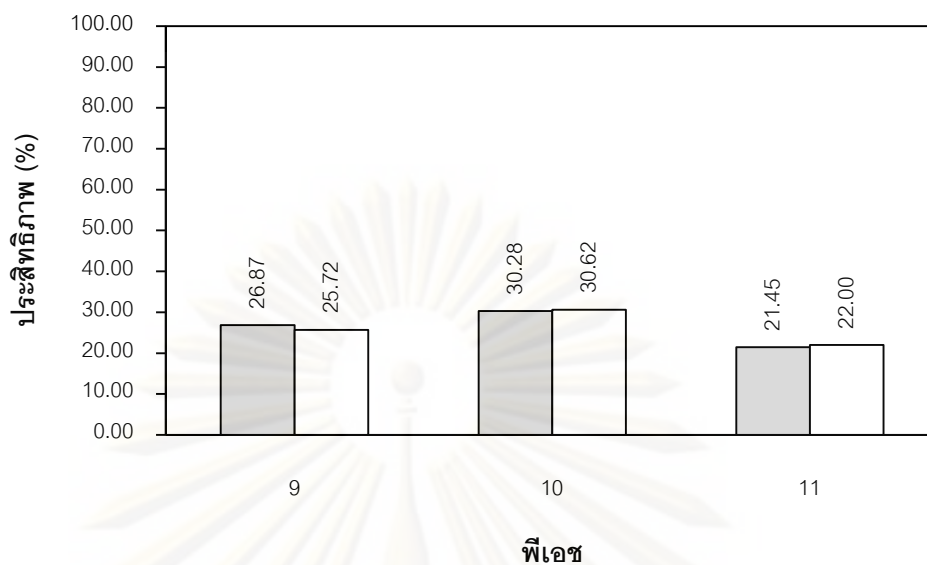
ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดพบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ที่พีเอช 9 10 และ 11 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดดังนี้ ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 26.30 15.14 และ 10.72% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15.ก ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 43.72 45.17 และ 40.22% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16.ก และที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 58.85 62.20 และ 54.55% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17.ก

ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนพบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 ที่พีเอช 9 10 และ 11 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนดังนี้ ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 11.58 9.21 และ 3.47% ตามลำดับ ดังรูป 4.15.ข ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 23.72 25.91 และ 19.83% ตามลำดับ ดังรูป 4.16.ข และที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อนเท่ากับ 37.74 42.70 และ 32.58% ตามลำดับ ดังรูป 4.17.ข

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ที่พีเอช 10 อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด และไซยาไนด์เชิงซ้อนมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณ 62.20 และ 42.70% ดังรูปที่ 4.18

ผลการทดลองในส่วนผลของพีเอช ต่อสารผลิตภัณฑ์พบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ไซยาเนต ทุกพีเอช และทุกความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น ซึ่งตรวจไม่พบไนไตรท์ และไนเตรท





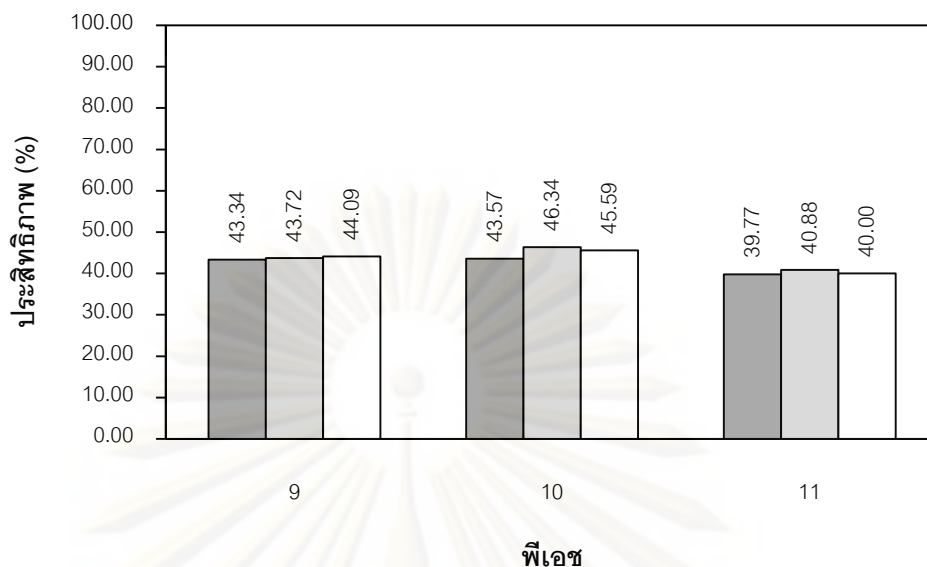
รูปที่ 4.15.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด



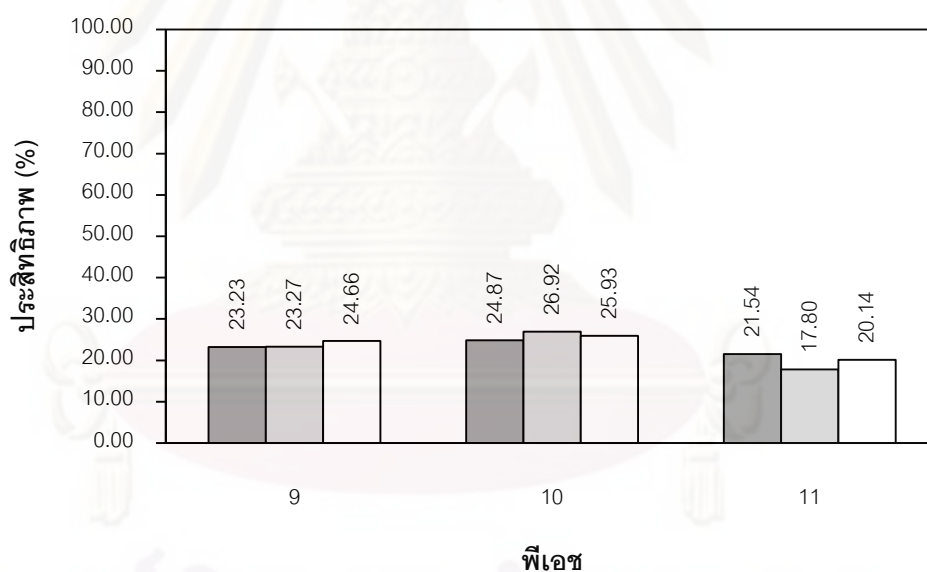
รูปที่ 4.15.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน

■ 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)    □ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 และ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1



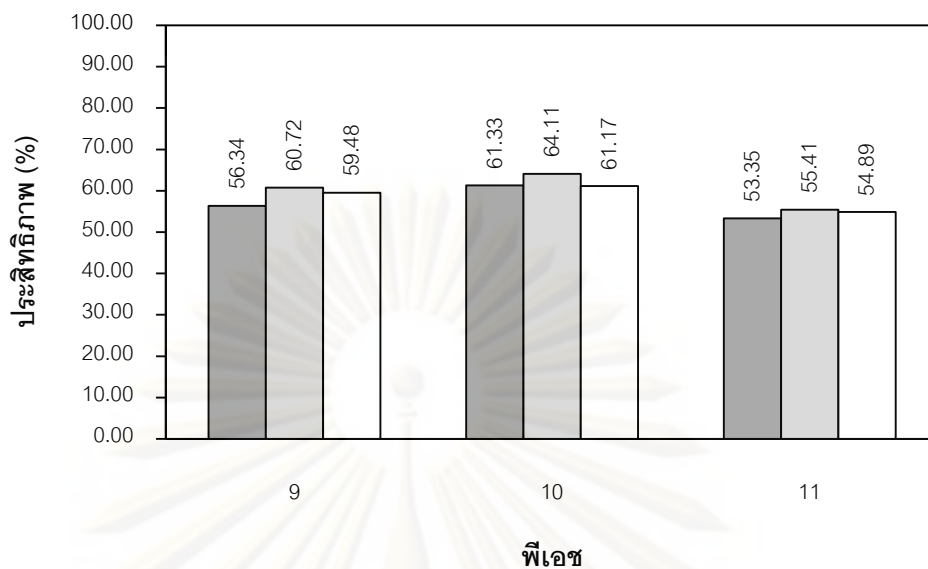
รูปที่ 4.16.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ทั้งหมด



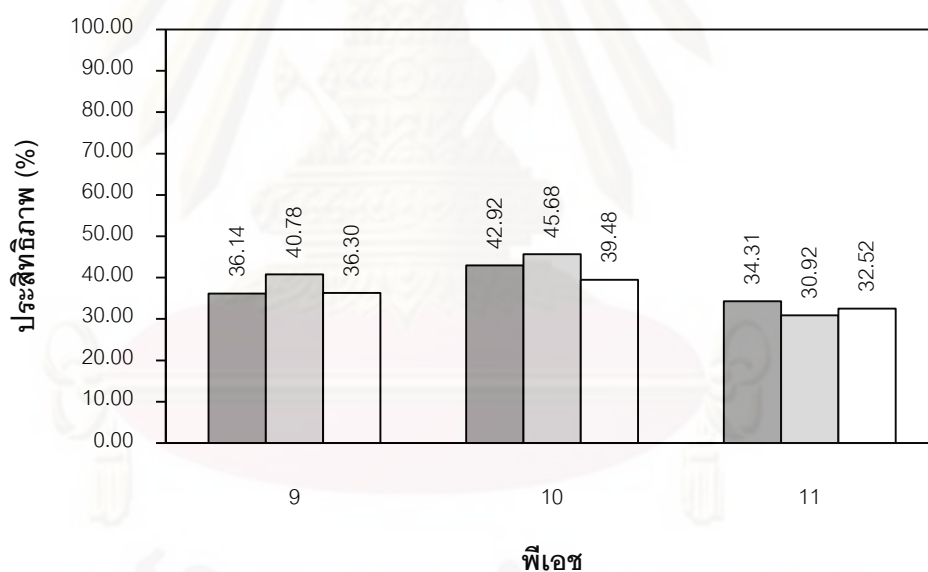
รูปที่ 4.16.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์เชิงซ้อน

■ 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)    ■ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)    □ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไชยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ พืเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเพอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



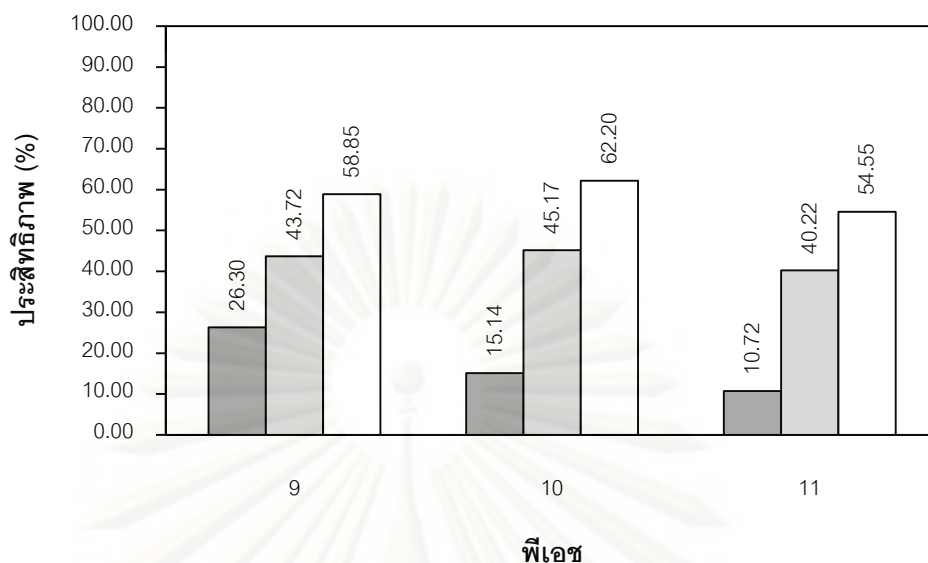
รูปที่ 4.17.ก ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ทั้งหมด



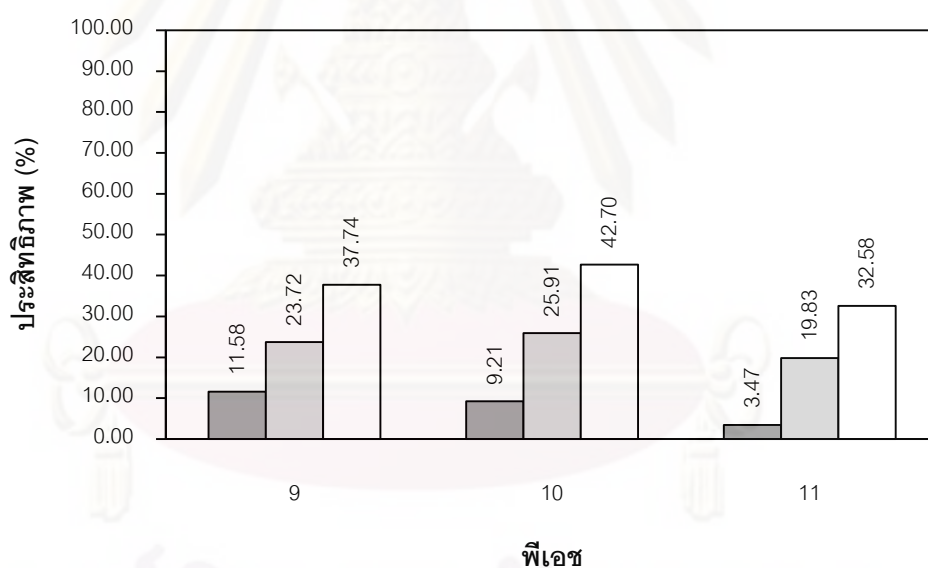
รูปที่ 4.17.ข ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์เชิงซ้อน

■ 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)    ■ 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)    □ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)

รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไชยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ พืเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเพอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



รูปที่ 4.18.ก ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด

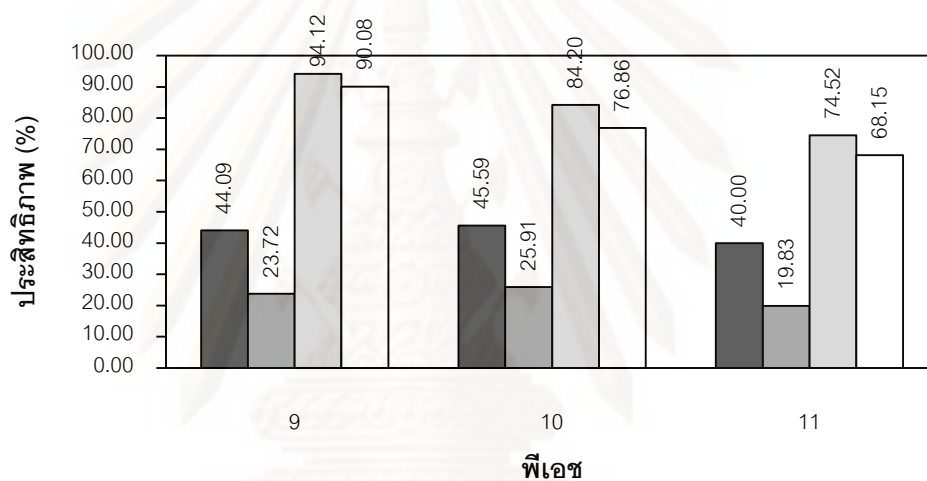


รูปที่ 4.18.ข ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไนโตรเจนเชิงซ้อน

■ 0.5 ต่อ 1 รูปุ๋ยไนโตรเจน    ■ 1 ต่อ 1 รูปุ๋ยไนโตรเจน    □ 2 ต่อ 1 รูปุ๋ยไนโตรเจน

รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน ที่ความเข้มข้นเตตระไฮดาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 100 และ 250 ไมโครโมลาร์ (รูปุ๋ยไนโตรเจน) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮดาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮดาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1    1 ต่อ 1 และ 2 ต่อ 1 รูปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ย 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1 ต่อ 1

เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับผลทดลองที่ ก-1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารประกอบไซยาไนด์เท่ากันพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดน้อยกว่าจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ดังรูปที่ 4.19 ดังนั้นเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ พีเอช และสารผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากสารละลายเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตไม่มีการแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระ และจากผลการศึกษาของ วศินี กิตติสาร (2552) พบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 เฟอร์เรตไม่สามารถออกซิไดซ์เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตให้อยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระ ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดจะเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเพียงอย่างเดียว



- ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์
- ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์
- ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)\*
- ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน ที่ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)\*

ที่มา : \* การทดลองที่ ก-1

**รูปที่ 4.19** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้นสารประกอบไซยาไนด์เริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) (การทดลองที่ ก-1) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1

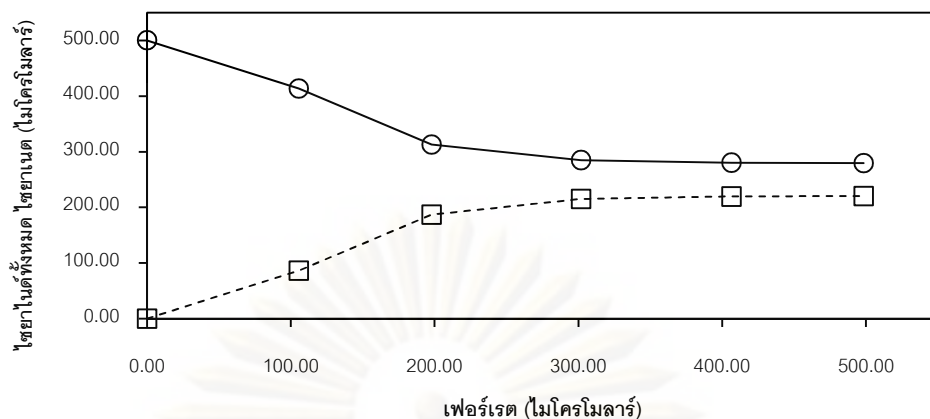


#### 4.2.2 ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

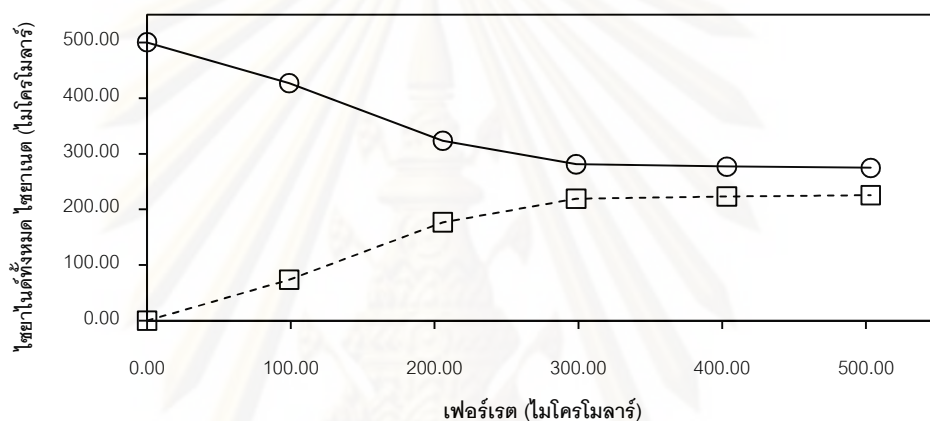
ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ ใช้สารละลายเฟอร์เรต 0.01 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และแปรค่าความเข้มข้นเฟอร์เรตจาก 0 ถึง 500 ไมโครโมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า ปฏิกริยาระหว่างสารประกอบไซยาไนด์กับเฟอร์เรตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 300 ไมโครโมลาร์ เป็นต้นไป ปริมาณความเข้มข้นของไซยาไนด์ทั้งหมดที่ลดลง และไซยาเนตที่เกิดขึ้น จะเริ่มคงที่ ในทุกพีเอช ดังรูปที่ 4.20

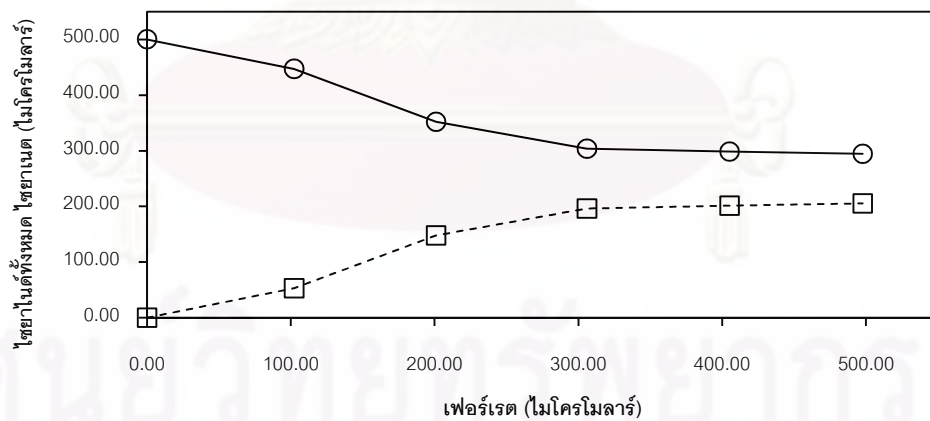
เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลทดลองที่ ก-2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารประกอบไซยาไนด์เท่ากันพบว่า ปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดจากน้ำเสียเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยาเนตเกือบ 100% ในทุกพีเอช ดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตมีความแข็งแรงของพันธะมากกว่าเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ วศินี กิตติสาร (2552) พบว่า อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 เฟอร์เรตไม่สามารถออกซิไดซ์เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตให้อยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระ แต่การทดลองที่ ก-2 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 เฟอร์เรตจะออกซิไดซ์เตตระไซยาโนนิกเกิลเลตไปเป็นไซยาเนตได้ ดังนั้นปริมาณไซยาไนด์เชิงซ้อนที่เหลืออยู่ในสารละลายภายหลังการทำปฏิกิริยา จะอยู่ในรูปของเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเกือบทั้งหมด



รูปที่ 4.20.ก พีเอช 9



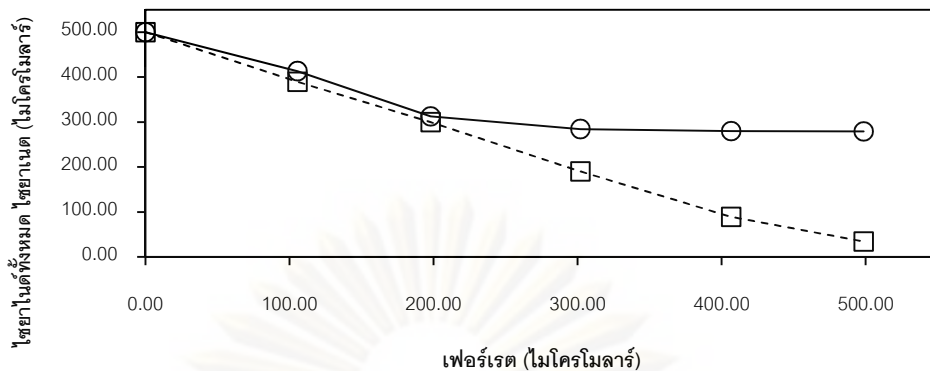
รูปที่ 4.20.ข ความพีเอช 10



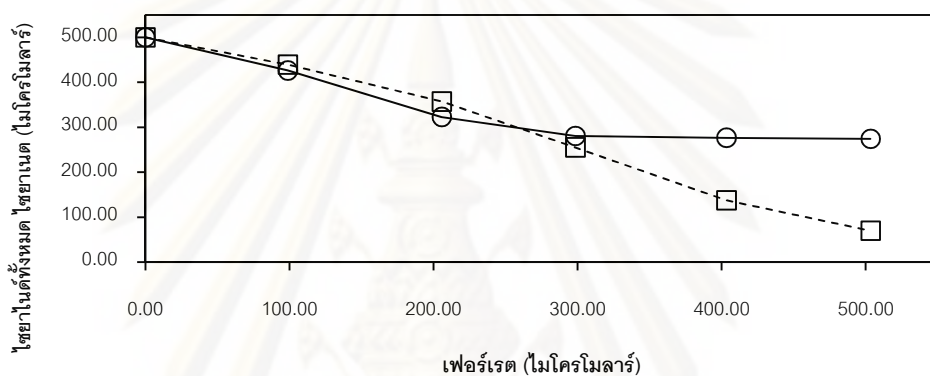
รูปที่ 4.20.ค พีเอช 11

○ ไชยาไนต์ทั้งหมด      -□- ไชยาไนต์

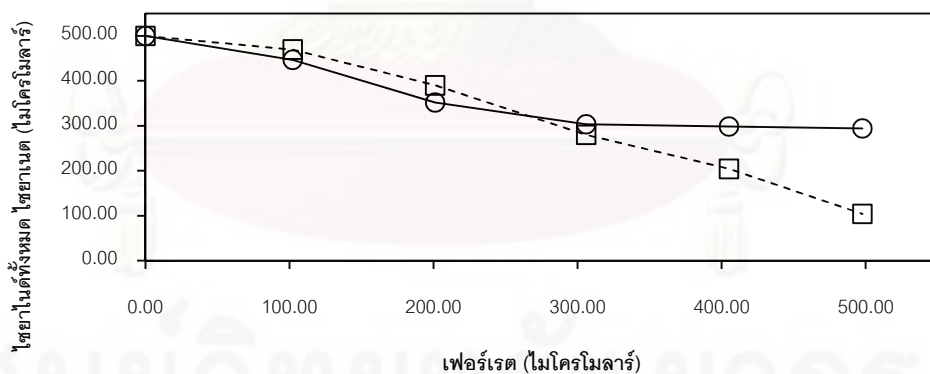
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างไชยาไนต์ทั้งหมดที่เหลือ และไชยาไนต์ที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอริเรต ที่ความเข้มข้นแต่ละไชยาไนติกเกลิตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไชยาไนติกเกลิตต่อเฮกซะไชยาไนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอริเรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



รูปที่ 4.21.ก พีเอช 9



รูปที่ 4.21.ก พีเอช 10



รูปที่ 4.21.ก พีเอช 11

○- เติตระไชยาโนนิกเกิดเลต และเฮกชไชยาโนโคบอลเตต      -□- เติตระไชยาโนนิกเกิดเลต

รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างไชยาไนต์ทั้งหมดที่เหลือ และไชยาเนตที่เกิดขึ้น ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกชไชยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ กับความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) (การทดลองที่ ก-2) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1

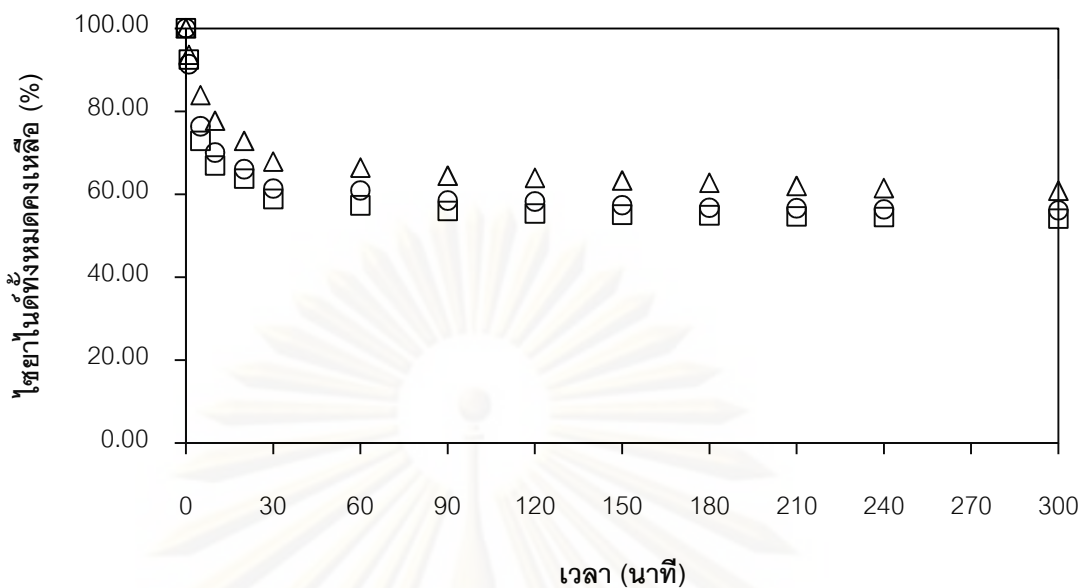
#### 4.2.3 ผลการทดลองการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (ข-3)

ทดลองที่พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ ใช้สารละลายบอร์เรต 0.01 โมลาร์ เป็นบัฟเฟอร์ และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 1 5 10 20 30 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที โดยมีอาร์เซนไนท์ ( $As^{3+}$ ) เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา

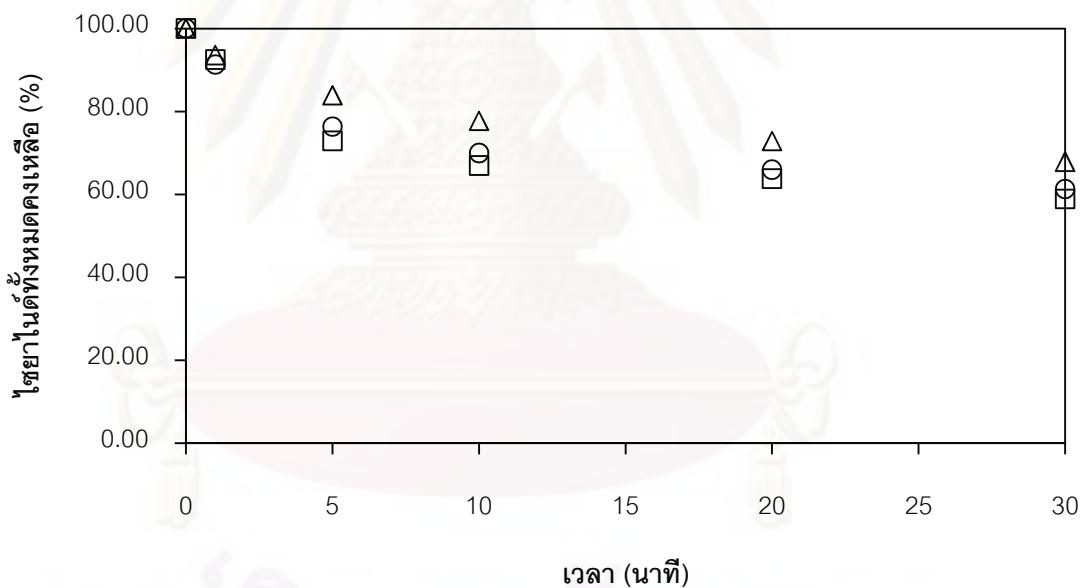
ผลการทดลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน พีเอช 9 10 และ 11 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.22 และ 4.24 โดยปฏิกิริยาส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วง 30 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ช้าลง จนสิ้นสุดปฏิกิริยา

เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับผลทดลองที่ ก-3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารประกอบไซยาไนด์เท่ากันพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต จะเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ในทุกพีเอช ดังรูปที่ 4.24 โดยปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต จะสิ้นสุดเมื่อปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดเหลืออยู่ประมาณ 50% ในทุกพีเอช แต่ปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต จะสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยาเนตโดยสมบูรณ์

ผลการทดลองพบว่า พีเอชไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่เฮกซะไซยาโนโคบอลเตตมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์ช้าลงในทุกพีเอช และสารผลิตภัณฑ์หลักที่พบ คือ ไซยาเนต



รูปที่ 4.22.ก ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที

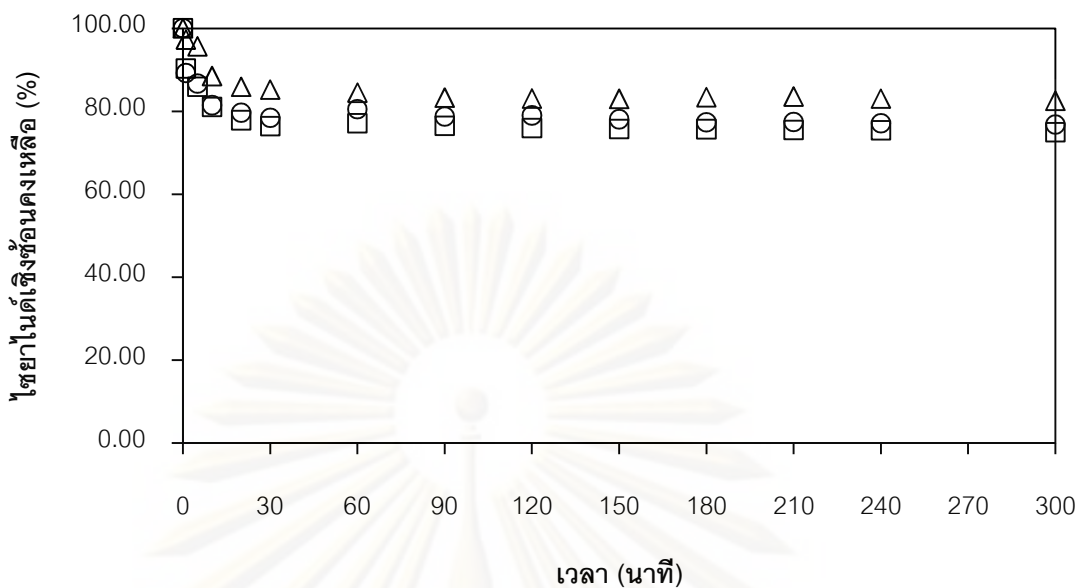


รูปที่ 4.22.ข ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

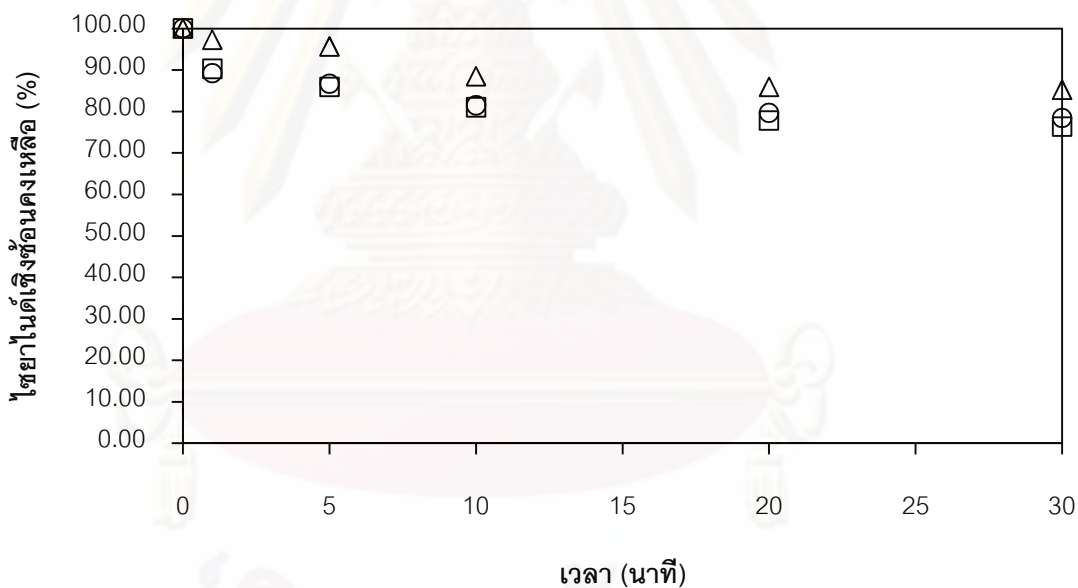
○ พีเอช 9      □ พีเอช 10      △ พีเอช 11

รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของไชยาไนต์ทั้งหมดคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกิลเลตเริ่มต้น 250ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไชยาโนนิกิลเลตต่อเฮกซะไชยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1





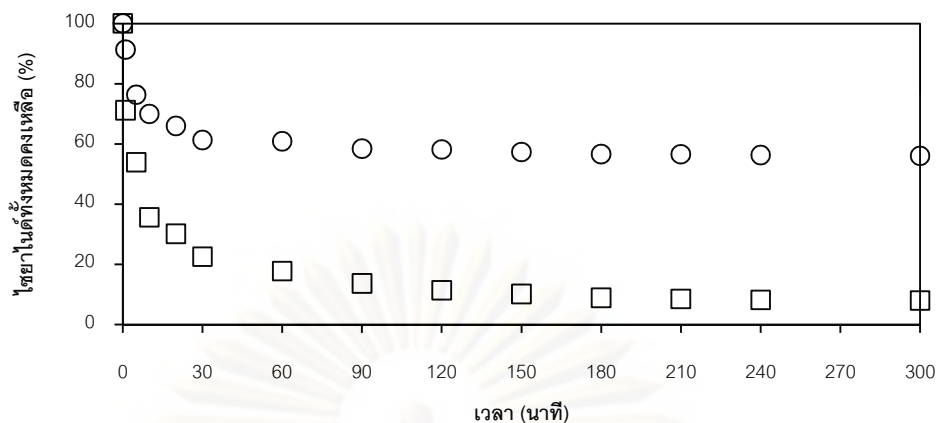
รูปที่ 4.23.ก ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 300 นาที



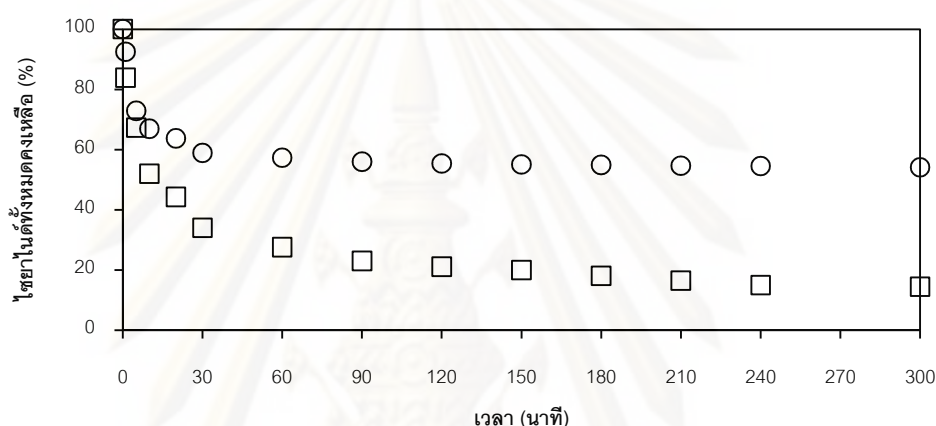
รูปที่ 4.23.ข ผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 ถึง 30 นาที

○ พีเอช 9      □ พีเอช 10      △ พีเอช 11

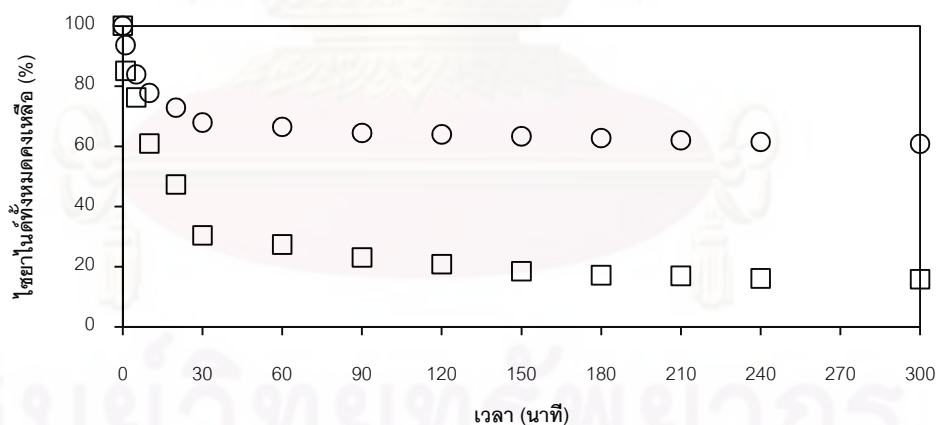
รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของไชยาไนต์เชิงซ้อนคงเหลือ กับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้นเตตระไชยาโนนิกิลเลตเริ่มต้น 250ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเตตระไชยาโนนิกิลเลตต่อเฮกซะไชยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์เท่ากับ 1 ต่อ 1



รูปที่ 4.24.ก พีเอช 9



รูปที่ 4.24.ข พีเอช 10



รูปที่ 4.24.ค พีเอช 11

○ เติตระไชยาไนติกิลเลต และเฮกซ์ไชยาไนโคบอลเตต      □ เติตระไชยาไนติกิลเลต

รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไชยาไนต์ทั้งหมดคงเหลือกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ความเข้มข้น เติตระไชยาไนติกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) อัตราส่วนโดยโมลเติตระไชยาไนติกิลเลตต่อ เฮกซ์ไชยาไนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไชยาไนต์ กับความเข้มข้นเติตระไชยาไนติกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์) (การทดลองที่ ก-3) พีเอช 9 10 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ เท่ากับ 1 ต่อ 1

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต ในด้านของประสิทธิภาพ อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ในการทำปฏิกิริยา ที่พีเอช 9 10 และ 11 โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ประเภท คือ น้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมระหว่างเตตระไฮยาโนนิกเกลเลตกับเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต

##### 5.1.1 การศึกษาผลของเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต ต่อการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

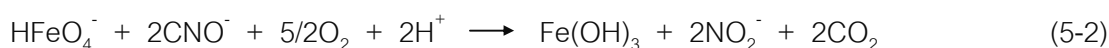
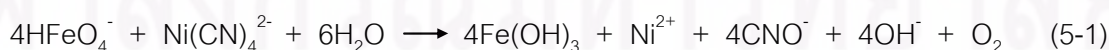
ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกลเลต การทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาโนด์ทั้งหมดมีอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ ในช่วงพีเอช 9 10 และ 11 ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.99 ต่อ 1 โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมด ประมาณ 80 ถึง 95% และได้สารผลิตภัณฑ์หลัก คือ ไฮยาเนต เตตระไฮยาโนนิกเกลเลตไม่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาโนด์ในการทำปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์และสารผลิตภัณฑ์ แต่เตตระไฮยาโนนิกเกลเลตมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่สุด คือ พีเอช 9 ถึง 10 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เกิดได้ช้าที่พีเอช 11 โดยจากการทดลองพบว่า พีเอช 9 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนสิ้นสุดประมาณ 120 นาที โดยปฏิกิริยาส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วง 60 นาทีแรก การทดลองนี้เป็นเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีผลทำให้สารละลายมีพีเอชสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดไฮดรอกไซด์ในระหว่างการทำปฏิกิริยา ไม่ใช่จากบัฟเฟอร์

### 5.1.2 การศึกษาผลของเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมดสูงสุด ที่อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ คือ ประมาณ 55 ถึง 60% และได้สารผลิตภัณฑ์หลัก คือ ไฮยาเนต เฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตมีผลทำให้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยาลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ลดลง สารผลิตภัณฑ์ลดลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลงด้วย ช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่สุด คือ พีเอช 9 ถึง 10 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เกิดได้ช้าที่พีเอช 11 โดยจากการทดลองพบว่า พีเอช 10 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจนสิ้นสุดประมาณ 60 นาที โดยปฏิกิริยาส่วนมากจะเกิดขึ้นในช่วง 30 นาทีแรก การทดลองนี้เป็นเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรต ที่ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีผลทำให้สารละลายมีพีเอชสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดไฮดรอกไซด์ในระหว่างการทำปฏิกิริยา ไม่ใช่จากบัฟเฟอร์

### 5.1.3 การประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียไซยาไนด์สำหรับโรงชุบนิเกิล โดยการใช้เฟอร์เรตที่ความเข้มข้นในช่วงที่ทำการทดลอง ควรจะใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 2 ชั่วโมง โดยควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 9.0 ถึง 9.5 เนื่องจากเฟอร์เรตมีความเสถียรที่ช่วงพีเอช 9.4-9.7 และใช้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ 2 เท่าจากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อความแน่นอนของผลการบำบัด เนื่องจากความเข้มข้นไซยาไนด์ที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีค่าต่ำมาก คือ น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ น้อยกว่า 7.6 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นไซยาไนด์ในการทดลอง คือ 500 ไมโครโมลาร์ จะต้องกำจัดไซยาไนด์ให้ได้ถึง 98.5% โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (5-1) และ (5-2)



จากนั้นทำการกำจัดนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยวิธีการตกตะกอน ทั้งนี้ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีต้องมีค่าพีเอชสูงๆ เนื่องจากเป็นสภาพที่ทำให้นิกเกิลละลายน้ำได้น้อยลง นิกเกิลส่วนเกินจะถูกกำจัดออกในรูปของโลหะออกไซด์ที่ค่าสภาวะความเป็นกรด-ด่าง สูงๆ จากนั้นจะแยกตะกอนออกมาทำให้แห้ง แล้วนำไปฝังกลบต่อไป ภายหลังจากการบำบัดความเข้มข้นของนิกเกิลจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด จำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าพีเอช ด้วยกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เพื่อให้ น้ำเสียมีความเป็นกลาง

สำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์สูง จำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความเสถียรของเฟอร์เรตในน้ำเสีย เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับ พีเอช และความเสถียรของเฟอร์เรตเป็นอย่างมาก

ในการบำบัดน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์สูง การเกิดปฏิกิริยาย่อมทำให้พีเอชของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงควรที่จะต้องมียระบบควบคุมพีเอชเป็นอย่างดี และใช้บัพเฟอร์ในการควบคุมพีเอชร่วมด้วย โดยคาดว่าบอร์เรตบัพเฟอร์ จะเป็นบัพเฟอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมพีเอช เนื่องจากบอร์เรตบัพเฟอร์สามารถควบคุมพีเอชได้ดีในช่วง 9 ถึง 10

การใช้เฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ความเสถียรของเฟอร์เรตลดลง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองการเตรียมเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นสูงประมาณ 0.05 โมลาร์ ซึ่งเฟอร์เรตที่เตรียมเกิดการสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากพีเอชที่สูงขึ้นในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้นที่สูงมาก กับเฟอร์ริคที่เกิดขึ้นมาก จะส่งผลต่อความคงตัวของเฟอร์เรตเช่นเดียวกัน (Schreyer และ Ockerman, 1951) จากการศึกษา งานวิจัยต่างๆ พบว่า ไอออนต่างๆ ในน้ำ และบัพเฟอร์ที่มีความเข้มข้นสูง มีผลต่อความคงตัวของเฟอร์เรต ดังนั้นในน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นไอออนสูง จึงน่าจะเป็นอีกสาเหตุที่ส่งผลให้เฟอร์เรตมีความเสถียรลดลงอย่างมาก

จากผลการทดลองของ Sharma (2005) ในการบำบัดไซยาไนด์จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่มีความเข้มข้นไซยาไนด์ทั้งหมด 665 ไมโครโมลาร์ พบว่า ต้องใช้เฟอร์เรตในรูปของโพแทสเซียมเฟอร์เรต 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 6,060 ไมโครโมลาร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ 99% :ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์สูงถึง 10 ต่อ 1 แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับพีเอชของน้ำเสีย ผลการทดลองนี้ทำให้คาดการณ์ได้ว่า



การบำบัดน้ำเสียจริงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น จำเป็นต้องศึกษาตัวแปรสำคัญบางตัวอีกซึ่งสามารถคาดการณ์ต่อได้ว่าน่าจะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรของเฟอร์เรต หรือ สารประกอบเชิงซ้อนไฮยาไนด์กับโลหะหนักบางชนิด

## 5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมศาสตร์

1. ทราบถึงประสิทธิภาพ อัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไฮยาไนด์ทั้งหมด และผลกระทบของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮยาไนด์ กับนิกเกิล และโคบอลต์

2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในเชิงทฤษฎีในการบำบัดน้ำเสียที่มีไฮยาไนด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮยาไนด์ กับนิกเกิล และโคบอลต์ เป็นส่วนประกอบหลัก

3. เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ที่มีไฮยาไนด์ และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮยาไนด์กับโลหะหนักอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ เพื่อปรับปรุงระบบการบำบัดของโรงงานชุบโลหะขนาดกลาง และขนาดเล็ก ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียไม่มาก เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการส่งไปบำบัดที่บริษัทรับกำจัดกากอุตสาหกรรม

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการกำจัดเตตระไฮยาไอนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาไโคบอลเตต ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาถึง ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนด์ การเปลี่ยนแปลงพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไฮยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา

2. ศึกษาถึงผลของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฮยาไนด์กับโลหะหนักอื่นๆ ที่พบในอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยเฉพาะเหล็ก เนื่องจากในน้ำเสียจริงนั้น จะพบว่ามีความเข้มข้นเหล็กสูง ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไฮยาไนด์ได้เช่นกัน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ธนพร เหล่าไพโรจน์. 2548. การกำจัดไชยาไนต์ และโลหะหนัก จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กรณีของคอลัมน์แบบเรซินรวม. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- ภัทรวรรณ ตียนานท์. 2549. ผลของนิกเกิดต่อการกำจัดไชยาไนต์ ในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิไดซ์ ด้วยเฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์. 2547. ผลของอัตราที่เอตต่อการออกซิเดชันของไชยาไนต์ ด้วยไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะศักดิ์ สิงหะสุริยะ. 2549. การกำจัดไชยาไนต์และอีดีทีเอในน้ำเสีย โดยวิธีการออกซิเดชันด้วย เฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2535. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี ในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาด กลางและขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศीलาลูธ ดำรงศิริ. 2548. ผลของสังกะสีต่อการกำจัดไชยาไนต์ โดยวิธีการออกซิไดซ์ด้วยเฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วลัยรัตน์ จันทรวงศ์. 2542. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้า พระนครเหนือ 9, 2: 4-8.
- วคินี กิตติสาร. 2552. การกำจัดเฮกซะไชยาโนโคบอลเตต จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธี การออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาวัลย์ จึ่งประเสริฐ และสุรจิต สุนทรธรรม. 2542. อาชีพเวชศาสตร์ ฉบับพิเศษวิทยา. 2,500 เล่ม,  
พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ไซเบอร์เพรส.

อนันต์ ทองมอญ. 2527. ชุดโลหะ-ชุดโครเมียม กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์.

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



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาษาอังกฤษ

- Adhoum, N., and Monser, L. 2002. Modified Active Carbon for the Removal of Copper, Zinc, Chromium and Cyanide from Wastewater. Separation and Purification Technology 26: 137-146.
- Adhoum, N., and Monser, L. 2002. Remove of Cyanide from Aqueous Solution Using Impregnated Activated Carbon. Chemical Engineering and Processing 41: 17-21.
- Barnes, Doen E., Wright, Peter J., Graham, Sandra M., and Jones-Watson, Elaine A. Techniques for the Determination of Cyanide in a Process Environment: A Review[online]. Available from: <http://www.crpq.cnrsnancy.fr/Geostandards/GNpdf.v24/msvm105.pdf>[2000, August 4]
- Benjamin, M. M. 2002. Water Chemistry. NY: McGraw-Hill.
- Botz, M. M. 2001. Overview of Cyanide Treatment Methods[Online]. Available from: <http://www.cyantists.com/treat.htm>[2001, September 12]
- Chao, A. C., Luca, S. J., and Idlea, C. N. 1993. Quality Improvement of Biosolids by Ferrate (VI) Oxidation of Offensive Odour Compounds. Water Science and Technology 33: 119-130.
- Chiang, K., Amal, R., and Tran, T. 2003. Photocatalytic Oxidation of Cyanide: Kinetic and Mechanistic studies. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 193: 285-297.
- Ebbs, S. 2004. Biological degradation of Cyanide Compounds. 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 Poblema of Pollution Control. II. The Direction and Indirect Oxidation of Cyanide. J.Appl.Electrochem 12: 669-673.
- Graham. N., Jiang. C. C., Li, X. Z., Jiang. J. Q., and Ma, J. 2004. The Influence of pH on the Degradation of Phenasl and Chlorophenals by Potassium Ferrate. Chemosphere 56: 949-956.

- Hatinger, L. 1994. Handbook of Effluent Treatment and Recycling for the Metal Finishing Industry. 2<sup>nd</sup> ed. Finishing Publications.
- Hine, F., Yasuda, M., Lida, T., and Ogata, Y. 1986. On the Oxidation of Cyanide Solution with Lead Oxide Coated Anode. Electrochimica Acta 31: 1389-1395.
- Ho, S. P., Wang, Y. Y., and Wan, C. C. 1990. Electrolytic Decomposition of Cyanide Effluent with an Electrochemical Reactor Packed with Stainless Fiber. Water Research 24: 1317-1321.
- Jiang, Q. J., and Lloyd, B. 2002. Progress in the Development and Use of Ferrate(VI) Salt as an Oxidation and Coagulant for Water and Wastewater Treatment. Water Research 36: 1397-1408.
- Khemarath, O., Yngard, R., Seelawut, D. and Sharma, V. K. 2007. Ferrate(VI) Oxidation of Zinc-Cyanide Complex. Chemosphere 69: 729-735.
- Ma, J., and Liu, W. 2002. Effectiveness and Mechanism of Potassium Ferrate(VI) Preoxidation for Algae Removal by Coagulation. Water Research 36: 4959-4962.
- Mallinckrodt Baker. 2004. MSDS: Potassium Cyanate[online]. Available from: <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/p5697.htm>[2009, June 14]
- Meehan, S. M. 2000. The Aqueous Chemistry of Cyanide and Nitrogen[online]. Available from: [http://thesis.lib.unimelb.edu.au/adt-root/uploads/approved/adtVU2002.0068/public/05\\_Ch3.pdf](http://thesis.lib.unimelb.edu.au/adt-root/uploads/approved/adtVU2002.0068/public/05_Ch3.pdf)[2000, October 23]
- Moran, R. 2000. Cyanide Uncertainties[online]. Available from: [http://www.eireview.org/eir/eirhome.nsf/\(DocLibrary\)/4255D0784BD4023F85256BFB006E9686/\\$FILE/Cyanide\\_Uncertainties%20\(Feiler\).pdf](http://www.eireview.org/eir/eirhome.nsf/(DocLibrary)/4255D0784BD4023F85256BFB006E9686/$FILE/Cyanide_Uncertainties%20(Feiler).pdf)[2000, March 11]
- Moyer, H. R. 1994. Cleaning and Degreasing Technology Report[online]. Available form: <http://www.dppr.ctc.com/clndegre/tr050494.html>[1994, Jan 15]
- 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 Titanium Solution. Waste Management 23: 183-191.
- Qu, J. H., Liu, H. J., Liu, S. X., and 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 Cyanide-Species from Precious-Metal Mill Effluents. Environmental Pollution 90, 3: 331-334.
- Rania, H., and Roldan, C. J. 2003. Toxicity Cyanide[online]. Available from: <http://www.emedicine.com/cgi-bin/foxweb.exe/screen@d:/em/ga?book=med&authored=2689&topicid=487>[2004, July 23]
- Sharma, V. K. 2002. Potassium Ferrate(VI): an Environmentally Friendly Oxidant. Advance in Environmental Research 6: 143-156.
- 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., 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 Vazquez, F. G. 1998. Potassium Ferrate(VI) Oxidation of Aqueous Cyanide. Environ. Sci. Technol 32: 2608-2613.
- Sharma, V. K., Yngard, R. A., Cabelli, D. E., and Baum, J. C. 2008. Ferrate(VI) and Ferrate(V) Oxidation of Cyanide, Thiocyanate, and Copper(I) Cyanide. Radiation Physics and Chemistry 77: 761-767.
- Tiwari, D., Kim, H. U., Choi, B. J., Lee, S. M., Kwon, O. H., Choi, K. M., and Yang, J. K. 2007. Ferrate(VI): A Green Chemical for the Oxidation of Cyanide in Aqueous/Waste Solutions. Journal of Environmental Science and Health 42: 803-810.

U.S. Environmental Protection Agency. 1994. Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings[Online]. Available from: <http://www.epa.gov/epaoswer/other/mining/techdocs/cyanide.pdf>[1994, April 14]

U.S. Environmental Protection Agency. 2000. Capsule Report Managing Cyanide in Metal Finishing. Available from: [http://www.dtsc.ca.gov/HazardousWaste/Cyanide/upload/CN\\_Capsule.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/HazardousWaste/Cyanide/upload/CN_Capsule.pdf)[2009, Sep 1]

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

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

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



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

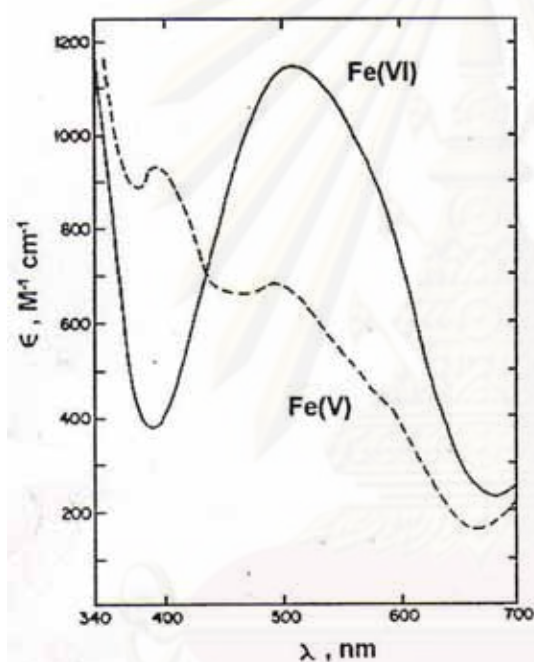
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับเฟอร์เรต

## ก.1 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์เรต

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



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

การตรวจวัดความเข้มข้นของเฟอร์เรตทำได้โดยการตรวจค่าการดูดซับแสงที่ 510 นาโนเมตร (nm) และคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นของเฟอร์เรตได้จากสมการของ Beer's law ดังสมการที่ (ก-1)

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

- เมื่อ
- A = ค่าการดูดซับแสงที่ตรวจวัดได้ ไม่มีหน่วย
  - $\epsilon$  = สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง มีค่าเท่ากับ 1150 โมลาร์<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร
  - C = ความเข้มข้นของเฟอร์เรต หน่วย โมลาร์
  - L = ระยะทางที่แสงผ่านตัวกลาง มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร สำหรับเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



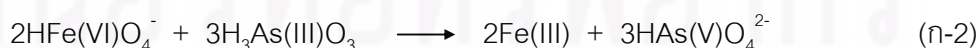
## ก.2 การเตรียมสารละลายเฟอร์เรต

สารละลายเฟอร์เรตมีการสลายตัวไปตลอดเวลา การเตรียมสารละลายเฟอร์เรตในการทดลองควรเตรียมก่อนใช้งานเท่านั้น และเตรียมในสภาวะที่สารละลายมีความคงตัวสูงที่สุด จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การเตรียมสารละลายที่เหมาะสมที่สุด คือ การเตรียมโดยใช้ตัวกลางเป็นน้ำปราศจากไอออน และไม่ต้องปรับพีเอชเพิ่มเติม เนื่องจากไอออนในน้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความคงตัวของสารละลายลดลง (Schreyer และ Ockerman, 1951) นอกจากนี้การเตรียมสารละลายเฟอร์เรตที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 9 ถึง 11 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเสถียรสูง

## ก.3 การหยุดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์

ในการทดลองเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา จำเป็นต้องหาวิธีการที่จะหยุดปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไซยาไนด์ การหยุดปฏิกิริยาทำได้โดยการทำให้เฟอร์เรตหายไปจากน้ำตัวอย่างในเวลาที่ต้องการ โดยวิธีการหยุดปฏิกิริยาวิธีหนึ่ง คือ การหาสารอื่นๆ ที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากว่าไซยาไนด์อย่างมาก โดยเติมลงในน้ำตัวอย่างที่ต้องการ

อาร์เซไนท์ ( $\text{As}^{3+}$ ) มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยากับเฟอร์เรตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ประมาณ  $3.54 \times 10^5$  โมล<sup>-1</sup>วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 12.9 (Lee Um และ Yoon, 2003) ในขณะที่ไซยาไนด์มีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ประมาณ  $3.76 \times 10^2$  โมล<sup>-1</sup>วินาที<sup>-1</sup> ที่พีเอช 9 และจะมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาช้าลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Sharma, 1998) ดังนั้นจึงคาดการณ์ได้ว่าในช่วงพีเอช 8 ถึง 12 อาร์เซไนท์จะมีค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าเฟอร์เรตอย่างน้อย 100 เท่า อาร์เซไนท์มีอัตราส่วนเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์เท่ากับ 2 ต่อ 3 ดังสมการที่ (ก-2) (Lee Um และ Yoon, 2003)



ในการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเฟอร์เรตเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ จะใช้ความเข้มข้นอาร์เซไนท์ในการหยุดปฏิกิริยา 750 ไมโครโมลาร์ ซึ่งทำได้โดยการเติมสารละลายอาร์เซไนท์ความเข้มข้นเท่ากับ 7500 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร สารละลายหลังผสมจะมีอัตราส่วนระหว่างเฟอร์เรตต่ออาร์เซไนท์เท่ากับ 2 ต่อ 3 พอดี

จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมสารละลายอาร์เซนไนท์ลงในสารละลายเฟอร์เรตที่พีเอช 9 10 และ 11 พบว่าสารละลายเฟอร์เรตจะทำปฏิกิริยากับอาร์เซนไนท์หมดทันที โดยสังเกตได้จากสีม่วงของสารละลายเฟอร์เรตที่หายไปทันที ซึ่งเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับไซยาไนด์อย่างมาก



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

การเก็บรักษาตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

### การเก็บรักษาตัวอย่าง

#### ข.1 ข้อควรระวังในการเก็บรักษาไซยาไนด์ ไนไตรท และไนเตรท

ข้อควรระวังในการเก็บรักษาตัวอย่างมีดังนี้

##### ข.1.1 การระเหย

เป็นข้อควรระวังที่สำคัญที่สุดสำหรับไซยาไนด์ การระเหยจะเกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อสารละลายมีพีเอชต่ำกว่า 12

##### ข.1.2 การเกิดการออกซิไดซ์

การเกิดการออกซิไดซ์ เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารที่มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับไซยาไนด์ ไซยาเนต และไนไตรท

##### ข.1.3 การเกิดปฏิกิริยากับสารเจือปนอื่นๆ

เป็นข้อควรระวังอีกข้อหนึ่งสำหรับไซยาไนด์ เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ ( $S^{2-}$ ) กลายเป็นไทโอไซยาเนต (SCN<sup>-</sup>) (มันส์สัน ตันทูลเวศม์, 2546)

##### ข.1.4 กระบวนการทางชีวภาพ

ไซยาไนด์ ไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

#### ข.2 การเก็บรักษาตัวอย่าง สำหรับวิเคราะห์ไซยาไนด์ ไนไตรท และไนเตรท

จากผลการศึกษาข้างต้น การเก็บรักษาตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรทั้งหมด คือ การเก็บรักษาตัวอย่างในสภาวะที่เป็นเบส โดยพีเอชต้องมากกว่า 12 ในที่นี้จะใช้วิธีผสมตัวอย่างในอัตราส่วนน้ำตัวอย่างต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ เท่ากับ 5 ต่อ 1 เพื่อให้ตัวอย่างถูกเก็บรักษาในสภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ซึ่งจะมีพีเอชมากกว่า 12.5 และเก็บรักษาตัวอย่างในที่มืด และอุณหภูมิต่ำ



ภาคผนวก ค.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

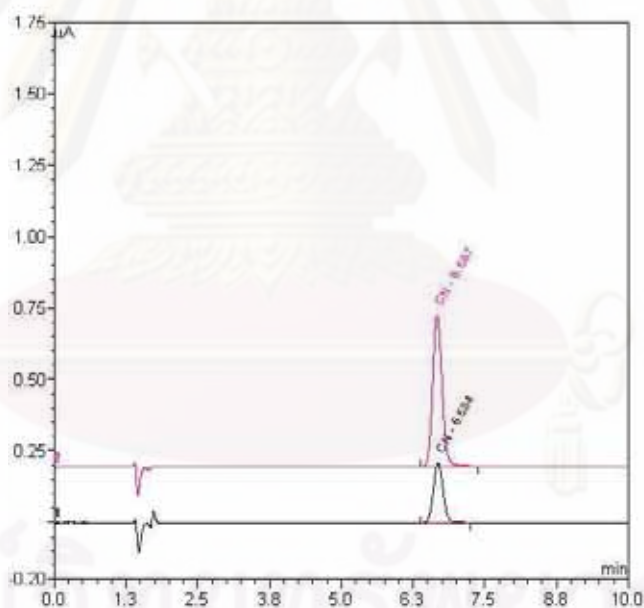


## ภาคผนวก ค.

## ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาไนด์

## ค.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

ไซยาไนด์สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatograph) โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสาร คือ คอลัมน์ AS7 ส่วนตรวจวัด คือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Electrochemical Cell โดยใช้ Silver Working Electrode ที่ 0.00 V และ Ag/AgCl Reference Mobile Phase ที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate) 0.5 โมลาร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) 0.1 โมลาร์ และ เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) 5% v/v ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของไซยาไนด์ ดังรูปที่ ค.1 ไซยาไนด์จะปรากฏสัญญาณที่เวลาประมาณ 6.4 ถึง 7.0 นาที



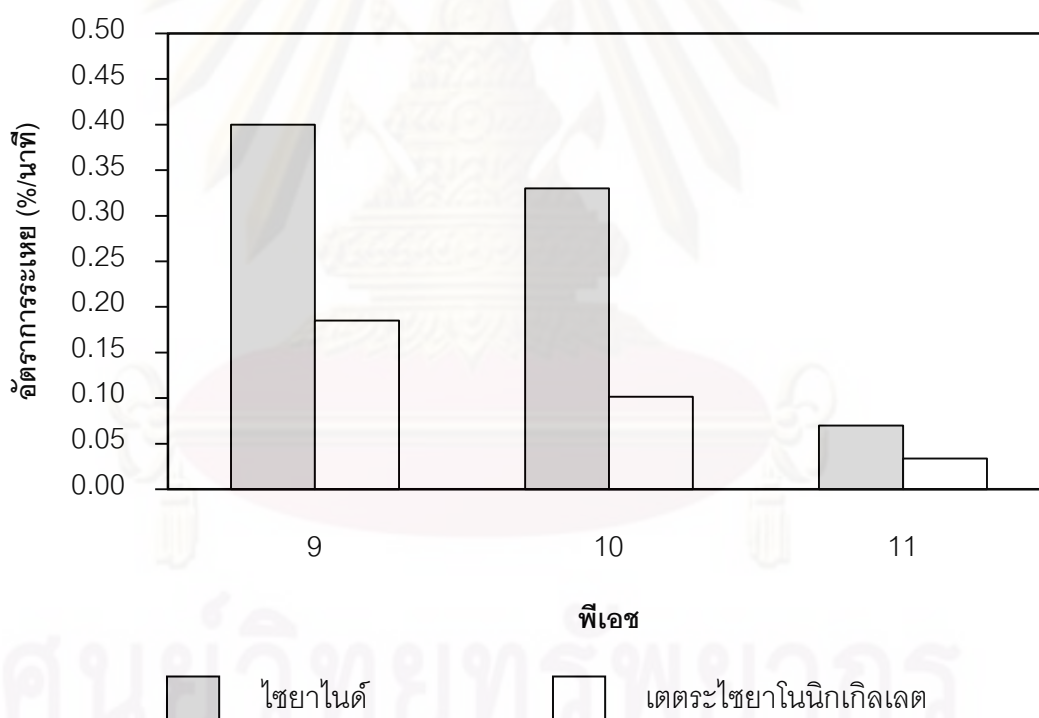
รูปที่ ค.1 สัญญาณของไซยาไนด์ จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี

## ค.2 การระเหยของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่สามารถระเหยได้เมื่ออยู่ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ดังนั้นจึงควรทราบถึงลักษณะในการระเหยของไซยาไนด์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจ และสามารถทำการทดลองได้อย่างเหมาะสม

การทดลองทำโดยเตรียมสารละลายไซยาไนด์ เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ซึ่งทำการทดลองที่ความเข้มข้น 50 100 250 และ 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์) ที่พีเอช 9 10 และ 11 นำสารละลายใส่ในภาชนะที่ใช้ในการทดลอง เปิดฝา และวางไว้ในตู้ดูดอากาศ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 และ 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์การระเหย

ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลต่ออัตราการระเหยที่เพิ่มขึ้น และอัตราการระเหยจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของไซยาไนด์อิสระ ในสารละลายต่างๆ กับพีเอช

สารละลายทั้ง 2 ตัว มีอัตราการระเหยของไซยาไนด์อิสระ ในแต่ละพีเอชมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สารละลายเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตไม่มีการระเหยของไซยาไนด์อิสระในทุกพีเอช

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นไซยาไนด์ ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะ เปิดฝา พีเอช 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

พีเอช	ตัวอย่าง	เวลา 0 นาที	เวลา 30 นาที	อัตราการระเหย		
		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์/นาที	%/นาที	%เฉลี่ย/นาที
9	ตัวอย่างที่ 1	483.23	445.93	37.30	0.26	0.40
	ตัวอย่างที่ 2	240.15	220.52	19.63	0.27	
	ตัวอย่างที่ 3	89.52	80.99	8.53	0.32	
	ตัวอย่างที่ 4	41.11	36.69	4.42	0.36	
10	ตัวอย่างที่ 1	481.30	451.03	30.27	0.21	0.33
	ตัวอย่างที่ 2	241.58	218.98	22.60	0.31	
	ตัวอย่างที่ 3	88.38	81.09	7.29	0.27	
	ตัวอย่างที่ 4	40.09	37.77	2.32	0.19	
11	ตัวอย่างที่ 1	480.15	475.98	4.17	0.03	0.07
	ตัวอย่างที่ 2	241.11	238.94	2.17	0.03	
	ตัวอย่างที่ 3	82.26	80.56	1.70	0.07	
	ตัวอย่างที่ 4	40.98	40.15	0.83	0.07	

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลด ที่เวลา 0 และ 30 นาที ในภาชนะ เปิดฝา พีเอช 9 10 และ 11 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

พีเอช	ตัวอย่าง	เวลา 0 นาที	เวลา 30 นาที	อัตราภาระเหย		
		ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์/นาที	%/นาที	%เฉลี่ย/นาที
9	ตัวอย่างที่ 1	301.12	291.02	10.10	0.11	0.19
	ตัวอย่างที่ 2	154.23	148.85	5.38	0.12	
	ตัวอย่างที่ 3	63.32	60.69	2.63	0.14	
	ตัวอย่างที่ 4	29.66	27.98	1.68	0.19	
10	ตัวอย่างที่ 1	302.23	297.01	5.22	0.06	0.10
	ตัวอย่างที่ 2	155.07	152.01	3.06	0.07	
	ตัวอย่างที่ 3	65.25	63.95	1.30	0.07	
	ตัวอย่างที่ 4	31.09	30.02	1.07	0.11	
11	ตัวอย่างที่ 1	299.97	299.01	0.96	0.01	0.03
	ตัวอย่างที่ 2	154.58	153.86	0.72	0.02	
	ตัวอย่างที่ 3	64.83	63.59	1.24	0.06	
	ตัวอย่างที่ 4	30.07	29.97	0.10	0.01	

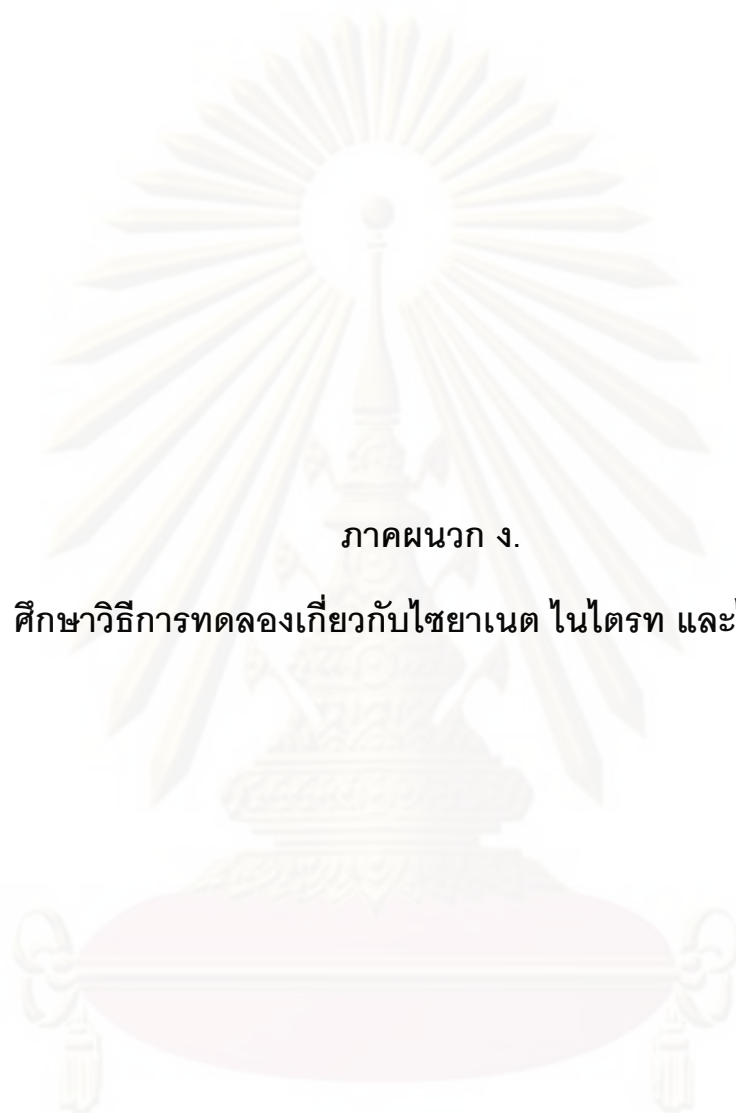
### ค.3 การเตรียมสารละลาย

สารละลายไซยาไนด์ เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต เตรียมโดยผสมโปตัสเซียมไซยาไนด์ 0.064 กรัม โปตัสเซียมเตตระไซยาโนนิกเกิลเลต 0.030 กรัม และโปตัสเซียมเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต 0.028 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ เพื่อให้สารละลายมีพีเอชมากกว่า 12 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายเข้มข้น 10,000 ไมโครโมลาร์ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับสารละลายที่ความเข้มข้นอื่นให้เจือจางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ สารละลายที่เตรียมแต่ละครั้งไม่ควรเก็บไว้ใช้งานเกิน 1 สัปดาห์ เนื่องจากสารละลายนี้ใช้ในการทำสารละลายมาตรฐานในการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ง.

ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

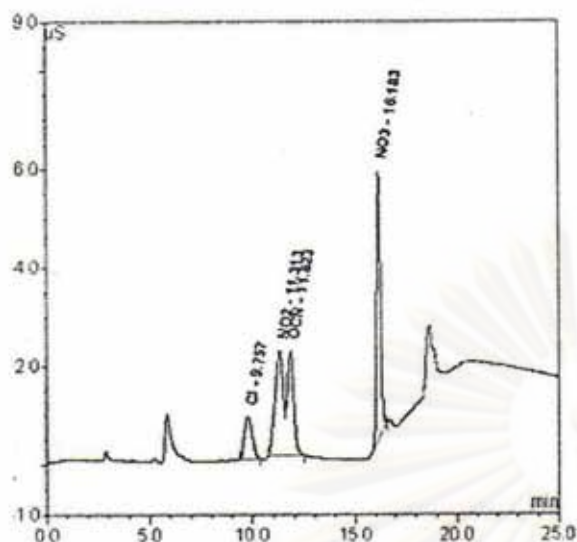
## ภาคผนวก ง.

### ศึกษาวิธีการทดลองเกี่ยวกับไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท

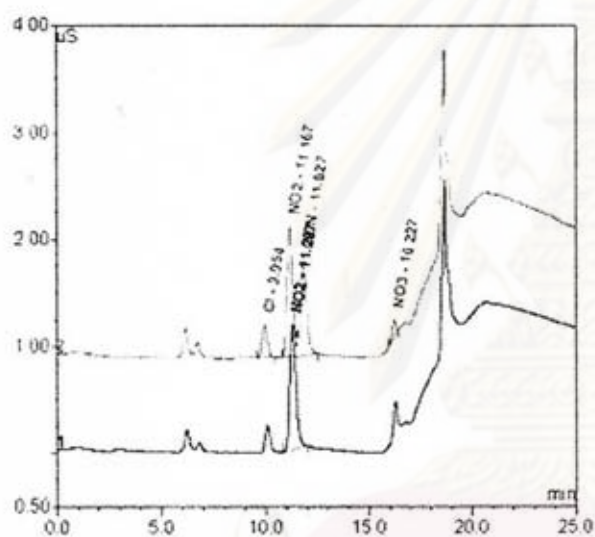
#### ง.1 การตรวจวัดความเข้มข้น

ไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ โดยมี ส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ดังนี้ ส่วนแยกสาร คือ คอลัมน์ AS16 ส่วนตรวจวัด คือ เครื่องตรวจวัด รุ่น ED50 ประกอบกับ Suppressor รุ่น ASRS 4 mm โดยใช้ Mode: Conductivity SRS Current เท่ากับ 137 mA อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส Reference Mobile Phase ที่ใช้ คือ สารละลาย โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ซึ่งผลิตจาก RFC โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น สารตั้งต้น อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เครื่อง RFC กำหนดความเข้มข้นโพตัสเซียม ไฮดรอกไซด์ 2.8 มิลลิโมลาร์ ถึง 55 มิลลิโมลาร์ ใช้ระยะเวลาเกรเดียน 5 นาที ที่โปรแกรมกำหนด เริ่มทำการเกรเดียนที่เวลา 12 นาที สิ้นสุดที่เวลา 25 นาที ระยะเวลาตรวจวัดตัวอย่าง 25 นาที และ เว้นช่วงให้ความเข้มข้นของ Mobile Phase คงที่อีก 5 นาที ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของ ไซยาเนต ไนไตรท และไนเตรท ดังรูปที่ ง.1

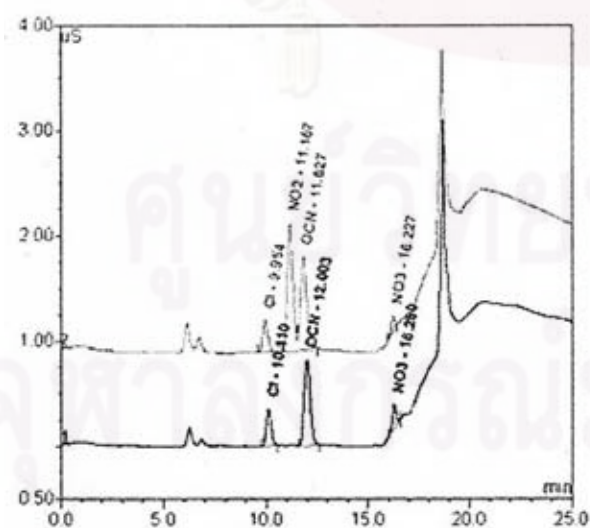
ไซยาเนต และไนไตรท จะมีสัญญาณติดกัน โดยไนไตรทจะปรากฏสัญญาณก่อน ดังรูปที่ ง.2 และไซยาเนตเป็นสัญญาณถัดไป ดังรูปที่ ง.3 สัญญาณทั้ง 2 มีเวลาปรากฏใกล้กันมาก และ เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย จากการทดลองพบว่า สัญญาณของคลอไรด์จะปรากฏก่อน สัญญาณของไนไตรทเล็กน้อย และสามารถใช่คลอไรด์เป็นสัญญาณอ้างอิงได้ ตัวอย่างสัญญาณ จากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างจริงที่มีการเติมคลอไรด์ลงไปเล็กน้อย ดังรูปที่ ง.4 หรืออีกวิธีหนึ่ง สามารถตรวจความแน่นอนได้ว่าเป็นสัญญาณของไนไตรท หรือไซยาเนตได้ โดยการเติม สารละลายมาตรฐานที่ใช้ลงไปในตัวอย่าง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจากสารละลาย มาตรฐาน ดังรูปที่ ง.5 จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณของไซยาเนตมีค่าสูงขึ้น



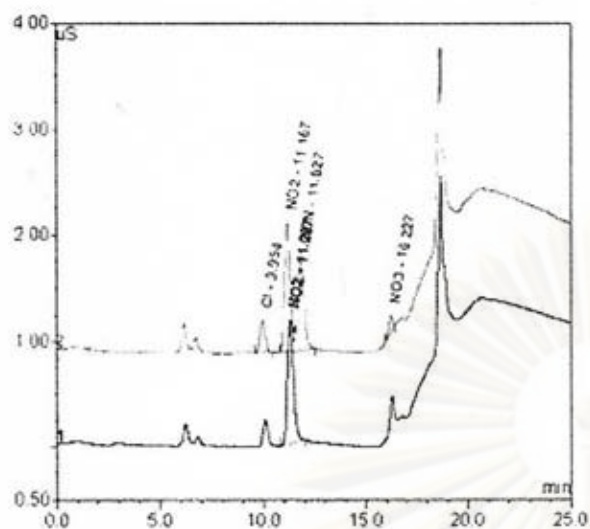
รูปที่ ง.1 สัญญาณของคลอไรด์ ไนโตรทไฮยานेत และไนเตรท จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟ



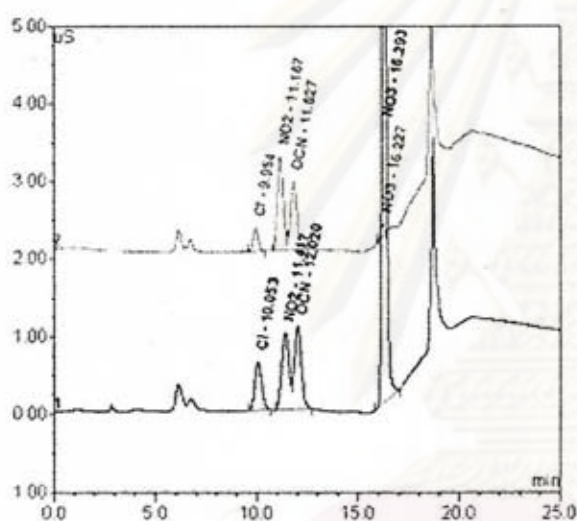
รูปที่ ง.2 ตำแหน่งสัญญาณของไนเตรท โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของไนเตรท และเส้นสีจางคือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ง.3 ตำแหน่งสัญญาณของไฮยานेत โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของไฮยานेत และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ง.4 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากตัวอย่างน้ำจริงกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ง.5 เปรียบเทียบตำแหน่งสัญญาณจากน้ำตัวอย่างจริงที่เติมสารละลายมาตรฐานลงไปกับสัญญาณจากสารละลายมาตรฐาน โดยเส้นสีเข้ม คือ สัญญาณของน้ำตัวอย่าง และเส้นสีจาง คือ สัญญาณของสารละลายมาตรฐาน



ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษากำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต  
จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ๑.1 ผลการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์  
จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกิดเลต (ก-1)

ตารางที่ ๑.1.1.ก ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนโตรท		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลี่ย	%	% เจลี่ย	%	% เจลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.05	31.12	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.25	9.07	0.84	48.55	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.25	9.03	0.72	47.23	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.25	8.98	0.91	48.05	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.03	29.85	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	49.56	9.09	10.05	5.01	41.55	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	49.56	9.09	10.08	4.54	40.26	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	49.56	9.09	10.09	3.94	41.68	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.03	27.96	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	48.26	9.25	11.09	6.63	35.98	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	48.26	9.25	11.11	5.01	37.01	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	48.26	9.25	11.05	7.95	36.04	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		

ตารางที่ จ.1.1.ข ความเข้มข้นเตตระไฮยานิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไฮยาไนต์ทั้งหมด	ไฮยาไนต์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาไนต์เชิงซ้อน	ไฮยาไนต์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาไนต์เชิงซ้อน	ไฮยาไนต์ทั้งหมด		ไฮยาไนต์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	50.00	31.12	0.00	0.00	0.00	18.88	0.84	48.55	0.00	0.00	0.61	97.10	95.89	96.77	93.47	
							0.72	47.23	0.00	0.00	2.05	94.46		89.14		
							0.91	48.05	0.00	0.00	1.04	96.10		94.49		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	50.00	29.85	0.00	0.00	0.00	20.15	5.01	41.55	0.00	0.00	3.44	83.10	82.33	82.93	78.46	
							4.54	40.26	0.00	0.00	5.20	80.52		74.19		
							3.94	41.68	0.00	0.00	4.38	83.36		78.26		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	50.00	27.96	0.00	0.00	0.00	22.04	6.63	35.98	0.00	0.00	7.39	71.96	72.69	66.47	67.66	
							5.01	37.01	0.00	0.00	7.98	74.02		63.79		
							7.95	36.04	0.00	0.00	6.01	72.08		72.73		

ตารางที่ จ.1.2.ก ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนต์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไฮยาโนต์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาเนต		ไนโตรท		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลีส	%	% เจลีส	%	% เจลีส
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.01	59.68	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	98.26	10.03	8.91	1.58	94.58	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	98.26	10.03	8.97	1.62	95.01	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	98.26	10.03	8.89	1.47	93.98	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			9.98	62.02	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.47	9.95	9.23	82.03	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.47	10.05	9.01	82.98	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.47	10.04	7.77	83.06	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.01	60.56	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	102.17	9.47	10.98	17.01	69.32	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	102.17	9.47	11.03	16.88	71.11	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	102.17	9.47	11.05	18.32	69.95	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.2.ข ความเข้มข้นเตตระไฮยานิกเกล็ดเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไฮยาไนด์ทั้งหมด	ไฮยาไนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาไนด์เชิงซ้อน	ไฮยาไนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาไนด์เชิงซ้อน	ไฮยาไนด์ทั้งหมด		ไฮยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	100.00	59.68	0.00	0.00	0.00	40.32	1.58	94.58	0.00	0.00	3.84	94.58	94.52	90.48	90.28	
							1.62	95.01	0.00	0.00	3.37	95.01		91.64		
							1.47	93.98	0.00	0.00	4.55	93.98		88.72		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	100.00	62.02	0.00	0.00	0.00	37.98	9.23	82.03	0.00	0.00	8.74	82.03	82.69	76.99	77.25	
							9.01	82.98	0.00	0.00	8.01	82.98		78.91		
							7.77	83.06	0.00	0.00	9.17	83.06		75.86		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	100.00	60.56	0.00	0.00	0.00	39.44	17.01	69.32	0.00	0.00	13.67	69.32	70.13	65.34	68.38	
							16.88	71.11	0.00	0.00	12.01	71.11		69.55		
							18.32	69.95	0.00	0.00	11.73	69.95		70.26		

ตารางที่ จ.1.3.ก ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนต์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไฮยาโนต์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาเนต		ไนโตรท		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลีส	%	% เจลีส	%	% เจลีส
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.03	156.64	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	244.57	10.59	9.01	4.98	229.11	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	244.57	10.59	8.95	5.81	232.10	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	244.57	10.59	9.04	5.23	230.19	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.03	154.32	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	244.57	10.59	9.97	6.89	216.98	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	244.57	10.59	9.94	7.01	217.77	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	244.57	10.59	10.01	7.94	216.01	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			10.98	155.68	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	248.74	10.62	11.03	24.12	195.03	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	248.74	10.62	11.05	23.09	193.87	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	248.74	10.62	11.07	24.95	193.95	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	



ตารางที่ จ.1.3.ข ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไฮยาโนด์ทั้งหมด	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์ทั้งหมด		ไฮยาโนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	250.00	156.64	0.00	0.00	0.00	93.36	4.98	229.11	0.00	0.00	15.91	91.64	92.19	82.96	84.80	
							5.81	232.10	0.00	0.00	12.09	92.84		87.05		
							5.23	230.19	0.00	0.00	14.58	92.08		84.38		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	250.00	154.32	0.00	0.00	0.00	95.68	6.89	216.98	0.00	0.00	26.13	86.79	86.77	72.69	73.04	
							7.01	217.77	0.00	0.00	25.22	87.11		73.64		
							7.94	216.01	0.00	0.00	26.05	86.40		72.77		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	250.00	155.68	0.00	0.00	0.00	94.32	24.12	195.03	0.00	0.00	30.85	78.01	77.71	67.29	66.43	
							23.09	193.87	0.00	0.00	33.04	77.55		64.97		
							24.95	193.95	0.00	0.00	31.10	77.58		67.03		

ตารางที่ จ.1.4.ก ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนต์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไฮยาโนต์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาเนต		ไนโตรท		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลีส	%	% เจลีส	%	% เจลีส
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.01	302.45	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	494.78	10.65	9.07	8.15	468.78	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	494.78	10.65	9.80	7.06	469.64	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	494.78	10.65	8.96	7.95	470.01	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.05	297.55	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	486.52	10.57	10.09	33.21	425.98	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	486.52	10.57	10.11	29.87	422.97	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	486.52	10.57	10.07	32.45	426.11	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			10.98	297.94	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	494.78	10.65	11.03	52.68	387.98	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	494.78	10.65	11.08	49.46	385.32	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	494.78	10.65	11.05	53.31	390.11	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.4.ข ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไฮยาโนด์ทั้งหมด	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์ทั้งหมด		ไฮยาโนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	500.00	302.45	0.00	0.00	0.00	197.55	8.15	468.78	0.00	0.00	23.07	93.76	93.90	88.32	88.46	
							7.06	469.64	0.00	0.00	23.30	93.93		88.21		
							7.95	470.01	0.00	0.00	22.04	94.00		88.84		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	500.00	297.55	0.00	0.00	0.00	202.45	33.21	425.98	0.00	0.00	40.81	85.20	85.00	79.84	78.69	
							29.87	422.97	0.00	0.00	47.16	84.59		76.71		
							32.45	426.11	0.00	0.00	41.44	85.22		79.53		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	500.00	297.94	0.00	0.00	0.00	202.06	52.68	387.98	0.00	0.00	59.34	77.60	77.56	70.63	70.12	
							49.46	385.32	0.00	0.00	65.22	77.06		67.72		
							53.31	390.11	0.00	0.00	56.58	78.02		72.00		

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาคัดสรรส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไชยาไนต์ในการทำปฏิกิริยา จากน้ำเสียสังเคราะห์  
เตตระไชยาไนติกเกิดเลต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์ (ก-2)

ตารางที่ จ.2.1 พีเอช 9 ความเข้มข้นเตตระไชยาไนติกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไชยาไนต์)

เฟอร์เรต	ไชยาไนต์อิสระ	ไชยาไนต์เชิงซ้อน	ไชยาไนต์ทั้งหมด	ไชยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	300.72	199.28	500.00	0.00	0.00	0.00
98.76	226.65	163.04	389.69	110.31	0.00	0.00
202.23	154.69	145.35	300.04	199.96	0.00	0.00
297.98	118.87	71.29	190.16	309.84	0.00	0.00
402.31	46.59	42.64	89.23	410.77	0.00	0.00
486.52	5.48	28.84	34.32	465.68	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
93.14				100	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์เชิงซ้อน (%)						
85.53						

ตารางที่ จ.2.2 พี่เชช 10 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด)

เฟอร์เรต	ไฮยาโนดอิสระ	ไฮยาโนดเชิงซ้อน	ไฮยาโนดทั้งหมด	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	301.15	198.85	500.00	0.00	0.00	0.00
101.30	254.69	185.12	439.81	60.19	0.00	0.00
206.09	195.67	161.64	357.31	142.69	0.00	0.00
307.01	167.77	87.61	255.38	244.62	0.00	0.00
397.87	82.23	55.54	137.77	362.23	0.00	0.00
506.09	32.11	38.02	70.13	429.87	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนดทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
85.97				100.00	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนดเชิงซ้อน (%)						
80.88						



ตารางที่ จ.2.3 พีเอช 11 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด)

เฟอร์เรต	ไฮยาโนดอิสระ	ไฮยาโนดเชิงซ้อน	ไฮยาโนดทั้งหมด	ไฮยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	299.87	200.13	500.00	0.00	0.00	0.00
103.49	279.89	189.85	469.74	30.26	0.00	0.00
203.54	220.19	169.83	390.02	109.98	0.00	0.00
306.24	172.21	107.81	280.02	219.98	0.00	0.00
404.44	112.68	91.54	204.22	295.78	0.00	0.00
495.95	49.98	54.17	104.15	395.85	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนดทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
79.17				100	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนดเชิงซ้อน (%)						
72.93						

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาดัชนีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์  
เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต (ก-3)

ตารางที่ จ.3.1 พีเอช 9 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

เวลา	ไซยาไนด์อิสระ		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	297.78	100.00	202.22	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	203.65	68.39	152.09	75.21	355.74	71.15	144.26	0.00	0.00
5	145.23	48.77	124.21	61.42	269.44	53.89	230.56	0.00	0.00
10	95.68	32.13	82.26	40.68	177.94	35.59	322.06	0.00	0.00
20	77.59	26.06	72.93	36.06	150.52	30.10	349.48	0.00	0.00
30	46.67	15.67	65.87	32.57	112.54	22.51	387.46	0.00	0.00
60	32.16	10.80	56.55	27.96	88.71	17.74	411.29	0.00	0.00
90	24.98	8.39	43.33	21.43	68.31	13.66	431.69	0.00	0.00
120	14.36	4.82	42.58	21.06	56.94	11.39	443.06	0.00	0.00
150	11.65	3.91	39.01	19.29	50.66	10.13	449.34	0.00	0.00
180	7.45	2.50	36.91	18.25	44.36	8.87	455.64	0.00	0.00
210	7.20	2.42	35.21	17.41	42.41	8.48	457.59	0.00	0.00
240	6.12	2.06	34.65	17.13	40.77	8.15	459.23	0.00	0.00
300	5.85	1.96	34.04	16.83	39.89	7.98	460.11	0.00	0.00
พีเอช		9.04							
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)		498.56							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไซยาไนด์ทั้งหมด (%)		92.02							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไซยาไนด์เชิงซ้อน (%)		83.17							

ตารางที่ จ.3.2 พีเอช 10 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด)

เวลา	ไฮยาโนดอิสระ		ไฮยาโนดเชิงซ้อน		ไฮยาโนดทั้งหมด		ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	299.84	100.00	200.16	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	238.23	0.00	181.02	90.44	419.25	83.85	80.75	0.00	0.00
5	185.36	61.82	151.10	75.49	336.46	67.29	163.54	0.00	0.00
10	137.98	46.02	121.84	60.87	259.82	51.96	240.18	0.00	0.00
20	120.39	40.15	100.84	50.38	221.23	44.25	278.77	0.00	0.00
30	92.23	30.76	77.62	38.78	169.85	33.97	330.15	0.00	0.00
60	70.56	23.53	67.15	33.55	137.71	27.54	362.29	0.00	0.00
90	53.97	18.00	60.87	30.41	114.84	22.97	385.16	0.00	0.00
120	48.97	16.33	56.35	28.15	105.32	21.06	394.68	0.00	0.00
150	44.09	14.70	55.78	27.87	99.87	19.97	400.13	0.00	0.00
180	40.16	13.39	49.95	24.96	90.11	18.02	409.89	0.00	0.00
210	36.01	12.01	46.22	23.09	82.23	16.45	417.77	0.00	0.00
240	35.12	11.71	39.43	19.70	74.55	14.91	425.45	0.00	0.00
300	34.52	11.51	37.62	18.79	72.14	14.43	427.86	0.00	0.00
พีเอช		10.05							
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)		500.86							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนดทั้งหมด (%)		85.57							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนดเชิงซ้อน (%)		81.21							

ตารางที่ จ.3.3 พีเอช 11 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 500 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด)

เวลา	ไฮยาโนดอิสระ		ไฮยาโนดเชิงซ้อน		ไฮยาโนดทั้งหมด		ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	303.31	100.00	196.69	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	257.94	85.04	191.70	97.46	449.64	89.93	50.36	0.00	0.00
5	231.16	76.21	172.68	87.79	403.84	80.77	96.16	0.00	0.00
10	184.69	60.89	136.62	69.46	321.31	64.26	178.69	0.00	0.00
20	143.56	47.33	118.08	60.03	261.64	52.33	238.36	0.00	0.00
30	92.23	30.41	99.62	50.65	191.85	38.37	308.15	0.00	0.00
60	83.14	27.41	92.32	46.94	175.46	35.09	324.54	0.00	0.00
90	69.98	23.07	80.28	40.82	150.26	30.05	349.74	0.00	0.00
120	63.32	20.88	73.32	37.28	136.64	27.33	363.36	0.00	0.00
150	56.15	18.51	68.69	34.92	124.84	24.97	375.16	0.00	0.00
180	52.14	17.19	65.60	33.35	117.74	23.55	382.26	0.00	0.00
210	51.55	17.00	59.59	30.30	111.14	22.23	388.86	0.00	0.00
240	48.92	16.13	59.82	30.41	108.74	21.75	391.26	0.00	0.00
300	48.21	15.89	57.01	28.98	105.22	21.04	394.78	0.00	0.00
พีเอช		11.05							
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)		501.23							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนดทั้งหมด (%)		78.96							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนดเชิงซ้อน (%)		71.02							



ภาคผนวก ฉ.

ผลการศึกษากำจัดเตตระไฮยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต  
จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเฟอร์เรต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ๑.1 ผลการศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน และสารผลิตภัณฑ์  
จากน้ำเสียสังเคราะห์เตตระไฮยาโนนิกเกลเลต และเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตต (ข-1)

ตารางที่ ๑.1.1.ก อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกลเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
									ไซยาเนต		ไนไตรท		ไนเตรท	
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ ไมโครโมลาร์	ไซยาเนต ไมโครโมลาร์	ไนไตรท ไมโครโมลาร์	ไนเตรท ไมโครโมลาร์	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย	%	% เฉลี่ย
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			8.97	26.64	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	152.65	10.05	9.05	2.34	40.02	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	152.65	10.05	9.06	1.65	39.86	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	152.65	10.05	9.06	3.36	41.05	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.03	25.02	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	153.31	10.03	10.07	1.85	46.01	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	153.31	10.03	10.06	3.04	45.88	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	153.31	10.03	10.04	2.98	44.36	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			10.98	27.03	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	149.82	10.01	11.07	4.11	32.06	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	149.82	10.01	11.08	3.06	30.99	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	149.82	10.01	11.05	2.98	33.47	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.1.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	150.00	26.64	0.00	0.00	0.00	123.36	2.34	40.02	0.00	0.00	107.64	26.68	26.87	12.74	13.07	
							1.65	39.86	0.00	0.00	108.49	26.57		12.05		
							3.36	41.05	0.00	0.00	105.59	27.37		14.40		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	150.00	25.02	0.00	0.00	0.00	124.98	1.85	46.01	0.00	0.00	102.14	30.67	30.28	18.27	18.42	
							3.04	45.88	0.00	0.00	101.08	30.59		19.12		
							2.98	44.36	0.00	0.00	102.66	29.57		17.86		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	150.00	27.03	0.00	0.00	0.00	122.97	4.11	32.06	0.00	0.00	113.83	21.37	21.45	7.43	6.93	
							3.06	30.99	0.00	0.00	115.95	20.66		5.71		
							2.98	33.47	0.00	0.00	113.55	22.31		7.66		

ตารางที่ จ.1.2.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลีย์	%	% เจลีย์	%	% เจลีย์
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.02	55.04	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	303.32	10.56	9.05	2.84	79.02	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	303.32	10.56	9.06	3.01	75.37	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	303.32	10.56	9.09	1.98	77.09	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.05	51.69	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	306.08	10.55	9.85	2.55	89.56	0.00	0.00	100.00	98.95	0.00	1.05	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	306.08	10.55	9.89	1.03	92.45	3.01	0.00	96.85		3.15		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	306.08	10.55	10.01	2.01	90.54	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.03	53.99	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	298.81	10.53	11.02	3.65	64.02	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	298.81	10.53	11.02	4.01	67.05	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	298.81	10.53	10.99	3.08	66.93	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.2.๒ อัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์ และความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไฮยาโนด์ทั้งหมด	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์ทั้งหมด		ไฮยาโนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	300.00	55.04	0.00	0.00	0.00	244.96	2.84	79.02	0.00	0.00	218.14	26.34	25.72	10.95	10.10	
							3.01	75.37	0.00	0.00	221.62	25.12		9.53		
							1.98	77.09	0.00	0.00	220.93	25.70		9.81		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	300.00	51.69	0.00	0.00	0.00	248.31	2.55	89.56	0.00	0.00	207.89	29.85	30.62	16.28	16.93	
							1.03	92.45	3.01	0.00	203.51	31.82		18.04		
							2.01	90.54	0.00	0.00	207.45	30.18		16.46		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	300.00	53.99	0.00	0.00	0.00	246.01	3.65	64.02	0.00	0.00	232.33	21.34	22.00	5.56	6.34	
							4.01	67.05	0.00	0.00	228.94	22.35		6.94		
							3.08	66.93	0.00	0.00	229.99	22.31		6.51		

ตารางที่ จ.1.3.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.08	28.65	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	98.79	10.01	9.00	2.38	43.03	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	98.79	10.01	9.02	1.25	42.95	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	98.79	10.01	9.01	2.03	44.04	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.01	27.32	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	101.62	9.89	10.02	1.03	42.65	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	101.62	9.89	9.98	2.60	44.02	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	101.62	9.89	10.04	2.03	43.85	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.03	26.66	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	103.35	9.45	11.05	3.03	38.56	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	103.35	9.45	11.07	1.15	41.05	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	103.35	9.45	11.08	3.87	39.71	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		



ตารางที่ จ.1.3.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	100.00	28.65	0.00	0.00	0.00	71.35	2.38	43.03	0.00	0.00	54.59	43.03	43.34	23.49	23.23	
							1.25	42.95	0.00	0.00	55.80	42.95		21.79		
							2.03	44.04	0.00	0.00	53.93	44.04		24.41		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	100.00	27.32	0.00	0.00	0.00	72.68	1.03	42.65	0.00	0.00	56.32	42.65	43.51	22.51	24.87	
							2.60	44.02	0.00	0.00	53.38	44.02		26.55		
							2.03	43.85	0.00	0.00	54.12	43.85		25.54		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	100.00	26.66	0.00	0.00	0.00	73.34	3.03	38.56	0.00	0.00	58.41	38.56	39.77	20.36	21.54	
							1.15	41.05	0.00	0.00	57.80	41.05		21.19		
							3.87	39.71	0.00	0.00	56.42	39.71		23.07		

ตารางที่ จ.1.4.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			8.97	55.98	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	198.74	10.48	9.02	2.33	88.88	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	198.74	10.48	9.06	2.01	85.69	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	198.74	10.48	9.05	1.85	87.71	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.02	56.63	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	204.31	10.49	10.03	1.77	91.05	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	204.31	10.49	10.03	3.04	93.33	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	204.31	10.49	10.05	2.85	93.65	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			10.93	60.01	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	202.09	10.49	11.01	3.01	79.87	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	202.09	10.49	10.98	2.98	82.03	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	202.09	10.49	10.97	3.56	83.33	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		

ตารางที่ จ.1.4.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	200.00	55.98	0.00	0.00	0.00	144.02	2.33	88.88	0.00	0.00	108.79	44.44	43.71	24.46	23.27	
							2.01	85.69	0.00	0.00	112.30	42.85		22.02		
							1.85	87.71	0.00	0.00	110.44	43.86		23.32		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	200.00	56.63	0.00	0.00	0.00	143.37	1.77	91.05	0.00	0.00	107.18	45.53	46.34	25.24	26.92	
							3.04	93.33	0.00	0.00	103.63	46.67		27.72		
							2.85	93.65	0.00	0.00	103.50	46.83		27.81		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	200.00	60.01	0.00	0.00	0.00	139.99	3.01	79.87	0.00	0.00	117.12	39.94	40.87	16.34	17.80	
							2.98	82.03	0.00	0.00	114.99	41.02		17.86		
							3.56	83.33	0.00	0.00	113.11	41.67		19.20		

ตารางที่ จ.1.5.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.03	134.03	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	486.52	10.58	9.09	3.58	220.62	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	486.52	10.58	9.04	4.01	222.77	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	486.52	10.58	9.04	3.89	218.02	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			10.95	136.58	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	488.70	10.61	10.02	3.04	228.77	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	488.70	10.61	10.05	2.87	225.69	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	488.70	10.61	10.03	2.62	229.45	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.02	131.10	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	494.75	10.63	11.05	5.67	199.77	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	494.75	10.63	11.06	4.56	201.56	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	494.75	10.63	11.03	6.01	198.63	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.5.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	500.00	134.03	0.00	0.00	0.00	365.97	3.58	220.62	0.00	0.00	275.80	44.12	44.09	24.64	24.67	
							4.01	222.77	0.00	0.00	273.22	44.55		25.34		
							3.89	218.02	0.00	0.00	278.09	43.60		24.01		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	500.00	136.58	0.00	0.00	0.00	363.42	3.04	228.77	0.00	0.00	268.19	45.75	45.59	26.20	25.93	
							2.87	225.69	0.00	0.00	271.44	45.14		25.31		
							2.62	229.45	0.00	0.00	267.93	45.89		26.28		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	500.00	131.10	0.00	0.00	0.00	368.90	5.67	199.77	0.00	0.00	294.56	39.95	40.00	20.15	20.14	
							4.56	201.56	0.00	0.00	293.88	40.31		20.34		
							6.01	198.63	0.00	0.00	295.36	39.73		19.93		



ตารางที่ จ.1.6.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			8.82	27.45	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	77.01	9.50	8.99	2.01	42.05	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	77.07	9.50	8.95	1.65	40.95	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	77.07	9.50	8.91	2.05	43.77	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			9.84	27.32	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	74.94	9.45	9.87	2.06	43.95	0.00	0.00	100.00	97.05	0.00	2.95	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	74.94	9.45	9.85	1.75	45.06	3.06	0.00	93.64		6.36		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	74.94	9.45	9.87	1.56	44.78	1.14	0.00	97.52		2.48		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.10	26.66	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	75.75	9.47	11.04	3.06	37.68	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	75.75	9.47	10.99	2.98	42.36	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	75.75	9.47	10.98	3.65	40.00	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		

ตารางที่ จ.1.6.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 50 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	75.00	27.45	0.00	0.00	0.00	47.55	2.01	42.05	0.00	0.00	30.94	56.07	56.34	34.93	35.14	
							1.65	40.95	0.00	0.00	32.40	54.60		31.86		
							2.05	43.77	0.00	0.00	29.18	58.36		38.63		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	75.00	27.32	0.00	0.00	0.00	47.68	2.06	43.95	0.00	0.00	28.99	58.60	61.33	39.20	42.93	
							1.75	45.06	3.06	0.00	25.13	64.16		47.29		
							1.56	44.78	1.14	0.00	27.52	61.23		42.28		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	75.00	26.66	0.00	0.00	0.00	48.34	3.06	37.68	0.00	0.00	34.26	50.24	53.35	29.13	34.31	
							2.98	42.36	0.00	0.00	29.66	56.48		38.64		
							3.65	40.00	0.00	0.00	31.35	53.33		35.15		

ตารางที่ จ.1.7.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์					
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท	
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			9.01	54.78	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	148.73	10.02	9.03	2.56	89.65	0.00	0.00	100.00	99.79	0.00	0.21	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	148.73	10.02	9.03	3.00	90.01	0.56	0.00	99.38		0.62		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	148.73	10.02	8.99	2.01	93.03	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			9.99	53.64	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	152.21	10.03	10.00	0.91	95.45	2.05	0.00	97.90	98.70	2.10	1.30	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	152.21	10.03	10.02	1.56	96.56	1.77	0.00	98.20		1.80		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	152.21	10.03	10.01	2.03	92.65	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.08	57.77	0.00	0.00	0.00						
	ตัวอย่างที่ 1	148.46	10.02	11.06	2.06	80.23	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ตัวอย่างที่ 2	148.46	10.02	11.09	3.45	83.45	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	
	ตัวอย่างที่ 3	148.46	10.02	11.06	4.01	85.65	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00	

ตารางที่ จ.1.7.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 100 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	150.00	54.78	0.00	0.00	0.00	95.22	2.56	89.65	0.00	0.00	57.79	59.77	60.72	39.31	40.78	
							3.00	90.01	0.56	0.00	56.43	60.38		40.74		
							2.01	93.03	0.00	0.00	54.96	62.02		42.28		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	150.00	53.64	0.00	0.00	0.00	96.36	0.91	95.45	2.05	0.00	51.59	65.00	64.11	46.46	45.68	
							1.56	96.56	1.77	0.00	50.11	65.55		48.00		
							2.03	92.65	0.00	0.00	55.32	61.77		42.59		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	150.00	57.77	0.00	0.00	0.00	92.23	2.06	80.23	0.00	0.00	67.71	53.49	55.41	26.59	30.92	
							3.45	83.45	0.00	0.00	63.10	55.63		31.58		
							4.01	85.65	0.00	0.00	60.34	57.10		34.58		

ตารางที่ จ.1.8.ก อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ตัวอย่าง	สารละลายเฟอร์เรต		ผลการตรวจวัดน้ำตัวอย่าง					สารผลิตภัณฑ์						
		ไมโครโมลาร์	พีเอช	พีเอช	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท์	ไนเตรท	ไซยาเนต		ไนไตรท์		ไนเตรท		
					ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	%	% เจลลี่	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	Blank			8.95	140.65	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	378.06	10.58	9.06	2.38	222.35	1.32	0.00	99.41	99.51	0.59	0.49	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	378.06	10.58	9.08	1.95	219.87	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	378.06	10.58	9.05	3.61	223.64	2.01	0.00	99.11		0.89		0.00		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	Blank			9.98	138.87	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	376.13	10.56	10.09	2.06	230.00	0.00	0.00	100.00	99.77	0.00	0.23	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	376.13	10.56	10.04	2.45	228.78	0.56	0.00	99.76		0.24		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	376.13	10.56	10.06	3.65	227.77	1.03	0.00	99.55		0.45		0.00		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	Blank			11.03	130.65	0.00	0.00	0.00							
	ตัวอย่างที่ 1	375.61	10.55	10.97	4.32	203.01	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	ตัวอย่างที่ 2	375.61	10.55	10.88	5.01	207.77	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		
	ตัวอย่างที่ 3	375.61	10.55	11.01	3.55	206.65	0.00	0.00	100.00		0.00		0.00		



ตารางที่ จ.1.8.๗ อัตราส่วนโดยโมลแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 2 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์ และความเข้มข้นแต่ละไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นเริ่มต้น						ความเข้มข้นสุดท้าย						ประสิทธิภาพในการกำจัด			
	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		
	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	%	%เฉลี่ย	%	%เฉลี่ย	
ชุดที่ 1 (พีเอช 9)	375.00	140.65	0.00	0.00	0.00	234.35	2.38	222.35	1.32	0.00	148.95	59.65	59.48	36.44	36.30	
							1.95	219.87	0.00	0.00	153.18	58.63		34.64		
							3.61	223.64	2.01	0.00	145.74	60.17		37.81		
ชุดที่ 2 (พีเอช 10)	375.00	138.87	0.00	0.00	0.00	236.13	2.06	230.00	0.00	0.00	142.94	61.33	61.17	39.47	39.48	
							2.45	228.78	0.56	0.00	143.21	61.16		39.35		
							3.65	227.77	1.03	0.00	142.55	61.01		39.63		
ชุดที่ 3 (พีเอช 11)	375.00	130.65	0.00	0.00	0.00	244.35	4.32	203.01	0.00	0.00	167.67	54.14	54.88	31.38	32.52	
							5.01	207.77	0.00	0.00	162.22	55.41		33.61		
							3.55	206.65	0.00	0.00	164.80	55.11		32.56		

**ตารางที่ ๑.2** ผลการศึกษ้อัตราส่วนโดยโมลเฟอร์เรตต่อไซยาไนด์ในการทำปฏิกิริยา จากน้ำเสียสังเคราะห์  
เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน  
และสารผลิตภัณฑ์ (ข-2)

**ตารางที่ ๑.2.1** พีเอช 9 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)  
และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์

เฟอร์เรต	ไซยาไนด์อิสระ	ไซยาไนด์เชิงซ้อน	ไซยาไนด์ทั้งหมด	ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	139.52	360.48	500.00	0.00	0.00	0.00
105.52	105.75	307.80	413.55	86.45	0.00	0.00
197.98	76.85	236.06	312.91	187.09	0.00	0.00
301.98	24.32	260.62	284.94	215.06	0.00	0.00
406.64	5.36	275.09	280.45	219.55	0.00	0.00
498.59	2.44	277.24	279.68	220.32	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
44.06				100.00	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เชิงซ้อน (%)						
23.09						

ตารางที่ ๑.2.2 พีเอส 10 ความเข้มข้นเตตระไฮยานอนิกเกล็ดเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาไนต์)

และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยานอนิกเกล็ดต่อเฮกซะไฮยานอนิโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไฮยาไนต์

เฟอร์เรต	ไฮยาไนต์อิสระ	ไฮยาไนต์เชิงซ้อน	ไฮยาไนต์ทั้งหมด	ไฮยาเนต	ไนไตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	132.03	367.97	500.00	0.00	0.00	0.00
98.79	101.06	325.52	426.58	73.42	0.00	0.00
205.69	74.65	248.58	323.23	176.77	0.00	0.00
298.49	20.41	260.60	281.01	218.99	0.00	0.00
403.32	3.06	273.90	276.96	223.04	0.00	0.00
503.41	2.11	272.53	274.64	225.36	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์ทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
45.07				100.00	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาไนต์เชิงซ้อน (%)						
25.94						

ตารางที่ จ.2.3 พีเอส 11 ความเข้มข้นเตตระไฮยานอนิกเกล็ดเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยานอนิกเกล็ดต่อเฮกซะไฮยานอนิโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์

เฟอร์เรต	ไฮยาโนด์อิสระ	ไฮยาโนด์เชิงซ้อน	ไฮยาโนด์ทั้งหมด	ไฮยานेत	ไนโตรท	ไนเตรท
ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0.00	132.33	367.67	500.00	0.00	0.00	0.00
102.25	104.59	342.40	446.99	53.01	0.00	0.00
201.06	72.23	279.71	351.94	148.06	0.00	0.00
305.98	25.77	277.90	303.67	196.33	0.00	0.00
405.18	6.59	292.05	298.64	201.36	0.00	0.00
497.77	4.85	289.73	294.58	205.42	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์ทั้งหมด (%)				สารผลิตภัณฑ์ (%)		
41.08				100.00	0.00	0.00
ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮยาโนด์เชิงซ้อน (%)						
21.20						

**ตารางที่ ๑.3** ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์เรตกับไซยาไนด์เชิงซ้อน จากน้ำเสียสังเคราะห์  
เตตระไซยาโนนิกเกิลเลต และเฮกซะไซยาโนโคบอลเตต (ข-3)

**ตารางที่ ๑.3.1** พีเอช 9 ความเข้มข้นเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไซยาไนด์)

และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไซยาโนนิกเกิลเลตต่อเฮกซะไซยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไซยาไนด์

เวลา	ไซยาไนด์อิสระ		ไซยาไนด์เชิงซ้อน		ไซยาไนด์ทั้งหมด		ไซยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	138.75	100.00	361.25	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	134.36	96.84	322.27	89.21	456.63	91.33	43.37	0.00	0.00
5	68.72	49.53	313.05	86.66	381.77	76.35	118.23	0.00	0.00
10	55.68	40.13	294.35	81.48	350.03	70.01	149.97	0.00	0.00
20	42.21	30.42	287.78	79.66	329.99	66.00	170.01	0.00	0.00
30	23.32	16.81	283.36	78.44	306.68	61.34	193.32	0.00	0.00
60	13.61	9.81	290.83	80.51	304.44	60.89	195.56	0.00	0.00
90	7.87	5.67	284.36	78.72	292.23	58.45	207.77	0.00	0.00
120	5.61	4.04	285.43	79.01	291.04	58.21	208.96	0.00	0.00
150	4.65	3.35	282.03	78.07	286.68	57.34	213.32	0.00	0.00
180	3.98	2.87	279.39	77.34	283.37	56.67	216.63	0.00	0.00
210	3.21	2.31	279.73	77.43	282.94	56.59	217.06	0.00	0.00
240	3.01	2.17	278.56	77.11	281.57	56.31	218.43	0.00	0.00
300	2.94	2.12	277.52	76.82	280.46	56.09	219.54	0.00	0.00
พีเอช		9.01							
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)		501.23							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไซยาไนด์ทั้งหมด (%)		43.91							
ประสิทธิภาพการกำจัด ไซยาไนด์เชิงซ้อน (%)		23.18							



ตารางที่ ๑.3.2 พีเอช 10 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์

เวลา	ไฮยาโนด์อิสระ		ไฮยาโนด์เชิงซ้อน		ไฮยาโนด์ทั้งหมด		ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	141.42	100.00	358.58	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	138.65	98.04	323.71	90.28	462.36	92.47	37.64	0.00	0.00
5	56.32	39.82	308.03	85.90	364.35	72.87	135.65	0.00	0.00
10	44.13	31.20	290.45	81.00	334.58	66.92	165.42	0.00	0.00
20	39.76	28.11	279.01	77.81	318.77	63.75	181.23	0.00	0.00
30	20.54	14.52	273.81	76.36	294.35	58.87	205.65	0.00	0.00
60	10.18	7.20	276.47	77.10	286.65	57.33	213.35	0.00	0.00
90	5.77	4.08	274.22	76.47	279.99	56.00	220.01	0.00	0.00
120	4.64	3.28	272.20	75.91	276.84	55.37	223.16	0.00	0.00
150	3.96	2.80	271.46	75.70	275.42	55.08	224.58	0.00	0.00
180	3.34	2.36	271.27	75.65	274.61	54.92	225.39	0.00	0.00
210	2.77	1.96	270.51	75.44	273.28	54.66	226.72	0.00	0.00
240	2.30	1.63	270.34	75.39	272.64	54.53	227.36	0.00	0.00
300	2.03	1.44	268.67	74.93	270.70	54.14	229.30	0.00	0.00
พีเอช	10.05								
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	492.36								
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนด์ทั้งหมด (%)	45.86								
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนด์เชิงซ้อน (%)	25.07								

ตารางที่ ๑.3.3 พีเอช 11 ความเข้มข้นเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตเริ่มต้น 250 ไมโครโมลาร์ (รูปไฮยาโนด์)

และอัตราส่วนโดยโมลเตตระไฮยาโนนิกเกิดเลตต่อเฮกซะไฮยาโนโคบอลเตตเท่ากับ 1 ต่อ 1 รูปไฮยาโนด์

เวลา	ไฮยาโนด์อิสระ		ไฮยาโนด์เชิงซ้อน		ไฮยาโนด์ทั้งหมด		ไฮยาเนต	ไนโตรท	ไนเตรท
	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	%	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์	ไมโครโมลาร์
0	137.46	100.00	362.54	100.00	500.00	100.00	0.00	0.00	0.00
1	115.23	83.83	352.74	97.30	467.97	93.59	32.03	0.00	0.00
5	72.61	52.82	346.83	95.67	419.44	83.89	80.56	0.00	0.00
10	67.77	49.30	320.87	88.51	388.64	77.73	111.36	0.00	0.00
20	52.84	38.44	311.47	85.91	364.31	72.86	135.69	0.00	0.00
30	30.41	22.12	309.03	85.24	339.44	67.89	160.56	0.00	0.00
60	25.81	18.78	306.42	84.52	332.23	66.45	167.77	0.00	0.00
90	20.32	14.78	302.03	83.31	322.35	64.47	177.65	0.00	0.00
120	18.56	13.50	301.28	83.10	319.84	63.97	180.16	0.00	0.00
150	15.68	11.41	301.00	83.03	316.68	63.34	183.32	0.00	0.00
180	11.36	8.26	302.52	83.44	313.88	62.78	186.12	0.00	0.00
210	7.01	5.10	303.06	83.59	310.07	62.01	189.93	0.00	0.00
240	6.32	4.60	301.15	83.07	307.47	61.49	192.53	0.00	0.00
300	5.01	3.64	299.32	82.56	304.33	60.87	195.67	0.00	0.00
พีเอช	11.03								
เฟอร์เรตเริ่มต้น (ไมโครโมลาร์)	489.97								
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนด์ทั้งหมด (%)	39.13								
ประสิทธิภาพการกำจัด ไฮยาโนด์เชิงซ้อน (%)	17.44								

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวประภาพร ฉัตรชัยธนวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย