ผลของอีดีทีเอต่อกระบวนการออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเลต

นายบัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6932-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21 พ.ค. 2551

T 21941890

EFFECT OF EDTA ON OXIDATION OF CYANIDE USING ELECTROCHEMICAL AND PHOTOCATALYTIC PROCESSES

MR. BUNDHIT CHUCHERDWATANASAK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6932-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอีดีทีเอต่อกระบวนการออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเลต
โดย	นายบัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์ : ผลของอีดีทีเอต่อการกระบวนการออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเลต. (EFFECT OF EDTA ON OXIDATION OF CYANIDE USING ELECTROCHEMICAL AND PHOTOCATALYTIC PROCESSES) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ 111 หน้า. ISBN 974-17-6932-6.

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์ ด้วยการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยในการกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าได้การการแปรค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ และอัตราส่วนโดยโมลอีดีทีเอต่อไซยาไนด์ ส่วนในกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์นั้น ได้ทำการศึกษาโดยการแปรค่าความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ อัตราการเติมอากาศ และอัตราส่วนโดยโมลของอีดีทีเอต่อไซยาไนด์ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของ CN^- และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12.5

ผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้ กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้านั้น การเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ว่าพลังงานที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์ 1 กิโลกรัมก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มขึ้นของอีดีทีเอในน้ำเสียจะทำให้อัตราการออกซิเดชันของไซยาไนด์มีค่าดีขึ้นเล็กน้อย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ โดยเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ เมื่อไม่มีอีดีทีเอจะต้องใช้พลังงาน 170.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เพื่อกำจัดไซยาไนด์ 1 กิโลกรัม (51.05 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย) แต่เมื่อมีอีดีทีเอในน้ำเสีย 15 กรัมต่อลิตร พลังงานที่ต้องใช้ลดลงเหลือเพียง 132.48 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของไซยาไนด์ (39.74 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย)

สำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์นั้น สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที โดยจะสามารถกำจัดไซยาไนด์ให้เหลือ 99% โดยใช้เวลา 380 นาที การเพิ่มขึ้นของอีดีทีเอในน้ำเสียจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลงอย่างมาก พลังงานที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์เพียงอย่างเดียวต้องใช้ถึง 1280 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ (384.00 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเช่นเดียวกับการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีแล้ว การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากเวลาที่ต้องใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ให้ลดลงเท่าๆกันนั้นจะน้อยกว่า รวมทั้งพลังงานที่ต้องใช้ก็ยังน้อยกว่าอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2547 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4570391421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: CYANIDE / EDTA / ELECTROCHEMICAL PROCESS / PHOTOCATALYTIC PROCESS / ELECTROPLATING WASTEWATER

BUNDHIT CHUCHERDWATANASAK : EFFECT OF EDTA ON OXIDATION OF CYANIDE USING ELECTROCHEMICAL AND PHOTOCATALYTIC PROCESSES. THESIS ADVISOR : KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR : PICHAYA RACHADAWONG, Ph.D., 111 pp. ISBN 974-17-6932-6.

This research was to investigate effect of EDTA on cyanide treatment in synthetic wastewater using electrochemical process and photocatalytic process with TiO_2 as a catalyst. Comparisons of efficiency and ability of cyanide destruction were carried out by vary parameters. In electrochemical process, electrical current and EDTA:CN^- molar ratio were varied. Titanium dioxide concentration, air flow rate, and EDTA:CN^- molar ratio were varied in this research on photocatalytic process. The initial concentration of cyanide was 100 milligram per liter as CN^- and initial pH was 12.5.

For electrochemical process, efficiency of electrochemical process seems to be increased when molar ratio of EDTA:CN^- is slightly higher. Higher electrical current, higher efficiency have got, but the energy used for oxidized 1 kilogram of cyanide was also increased. Using current of 2.5 ampere, with absence of EDTA, energy for destructed 1 kilogram for cyanide was 107.17 kilowatt-hours (51.05 baht per cubic meter of wastewater). When EDTA is presented in the wastewater in amount of 15 gram per liter, energy was increased to 132.48 kilowatt-hour per kilogram of cyanide destroyed (39.74 baht per cubic meter of wastewater).

In synthetic wastewater, optimum condition for photocatalytic process was 0.1 gram per liter of titanium dioxide with air flow rate of 0.2 liter per minute. The efficiency of this process reaches 99% in 380 minute. Presence of EDTA in the wastewater affected the oxidation of cyanide, increasing of EDTA, lowering of cyanide oxidation rate. Energy consumption for destruction 1 kilogram of cyanide was 1280 kilowatt-hour (384.00 baht per cubic meter of wastewater). Both electrochemical and photocatalytic processes, first order of rate law was conformed. Efficiency of electrochemical process is better than photocatalytic process. Because time and energy to destructed the same amount of cyanide is lower.

Department Environmental Engineering Student's signature _____

Field of study Environmental Engineering Advisor's signature _____

Academic year 2004 Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนในทุกๆเรื่อง และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูง ที่ให้โอกาสและความกรุณาในการอบรมสั่งสอนให้ความรู้ และให้คำแนะนำ คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบเงินทุนสนับสนุนการวิจัย รวมทั้งโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้อีกด้วย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณรามนรี เนตรวิเชียร และ คุณฉันทนา อินทิม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายที่สุดนี้ของขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ทั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และที่ห้องปฏิบัติการของโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย และเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือขณะที่ทำการศึกษา และทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า..... 5

2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า..... 5

2.1.2 ขั้นตอนในการชุบโลหะ..... 6

2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย..... 9

2.2 ไซยาไนด์..... 12

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์..... 12

2.2.1.1 ไซยาไนด์อิสระ..... 12

2.2.1.2 สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลน์..... 12

2.2.1.3 สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนัก..... 13

2.2.1.4 สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ..... 13

2.2.1.5 ไซยาโนเจนคลอไรด์..... 14

2.2.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์..... 14

2.2.3 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย..... 16

2.2.3.1 การออกซิเดชันด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอริเนชัน..... 16

2.2.3.2 การออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต..... 17

2.2.3.3 การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 19

2.2.3.4 การออกซิเดชันด้วยโอโซน..... 19

2.2.3.5 กระบวนการการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต..... 20

2.2.3.6 กระบวนการการออกซิเดชันตัวด้วยไฟฟ้า..... 22

2.2.3.7 การออกซิเดชันด้วยความร้อน..... 24

2.2.3.8 วิธีการอื่นๆที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์..... 24

2.2.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดไซยาไนด์.....24
2.3 อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra-acetic acid, EDTA).....33
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ.....33
2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ.....33
2.3.3 การกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสีย.....34
2.3.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดอีดีทีเอ.....35
2.4 การทำงานกับสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันสูง.....37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....39
3.1 แผนการวิจัย.....39
3.2 เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....39
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....39
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....40
3.3 น้ำเสียสังเคราะห์.....40
3.4 การดำเนินการทดลอง.....41
3.4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.....41
3.4.2 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์.....41
3.4.2.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrochemical process).....41
3.4.2.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ (Photocatalytic process).....44
3.5 วิธีการวิเคราะห์.....46
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....47
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.....47
4.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า...48
4.2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์.....48
4.2.2 ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการอีดีทีเอ.....52
4.2.3 ผลของอีดีทีเอที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์.....53
4.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์.....56
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์.....59

4.3.2 ผลของอัตราการเติมอากาศที่มีการกำจัดไซยาไนด์..... 60
4.3.3 การกำจัดอีดีทีเอโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์.....62
4.3.4 ผลของอีดีทีเอที่มีต่ออัตราการกำจัดไซยาไนด์..... 62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....65
5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์..... 67
5.3 ข้อเสนอแนะ.....67
รายการอ้างอิง.....69
ภาคผนวก..... 75
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์..... 76
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง..... 101
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของหลอดยูวี..... 103
ภาคผนวก ง. รายละเอียดของไททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25.....105
ภาคผนวก จ. รายละเอียดของวิธีการในการวัดไซยาไนด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography..... 107
ภาคผนวก ฉ. รายละเอียดของวิธีการในการวัดอีดีทีเอด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (Novack et al., 1996).....109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	11
2-2	ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ	15
2-3	ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย	15
2-4	ลักษณะและสมบัติของอีดีทีเอ	34
3-1	ขั้นตอนการวิจัย	42
3-2	รายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า	42
4-1	ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม	47
4-2	เวลาที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์ 90% และ 99% เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ใช้	51
4-3	ค่าคงที่อัตรา *K* ที่คำนวณได้ของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า เมื่อในน้ำเสียสังเคราะห์มีไซยาไนด์ และอีดีทีเอ	55
4-4	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 12.5	56
4-5	ค่าคงที่อัตรา *K* ที่คำนวณได้ของกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อในน้ำเสียสังเคราะห์มีไซยาไนด์ และอีดีทีเอ	64
ผ1	ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์	77
ผ2	ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 แอมแปร์	78
ผ3	ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์	79
ผ4	ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.0 แอมแปร์	80
ผ5	ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ สำหรับการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียมีไซยาไนด์เพียงอย่างเดียว	80
ผ6	ข้อมูลการวัดค่าอีดีทีเอกับน้ำเสียสังเคราะห์อีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 แอมแปร์	81

ผ7 ข้อมูลการวัดค่าอีดีทีเอกับน้ำเสียสังเคราะห์อีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 แอมแปร์..... 82

ผ8 ข้อมูลการวัดค่าอีดีทีเอกับน้ำเสียสังเคราะห์อีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.0 แอมแปร์..... 83

ผ9 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ สำหรับการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียมีอีดีทีเอเพียงอย่างเดียว..... 83

ผ10 ข้อมูลการวัดไซยาไนด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ และอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 3.75 กรัมต่อลิตร.....84

ผ11 ข้อมูลการวัดไซยาไนด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ และอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 7.5 กรัมต่อลิตร..... 85

ผ12 ข้อมูลการวัดไซยาไนด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ และอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 15 กรัมต่อลิตร.....86

ผ13 ข้อมูลการวัดไซยาไนด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ และอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 22.5 กรัมต่อลิตร..... 87

ผ14 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ สำหรับการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยน้ำเสียมีไซยาไนด์ และอีดีทีเอ ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 87

ผ15 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที.....88

ผ16 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที.....89
ผ17 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที.....90
ผ18 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที.....91
ผ19 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที..... 92
ผ20 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.55 ลิตรต่อนาที..... 93
ผ21 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที..... 94
ผ22 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที ไม่มีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และรังสีอัลตราไวโอเลต.....94

ผ23 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ ไม่มีการเติมอากาศ และเติมไททาเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัมต่อลิตร และฉายรังสีอัลตราไวโอเลต..... 95

ผ24 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์และไซยาเนตกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ที่เวลาต่างๆ เติมอากาศด้วยอัตรา 1.1 ลิตรต่อนาที ทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต แต่ไม่มีเติมไททาเนียมไดออกไซด์.... 96

ผ25 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยมีอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 0.15 กรัมต่อลิตร..... 97

ผ26 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยมีอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 1.5 กรัมต่อลิตร..... 98

ผ27 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยมีอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 7.5 กรัมต่อลิตร..... 99

ผ28 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์และอีดีทีเอ ทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาต่างๆ และไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยมีอัตราส่วน CN^-:EDTA เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร : 15 กรัมต่อลิตร..... 100

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า	6
2-2	ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย	7
2-3	แผนผังขั้นตอนการชุบโครเมียม	10
2-4	แผนผังขั้นตอนการชุบสังกะสี	11
2-5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออนกับกรดไฮโดรไซยานิคที่พีเอชต่าง ๆ	13
2-6	ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนต	18
2-7	การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร	20
2-8	แผนผังแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต	22
2-9	(ก) โครงสร้างของอีดีทีเอโดยทั่วไป และ (ข) เมื่อมีการจับกับโลหะหนัก	34
3-1	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า	43
3-2	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์	44
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ไอออน (CN^-) และไซยาเนตไอออน (CNO^-) ที่เวลาต่างๆ และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ (ก) 1.0 แอมแปร์ (ข) 5.0 แอมแปร์	49
4-2	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ และเวลา ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง Ln C/C_0 และกับเวลา ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ	50
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตรา, K (นาที$^{-1}$) กับกระแสไฟฟ้า	51
4-4	พลังงานที่ต้องใช้ต่อการกำจัดไซยาไนด์ 1 กิโลกรัม เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ใช้	52
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอีดีทีเอ กับเวลา เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ	53
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ และเวลา เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.5 แอมแปร์ ที่อัตราส่วนอีดีทีเอต่อไซยาไนด์ต่างๆ	54
4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมล และพลังงานที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์ 1 กิโลกรัม	55
4-8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ และเวลาของการทดลองต่างๆ	57

4-9 ความเข้มข้นของไซยาไนด์ และไซยาเนต ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที.....58
4-10 กราฟ Langmuir-Hinshelwood สำหรับการย่อยสลายไซยาไนด์.....59
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง %[CN^-] ที่เหลืออยู่ และเวลา ที่ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ทำการเติมอากาศด้วยอัตรา 1.1 ลิตรต่อนาที.....60
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง %[CN^-] ที่เหลืออยู่ และเวลา เมื่อทำการทดลองโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัม/ลิตร ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 61
4-13 ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศด้วยอัตราการเติม (ก) 0.22 ลิตรต่อนาที, (ข) 0.5 ลิตรต่อนาที, (ค) 1.1 ลิตรต่อนาที และ (ง) 2.2 ลิตรต่อนาที.....62
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง %EDTA ที่เหลืออยู่ และเวลา เมื่อทำการทดลองโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที..... 63
4-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง %[CN^-] ที่เหลืออยู่ และเวลา เมื่อทำการทดลองโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัม/ลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตร/นาที โดยมีอีดีทีเอที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ..... 63