การนำไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์
มาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้า

นางสาวสุภาวดี อ้อยเป็น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2500-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REUSE OF TITANIUM DIOXIDE FROM CYANIDE TREATMENT BY CHEMICAL COAGULATION AND ELECTROCOAGULATION PROCESSES.

Miss Supavadee Oiypen

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 2006
ISBN 974-14-2500-7

490062

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์มาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้า
โดย	นางสาวสุภาวดี อ้อยเป็น
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

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

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

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

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

สุภาวดี อ้อยเป็น : การนำไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์มาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้า. (REUSE OF TITANIUM DIOXIDE FROM CYANIDE TREATMENT BY CHEMICAL COAGULATION AND ELECTROCOAGULATION PROCESSES.) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ 132 หน้า. ISBN 974-14-2500-7.

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำเสียโดยการรวมตะกอนทางเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งทำการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ชนิดของโคแอกกูแลนต์ พีเอชเริ่มต้น และปริมาณของโคแอกกูแลนต์สำหรับการตกตะกอนทางเคมี ส่วนการรวมตะกอนไฟฟ้าทำการแปรค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ พีเอชเริ่มต้น ระยะเวลาเก็บกัก ขนาดขั้วไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า และนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนทางเคมีและไฟฟ้ากลับมาใช้ในการกำจัดไซยาไนด์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อหาประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้ การรวมตะกอนทางเคมีด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต สภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอชเริ่มต้น 12 12.5 และ 12 ปริมาณโคแอกกูแลนต์เท่ากับ 1.5 1.0 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ สำหรับการรวมตะกอนไฟฟ้า เมื่อใช้กระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.25 แอมแปร์ ฟล็อคจะมีปริมาณมาก ประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูง เวลาเก็บกักที่เหมาะสมคือครึ่งชั่วโมง เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะยิ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นด้วยในขณะที่ประสิทธิภาพไม่ต่างกันมากนัก พีเอชที่เหมาะสมคือ 11 ขนาดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ 6x6.5 ตร.ซม. สำหรับประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้าสามารถใช้ซ้ำได้ 4 ครั้ง โดยสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้มากกว่า 90% ในเวลา 420 นาที ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการใช้แคลเซียมคลอไรด์ ไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ค่อนข้างต่ำ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต สุภาวดี อ้อยเป็น
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4670741521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: Cyanide / Titanium Dioxide / Photocatalytic process / Electrocoagulation / Chemical coagulation

SUPAVADEE OIYPEN : REUSE OF TITANUIM DIOXIDE FROM CYANIDE TREATMENT BY CHEMICAL COAGULATION AND ELECTROCOAGULATION PROCESSES. THESIS ADVISOR : Assist Prof. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., THESIS COADVISOR : Assist Prof. KHEMARATH OSATHAPHAN,Ph.D., 132 pp. ISBN 974-14-2500-7.

This research examined the optimum conditions of chemical coagulation and electrocoagulation process for separate TiO_2 from cyanide treatment wastewater. In chemical coagulation process : coagulants, initial pH and coagulant dosages were varied. Effect of the influencing factors : electrical current, initial pH, retention time, electrode size and conductivity were explored in electrocoagulation process.

The optimum initial pH in chemical coagulation process for PACl, $CaCl_2$ and $FeSO_4$ coagulations were 12.0 12.5 and 12.0 and coagulant dosages were 1.5 1.0 and 1.5 grams per liter, respectively. In electrocoagulation process, amount of floc and percentage of TiO_2 removal increased when electrical current was more than 0.25 amperes. The optimum retention time was half an hour. Although higher percentage of TiO_2 removal was associated with higher retention time and electrode size, the power energy and losing aluminum increased. Amount of floc were too much when the electrode size was larger than 6x6.5 square centimeters. The number of TiO_2 reuse times were four for TiO_2 from PACl coagulation and electrocoagulation. The cyanide removal efficiency of these processes was more than 90% in 420 minutes. In contrast, the remaining chloride ion on surface of TiO_2 from $CaCl_2$ coagulation retarded cyanide photooxidation reaction whose first order rate constants much were lower than those of new TiO_2.

Department Environmental Engineering.... Student's signature .....สุภาวดี อ้อยเพ็ญ.....

Field of study Environmental Engineering.. Advisor's signature .....พิชญ รัชฎาวงศ์.....

Academic year 2006........ Co-advisor's signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมเป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางวิชาการ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนและเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือขณะทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................จ

กิตติกรรมประกาศ....................ฉ

สารบัญ....................ช

สารบัญตาราง....................ฎ

สารบัญรูป....................ฏ

บทที่ 1 บทนำ....................1

วัตถุประสงค์....................2

ขอบเขตของการวิจัย....................2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ....................3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....................4

2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์....................4

2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า....................8

2.2.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า....................8

2.2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ....................9

2.2.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย....................9

2.3 ไซยาไนด์....................12

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์....................12

2.3.1.1 ไซยาไนด์อิสระ....................12

2.3.1.2 สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลน์....................13

2.3.1.3 สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนัก....................13

2.3.1.4 สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก....................13

2.3.1.5 ไซยาโนเจนคลอไรด์....................13

2.3.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์....................14

2.3.3 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย....................15

2.3.3.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนหรืออัลคาไลน์คลอริเนชัน....................15

2.3.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส....................16

2.3.3.3 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์....................16

หน้า

2.3.3.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน.. 17
2.3.3.5 การออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.................................17
2.3.3.6 การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า...18
2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์...........19
2.4 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีหรือโคแอกกูเลชัน (Chemical Coagulation)... 22
2.4.1 สารสร้างตะกอน (Coagulants).. 25
2.4.1.1 เฟอร์ริคซัลเฟต $Fe_2(SO_4)_3 \bullet 8H_2O$................................ 26
2.4.1.2 เฟอร์รัสซัลเฟต $FeSO_4 \bullet 7H_2O$.. 26
2.4.1.3 Chlorinated Ferrous Sulphate................................ 26
2.4.1.4 เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$)... 26
2.4.1.5 อลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4) \bullet 14H_2O$...............................27
2.4.1.6 อลูมิเนียมคลอไรด์ $AlCl_3 \bullet 6H_2O$................................. 27
2.4.1.7 โซเดียมอะลูมิเนต $NaAlO_2$.. 27
2.4.1.8 โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)... 28
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน.. 29
2.4.3 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน.. 29
2.4.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอน
ไททาเนียมไดออกไซด์.. 30
2.5 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation)... 32
2.5.1 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี... 32
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี.. 35
2.5.2.1 พีเอช.. 35
2.5.2.2 ค่าความนำไฟฟ้า.. 35
2.5.2.3 ขั้วไฟฟ้า (electrodes)... 36
2.5.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.. 37
2.5.4 หลักการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี... 37
2.5.5 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี............ 39

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.......... 42
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.......... 42
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.......... 42
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.......... 42
3.2 การดำเนินการทดลอง.......... 43
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.......... 43
3.2.2 การศึกษาสภาวะเหมาะสมโดยการตกตะกอนทางเคมี.......... 43
3.2.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.......... 45
3.2.4 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ตกตะกอนได้.......... 50
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.......... 52
บทที่ 4 ผลการวิจัย.......... 53
4.1 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี.......... 53
4.1.1 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์.......... 53
4.1.2 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์.......... 56
4.1.3 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต.......... 58
4.2 การตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้า.......... 60
4.2.1 การทดลองหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม.......... 60
4.2.2 การทดลองหาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม.......... 63
4.2.3 การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม.......... 65
4.2.4 การทดลองหาขนาดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม.......... 67
4.2.5 การทดลองปรับเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้า.......... 69
4.3 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมีและไฟฟ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.......... 71
4.3.1 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมี.......... 72
4.3.2 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนทางไฟฟ้า.......... 75

หน้า

4.3.3 ผลของการบำบัดไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จาก
การกรอง.. 77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 80
5.1 สรุปผลการวิจัย... 80
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 81
รายการอ้างอิง.. 82
ภาคผนวก... 86
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองรวมตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ทางเคมี.......................87
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองรวมตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ทางไฟฟ้า.....................97
ภาคผนวก ค. ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ด้วย
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนด้วยวิธีต่างๆ.. 103
ภาคผนวก ง. ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ไอออนที่ตรวจวัดได้ในการทดลองบำบัดน้ำเสีย
สังเคราะห์ไซยาไนด์ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนด้วยวิธีต่างๆ...............115
ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนด้วย
วิธีต่างๆ ด้วยเครื่องXRF..119
ภาคผนวก ฉ. รายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายในการตกตะกอน...........................122
ภาคผนวก ช. รายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง...................................125
ภาคผนวก ซ. รายละเอียดของหลอดยูวี... 127
ภาคผนวก ฌ.รายละเอียดของไททาเนียมไดออกไซด์.. 129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 132

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ TiO_2 เปรียบเทียบระหว่างรูไทล์และอนาเทส........ 7
2.2 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม........................10
2.3 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า...................................... 11
2.4 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดตามมาตรฐานต่าง ๆ ในประเทศไทย............................ 15
3.1 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง...43
4.1 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีต่างๆ..................................71
4.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์...73
4.3 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้า.. 76
4.4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรองที่เวลาต่างๆ...78
4.5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ที่เวลา 420 นาที ในแต่ละรอบการใช้ซ้ำ.. 79

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะโครงสร้างของรูไทล์ (rutile) และอนาเทส (anatase)........ 4
2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต........5
2.3 ระดับพลังงานในกระบวนการรีดอกซ์ที่เกิดบนผิว TiO_2 ที่พีเอช 7
เทียบกับ Standard Hydrogen Electrode (SHE)........ 7
2.4 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า........ 8
2.5 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า........ 9
2.6 แผนผังขั้นตอนการชุบสังกะสี........11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออนกับกรดไฮโดรไซยานิกที่พีเอชต่างๆ........ 12
2.8 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์........ 23
2.9 อุปกรณ์จาร์เทสต์........ 30
2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมี........ 33
3.1 การทดลองตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์........ 45
3.2 การทดลองตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์........45
3.3 การทดลองตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต........46
3.4 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการตกตะกอนไฟฟ้า........ 47
3.5 แผนผังการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม........ 48
3.6 แผนผังการศึกษาระยะเวลาเก็บกัก........ 48
3.7 แผนผังการศึกษาค่าพีเอช........ 49
3.8 แผนผังการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า........ 49
3.9 แผนผังการศึกษาค่าความนำไฟฟ้าไฟฟ้า........ 50
3.10 ลักษณะถังปฏิกรณ์........ 51
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วย
โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์........ 54
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพใน
การตกตะกอน........55
4.3 ลักษณะฟล็อคจากการใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์........55
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้นและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนเมื่อใช้
แคลเซียมคลอไรด์........ 57

รูปที่ **หน้า**

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมคลอไรด์และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอน...................................... 57
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนเมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟต...................................... 58
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตและค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอน...................................... 59
4.8 ลักษณะฟล็อคจากการใช้เฟอร์รัสซัลเฟต...................................... 59
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนและกระแสไฟฟ้าที่ใช้.........61
4.10 ลักษณะฟล็อคที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยไฟฟ้า.................. 61
4.11 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสไฟฟ้า............................ 62
4.12 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างๆ............ 63
4.13 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา...................................... 64
4.14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ......................................64
4.15 พีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ...................................... 65
4.16 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ.......... 66
4.17 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ...................................... 66
4.18 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดต่างๆ...68
4.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายหลังการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดขั้วไฟฟ้า............ 68
4.20 พีเอชก่อนและหลังการทดลองที่ขนาดขั้วไฟฟ้าต่างๆ...................................... 69
4.21 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนความนำไฟฟ้า........ 70
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์ ไซยาเนตและไนเตรตที่เวลาต่างๆ........ 72
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์......................................73
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์...................................... 75
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์และเวลาเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการรวมตะกอนไฟฟ้า......................................76

รูปที่ **หน้า**

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์และเวลา
เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกรอง..77
4.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จาก
กระบวนการต่างๆ ที่เวลา 420 นาที ในแต่ละรอบการใช้ซ้ำ.................................... 79