

การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต  
และไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง



นางสาว ปรีศนีย์ เจริญสิน

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

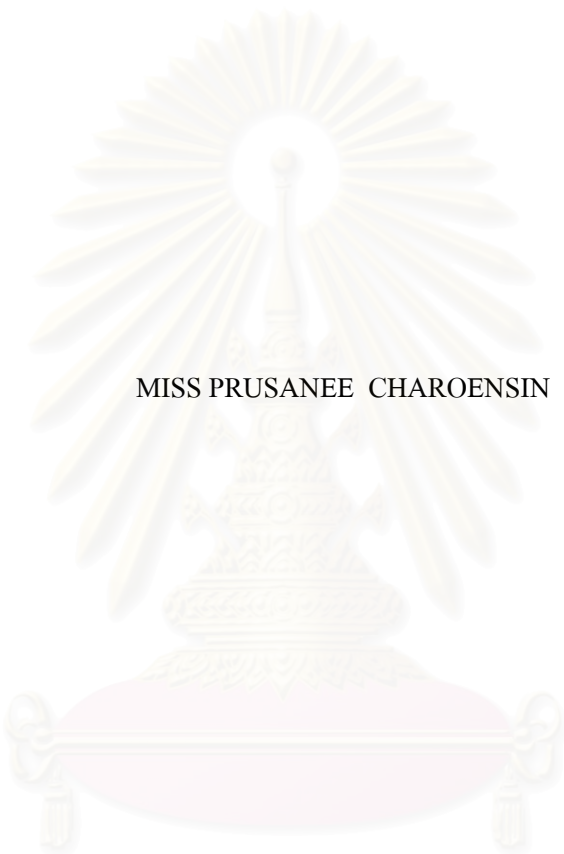
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2501-5

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF CYANIDE USING ULTRAVIOLET RAY  
AND TiO<sub>2</sub> IN CONTINUOUS FLOW

MISS PRUSANEE CHAROENSIN



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

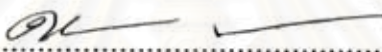
Chulalongkorn University

Academic Year 2006

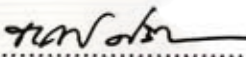
ISBN 974-14-2501-5

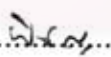
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการไหลแบบต่อเนื่อง
โดย	นางสาวปรศนีญ์ เจริญสิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ ไอสถาพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัฒน์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ ไอสถาพันธุ์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร)

ปรักณีษั เจริญสิน : การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง (REMOVAL OF CYANIDE USING ULTRAVIOLET RAY AND TiO<sub>2</sub> IN CONTINUOUS FLOW) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนบุรี 102 หน้า. ISBN 974-14-2501-5.

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์และสัตว์ พบในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ วิธีการกำจัดโดยทั่วไปคือการออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน ซึ่งจะเกิดก๊าซไซยาโนเจนคลอไรด์ และไฮโปคลอไรท์ ส่วนเกินจะยังคงความเป็นพิษอยู่ งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธีนี้ โดยจะควบคุมค่าความเป็นกรดค่าเริ่มต้นที่ 12.0 เพื่อความปลอดภัยจากกรดไฮโดรไซยานิก และควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์สูงสุด 98-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 525 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์สูงสุด 98-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 450 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที และที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์สูงสุด 98-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 412 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที ซึ่งอัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในการทดลองจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1:10 กรัม นาที ลิตร<sup>-2</sup> เมื่อความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มเป็น 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์กลับลดลงเป็น 1:4 กรัม นาที ลิตร<sup>-2</sup> เนื่องจากความขุ่นของสารละลายเริ่มมีมากจนบดบังทางเดินของรังสีอัลตราไวโอเลต หากปริมาณและขนาดของฟองอากาศมีมากขึ้น การส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเลตก็จะถูกขัดขวางมากขึ้นตามไปด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิิต..... *Prasom Charomsin*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *พิชญ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *เขมรัฐ*

## 4670699921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: Cyanide / Titanium dioxide / Ultraviolet ray / Continuous flow

PRUSANEE CHAROENSIN : REMOVAL OF CYANIDE USING ULTRAVIOLET RAY AND TiO<sub>2</sub> IN CONTINUOUS FLOW. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSIST.PROF. KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., 102 pp. ISBN 974-14-2501-5.

Cyanide was normally found in metal plating industrial wastewater which was toxic to human and animal life. Typical treatment process for cyanide treatment is alkaline chlorination, but after treating, toxic product, cyanogen chloride and excess hypochlorite still remained. This study investigated the effect on cyanide removal by using ultraviolet ray and Titanium dioxide in continuous flow. For safety, an initial pH solution was controlled at 12.0 due to hydrocyanic acid produced at lower pH and initial concentration of cyanide was fixed at 100 mg/l.

The result showed that cyanide removal efficiency was 98-99% at 525 minutes under the condition of 0.05mg/l of Titanium dioxide and 0.5 l/min airflow. The conditions, 0.10mg/l of Titanium dioxide and 1.1 l/min airflow at 450 minutes, and 0.50mg/l of Titanium dioxide and 2.2 l/min air flow at 412 minutes, cyanide removal efficiency was 98-99%. The optimum conditions of ratio of titanium dioxide concentration (mg/l) and air flow (l/min) was 1:10 at 0.05 and 0.10 g/l of titanium dioxide concentration. But if at the condition, 0.50 g/l of titanium dioxide concentration, the optimum ratio of Titanium dioxide concentration (mg/l) and air flow (l/min) was 1:4. The results indicated that turbidity of high titanium dioxide concentration and the large volume and size of air bubble obstructed the light of ultraviolet ray.

Department Environmental Engineering Student's signature.....*Prusana Charoensin*  
 Field of study Environmental Engineering Advisor's signature.....*P.S.*  
 Academic year 2006 Co-advisor's signature.....*P.O.*

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 บทนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	8
2.2 ไชยาไนต์.....	11
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์.....	11
2.2.2 ความเป็นพิษของไชยาไนต์.....	14
2.2.3 การกำจัดไชยาไนต์ในน้ำเสีย.....	14
2.2.3.1 การออกซิเดชันด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน.....	16
2.2.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยปอดัสเซียมเปอร์มังกานेट.....	17
2.2.3.3 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	18
2.2.3.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน.....	19
2.2.3.5 กระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.....	20
2.2.3.6 กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า.....	22

2.2.3.7 การออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	23
2.2.3.8 วิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์.....	23
2.2.4 ค่ามาตรฐานของไซยาไนด์ในประเทศไทย .....	23
2.3 รังสีอัลตราไวโอเลต.....	24
2.3.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเลต.....	24
2.3.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต.....	25
2.4 ทฤษฎีโฟโตคะตะไลซิส.....	26
2.4.1 กระบวนการดูดซับผิว.....	26
2.4.1.1 แบบจำลองของ Langmuir.....	27
2.4.1.2 แบบจำลองของ Langmuir-Hinshelwood.....	28
2.4.2 การฉายแสง.....	29
2.5 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	39
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	39
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	40
3.3.1 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท (Photocatalytic processes; Batch) .....	40
3.3.1.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	41
3.3.1.2 ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ.....	41
3.3.2 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสี อัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหล แบบต่อเนื่อง (Photocatalytic processes; Continuous) .....	45
3.3.2.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	46
3.3.2.2 ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ.....	47
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	52
4.1 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท.....	52

4.1.1 ผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท.....	52
4.1.2 ผลของอัตราการเติมอากาศต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท .....	53
4.2 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง.....	55
4.2.1 ผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง.....	55
4.2.2 ผลของอัตราการเติมอากาศที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง.....	56
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และอัตราการเติมอากาศ ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง.....	60
4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กั้นถึงปฏิกรณ์กับการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์.....	63
4.3.1 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	63
4.3.2 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	64
4.3.3 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	72



ภาคผนวก .....	76
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองกำจัดไซยาไนด์ .....	77
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของหลอดยูวี .....	96
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	98
ภาคผนวก ง. การวัดไซยาไนด์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography .....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	102



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สูตรน้ำยาชุบผิวแบบต่างๆ ..... 8
2.2	ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ..... 11
2.3	ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ..... 14
2.4	ค่ามาตรฐานของไซยาไนด์ในประเทศไทย ..... 24
2.5	คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25..... 31
3.1	ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม..... 40
3.2	ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์..... 42
3.3	ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์..... 42
3.4	ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์..... 46
3.5	ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์..... 47
4.1	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในสภาวะต่างๆ โดยพิจารณาที่ระยะเวลาการกำจัด 420 นาทีเท่ากับกรณีแบบทีละเท และ 450 นาทีเท่ากับ กรณีแบบไหลต่อเนื่อง..... 60
4.2	เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 63
4.3	เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.10 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 65
4.4	เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.50 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 66
ก.1	ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที..... 78





## ตารางที่

## หน้า

ก.16	ข้อมูลการวัดค่าไชยาไนต์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที.....	93
ก.17	ข้อมูลการวัดค่าไชยาไนต์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที.....	94
ก.18	ข้อมูลการวัดค่าไชยาไนต์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที.....	95

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....	4
2.2	ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย.....	5
2.3	แผนผังขั้นตอนการชุบสังกะสี .....	9
2.4	แผนผังขั้นตอนการชุบโครเมียม.....	10
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออนกับกรดไฮโดรไซยานิกที่พีเอชต่างๆ....	12
2.6	ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนต.....	17
2.7	การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	19
2.8	แผนผังแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต.....	21
2.9	กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับผิวแบบ Langmuir.....	28
2.10	ลักษณะโครงสร้างของเซมิคอนดักเตอร์.....	30
2.11	โครงสร้างของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบต่างๆ .....	30
3.1	ผังการเตรียมสารละลายไซยาไนด์สำหรับการทดลองแบบทีละเท.....	41
3.2	ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้.....	43
3.3	ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท เพื่อศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ.....	44
3.4	ผังการเตรียม Stock Cyanide สำหรับการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง.....	45
3.5	ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	48
3.6	ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ.....	49
3.7	ลักษณะถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองแบบทีละเท.....	50
3.8	ลักษณะถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง.....	51

รูปที่

หน้า

4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบที่ละเท.....	53
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลาที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบที่ละเท.....	54
4.3	ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศด้วยอัตราการเติม (ก) 0.5 ลิตรต่อนาที (ข) 1.1 ลิตรต่อนาที และ (ค) 2.2 ลิตรต่อนาที.....	55
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	56
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	57
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	58
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	59
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	61
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	62
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง.....	62
ง.1	สัญญาณของไซยาไนด์จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และไทเทเนียม ไดออกไซด์  
ในการไหลแบบต่อเนื่อง

ภาษาอังกฤษ : Removal of Cyanide using Ultraviolet ray and  $TiO_2$  in Continuous Flow

### 1.2 คำสำคัญ (Key Words)

ไซยาไนด์ (Cyanide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet ray)

การไหลแบบต่อเนื่อง (Continuous flow)

### 1.3 บทนำ

การชุบโลหะนั้นจะประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆ ทั้งกระบวนการทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้าเคมี เพื่อทำความสะอาด กัดผิว และเคลือบผิววัสดุ ทั้งที่เป็นโลหะ และอโลหะ โดยกระบวนการทางเคมีและไฟฟ้าเคมีจะก่อให้เกิดปริมาณของของเสียที่เป็นอันตรายมากกว่ากระบวนการทางกายภาพ เช่น การอบแห้ง การทำผิวให้เรียบ และการขัดเงา ของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะโดยทั่วไปแล้ว ได้แก่ น้ำทิ้งจากการล้างชิ้นงาน และน้ำยาชุบโลหะที่ผ่านการใช้งานแล้ว

น้ำยาที่ใช้ในการชุบโลหะจะเป็นน้ำยาที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งไซยาไนด์จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยมนุษย์สามารถรับเอาไซยาไนด์เข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง หรือปอด ในรูปของฝุ่น หรือไอระเหยได้ อีกทั้งไซยาไนด์ยังมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำอีกด้วย การได้รับพิษไซยาไนด์เข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยจะเกิดอาการพิษแบบสะสม มักพบอาการผิดปกติทางสมอง และปรากฏอาการทางจิต ประสาทตาเสื่อม หรือฝ่อได้ ผู้ที่ได้รับพิษไซยาไนด์ในปริมาณมากจะเกิดอาการพิษแบบเฉียบพลัน เซลล์ของร่างกายโดยเฉพาะสมองจะขาดออกซิเจน ผู้ป่วยมีอาการชักหมดสติ ระบบการหายใจผิดปกติ หากแพทย์ให้การรักษาไม่ทันอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ (ชุตินพงษ์ วิวัฒน์ภูวนรงค์ และ ปรียนันท์ เพชรสุวรรณ, 2542)



ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ได้กำหนดให้มีไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN)

วิธีการที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียในปัจจุบัน คือ การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline chlorination) นั้นจะมีข้อเสีย คือ ค่าสารเคมีที่ใช้สูง การเกิดก๊าซไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen chloride, CNCl) ซึ่งมีความเป็นพิษ ไม่สามารถกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ได้ทั้งหมด (Augugliaro และคณะ, 1997) น้ำทิ้งจะมีของแข็งละลาย (TDS) ในปริมาณที่สูง ไฮโปคลอไรท์ส่วนเกินจะมีความเป็นพิษ (Sarla และคณะ, 2004) คลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบคลอรีน (Chlorinated compounds) ได้ (Ismail และคณะ, 2003) และสารเคมีที่ใช้ยังต้องมีการจัดเก็บอย่างระมัดระวัง (Parga และคณะ, 2003) ดังนั้นจึงได้มีผู้ที่นำกระบวนการอื่นๆ มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ เช่น กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrochemical Processes) กระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalysis Processes) เป็นต้น

สำหรับกระบวนการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalysis Processes) นั้น ที่ผ่านมามีการศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบที่ละเทไปบ้างแล้ว พบว่า กรณีที่ต้องการกำจัดไซยาไนด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ได้ 90% และ 99% ต้องใช้เวลาในการกำจัดเท่ากับ 260 นาที และ 380 นาที ตามลำดับ (บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์, 2547) ซึ่งผลการกำจัดนั้นจัดอยู่ในขั้นน่าพอใจ และได้ทราบถึงสภาพที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการดังกล่าวแล้ว ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuous flow photocatalytic) โดยศึกษาหาสภาพที่เหมาะสมของการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในสภาพการไหลแบบต่อเนื่อง เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการนี้ต่อไป

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบผลของการบำบัดไซยาไนด์แบบการไหลต่อเนื่อง ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์ ในแต่ละสถานะ

#### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและวิจัยในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องและแบบที่ละเท น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้มีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเทียบกับ

น้ำเสียจริงที่ได้จากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (Genco) แล้ว โดยจะแบ่งส่วนการทดลอง ออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การบำบัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบทีละเท และแบบการไหลต่อเนื่อง โดยพิจารณาประสิทธิภาพของการกำจัดจากความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และความเข้มข้นของไซยาเนตที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่เหมาะสมของแต่ละสภาวะ เพื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากัน และรวบรวมปัจจัยหลักที่เหมาะสมของการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตของทั้งสองสภาวะ

สำหรับขอบเขตของการทดลองในงานวิจัยนี้ คือ ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยการออกซิเดชัน โดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรถังปฏิกรณ์ที่ใช้เท่ากับ 750 มิลลิตร และอัตราการไหลของสารละลายผ่านหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในการทดลองแบบไหลต่อเนื่องเท่ากับ 100 มิลลิตรต่ออนาที โดยการทดลองแบบต่อเนื่องนั้นจะเป็นการป้อนสารละลายผ่านถังปฏิกรณ์ โดยมีการเวียนน้ำขาออกกลับมาผ่านเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ใหม่อีกครั้งจนกว่าจะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ที่ต้องการ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลของปัจจัยหลักที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง
2. เป็นแนวทางในการออกแบบระบบเพื่อใช้ในการกำจัดไซยาไนด์จากน้ำเสียจริงได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

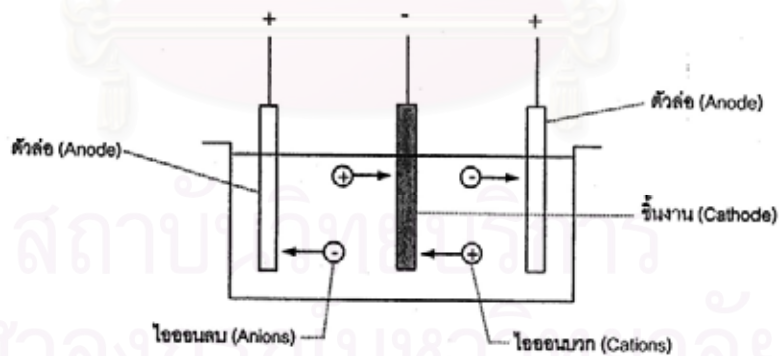
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

อุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะกระทำด้วยวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น การชุบเพื่อความสวยงาม การชุบเพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน และการชุบเพื่อรองพื้นหรือเพิ่มความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม ได้แก่ การชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี และทองคำ เป็นต้น

##### 2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ทำให้โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะให้ไปเคลือบผิวชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วบวกที่เรียกว่า ตัวล่อ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกับผิวของชิ้นงานที่จะไปเคลือบผิวเสมอไป แล้วนำเอาชิ้นงานและตัวล่อจุ่มในน้ำยาชุบ ซึ่งมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ จากนั้นปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบโลหะเกิดปฏิกิริยา (อนันต์ ทองมฤณ, 2527) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

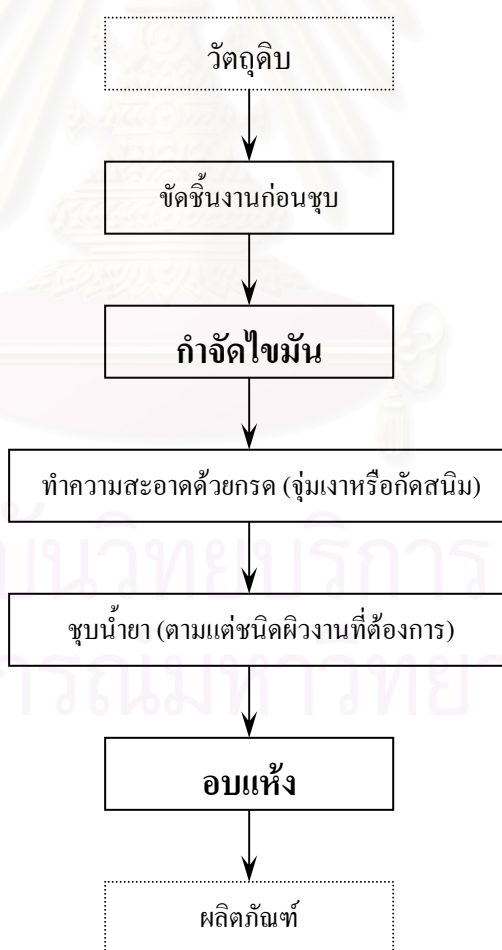
จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่า ที่ขั้วลบไอออนบวกของโลหะจะวิ่งไปปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงานดังสมการที่ 2-1 ในขณะที่ขั้วบวกถ้าโลหะเป็นชนิดเดียวกับโลหะ

ที่จะไปเคลือบชิ้นงาน ก็จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอน และกลายเป็นไอออนบวกละลายลงในสารละลาย ดังสมการที่ 2-2



### 2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

รูปแบบขั้นตอนการชุบโลหะอย่างง่ายประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน และนำไปจุ่มกรดเพื่อนำเอาสนิมออก ต่อจากนั้นก็นำชิ้นงานไปชุบในน้ำยาซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามที่กำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย (สาโรช บุญยกิจสมบัติ, 2535)

2.1.2.1 การขัดชิ้นงานก่อนชุบ แบ่งออกเป็น การขัดหยาบ และการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยขัดเอารอยขีดข่วนเล็กๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบ ทำให้ผิวชิ้นงานเรียบ นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใส่ถังหมุนซึ่งมีหินขัดบรรจุอยู่ภายใน

#### 2.1.2.2 การกำจัดไขมัน ทำได้โดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยใช้ไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapor degreasing) โดยการนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน และให้ความร้อนจนถึง 86 องศาเซลเซียส ซึ่งไตรคลอโรเอทิลีนจะกลายเป็นไอมากระทบกับท่อขัดทำความสะอาดบริเวณปากถังและชิ้นงาน และกลั่นตัวจับอยู่บนผิวโลหะทำการชำระล้างไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soak clean) โดยการแช่ชิ้นงานในถังเหล็ก หรือในถังสแตนเลสที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

2.1.2.3 การทำความสะอาดด้วยกรด หรือจุ่มเงา (Pickling and dipping) เป็นการกัดเอาสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมอื่นออกจากผิวโลหะ โดยการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นประมาณ 5-10% หรืออาจจะใช้กรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ส่วนกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่มีการใช้งาน ได้แก่ กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก กรดซัลฟูริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

#### 2.1.2.4 การชุบโลหะประเภทต่างๆ

2.1.2.4.1 การชุบทองแดง เป็นการชุบเคลือบผิวชิ้นแรกก่อนนำไปชุบโลหะชนิดอื่น เช่น ชุบงานที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีผสมก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล การชุบทองแดงจะแบ่งออกเป็น การชุบทองแดงแบบต่าง และแบบกรด การชุบแบบต่างนั้นจะมีกำลังการเคลือบผิวดีมาก และการเกาะจับติดแน่น เหมาะสำหรับการชุบรองพื้นชิ้นแรกก่อนการชุบแบบกรด และชุบนิกเกิลเงา ส่วนการชุบแบบกรดนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความเงางามมาก นิยมใช้ชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนทำการชุบด้วยนิกเกิลเงา

2.1.2.4.2 การชุบนิกเกิล เพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะ และยังทำให้ผิวดูสวยงาม โดยปกติแล้วจะตามด้วยการชุบโครเมียม เพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด การชุบนิกเกิลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท ดังนี้

- นิกเกิลด้าน (Dull Nickel) ใช้ในงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลกึ่งเงา (Semi bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม ทอง หรือทองเหลือง

- นิกเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานซึ่งไม่ต้องการให้เกิดการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่นตา
- นิกเกิลซาติน (Satin Nickel) จะได้สีเหลืองเหมือนสีแพร์ หรือผิวไข่มุกเงา
- นิกเกิลแบบหนา (Heavy electrodeposition of Nickel) ใช้ในงานที่สึกหรือ

2.1.2.4.3 การชุบโครเมียม การชุบโครเมียมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดหนา (Hard Chromium) การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดหนานั้น จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนทำการชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบชนิดบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไป และทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดงก่อนชุบนิกเกิล และการรองพื้นด้วยนิกเกิลก่อนชุบโครเมียม เหมาะสำหรับงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม ฯลฯ ตัวล่อโครเมียมใช้โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก หรือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง สำหรับกรณีการชุบชนิดแข็ง (Hard Chromium) นั้นสามารถทำการชุบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลรองพื้นก่อน โดยคุณสมบัติของชิ้นงานหลังจากการชุบโครเมียมจะเป็นดังนี้

- สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ
- สวยงาม
- ไข่มแม่เหล็กดูดได้

2.1.2.4.4 การชุบทอง นิยมชุบชิ้นงานที่เป็นเครื่องประดับ หรือในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชุบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ต่อมาได้มีการปรับปรุงนำยาชุบโดยการผสมโลหะอื่นลงไป ทำให้ผิวชุบอยู่ในรูปของทองอัลลอยด์ซึ่งมีผิวที่แข็งกว่าเนื้อทองธรรมดา ใช้ชุบบนเครื่องใช้ที่ต้องการให้ทนต่อการสัมผัสเสียดสี เช่น นาฬิกา ขอบแว่นตา ไฟแช็ค เป็นต้น นำยาชุบทองแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ นำยาชุบทองชนิดเป็นกลาง นำยาชุบทองแบบกรด และนำยาชุบทองแบบไม่มีไซยาไนด์

2.1.2.4.5 การชุบสังกะสี นิยมใช้กับชิ้นส่วนของรถยนต์ การชุบชิ้นงานที่เป็นเหล็กสามารถทำได้โดยตรงไม่ต้องมีการชุบรองพื้น การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และการชุบสังกะสีแบบด่าง การชุบแบบด่างสามารถแบ่งได้เป็นแบบมีไซยาไนด์สูง มีไซยาไนด์ต่ำ และไม่มีไซยาไนด์ ส่วนการชุบแบบกรดนั้นจะไม่มีไซยาไนด์เป็นส่วนผสม

ตารางที่ 2.1 สูตรน้ำยาชุบผิวแบบต่างๆ (ชุดพิมพ์ วิวัฒน์ภูวพงศ์ และ ปรียนันท์ เพชรสุวรรณ, 2542)

การชุบผิวด้วยโลหะ	องค์ประกอบของน้ำยาชุบ
1. ทองแดง	คอปเปอร์(I)ไซยาไนด์ (CuCN) โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) โซเดียมคาร์บอเนต (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
2. แคดเมียม	แคดเมียมออกไซด์ (CdO) โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
3. สังกะสี	สังกะสีไซยาไนด์ (Zn(CN) <sub>2</sub> ) โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. เงิน	ซิลเวอร์ไซยาไนด์ (AgCN) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
5. ทอง	โพแทสเซียมโกลด์ไซยาไนด์ (KAu(CN) <sub>2</sub> ) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

### 2.1.3 ลักษณะของน้ำเสียจากการชุบโลหะ

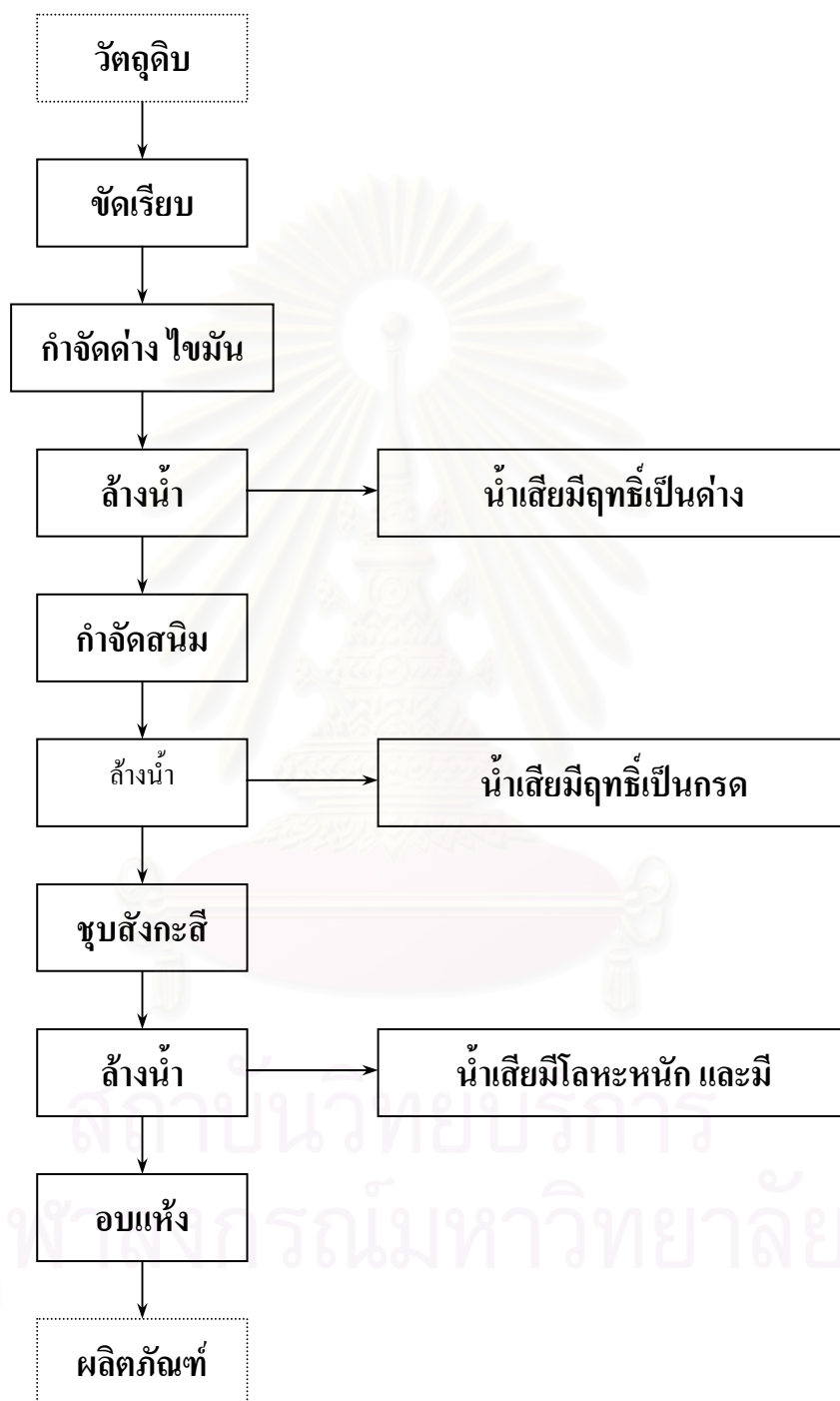
น้ำเสียที่มาจากขั้นตอนต่างๆ จะมีลักษณะ ปริมาณ และความเข้มข้นของมลพิษต่างๆ กัน ในโรงงานที่ไม่มีการจัดการของเสียอย่างเหมาะสม น้ำเสียจากทุกแหล่งจะถูกนำมารวมกันเป็นน้ำทิ้งรวม

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะมาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
- น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

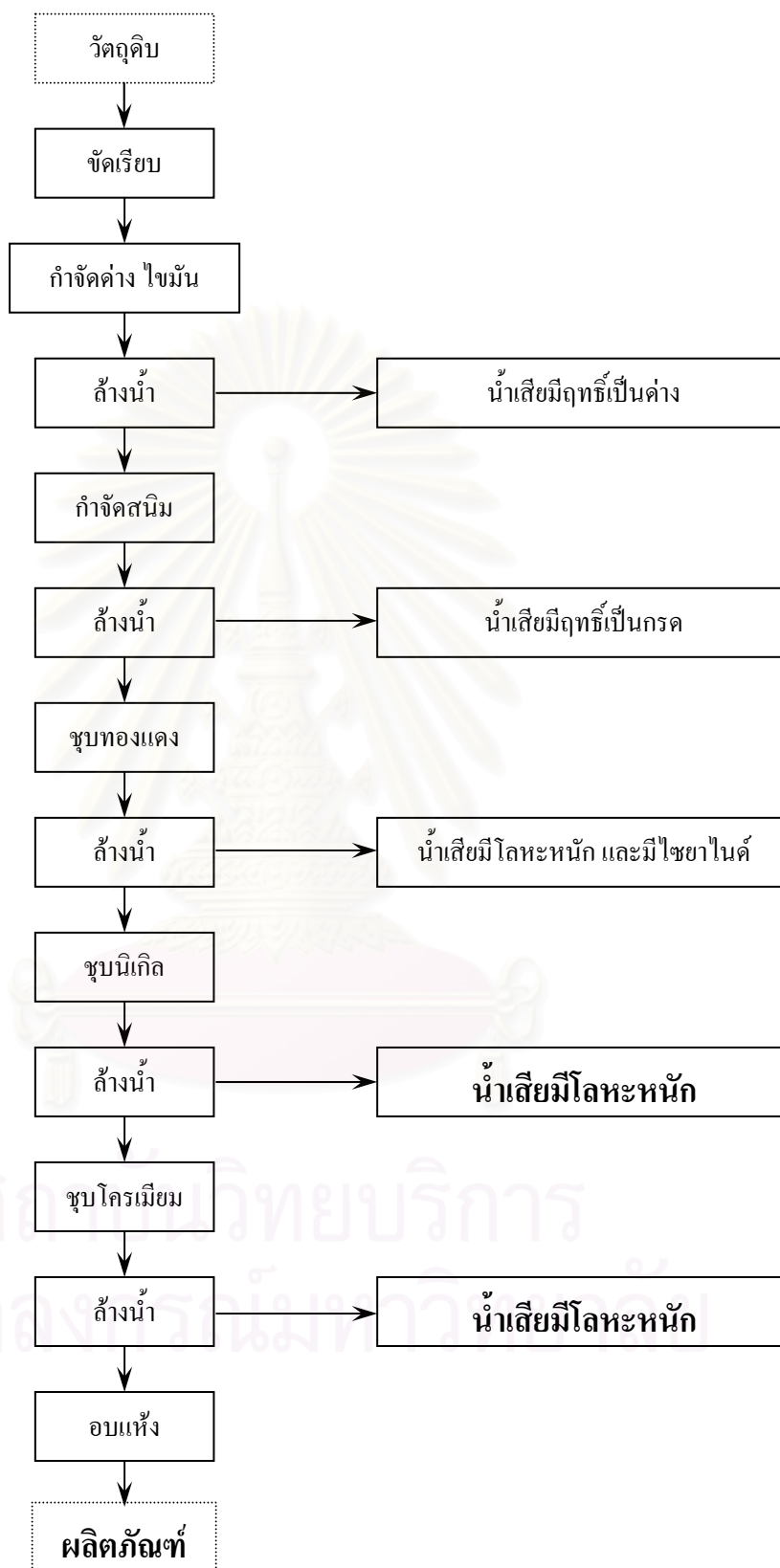
มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมัน และไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากการทิ้งน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ จึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และปริมาณไม่

มากนัก สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2-3 และ 2-4 และลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 แผนผังขั้นตอนการชุบสังกะสี (สาโรช บุญยกิจสมบัติ, 2535)





รูปที่ 2.4 แผนผังขั้นตอนการหุบโครเมียม (สาโรช บุญกิจสมบัติ, 2535)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ (อภิชน วิศวกรรมศาสตร์, 2546)

	ช่วงค่าความเข้มข้น	ค่าเฉลี่ย (mg/l)
pH	0.4 – 13.7	6.29
Chromium, Cr	0.05 – 1616	69.16
Copper, Cu	0.03 – 293.16	25.67
Nickel, Ni	<0.4 – 606.4	33.86
Zinc, Zn	1.33 – 140.71	137.65
Lead, Pb	<1 – 10.4	1.62
Silver, Ag	0.02 – 0.087	0.27
Gold, Au	0.21 – 0.51	0.35
Cyanide, CN <sup>-</sup>	0.02 – 909	81.98

## 2.2 ไซยาไนต์

### 2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนต์

ไซยาไนต์เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น คน และสัตว์น้ำ เป็นต้น ในธรรมชาติความเป็นพิษของไซยาไนต์จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นในน้ำ ดังนั้นในการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมลงในแหล่งน้ำจึงต้องมีการตรวจสอบหาปริมาณไซยาไนต์ก่อน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของหน่วยงานราชการที่กำหนดไว้

ไซยาไนต์ หมายถึง หมู่ไซยาไนต์ ( $-C\equiv N-$ ) ที่มีในสารประกอบที่เราสามารถวิเคราะห์หาปริมาณออกมาในรูปไซยาไนต์ไอออน (CN<sup>-</sup>)

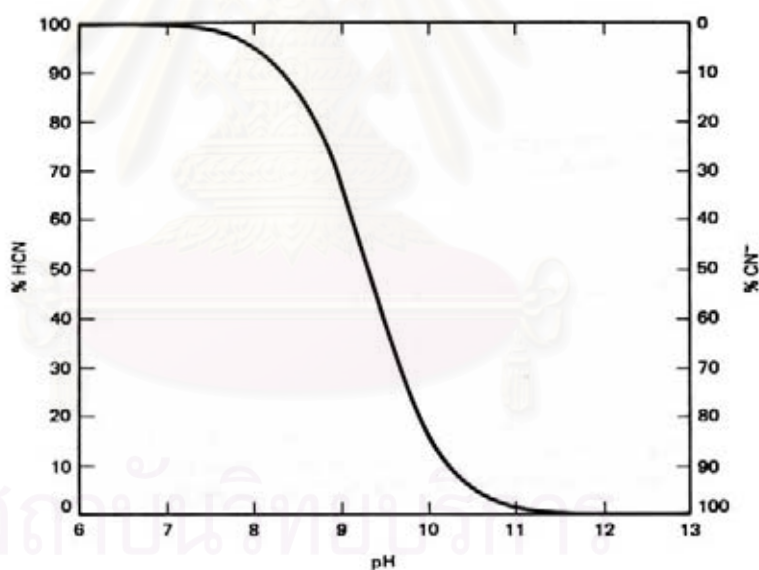
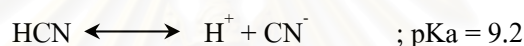
สารประกอบไซยาไนต์ที่ปล่อยออกมากับน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น จะสามารถคงตัวในสิ่งแวดล้อมในรูปแบบต่างๆ โดยทั่วไปแล้วไซยาไนต์ไอออนในรูปแบบอิสระจะเกิดขึ้นน้อยมากในธรรมชาติ เนื่องด้วยโมเลกุลนี้มีคุณสมบัติที่มีอันตรกิริยา (interaction) สูง ในสิ่งแวดล้อมไซยาไนต์จะอยู่ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ หรือถูกตรึงอยู่กับโลหะในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ความเข้มข้นของไซยาไนต์ปริมาณสูงๆ ที่ตรวจพบในดินและน้ำมักจะเป็นผลจากการจัดระบบน้ำทิ้งอันไม่เหมาะสม ไซยาไนต์ไอออนในรูปอิสระมักจะทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ เช่น

1. ทำปฏิกิริยากับธาตุกำมะถันจากไฟโรต์ และแร่ธาตุอื่นๆ ได้เป็นไซโอไซยานेट (SCN<sup>-</sup>)
2. เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ
3. ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศ
4. ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

5. ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไซยาเนต (CNO<sup>-</sup>) และย่อยสลายทางเคมีกลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และฟอร์มเมท เป็นต้น

ดังนั้นจึงสามารถแบ่งสารไซยาไนด์ชนิดต่างๆ ออกเป็น ไซยาไนด์อิสระ สารประกอบ ไซยาไนด์เชิงเดี่ยว (Simple cyanide) และสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน (Metal cyanide complexes)

2.2.1.1 ไซยาไนด์อิสระ (Simple Cyanide) หมายถึง ไซยาไนด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจน ไซยาไนด์ (HCN) หรือกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic Acid) และไซยาไนด์ไอออน (CN<sup>-</sup>) ไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นกรดอ่อนที่ระเหยได้ง่าย โดยสัดส่วนของไซยาไนด์ไอออนต่อไฮโดรเจน ไซยาไนด์ (CN<sup>-</sup> : HCN) จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและค่าคงตัวของการแตกตัวเป็นไอออน (Ka) ของ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4.6 \times 10^{-10}$  ที่ 25 องศาเซลเซียส หรือสามารถดูได้จากรูปที่ 2.5 ดังนั้นในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไปซึ่งมีพีเอชประมาณ 7 จะพบไซยาไนด์ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนด์ มากกว่าที่จะอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออน



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออนกับกรดไฮโดรไซยานิกที่พีเอชต่างๆ (Benefield และคณะ, 1982)

- 2.2.1.2 สารประกอบไซยาไนด์เชิงเดี่ยว มีสูตรทั่วไปเป็น  $A(\text{CN})_x$  โดยที่ A เป็นโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม เป็นต้น

X เป็นจำนวนเวเลนซ์ของ A ซึ่งเป็นจำนวนหมู่ของไซยาไนด์ ตัวอย่างสารประกอบไซยาไนด์เชิงเดี่ยวได้แก่ โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) และแอมโมเนียมไซยาไนด์ ( $\text{NH}_4\text{CN}$ ) เป็นต้น

สารประกอบเหล่านี้เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นสารละลาย จะแตกตัวให้ไซยาไนด์ไอออน ( $\text{CN}^-$ ) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และจุลินทรีย์ในน้ำ

2.2.1.3 สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน ได้แก่สารประกอบของโลหะอัลคาไลด์ และโลหะหนัก (Alkaline-metal cyanide) แทนด้วยสูตรทั่วไปคือ  $\text{A}_y\text{M}(\text{CN})_x$  โดยที่

A เป็นโลหะอัลคาไลด์

Y เป็นจำนวนโลหะอัลคาไลด์ที่มีสารประกอบ

M เป็นโลหะหนัก (เหล็ก แคลเซียม ทองแดง นิกเกิล เงิน สังกะสี และอื่นๆ)

X เป็นจำนวนของหมู่ไซยาไนด์ซึ่งเท่ากับเวเลนซ์ของ A ซึ่งแทนด้วย Y รวมกับเวเลนซ์ของโลหะหนัก M

ในปัจจุบันมีการนำสารประกอบไซยาไนด์มาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท แต่ที่พบว่ามีการใช้สารประกอบไซยาไนด์กันมาก ได้แก่ อุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้สารประกอบไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบในสารละลายชุบของโลหะต่างๆ เช่น การชุบทองแดงแบบไซยาไนด์ การชุบแคลเซียมแบบไซยาไนด์ การชุบสังกะสีแบบไซยาไนด์ การชุบผิวด้วยเงิน การชุบผิวด้วยทองแบบต่าง เป็นต้น

ดังนั้นหลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการชุบและล้างทำความสะอาดจะมีไซยาไนด์บางส่วนซึ่งอยู่ในน้ำยาชุบปะปนออกมากับน้ำทิ้งของโรงงาน ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจวัดปริมาณของไซยาไนด์ในน้ำทิ้งดังกล่าว และทำการบำบัดให้มีปริมาณของไซยาไนด์ตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดก่อนที่จะปล่อยลงแม่น้ำลำคลอง

ไซยาไนด์จะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากที่สุดเมื่ออยู่ในรูปกรดไฮโดรไซยานิก โดยกรดไฮโดรไซยานิกนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาไนด์ไอออน ดังสมการ



โดยปกติน้ำธรรมชาติจะมีไซยาไนด์อยู่ในรูปกรดไฮโดรไซยานิกซึ่งมีพิษต่อสัตว์น้ำรุนแรง ส่วนน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบโลหะจะมีสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถแตกตัวแล้วเกิดเป็นกรดไฮโดรไซยานิกที่มีพิษต่อสัตว์น้ำ โดยความเป็นพิษของสารละลายพวกนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย และความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อน เช่น สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนของแคลเซียม และของสังกะสี จะสามารถแตกตัวได้ดีในสารละลายที่เจือจางจึงมีความเป็นพิษต่อปลามาก ในขณะที่สถานะเดียวกัน สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนของนิกเกิลจะแตกตัวได้น้อย

## 2.2.2 ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารที่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์และสัตว์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะเกิดการรวมตัวกับฮีโมโกลบิน และเอนไซม์ไซโทโครมออกซิเดส (Cytochrome oxidase) ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการหายใจภายในเซลล์ ทำให้ไม่สามารถนำออกซิเจนไปใช้งานได้ และก่อให้เกิดอาการพิษคือ ปวดศีรษะ หายใจช้า อาเจียน กระวนกระวาย หัวใจเต้นเร็ว แรงดันเลือดต่ำ ชักหมดสติ และถึงแก่ความตายได้ (อรอนงค์ ทรงกิตติ, 2539)

มีการรายงานไว้ว่าความเข้มข้นของไซยาไนด์เพียง 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความเป็นพิษอย่างร้ายแรงต่อปลาสายพันธุ์ต่างๆ (Benefield และคณะ, 1982) ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลความเป็นพิษของไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ ที่มีใช้ในกระบวนการชุบโลหะ

ตารางที่ 2.3 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปแบบต่างๆ (U.S.EPA, 2000)

สารประกอบ	สูตร	สถานะ	TLV*	LD <sub>50</sub> **
ไฮโดรเจนไซยาไนด์	HCN	ก๊าซ ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โพตัสเซียมไซยาไนด์	KCN		5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โซเดียมไซยาไนด์	NaCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	6.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
ไซยาโนเจนคลอไรด์	CNCl		0.3 พีพีเอ็ม	
โซเดียมไซยานิด	NaCNO	ก๊าซ	-	260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โพตัสเซียมไซยานิด	KCNO	ของแข็ง	-	320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โพตัสเซียมเพอร์ไซยาไนด์	K <sub>3</sub> [Fe(CN) <sub>6</sub> ]	ของแข็ง ของแข็ง	-	1600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)

TLV\* หมายถึง Threshold Limit Value คือ ความเข้มข้นของสารที่สามารถสัมผัสหลายๆ วันต่อเนื่องกันโดยไม่เกิดผลเสีย หรืออันตรายต่อสุขภาพ

LD<sub>50</sub>\*\* หมายถึง Median Lethal Dose คือ ปริมาณสารที่เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้ว จะทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่มตัวอย่างตายลงครึ่งหนึ่ง

## 2.2.3 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารประกอบไซยาไนด์ จะต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีการบำบัดแตกต่างกันไปตามรูปของไซยาไนด์ที่มีอยู่ในน้ำ

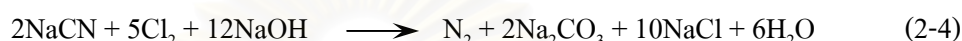
การบำบัดไซยาไนด์อิสระสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. วิธีอัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline Chlorination)
2. วิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)
3. วิธีเติมอากาศและกรด (Acid-aeration treatment)

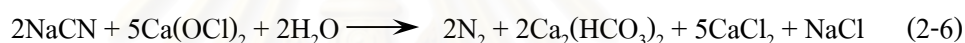
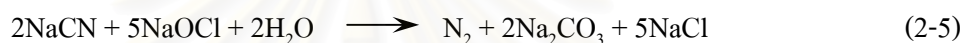
4. วิธีการทำให้เกิดเกลือของสารประกอบเชิงซ้อน (Complex salt formation)
5. วิธีการบำบัดด้วยโอโซน (Ozone treatment)
6. วิธีการบำบัดด้วยจุลชีพ (Biological treatment)
7. วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ และโรงงานชุบแข็งโลหะจะมีไซยาไนด์ออกมาจำนวนมาก ซึ่งจะต้องทำการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันทางเคมี การใช้สารเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

1. ใช้แก๊สคลอรีนทำลายไซยาไนด์อิสระ



2. ใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ทำลายไซยาไนด์อิสระ



3. เปลี่ยนไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยานेटโดยใช้เปอร์แมงกานेट



4. เปลี่ยนไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยานेटโดยใช้แก๊สคลอรีน



5. เปลี่ยนไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยานेटโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์



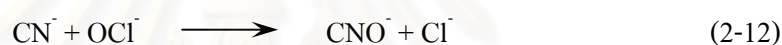
6. เปลี่ยนไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยานेटโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ในการกำจัดไซยาไนด์นั้น จะต้องอาศัยกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการเติมสารเคมีที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า หรือไม่มีความเป็นพิษ ซึ่งวิธีการต่างๆ ที่มีใช้ในการกำจัดนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

**2.2.3.1 การออกซิเดชันด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline chlorination)** เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือการเติมก๊าซคลอรีน ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชมากกว่า 10.0 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 30 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งไซยาเนตที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์อย่างมาก (ประมาณ 1000 เท่า) จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปด้วยคลอรีนที่มากเกินไป กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ที่พีเอชตั้งแต่ 10.0 ขึ้นไป และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานหลายชั่วโมง แต่หากน้ำเสียมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 จะใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 1 ชั่วโมง กลไกของปฏิกิริยาดังกล่าวสรุปได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งสมการต่อไปนี้จะสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาขั้นตอนแรก

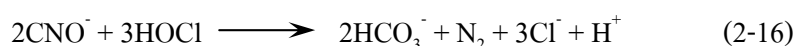


อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงนั้นซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาตามสมการ 2-11 และ 2-12 ซึ่ง Chamberlain และ Synder, 1965 ได้เสนอว่า การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตนั้น จะเกิดไซยาโนเจนคลอไรด์ขึ้นก่อน ดังสมการต่อไปนี

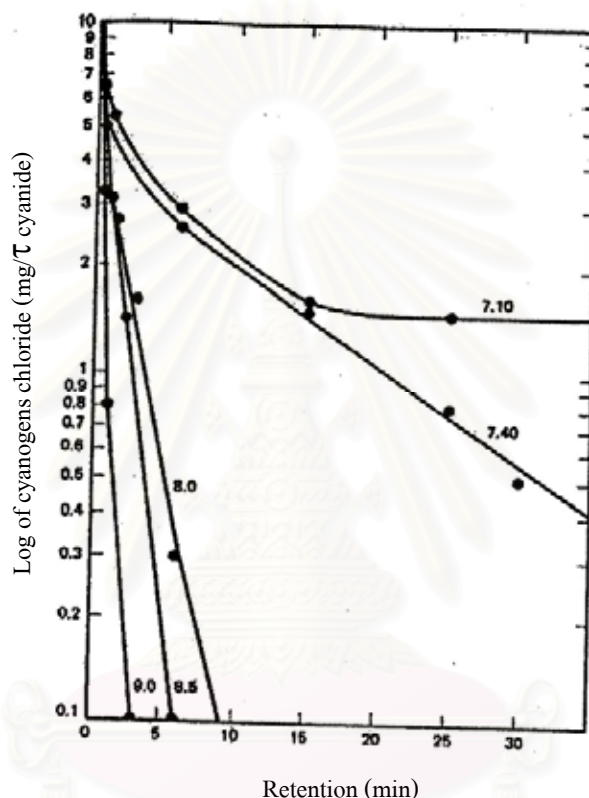


การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์ จะเกิดได้อย่างรวดเร็วที่ทุกช่วงพีเอช แต่การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนตนั้น จะเกิดขึ้นได้ช้าเมื่อพีเอชมีค่าประมาณ 7.0 แต่จะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 8.5-9.0 (รูปที่ 2-6) ดังนั้นปฏิกิริยาขั้นแรกจึงควรจะมีพีเอชประมาณ 9.0-10.0 เพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกิริยาต่อมาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนไซยาเนตไปเป็นไบคาร์บอเนต (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีคลอรีนที่มากเกินไป ที่พีเอช 8.5 กลไกของปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

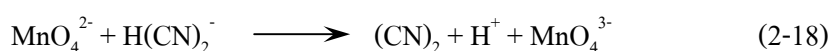
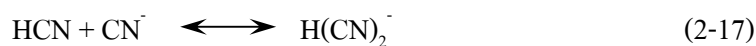


พบว่ากรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) จะเป็น Active Chlorine Species ที่ไปทำลายไซยาเนต ซึ่งกรดไฮโปคลอรัสเพียงเล็กน้อยก็สามารถออกซิไดซ์ไซยาเนตได้ เช่น ที่พีเอช 8.5 (กรดไฮโปคลอรัสประมาณ 10%) ไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้เกือบหมดภายใน 10 นาที และเมื่อพีเอชมีค่าลดลงจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ได้เร็วยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.6

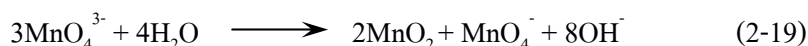


รูปที่ 2.6 ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนต (Benfield และคณะ, 1982)

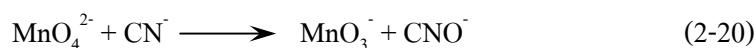
2.2.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต (Permanganate oxidation) เป็นการทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการออกซิไดซ์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) ที่พีเอช 12-14 แต่ที่พีเอช 6-9 จะเกิดก๊าซไซยาโนเจน ( $(\text{CN})_2$ ) ซึ่งมีความเป็นพิษสูงขึ้น และที่พีเอชต่ำกว่า 6 ปฏิกิริยานี้จะไม่เกิดขึ้น กลไกของปฏิกิริยาเมื่อพีเอช 6-12 จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้







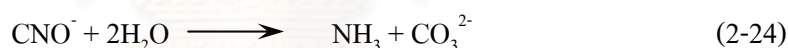
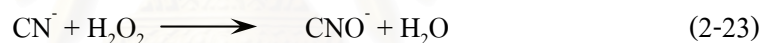
เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 12-14 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอชนั้น กลไกของปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้



ในกรณีที่พีเอชมีค่า 12-14 เช่นเดียวกัน แต่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช จะเกิดแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้ตามสมการ 2-22

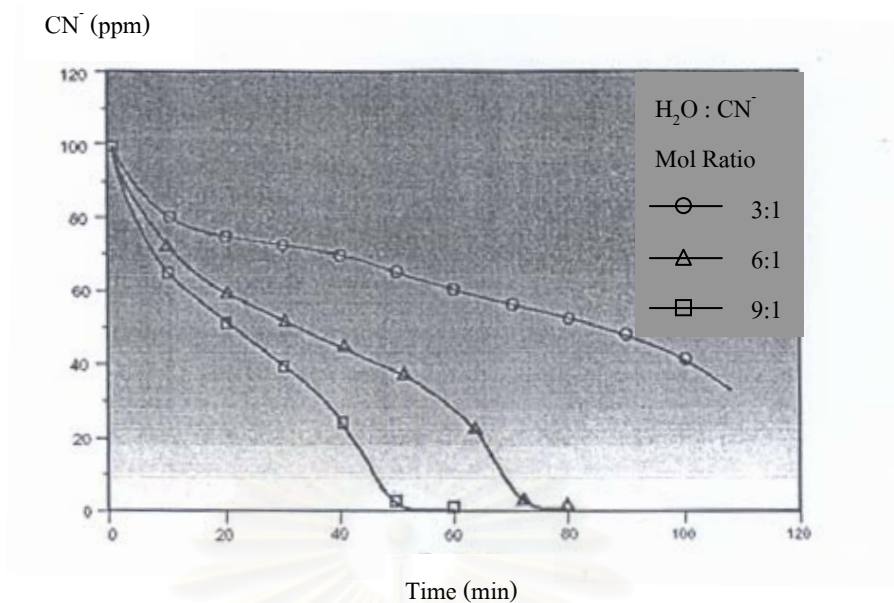


**2.2.3.3 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide oxidation)** โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไปจะไปออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกรีดิวซ์เป็นน้ำ ดังสมการต่อไปนี้



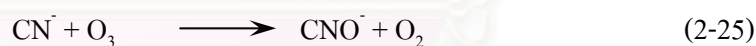
ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 9 โดยมีช่วงที่เหมาะสมอยู่ระหว่างพีเอช 10 ถึง 11 ดังนั้นการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นพิษนั้นจึงไม่เกิดขึ้น

สำหรับการกำจัดไซยาไนด์ไอออนอิสระแล้ว ในการใช้งานโดยทั่วไปจะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3-6 โมล ในการทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ 1 โมล โดยอัตราทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกิน และอุณหภูมิ โดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง จะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้ (รูปที่ 2.7)

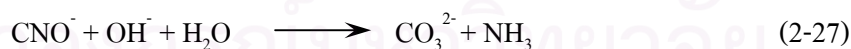


รูปที่ 2.7 การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มิลลิกรัม ต่อลิตร (Solvay Interlox, 2001)

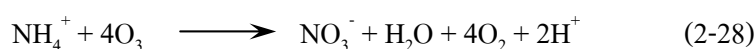
2.2.3.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozonation) เป็นการทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการเติมโอโซน ( $O_3$ ) ลงไป โดยโอโซนที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ โดยไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไซยานเนต และเกิดการออกซิไดซ์ไซยานเนตเป็นไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไปตามสมการปฏิกิริยาดังนี้ (Selm, 1959 และ Tyler และคณะ, 1951)



ในสารละลายที่มีพีเอชเป็นด่างนั้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยานเนตจะเกิดขึ้นดังสมการ



จากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้เป็นไนเตรต ซึ่งปฏิกิริยาที่สังเกตได้โดย Singer และ Zilli, 1975 เป็นไปดังนี้

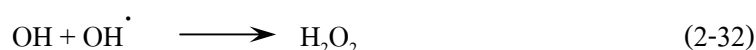
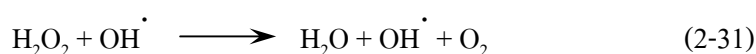
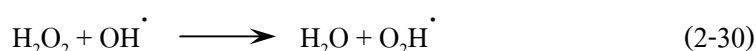
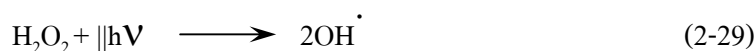


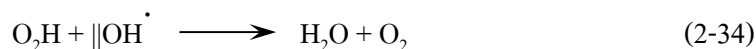
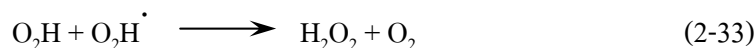
โดยที่พีเอช 9-12 จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10-15 นาที และเมื่อมีการเติมทองแดงลงไปปริมาณเล็กน้อยจะสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น โดยวิธีนี้สามารถทำลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิเกิล สังกะสี และแคดเมียมได้ แต่สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโคบอลต์ ทอง หรือเหล็ก จะทำลายได้ยาก แม้ว่าจะเติมสารเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง หรือแมงกานีส ลงไปก็ตาม แต่ว่าการใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะช่วยให้สามารถออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ได้อย่างสมบูรณ์

**2.2.3.5 กระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet oxidation)** ในการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ เช่น เฟอร์ริไซยาไนด์ และเฟอร์โรไซยาไนด์แตกตัวได้บางส่วน แต่การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมโอโซน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะช่วยให้การออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ข้อจำกัดของการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต คือ สามารถใช้ได้เฉพาะสารละลายที่ค่อนข้างใส เนื่องจากน้ำเสียจะต้องไหลผ่านเพื่อรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตเข้มข้นอย่างต่อเนื่อง การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH<sup>•</sup>) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถที่จะออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้ (Parson, 2004) แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมจะให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตร ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซนจะสามารถดูดซับรังสีในช่วงนี้ไว้ได้ ข้อดีของการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน และการออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ ไม่ก่อให้เกิดสารที่ไม่พึงประสงค์ เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น นอกจากนี้การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตยังสามารถที่จะใช้ร่วมกับ Fenton's reagent และไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อีกด้วย

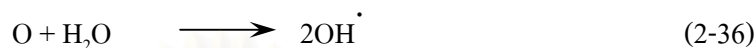
สมการด้านล่างได้สรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโอโซนร่วมกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Fernando, 1997 และ U.S.EPA, 2000)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ :

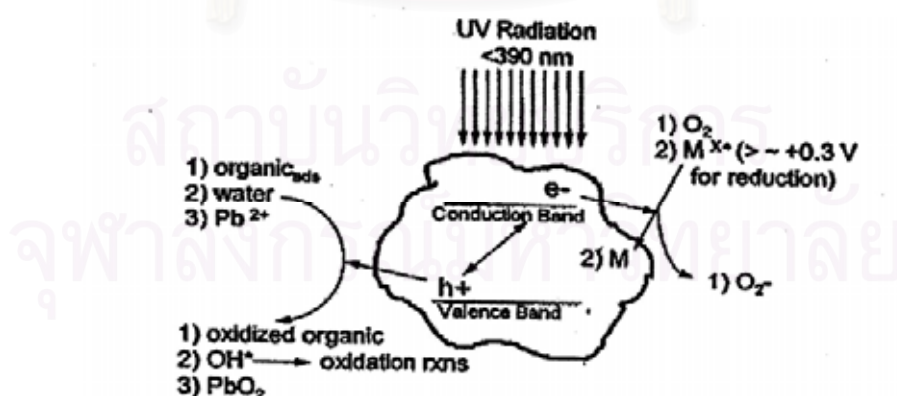
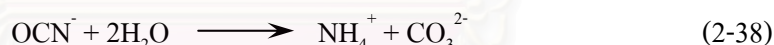




ไอโซน :

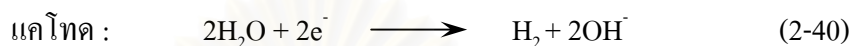
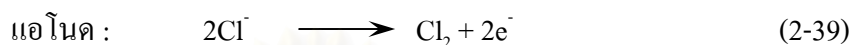


ส่วนการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 385 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับพลังงาน Band gap ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทส (Anatase) ที่เท่ากับ 3.2 eV (Chiang และคณะ, 2003) ก็จะสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 2-8) ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนั้นเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก (Vohra และ Davis, 2000) ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะได้เป็นไฮยาเนต และถูกออกซิไดซ์ต่ออย่างรวดเร็วบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไปได้เป็นไนเตรต และคาร์บอเนต หรืออาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไฮยาเนตขึ้นได้ ทำให้แอมโมเนียมและคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น (Chiang และคณะ, 2003) ดังสมการที่ 2-37 และ 2-38



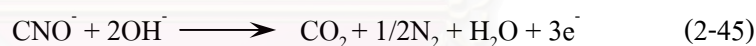
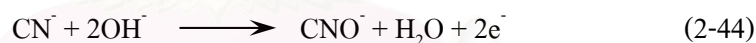
รูปที่ 2.8 แผนผังแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Madden และคณะ, 1997)

2.2.3.6 กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrochemical processes) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีแรกเป็นวิธีการทางไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ (OCI) จากโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป จากนั้นไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นจะไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป วิธีนี้สามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ogutveren และคณะ, 1999) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปดังนี้

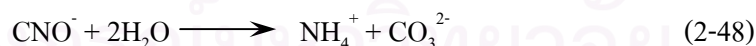
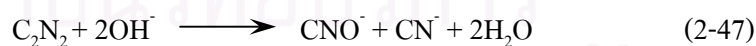


ส่วนวิธีที่สองจะเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงๆ (มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการออกซิเดชันที่แอโนดโดยตรง โดยจะเปลี่ยนไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งจะถูกสลายต่อไปได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซาลेटไอออน ขึ้นอยู่กับพีเอช (Ogutveren และคณะ, 1999) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปดังนี้

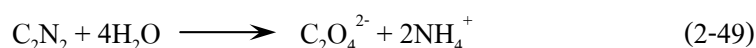
ในสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง (พีเอช 12) :



ในสารละลายที่เป็นกลางและเป็นด่างอ่อน (พีเอช 7.0-11.7) :

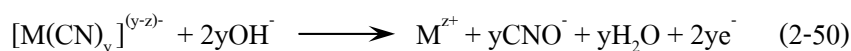


ในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน (พีเอช 5.2-6.8) :



ส่วนในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ประกอบไปด้วยไซยาไนด์ และโลหะหนัก เช่น แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) และเหล็ก (Fe) นั้น ไซยาไนด์จะเข้าไปรวมตัวอย่างรวดเร็วกับไอออนของโลหะหนัก  $\text{M}^{z+}$  ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร  $[\text{M}(\text{CN})_y]^{(y-z)-}$  กลไกในการ

สลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนนี้ยังไม่มีการยืนยัน แต่ได้มีการเสนอไว้อยู่ 2 กลไกด้วยกัน โดยกลไกแรกเป็นการออกซิไดซ์โดยตรงของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งเกิดขึ้นที่แอนอด

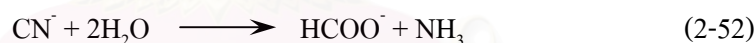


ส่วนกลไกที่สองนี้เกี่ยวข้องกับการแตกตัวทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ในสารละลาย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้



จากนั้นจึงเกิดการออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยาเนตต่อไป

**2.2.3.7 การออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation)** เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำลายไซยาไนด์ การทำลายไซยาไนด์ด้วยความร้อนสามารถใช้ได้ทั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง และการเผาไหม้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 140 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส และที่เอชประมาณ 8 ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอเมต (HCOO<sup>-</sup>) และแอมโมเนีย (Hartinger, 1994) แรงดันที่ต้องใช้สูงถึง 100 บาร์ แต่กระบวนการนี้สามารถที่จะบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง สามารถใช้ได้น้ำล้างชิ้นงาน และสารละลายเข้มข้น



**2.2.3.8 วิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์** ซึ่งได้มีการนำเสนอ หรือมีการใช้งานอยู่น้อยในทางปฏิบัติ เช่น

- การตกตะกอนไซยาไนด์ด้วยเกลือของ Fe(II) (Hartinger, 1994)
- การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Patterson, 1985)
- กระบวนการคาสโตน (Kastone process) (Patterson, 1985)
- การทำลายด้วยออกซิเจน (Hartinger, 1994)
- การทำลายด้วย SO<sub>2</sub>/Air (INCO, 1993)
- การทำลายด้วย Fenton's reagent (Eilbeck และ Mattock, 1987)

## 2.2.4 ค่ามาตรฐานของไซยาไนด์ในประเทศไทย

ค่ามาตรฐานเกี่ยวกับการปนเปื้อนไซยาไนด์ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นในกฎหมายหลายฉบับ ซึ่งได้รวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่ามาตรฐานของไซยาไนด์ในประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

มาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	ที่มา
1. มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน	ไม่เกิน 0.2	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543)
2. ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง	แหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 ไม่เกิน 0.01	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537)
3. มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	แหล่งน้ำประเภทที่ 2-4 ไม่เกิน 0.005	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537)
4. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521)
5. มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ไม่เกิน 0.1 (เกณฑ์อนุโลมสูงสุด)	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534)
6. มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ต้องไม่มี (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542)
7. มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)
8. มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล	ไม่เกิน 0.2 (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521)

## 2.3 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

### 2.3.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ อย่างไรก็ตามรังสีอัลตราไวโอเล็ตก็มีคุณสมบัติเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ คือ มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และเป็นที่ยอมรับกันมานานแล้วว่า รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้มีอยู่ในแสงอาทิตย์ แต่รังสีต่างๆ ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์นี้ส่วนใหญ่มักถูกดูดกลืน หักเห หรือสะท้อนออกไปโดยชั้นบรรยากาศซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่ (ชั้นเทอร์โมสเฟียร์ และชั้นบนของเมโซสเฟียร์) ก่อนที่จะผ่านลงมาถึงผิวโลกได้ ทำให้รังสีที่สามารถผ่านลงมาถึงผิวโลกได้มีเพียงร้อยละ 49 ของรังสีทั้งหมดเท่านั้น และรังสีที่ผ่านลงมาได้นี้ส่วนใหญ่เป็นรังสีอินฟราเรด (infrared) ถึงร้อยละ 46 และรังสีที่มองเห็นได้ (Visible light) อีกร้อยละ 45 คงเหลือเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพียงร้อยละ 9

มนุษย์สามารถสร้างรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้โดยอาศัยหลอดไฟชนิดพิเศษ ซึ่งภายในบรรจุไอระเหยของสารปรอท ซึ่งลักษณะของหลอดจะคล้ายกับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent)

เพียงแต่ผนังภายในของหลอดไม่ได้ฉาบสารฟอสโฟเรสเซนต์ (phosphorescent) ทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้เป็นแสงสีขาวที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (Lehr และคณะ, 1980) หลอดไฟยูวีที่ผลิตขึ้นมาเพื่อการบำบัดน้ำมักให้กำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นประมาณ 253.7 นาโนเมตร โดยแก้วที่ใช้ทำหลอดต้องเป็นแก้วชนิดพิเศษที่ยอมให้แสงอัลตราไวโอเล็ตส่องผ่านได้ตลอด เช่น Quartz หรือแก้วที่มีเนื้อซิลิกาสูงมากๆ เป็นต้น โดยธรรมชาติแล้วสายตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แต่รังสีนี้ทำให้วัสดุสีขาวมีความจ้ำจืดขึ้นได้ (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2537)

คลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1,000-3,900 แองสตรอม ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้เป็น 4 ชนิดตามช่วงความยาวคลื่น ดังนี้ (รัฐพนธ์ ทาทอง, 2543)

- ช่วงคลื่นยาว หรือ UV-A (ตั้งแต่ 3,200-3,900 Å) รังสีในช่วงนี้ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงผิวโลก เนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่สามารถดูดกลืนได้น้อยมาก
- ช่วงคลื่นปานกลาง หรือ UV-B (ตั้งแต่ 2,800-3,200 Å) รังสีในช่วงนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหลายประเภท และยังสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านลงมาถึงผิวโลก เนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดกลืนไว้ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น
- ช่วงคลื่นสั้น หรือ UV-C (ตั้งแต่ 2,000-2,800 Å) รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต แต่ตามปกติจะไม่พบในแสงแดดที่ส่องผ่านมาถึงผิวโลก เนื่องจากรังสีนี้เมื่อเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศของโลกก็จะถูกก๊าซโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดกลืนไว้ทั้งหมด
- ช่วงคลื่นที่เรียกว่า Vacuum UV (ตั้งแต่ 1,000-2,000 Å) รังสีในช่วงนี้ยังมีการศึกษาไม่มากนักเนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

### 2.3.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด (รัฐพนธ์ ทาทอง, 2543 และ Willy, 2002) คือ

**2.3.2.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันสูง (High-pressure lamp)** โดยหลอดความดันสูงนี้ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน หรือไอปรอท และขั้วหลอดแบบ epoxidated electrodes (wolfram wires coated with strontium and barium carbonates) ตัวหลอดทำจากวัสดุท่อควอทซ์ (Quartz pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ถึง 30 มิลลิเมตร และมีขั้วหลอดปิดอยู่ปลายทั้งสอง หลอดควอทซ์ซึ่งบรรจุปรอทที่ความดันสูง (ประมาณ 1-10 atm) เมื่อทำงานจะมีความร้อน



เกิดขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส โดยหลอดชนิดนี้จะกำเนิดแสงขาว (Visible light), รังสีอินฟราเรด (Infrared ray) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 365.0-366.3 นาโนเมตร

**2.3.2.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันปานกลาง (Medium-pressure lamp)** จะบรรจุไอปรอทอยู่ภายใน มีความดันแก๊สทั้งหมดอยู่ในช่วง 10-30 MPa (1-3 bar)

**2.3.2.3 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำ (Low-pressure lamp)** หลอดชนิดนี้สร้างขึ้นจากท่อแก้ว Uviol รังสีที่เกิดขึ้นมาจากไอปรอทซึ่งบรรจุอยู่ภายในหลอดแก้ว มีความดันประมาณ 0.001 atm โดยปกติหลอดชนิดนี้จะมีขนาด 15-60 วัตต์ ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำงานมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส หลอดชนิดความดันต่ำนี้จะมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตอยู่ประมาณร้อยละ 70 ของรังสีที่เกิดขึ้นทั้งหมด และร้อยละ 60 ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ 253.7 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค และทำลายพันธะเคมีต่างๆ

## 2.4 ทฤษฎีโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) (นรา โตเยี่ยม และคณะ, 2545)

โฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดหรือทำให้สารบริสุทธิ์ทั้งในเรื่องการบำบัดน้ำ และอากาศ หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการดูดซับ และ การฉายแสง

### 2.4.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับถูกค้นพบครั้งแรกโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับของก๊าซ และต่อมาในปี ค.ศ. 1785 Lowitz ได้ค้นพบกระบวนการดูดซับของสารละลาย ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพชีวภาพ และเคมี กระบวนการดูดซับบนของแข็งนั้นได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย กระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของ 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับก๊าซ ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) กระบวนการดูดซับนี้จะไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้นเกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการดูดซับ (sorption process (Danald,

1995)) กระบวนการดูดติดผิวสามารถใช้กำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมีเป็นสำคัญ

สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว (อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 2546 และ Frank, 1985)

โดยทั่วไปการกระจายตัวของสารระหว่างเฟสเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล หรือเมื่อไม่มีการดูดติดสุทธิเกิดขึ้น จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณตัวถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดติดกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล ไอโซเทอมของการดูดติดผิวเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของสารเมื่อเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิว กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดที่อยู่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ไอโซเทอมที่นิยมใช้อ้างอิงสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ไอโซเทอมของ Langmuir และ Langmuir-Hinshelwood

#### 2.4.1.1 แบบจำลองของ Langmuir

สมมติฐานของแบบจำลอง Langmuir ที่เรียกว่า “Ideal Localized Monolayer Model” คือ

1. โมเลกุลถูกดูดติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดติดได้เพียงโมเลกุลเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดติดผิวมีจำนวนแน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดติดผิวตัวถูกละลายจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir แสดงดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2-53)$$

โดยที่  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น มก./ก. หรือ โมล/ก.

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น มก./ก. หรือ โมล/ก.

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มก./ก. หรือ โมล/ก.

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดติดผิว

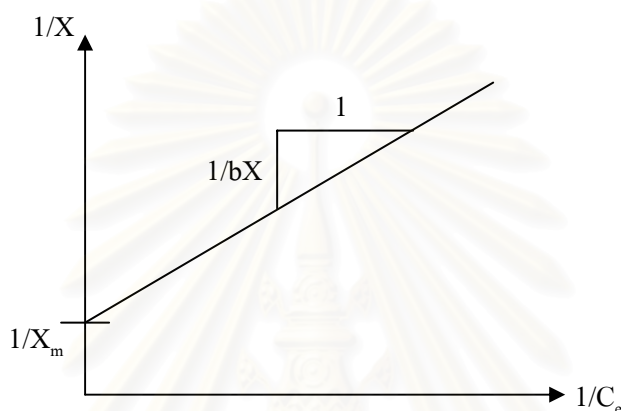
จากสมการ เมื่อ  $X$  เข้าใกล้  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าใกล้อินฟินิตี้ (Infinity) สมการที่ 2-53 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_e/X = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad (2-54)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/X$  กับ  $C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/bX_m$  สมการเส้นตรงแบบอื่นสามารถเขียนได้โดยนำ  $C_e$  ไปหารสมการที่ 2-54 จะได้สมการ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \quad (2-55)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/bX_m$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_m$  ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir

#### 2.4.1.2 แบบจำลองของ Langmuir-Hinshelwood (Chang และคณะ, 2000)

แบบจำลองของ Langmuir-Hinshelwood เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาการดูดซับของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งมีสมการอ้างอิง ดังนี้

$$q = \frac{q_{\max} b S_w}{1 + b S_w} \quad (2-56)$$

โดยที่  $q$  = ความเข้มข้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนผิวคะตะลิสต์ใน sorbed phase

$S_w$  = ความเข้มข้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนผิวคะตะลิสต์ใน liquid phase

$q_{\max}$  = ความจุสูงสุดของการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$b$  = สัมประสิทธิ์การดูดซับของ Langmuir-Hinshelwood (ลิตร/มิลลิกรัม)

และสามารถอธิบายในเทอมของอัตราเร็วปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$r = -dC/dt = k_r \theta = \frac{k_r K C_o}{1 + K C_o} \quad (2-57)$$

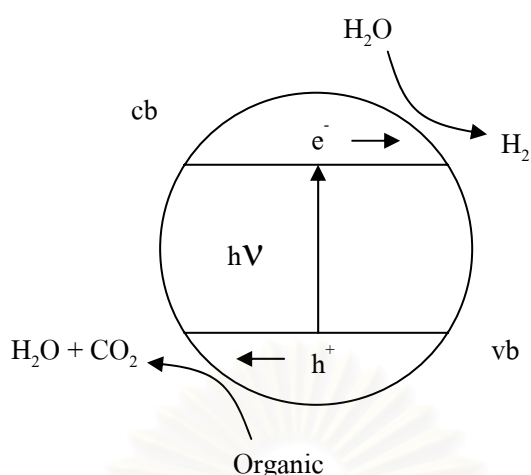
- โดยที่  $r$  = อัตราเร็วของปฏิกิริยา (โมล/ลิตร.นาท)
- $t$  = เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาท)
- $C$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (โมล/ลิตร)
- $\theta$  = สัดส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีตัวถูกละลายยึดเกาะอยู่แบบชั้นเดียว
- $k_r$  = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (โมล/ลิตร.นาท)
- $K$  = ค่าคงที่ของการดูดซับผิวที่สภาวะสมดุล
- $C_0$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (โมล/ลิตร)

#### 2.4.2 การฉายแสง (Illumination)

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส นั้น เป็นการฉายแสงลงไปบนผิวของเซมิคอนดักเตอร์ กล่าวคือ ในตัวเซมิคอนดักเตอร์จะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ทางไฟฟ้า โดยชั้นที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (มีพลังงานทางไฟฟ้าสูง) เรียกว่า valence band เมื่อได้รับการฉายแสงจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน จากชั้น valence band ไปสู่ชั้น conduction band ซึ่งเป็นชั้นที่ว่างเปล่าไม่มีพลังงานทางไฟฟ้า ทำให้ตัวเซมิคอนดักเตอร์สามารถรับและให้อิเล็กตรอนกับสารอื่นในน้ำได้ (Robert, 1996)

การสูญเสียอิเล็กตรอนเนื่องจากแสงของเซมิคอนดักเตอร์ในระหว่างที่มีการฉายแสงเกิดขึ้นนั้น อิเล็กตรอน (e) จะเกิดขึ้นที่ conduction band (cb) และช่องว่าง (holes) จะเกิดที่ valence band (vb) ถ้าเซมิคอนดักเตอร์อยู่ในสารละลายแขวนลอย อิเล็กตรอนจะสามารถย้ายไปอยู่ที่ผิวหน้าของเซมิคอนดักเตอร์ และทำปฏิกิริยากับสารในน้ำเสียทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน ส่วนช่องว่าง (holes) ที่เป็นตัวทำให้เกิดการรับอิเล็กตรอน (Kohan, 1996) เช่น ในสารประกอบอินทรีย์ holes จะทำปฏิกิริยากับเซมิคอนดักเตอร์ สารประกอบอินทรีย์จะใช้ holes ขณะที่เริ่มทำการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน และเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Huang และคณะ, 1993) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของเซมิคอนดักเตอร์ (Huang และคณะ, 1993)

การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ หรือด้วยแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างร่วมกันในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนี้ การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจากแรงทางเคมีเป็นส่วนมาก (Wang, 1997) ตัวเซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อมมักอยู่ในรูปของออกไซด์และซัลไฟด์ มีหลายชนิด เช่น ซิงค์ ออกไซด์ (ZnO), ทังสเตนออกไซด์ (WO<sub>3</sub>), แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งรวมไปถึงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีข้อดีในการนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียคือ มีความคงตัว ไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยา ไม่เกิดการกัดกร่อน และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ (อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 2546) ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลึกอยู่ 3 รูป คือ Rutile , Anatase และ Brookite ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบต่างๆ

สำหรับในงานวิจัยนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองจะเป็นของบริษัทเยอรมันภายใต้ชื่อทางการค้า Degussa P-25 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 (Degussa, 2002)

คุณสมบัติ	ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25
Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	50
pH (4% disp. In water)	3.5-4.5
Average particle size	Approx. 21 nm
Loss on drying	< 1.5
Ignition loss (%)	< 2.0
TiO <sub>2</sub> content (%)	> 99.5

## 2.5 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพ็ชรจิตร ชัยศรีสวัสดิ์สุข (2527) ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสีย และสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณไซยาไนด์ในน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการชุบโลหะด้วยทองแดง โดยใช้วิธีการออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรท์ และทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์แบบจำลองพบว่า น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจำนวน 22 แห่งในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณไม่มากนักสามารถกำจัดแบบเบดซ์ได้ เพื่อชองน้ำเสียที่มีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบจะมีสภาพเป็นค่าความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียของโรงงานแต่ละแห่งจะแตกต่างกัน โดยอยู่ในช่วง 4.40-1667.45 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้ง (ร้อยละ 99.67) คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของไซยาไนด์ต่อไฮโปคลอไรท์ 1 ต่อ 4 และเวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที เมื่อนำค่าสภาวะที่เหมาะสมนี้ไปใช้กับแบบจำลองพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 98.98 และเมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่างๆ กันในช่วง 200-1,044 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

ชุดิพงษ์ วิวัฒน์ภูวพงศ์และปริยนันท์ เพชรสุวรรณ (2542) ศึกษาการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อสลายพันธะของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนออกเป็นไซยาไนด์อิสระ โดยศึกษาถึงชนิดและกำลังวัตต์ของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะทั้ง 5 ชนิดที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ ได้แก่ Fe(III) , Ni(II) , Cu(II) , Cd(II) , และ

Ag(I) รวมทั้งระยะเวลาในการฉายแสงที่ให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวมากที่สุด พบว่า หลอดอัลตราไวโอเลตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์ สามารถทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของเหล็กที่มีความเข้มข้น 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสลายตัวได้มากที่สุดร้อยละ 28.96 ที่เวลา 10 นาที และทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสลายตัวได้มากที่สุดร้อยละ 26.83 ที่เวลา 20 นาที สำหรับสารละลายเชิงซ้อนของคอปเปอร์ แคลเดียม และซิลเวอร์ หลอดอัลตราไวโอเลตชนิดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 15 และ 40 วัตต์ไม่มีผลต่อการสลายพันธะ แต่หลอดอัลตราไวโอเลตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์ทำให้ไซยาไนด์ไอออนอิสระเกิดการรวมตัวกับไอออนโลหะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้มากขึ้น

บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์ (2547) ศึกษาผลของอิตีทีเอต่อการออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยกระบวนการใช้ไฟฟ้า และรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ที่เตรียมขึ้นจากการอ้างอิงเทียบกับน้ำเสียจริงจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (Genco) ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยของไซยาไนด์ในน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป  $CN^-$  พบว่าผลของอิตีทีเอที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ในกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของอิตีทีเอจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ดีขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น อิตีทีเอจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ โดยจะทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลง สำหรับสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเท (Batch) และใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิด low-pressure mercury lamp: Philips CLEO 15W. คือ ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที ใช้พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12.5 เวลาที่ต้องใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ร้อยละ 99 ต้องใช้เวลา 260 นาที แต่ถ้าต้องการกำจัดไซยาไนด์ร้อยละ 99 จะต้องใช้เวลาถึง 380 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้งกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าและการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายไซยาไนด์จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์

Zeevalkink และคณะ (1980) ทำการศึกษากลไก และจลนศาสตร์ของการทำลายไซยาไนด์ในน้ำด้วยโอโซน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโปตัสเซียมไซยาไนด์ไปเป็นไซยานเนตนั้น จะทำการวัดในสารละลายที่มีสภาพเป็นด่าง (พีเอช 11.8) และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะดังกล่าวอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ แต่ว่าจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ อัตราการออกซิเดชันจะมีค่าสูงจนกระทั่งการเปลี่ยนรูปของไซยาไนด์จะถูก

กำจัดโดยการถ่ายเทมวล จากการทำคูลมวลงแสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซน 1 โมลจะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ได้เท่ากับ 1 โมล

Rader และคณะ (1995) ทำการศึกษาการลดความเป็นพิษของไซยาไนด์และสารประกอบไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่า ทั้งไซยาไนด์อิสระ และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก(Fe), ทองแดง(Cu), สังกะสี(Zn),ปรอท(Hg), และสารหนู(As) จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยานตและไนไตรท์ได้ทั้งสิ้น ซึ่งไซยานตมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ นอกจากนี้สารประกอบระหว่างไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ จะถูกทำให้เสถียรและสามารถตกตะกอนได้

Augugliaro และคณะ (1997) ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไซยาไนด์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ), ค่าพีเอชของสารละลาย, กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย พบว่า อัตราการออกซิเดชันของไซยาไนด์ขึ้นกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน และกำลังของการฉายแสง ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์และค่าพีเอชไม่มีผล และถ้าไม่มีแสง หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือก๊าซออกซิเจน อย่างใดอย่างหนึ่งก็ตาม ก็จะไม่เกิดการออกซิเดชันของไซยาไนด์และไม่มีไซยานตเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ หรือการเติมอากาศจะให้ผลไม่ต่างกัน ส่วนอัตราการออกซิไดซ์ไซยานตนั้นจะขึ้นกับพีเอชเริ่มต้นด้วย ในขณะที่อัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไม่ขึ้นกับค่าพีเอช

Lea และ Adesoji (1999) ศึกษาการย่อยสลายสารโซเดียมออกซาเลต (Na Oxalate) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีการเติมอากาศและของเหลวอย่างต่อเนื่อง พบว่าอัตราของปฏิกิริยาการย่อยสลายเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง และเป็นไปตามสมการของ Langmuir-Hinshelwood กรณีที่มีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องจะให้ประสิทธิภาพการทำลายโซเดียมออกซาเลตได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าอัตราการไหลของของเหลวเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ผ่านหลอดกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้ว จะส่งผลให้อัตราการทำลายโซเดียมออกซาเลตเร็วกว่ากรณีที่ของเหลวเคลื่อนที่เร็ว และเปอร์เซ็นต์การทำลายโซเดียมออกซาเลตที่มากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 75 เมื่อมีอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของของเหลวต่ออัตราการไหลของก๊าซ (L:G ratio) เท่ากับ 1

Carrillo-Pedroza และคณะ (2000) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยโอโซน โดยทำการทดลองที่พีเอช อัตราการเติมโอโซน อัตราการไหลของก๊าซ และความ



เข้มข้นของไซยาไนด์ต่างกัน โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซผสม และจะเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ในสารละลาย โดยค่าคงที่อัตราหาได้จากการทำปฏิกิริยามีค่าประมาณ  $10^{-5}$  โมล/ลิตร วินาที การประมาณปริมาณโอโซนที่ต้องใช้จากสมการพบว่าต้องใช้โอโซน 1 โมล ในการทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ 1 โมล ซึ่งจะได้ไซยาเนต 1 โมล จากนั้นได้ทำการยืนยันผลที่ได้นี้ โดยการทดลองกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่จำนวน 2 แห่งในเม็กซิโกอีกครั้งหนึ่ง

Dijkstra และคณะ (2001) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการสลายกรดฟอร์มิก เปรียบเทียบ 3 ระบบด้วยกัน คือ ระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารแขวนลอย ระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบติดบนผนังถังปฏิกรณ์ และระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบติดบนผิวของเม็ดแก้ว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่า ระบบที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบติดบนผิวผนังถังปฏิกรณ์จะมีข้อจำกัดในการถ่ายเทมวลสารเพียงระบบเดียว แต่หากมีการเติมอากาศเข้าไปในระบบจะช่วยลดปัญหาในเรื่องข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลสารดังกล่าวลง และทำให้อัตราการย่อยสลายกรดฟอร์มิกเพิ่มขึ้นได้ ในส่วนของการทดลองในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบติดบนผิวของเม็ดแก้วจะมีทดลองกับเม็ดแก้ว 2 ขนาดด้วยกัน พบว่า การใช้ขนาดเม็ดแก้วที่ใหญ่กว่าจะให้ผลการย่อยสลายได้ดีกว่าการใช้เม็ดแก้วขนาดเล็ก (เมื่อใช้จำนวนเม็ดที่เท่ากัน) เนื่องจากปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีมากกว่านั่นเอง

สำหรับกรณีระบบตัวเร่งเป็นสารแขวนลอยอยู่ในสารละลาย จะไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทมวลสาร และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากการมีสารแขวนลอยอยู่ในสารละลายมากเกินไปจะไปจำกัดการส่องผ่านของแสง นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของการกำจัดสารแขวนลอยดังกล่าวหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาด้วย

Kim และคณะ (2001) ทำการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้หลอดยูวีชนิด High pressure mercury กำลัง 400 วัตต์ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ  $1.92 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.2 กรัมในสารละลาย 300 มิลลิลิตร และปริมาณโลหะที่ใช้กำหนดให้คงที่เท่ากับร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 ที่ถูกกระตุ้นโดยนิเกิล คอปเปอร์ โคบอลต์ และซิลเวอร์ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวในการนำมาใช้กำจัดไซยาไนด์ การทำงานของ Ni-Cu/TiO<sub>2</sub> ที่ทุกๆ อัตราส่วนของ Cu/Ni จะมีค่าสูงกว่าการใช้ Ni/TiO<sub>2</sub> หรือ Cu/TiO<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว ซึ่งหมายความว่าการใช้ Ni เกิด

ร่วมกับทองแดงจะมีผลการทำงานที่เสริมกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วน Cu/Ni เท่ากับ 0.3 จะมีการทำงานที่ดีที่สุด

Aguado และคณะ (2002) ทำการศึกษาถึงการนำเอาไทเทเนียมไดออกไซด์ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยนำเสียดังเคราะห์ที่ใช้เตรียมได้จากโปตัสเซียมไซยาไนด์ และเฮกซะไซยาโนเฟอเรต ให้มีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\text{TiO}_2$ ) ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองเท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11.5 และใช้หลอดยูวีชนิด Medium pressure mercury (Heraeus TQ-150) กำลัง 150 วัตต์ และมีการเวียนสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเพื่อใช้ป้องกันความร้อนของสารละลายที่สูงเกินไป และเพื่อตัดรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 300 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าการใช้ซิลิกาเป็นวัสดุรองรับ (Support) นั้น เป็นวิธีที่ดีในการเตรียมวัสดุที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจะช่วยในการทำงานของปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตของไซยาไนด์ และเพิ่มคุณสมบัติในการตกตะกอนให้ดีขึ้น การใช้ซิลิกาที่มีโครงสร้างขนาดปานกลางเช่น SBA-15 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ไอออนอิสระได้ดีที่สุด ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Degussa P-25 แต่ว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะดีกว่า

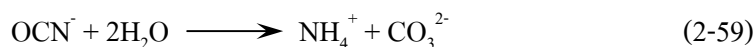
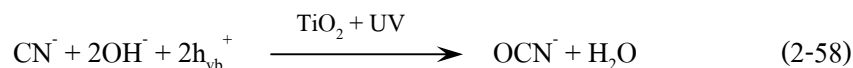
Dabrowski และคณะ (2002) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยทำการหาอัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้น พีเอช ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซที่ใช้ และอุณหภูมิต่างๆ พบว่าเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ต และออกซิเจน จะมีผลให้อัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่ขึ้นกับความดันย่อยของออกซิเจน (0.2-1.0 บรรยากาศ) ที่อัตราการไหลของก๊าซในช่วงที่ทำการศึกษา ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 ไปเป็น 35 องศาเซลเซียสนั้น ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์

Hong และคณะ (2002) ศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารดูดซับในการดูดซับและย่อยสลายสารไคคลอโรเบนซีนจากน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวดูดซับเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์ และแบบการไหลต่อเนื่อง ในการทดลองแบบแบตช์แบ่งเป็นการทดลองที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอย และเคลือบติดอยู่กับผิวของเม็ดตัวกลางที่เป็นโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) และควอตซ์ (quartz) พบว่าในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารไคคลอโรเบนซีนจะเกิด

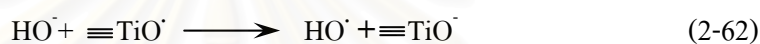
เป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ เกิดเป็น 2-คลอโรฟีนอล, 2,3-ไดคลอโรฟีนอล, 1,2-ไดไฮดรอกซีเบนซีน และ o-เบนโซควิโนน โดยการเพิ่มขึ้นของสารออกซิแดนซ์ประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของไดคลอโรเบนซีน สมการปฏิกิริยาของการย่อยสลายอธิบายได้โดยสมการของ Langmuir-Hinshelwood อัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายกรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบติดบนผิวของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้น จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการเคลือบติดบนผิวของควอตซ์ อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายในกรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบติดบนผิวตัวกลางยังเกิดได้ช้ากว่าการใช้เป็นสารแขวนลอย สำหรับความแตกต่างของการทดลองแบบแบดจ์และแบบการไหลต่อเนื่องนั้น พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องเป็นไปได้เร็วกว่าผลการทดลองแบบแบดจ์ และสมการปฏิกิริยาที่ใช้อ้างอิงสามารถใช้สมการของ Langmuir-Hinshelwood ได้ ซึ่งการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแบบสารแขวนลอยยังคงให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารที่ต้องการได้เร็วกว่าการใช้เคลือบติดบนผิวของตัวกลางใดๆ แต่การนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่นั้นจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารที่ต้องการในรอบการทดลองต่อไปลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากรอบที่ผ่านมา

Chiang และคณะ (2003) ทำการศึกษาจลนศาสตร์ และกลไกของการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้น 0.39-3.85 มิลลิโมลาร์ ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8.5-12 และอัตราการเติมอากาศ 500 มิลลิลิตรต่ออนาที ผลการทดลองพบว่า หากใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 1 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าอัตราการออกซิเดชันสูงสุดประมาณ 0.75 มิลลิโมลาร์ต่ออนาที ถ้าใช้มากกว่านี้จะทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้นขัดขวางรังสี เป็นผลให้อัตราการออกซิเดชันลดลง นอกจากนี้การเติมอากาศยังส่งผลต่อการออกซิไดซ์ของไซยาไนด์ เพราะนอกจากจะทำให้คู่ของ  $e^- - h^+$  มารวมตัวกันได้ช้าลงแล้ว ยังทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายได้อย่างทั่วถึงในสารละลายด้วย แต่ต้องเติมในอัตราที่เหมาะสม เพราะหากมากเกินไปฟองอากาศจะไปบดบังทางเดินของแสง และถ้าน้อยเกินไป คู่  $e^- - h^+$  ก็จะกลับมารวมตัวกันเร็วขึ้น ทำให้ไม่มีตัวช่องว่างที่จะแลกเปลี่ยนสารปนเปื้อนได้ ส่วนกรณีที่มีการปนเปื้อนของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายไซยาไนด์เริ่มต้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ลดลง เนื่องจากการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนเกิดขึ้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เกิดเป็น  $\equiv\text{TiO}^+$  ลดลง

สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ กลายเป็นไซยาเนต และสุดท้ายจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรต และคาร์บอเนต ขณะเดียวกันไซยาเนตอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปเป็นแอมโมเนียมและคาร์บอเนตได้



ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และฟรีเรดิคัลของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการกระตุ้นโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์เกิดเป็นไซยานต



Parga และคณะ (2003) ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การออกซิเดชันด้วยคลอรีนไดออกไซด์ ( $\text{ClO}_2$ ) การออกซิเดชันด้วยโอโซน ( $\text{O}_3$ ) และการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการออกซิเดชันด้วยคลอรีนไดออกไซด์นั้น น้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.20 2.57 และ 11.23 จากผลการทดลองพบว่า ไซยาไนด์อิสระจะสามารถถูกทำลายได้ทุกค่าของพีเอช แต่วสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์จะถูกทำลายได้ดีเมื่อสารละลายมีพีเอชสูง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์อิสระจะเท่ากับร้อยละ 99.9 ที่ทุกช่วงพีเอช และประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์จะเท่ากับร้อยละ 58.8 25.2 และ 78.8 ที่พีเอช 9.20 2.57 และ 11.23 ตามลำดับ

ผลการทดลองโดยใช้การออกซิเดชันด้วยโอโซนนั้น พบว่า อัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับอัตราการเติมโอโซน ซึ่งสามารถเขียนแทนได้โดยสมการ

อัตราการออกซิเดชัน, มิลลิกรัมต่อลิตร นาที =  $(190.5 \pm 15)(\text{อัตราการเติมโอโซน, กรัม/นาที})$

และเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยจะมีค่าคงที่อัตราประมาณ  $10^{-5}$  โมล/ลิตร วินาที

ส่วนผลของการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พบว่าจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชมีค่าประมาณ 10 โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโปตัสเซียมเฟอร์ไรไซด์ ( $K_3Fe(CN)_6$ ) มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิโมลาร์

Barakat, Chen และ Huang (2004) ได้ทำการศึกษาเพื่ออธิบายถึงผลของ Cu(II) ไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ โดยทำการทดลองที่พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เวลา และอัตราส่วนคอปเปอร์ต่อไซยาไนด์ต่างๆ โดยในการทดลองมีสถานะดังนี้ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ  $10^{-3}$  โมลาร์ คอปเปอร์ที่ใช้เติมอยู่ในรูปของ  $Cu(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$  ความเข้มข้นในช่วง  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-3}$  โมลาร์ พีเอช 11 ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าประมาณ 78% ของไซยาไนด์อิสระ ( $10^{-3}$  โมลาร์) สามารถถูกกำจัดหลังจากเวลาในการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง เมื่อมีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร และพีเอชเท่ากับ 11 คอปเปอร์อิสระ  $10^{-2}$  โมลาร์ สามารถกำจัดได้หมดโดยใช้เวลาที่สั้นกว่า (3 ชั่วโมง) การมีทั้ง Cu(II) และ  $CN^-$  จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด  $CN^-$  เมื่ออัตราส่วน Cu: $CN^-$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นด้วย

การเพิ่มความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจาก 100 วัตต์ เป็น 200 วัตต์ จะทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์ให้มีค่าสูงสุดคงที่ได้ในเวลาที่ยาว (ประมาณ 150 นาที) ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นมากกว่านี้ประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่าลดลง เนื่องมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปจะไปบังทางเดินของแสง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4-digits Balance) : Mettler-Toledo, Dragon 204
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) : Denver Instrument, Model 215
3. เครื่องไอออนโครมาโตกราฟี (Ion Chromatography, IC) : Dionex
4. เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer) : Thermo electron corporation, Helios Alpha
5. เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (DI water 18.2 mΩ) : ELGA, Purelab Maxima
6. เครื่องปฏิกรณ์แก้วสำหรับการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ โดยมีกรดกับเบสควบคุมอัตราการไหลของสารละลายขาเข้า และอากาศขาเข้า
7. หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต : Philips CLEO 15W
8. อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
9. บีมเติมอากาศ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium cyanide, KCN) : Ajax, AR 96%
2. ไททานเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
4. กรดไนตริก (Nitric Acid, HNO<sub>3</sub>) : Carlo ERBA, 65%

#### 3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในการวิจัยนี้ จะทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป CN<sup>-</sup> เพื่อให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่จะบำบัดอยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (Genco) ซึ่งได้มีการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไซยาไนด์อิสระ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการสุ่มเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ทั้งสิ้น 4 ครั้ง ในวันที่ 11 16 23 และ 30 ธันวาคม 2546 ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม  
(บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์, 2547)

พารามิเตอร์	หน่วย	11/12/03	16/12/03	23/12/03	30/12/03
การนำไฟฟ้า (Conductivity)	มิลลิซีเมนส์/ซม.	12.47	11.39	16.74	13.58
ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)	กรัม/ลิตร	6.22	5.70	8.37	6.79
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TIC)	มก./ลิตร	30.27	48.70	31.80	33.15
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	มก./ลิตร	111.57	244.43	284.07	672.33
อีซีทีเอ	กรัม/ลิตร	11.75	13.48	15.17	18.87
ไซยาไนด์ไอออน	มก. CN/ลิตร	95.28	264.72	74.38	99.44
ทองแดง (Cu)	มก./ลิตร	12.69	28.68	3.87	12.47
สังกะสี (Zn)	มก./ลิตร	0.51	1.33	8.17	1.25
โครเมียม (Cr)	มก./ลิตร	30.21	26.58	8.89	26.82
นิกเกิล (Ni)	มก./ลิตร	30.06	9.37	17.92	31.16
เงิน (Ag)	มก./ลิตร	0.71	0.01	0.02	0.11

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในแบบทีละเท โดยหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม และส่วนที่ 2 จะทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์

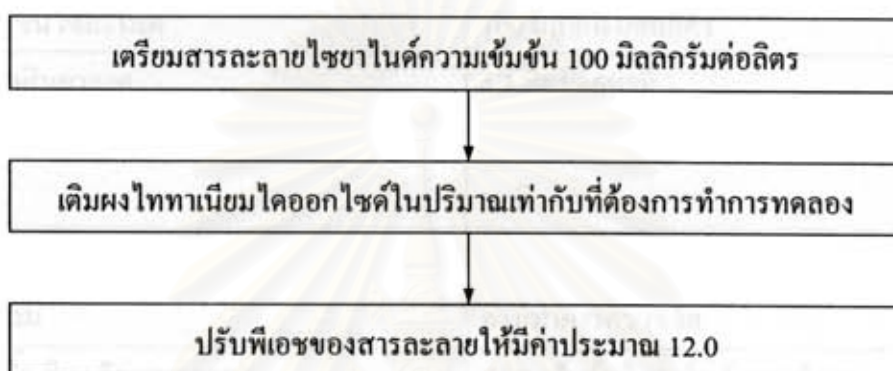
#### เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

- ไซยาไนด์ : IC (Ion Chromatography)
- ไซยาเนต : IC (Ion Chromatography)
- พีเอช : pH meter

#### 3.3.1 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท (Photocatalytic processes; Batch)

ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดไซยาไนด์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในแบบทีละเท พารามิเตอร์ที่จะวิเคราะห์ในที่นี้ คือ ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ และอัตราการเติมอากาศ โดยแบ่งการ

ทดลองในขั้นตอนนี้ออกเป็น 2 ครั้ง ทำการทดลองต่อครั้ง ครั้งละ 3 รอบ ใช้สารละลายไซยาไนด์ เริ่มต้นที่ความเข้มข้นไซยาไนด์อิสระ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 12.0 เนื่องจากเมื่อดำเนินการทดลองไปค่าพีเอชจะลดลงเล็กน้อย (ประมาณ 0.5-1.0) จึงควบคุมพีเอชให้มีค่าสูงกว่าค่าคงที่การแตกตัวของกรดไฮโดรไซยานิก (พีเอช 9.2) เพื่อความปลอดภัยแก่ตัวผู้ทดลอง โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารละลายดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.1 ผังการเตรียมสารละลายไซยาไนด์สำหรับการทดลองแบบทีละเท

### 3.3.1.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์

เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของไททาเนียมไดออกไซด์ สำหรับการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในแบบทีละเท โดยมีการอ้างอิงค่าความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในสภาวะเดียวกับการทดลองนี้ รวมอยู่ด้วย คือ 0.10 กรัมต่อลิตร (บัณฑิต ชูเชิควัฒนศักดิ์, 2547) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผู้วิจัยเห็นว่าในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลในสองสภาวะ คือ แบบทีละเท และแบบการไหลต่อเนื่อง ดังนั้น จึงทำการทดลองในส่วนนี้อีกครั้งโดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของทั้งสองสภาวะให้สอดคล้องกัน เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกันได้ ค่าตัวแปรต่างๆ ในขั้นตอนการทดลองนี้ดังตารางที่ 3.2 และมีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.2

### 3.3.1.2 ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ โดยพิจารณาผลการทดลอง อยู่ในรูปของภาระบรรทุก ที่มีผลต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเท ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 และมีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

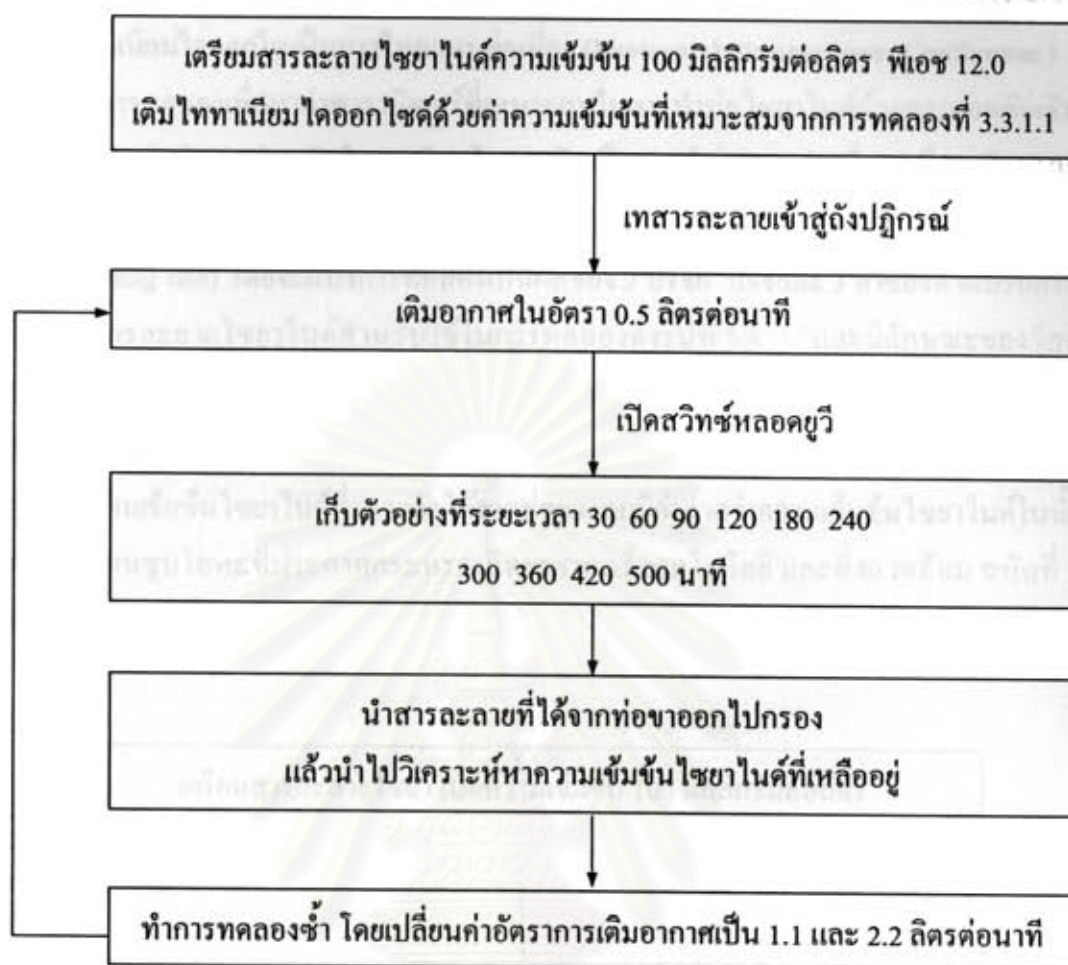
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์	0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรควบคุมคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์	750 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นไซยาไนด์	100 มิลลิกรัมต่อลิตร
อัตราการเติมอากาศ	1.1 ลิตรต่อนาที
ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	30 60 90 120 180 240 300 360 420 500 นาที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ และ ไซยานต

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
อัตราการเติมอากาศ	0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรควบคุมคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์	750 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นไซยาไนด์	100 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.3.1.1
ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	30 60 90 120 180 240 300 360 420 500 นาที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ และ ไซยานต



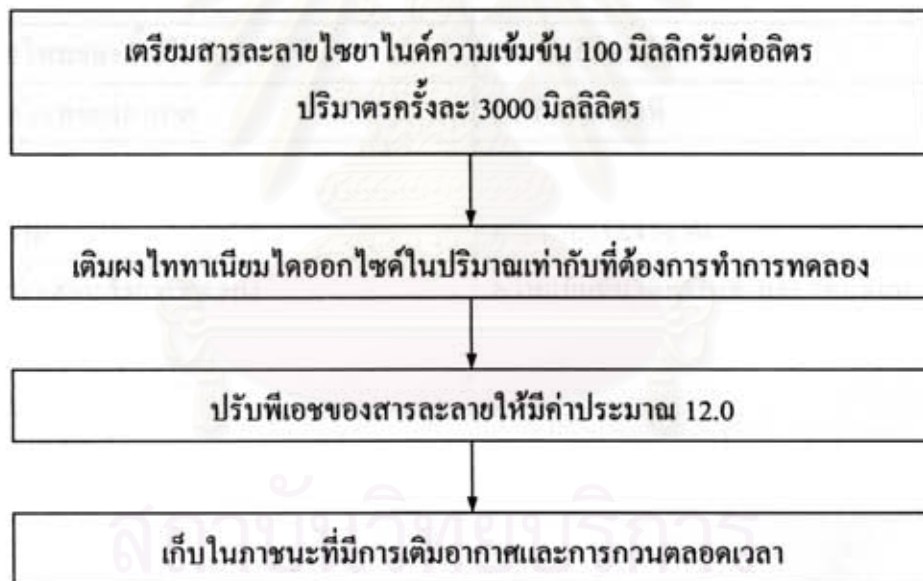
รูปที่ 3.2 ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททานเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ใช้



รูปที่ 3.3 ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต  
ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท เพื่อศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ

### 3.3.2 การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง (Photocatalytic processes; Continuous)

ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดไซยาไนด์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะศึกษาผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ และอัตราการไหลของอากาศ และคิดเทียบเป็นภาระบรรทุก (loading rate) โดยจะแบ่งการทดลองเป็นผลของ 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ค่าของตัวแปรอิสระ การเตรียมสารละลายไซยาไนด์สำหรับใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.4 และมีลักษณะของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองดังภาพที่ 3.8 การทดลองจะมีการป้อนสารละลายผ่านถังปฏิกรณ์เป็นรอบๆ โดยจะเวียนสารละลายขาออกจากรอบที่ผ่านเข้ามาป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์อีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้จนกว่าค่าความเข้มข้นไซยาไนด์ที่ตรวจวัดได้จากท่อขาออกมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนด (0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ 3.4 ผังการเตรียม Stock Cyanide สำหรับการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

### 3.3.2.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์

เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม ในการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 3.4 และมีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์

ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์	0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรควบคุมคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
ปริมาตรถังปฏิกรณ์	750 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นไซยาไนด์	100 มิลลิกรัมต่อลิตร
อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	100 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของอากาศ	1.1 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ และ ไซยาเนต

### 3.3.2.2 ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศ

เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ โดยจะพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งจะให้อัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้นทีละ 2 เท่าอย่างมีนัยสำคัญเพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากผลของอัตราการเติมอากาศที่ต่างกัน ทำให้ปริมาณของออกซิเจนในสารละลายต่างกัน และขนาดของฟองอากาศที่ได้ก็ต่างกันด้วย ข้อมส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Lea และ Adesoji, 1999) ค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และมีแผนผังขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์

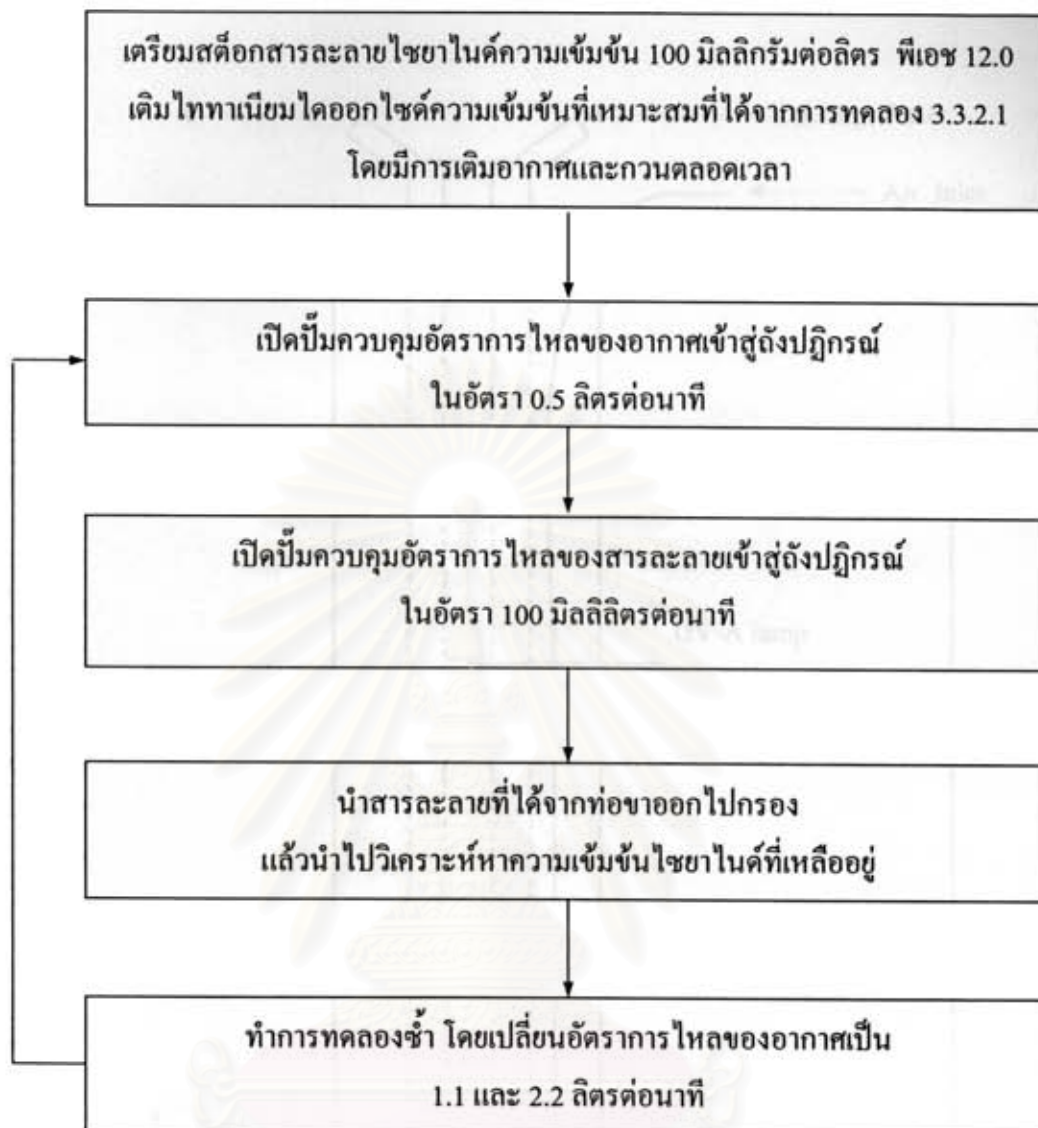
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการศึกษา
อัตราการไหลของอากาศ	0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรควบคุมคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
ปริมาตรถังปฏิกรณ์	750 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นไซยาไนด์	100 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.3.2.1
อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์	100 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการตรวจวัด
ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ และ ไซยาเนต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสี  
อัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททานเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง  
เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไททานเนียมไดออกไซด์

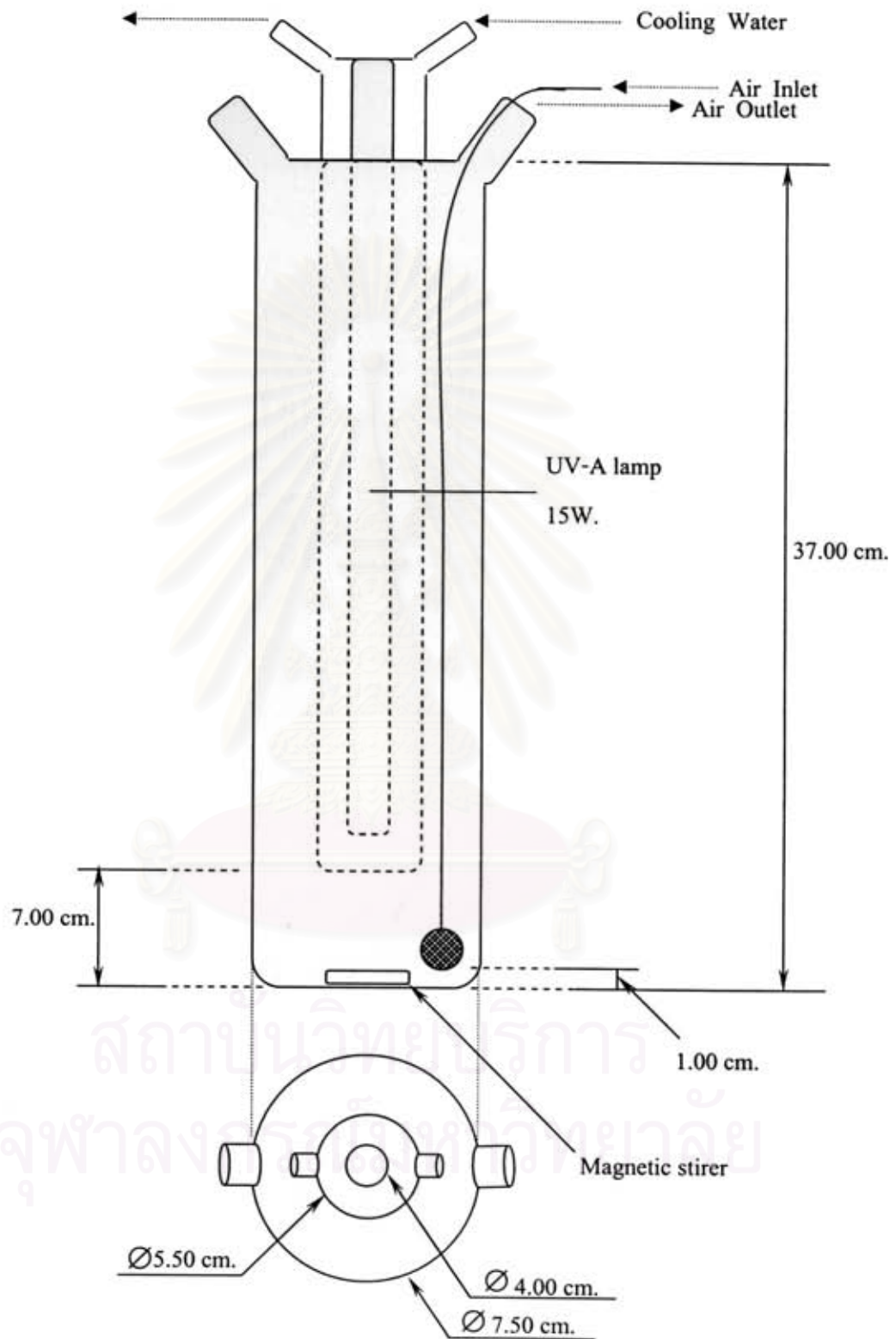
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



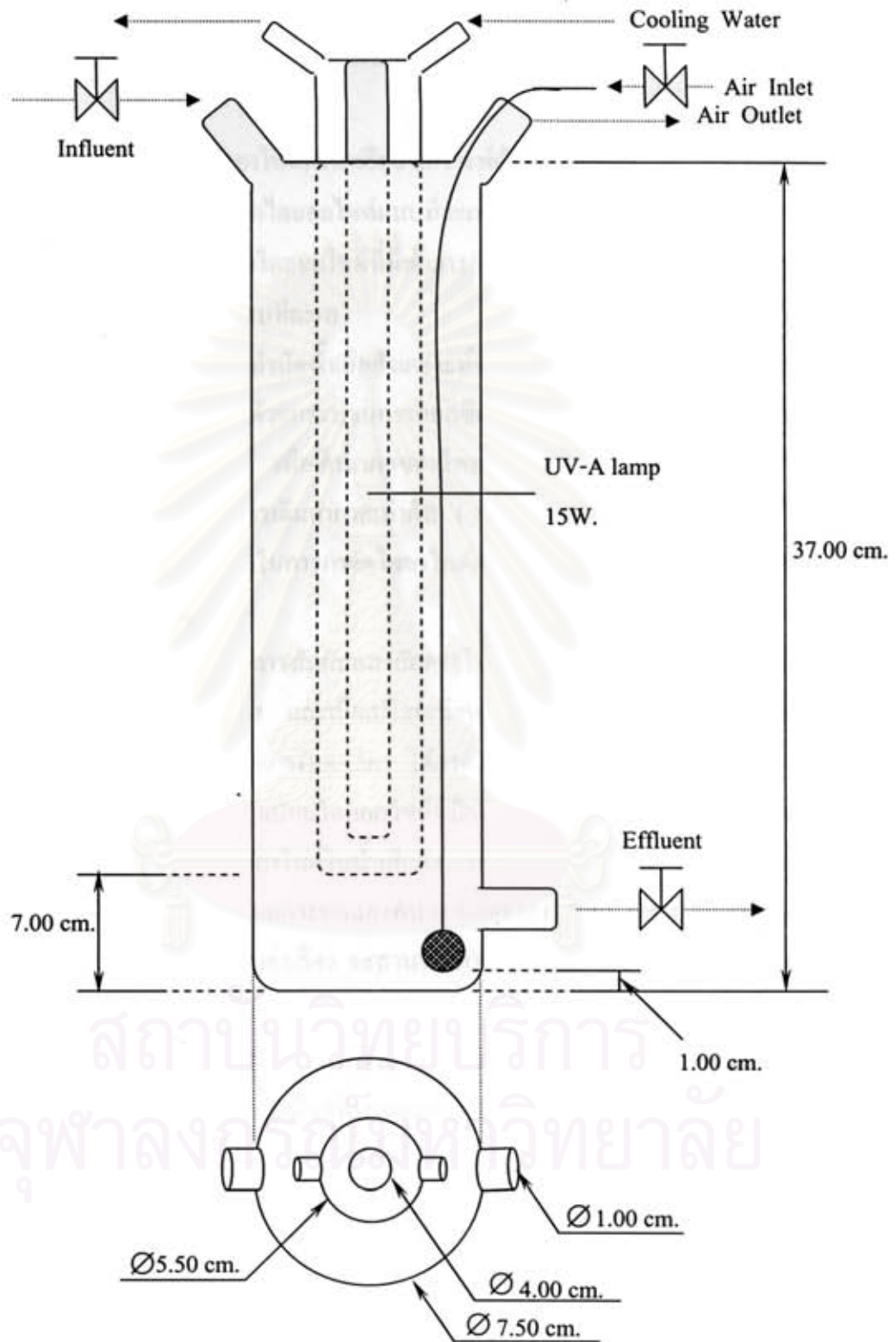
รูปที่ 3.6 ผังการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการออกซิเดชันด้วยรังสี  
อัลตราไวโอเลตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง  
เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

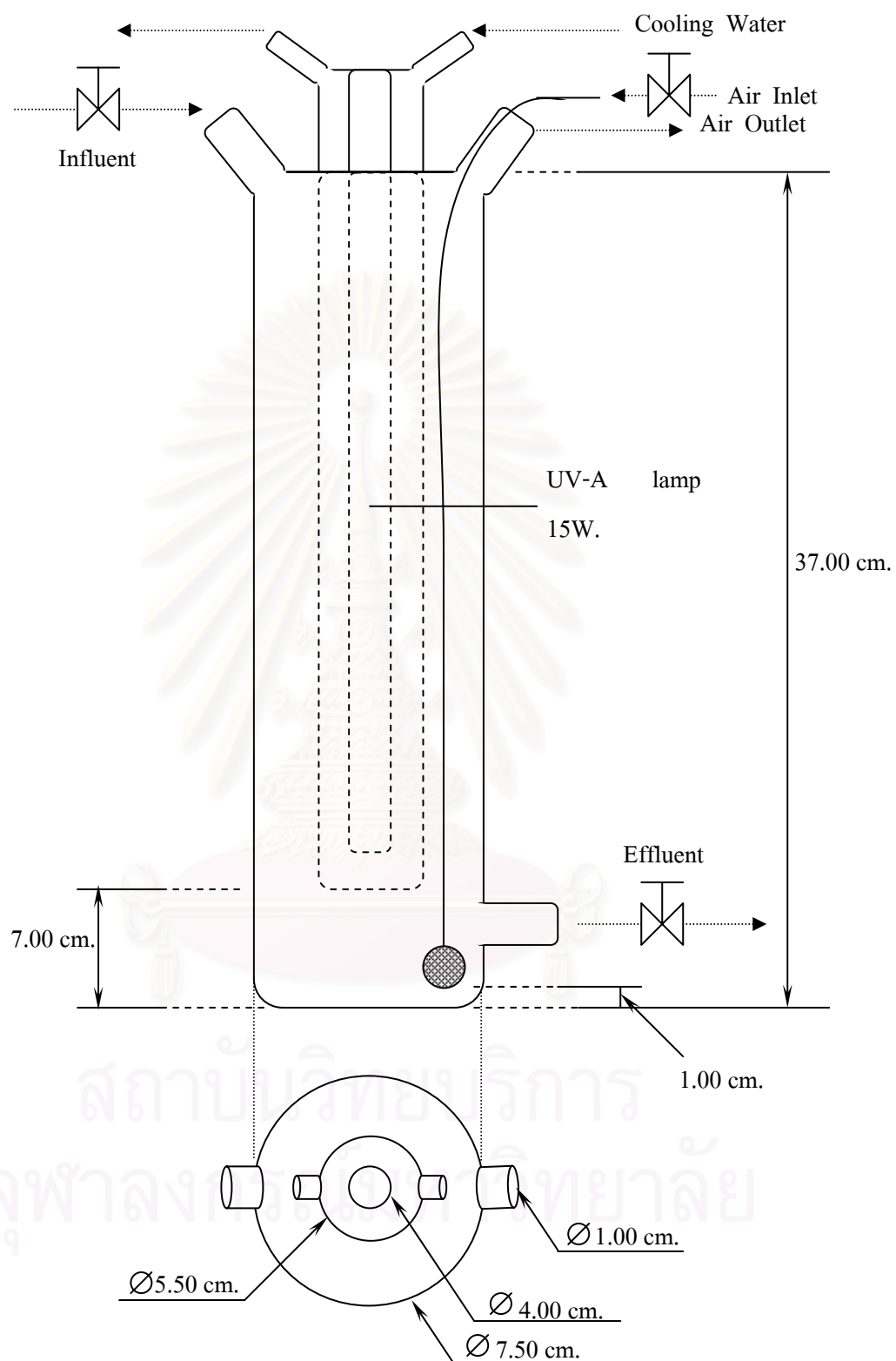




รูปที่ 3.7 ลักษณะดังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองแบบทีละเท



รูปที่ 3.8 ลักษณะดังปฏิกิริยาสำหรับการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 3.8 ลักษณะถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

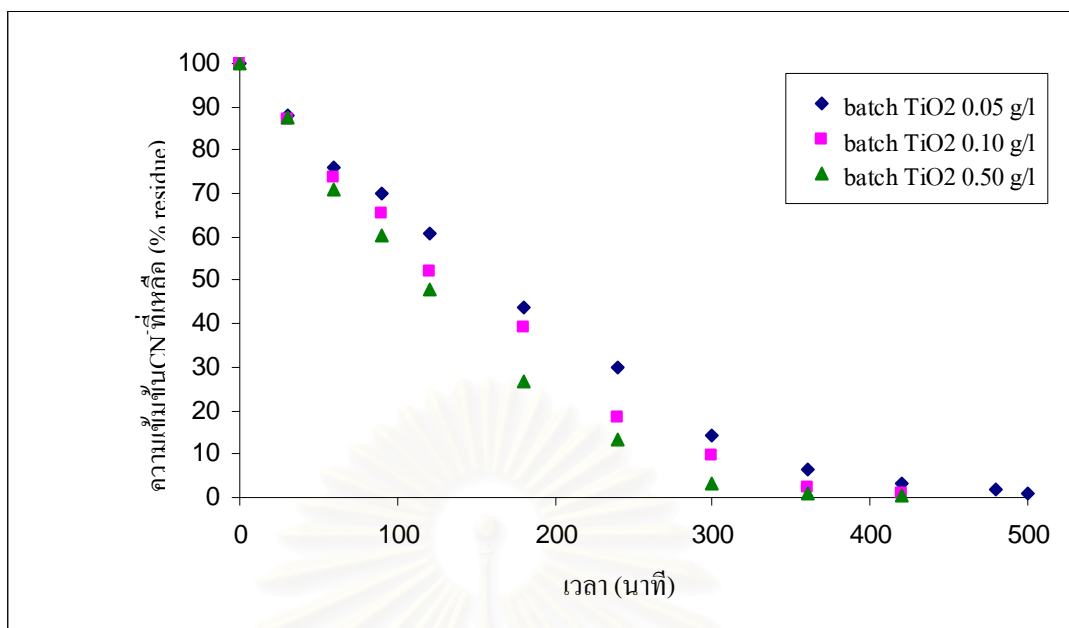
#### 4.1 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบที่ละเท

##### 4.1.1 ผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบที่ละเท

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีค่าความเข้มข้นไซยาไนด์อิสระเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบที่ละเท เพื่อศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ โดยใช้อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาทีเนื่องจากเป็นค่าอัตราการเติมอากาศที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการนี้จากการทดลองที่ผ่านมา (บัณฑิต ชูเชิดวัฒน์ศักดิ์, 2547)

พบว่า เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสแสงอัลตราไวโอเล็ตของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไซยาไนด์จะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ได้ค่าดังรูปที่ 4.1

เมื่อพิจารณาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการกำจัดไซยาไนด์ จากรูปที่ 4.1 พบว่า ระยะเวลาในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 360 นาที เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 420 นาที ส่วนการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตรนั้น จะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลา 540 นาที



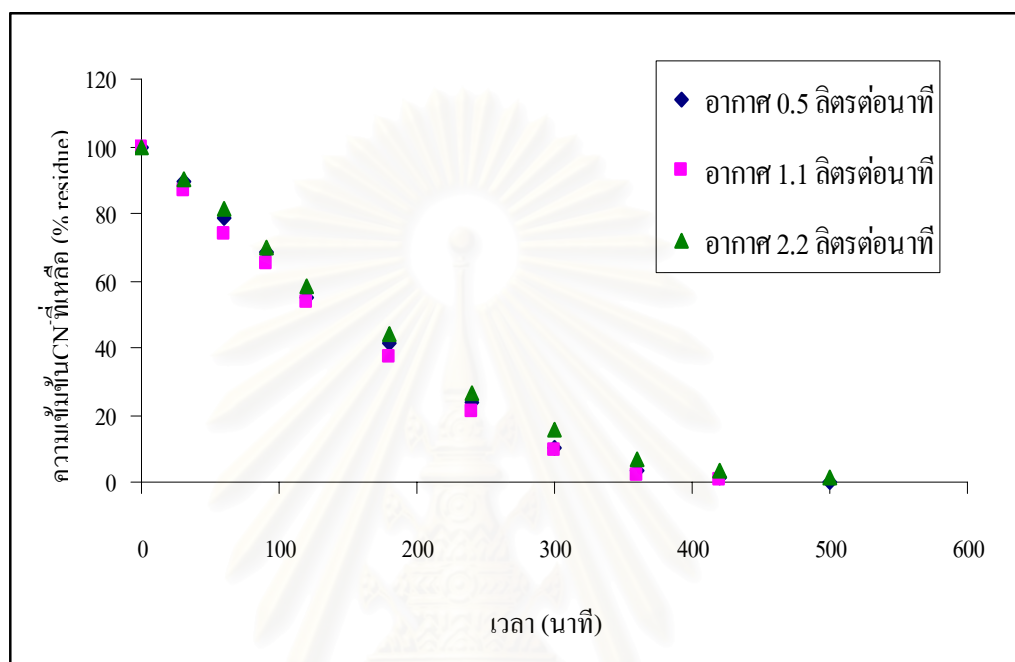
**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบทีละเท

จากผลการทดลองดังกล่าวอาจสรุปได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสบนไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากำจัดไซยาไนด์ โดยเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณฟรีเรดิคัลของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ย่อมมีมากขึ้นด้วย ซึ่งเรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะไปทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ในสารละลายโดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะไม่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในทางกลับกันการออกซิเดชันกลับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ 5.00 กรัมต่อลิตร พบว่าจะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 98-99 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลาประมาณ 600 นาที ทั้งนี้เนื่องจากความขุ่นที่มากเกินไปของน้ำเสียสังเคราะห์จะไปขัดขวางการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Chang, 1998)

#### 4.1.2 ผลของอัตราการเติมอากาศต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท

การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเติมอากาศ หรือ ออกซิเจน ลงไปในสารละลายด้วย ไม่เช่นนั้นการออกซิเดชันของไซยาไนด์จะเกิดขึ้นด้วยอัตราที่ต่ำมาก (Augugliaro และคณะ, 1997) เนื่องจากอากาศเป็นตัวช่วยในการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ ช่วยให้คู่อิเล็กตรอนและช่องว่างกลับมารวมตัวกันได้

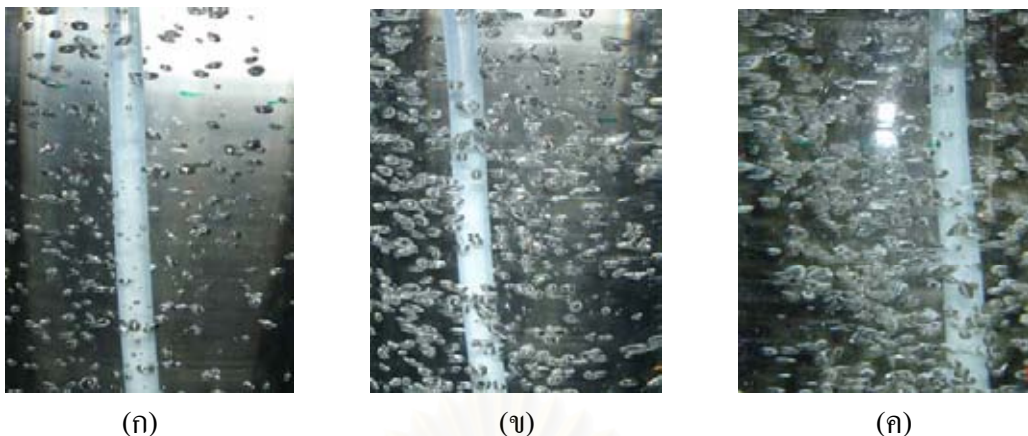
ช้าลง และยังทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในสารละลายด้วย (Chiang และคณะ, 2003) ในการวิจัยนี้ได้แปรเปลี่ยนค่าอัตราการเติมอากาศเป็น 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยทดลองใช้กับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลาที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบทีละเท

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตรนั้น อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 และ 1.1 ลิตรต่อนาที จะให้ค่าอัตราการกำจัดไซยาไนด์ที่ใกล้เคียงกัน คือ สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 420 นาที แต่เมื่ออัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที จะทำให้ระยะเวลาในการกำจัดไซยาไนด์เพิ่มขึ้น โดยจะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 500 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว อาจสรุปได้ว่า เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศมากขึ้น จะทำให้ขนาดและปริมาณของฟองอากาศในสารละลายเพิ่มขึ้น และเมื่อฟองอากาศมีขนาดและปริมาณมากเกินไป (รูปที่ 4.3 ก ถึง ค) ทำให้บดบังทางเดินของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์จึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.3 ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศด้วยอัตราการเติม

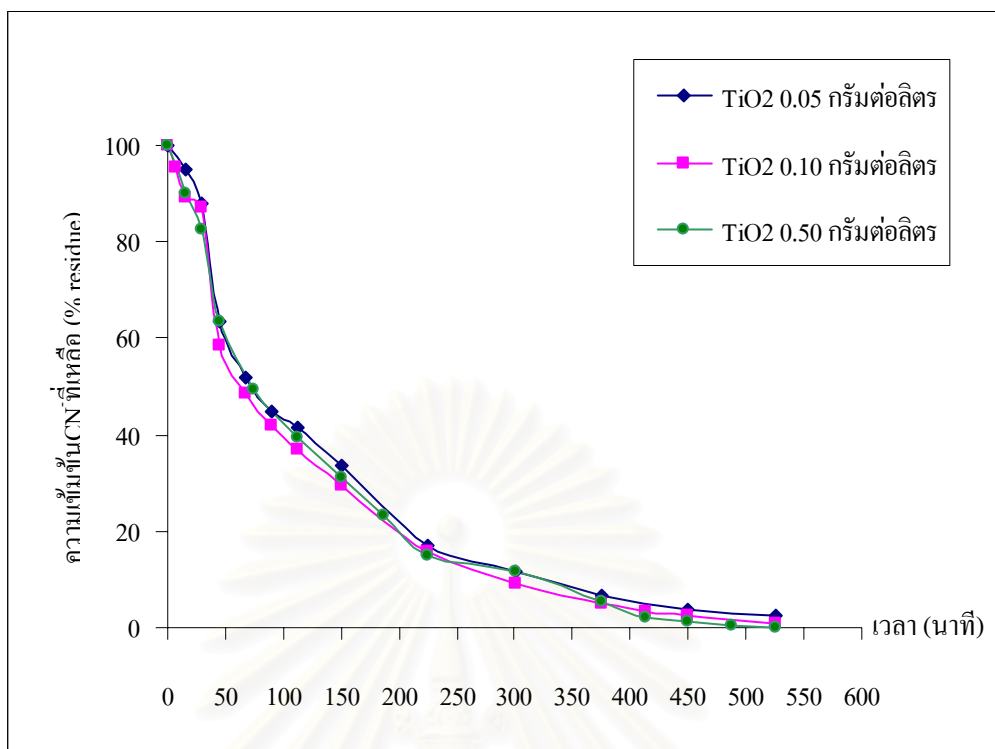
(ก) 0.5 ลิตรต่อนาที (ข) 1.1 ลิตรต่อนาที และ (ค) 2.2 ลิตรต่อนาที

#### 4.2 ผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง

##### 4.2.1 ผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง

การทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่องนั้น เมื่อทำการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราการเติมอากาศที่ 1.1 ลิตรต่อนาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาในการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลงตามลำดับ โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 487.5 นาที หรือ ประมาณ 8 ชั่วโมง ส่วนผลของการกำจัดไซยาไนด์เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตรนั้น จะสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 675 และ 525 นาที ตามลำดับ



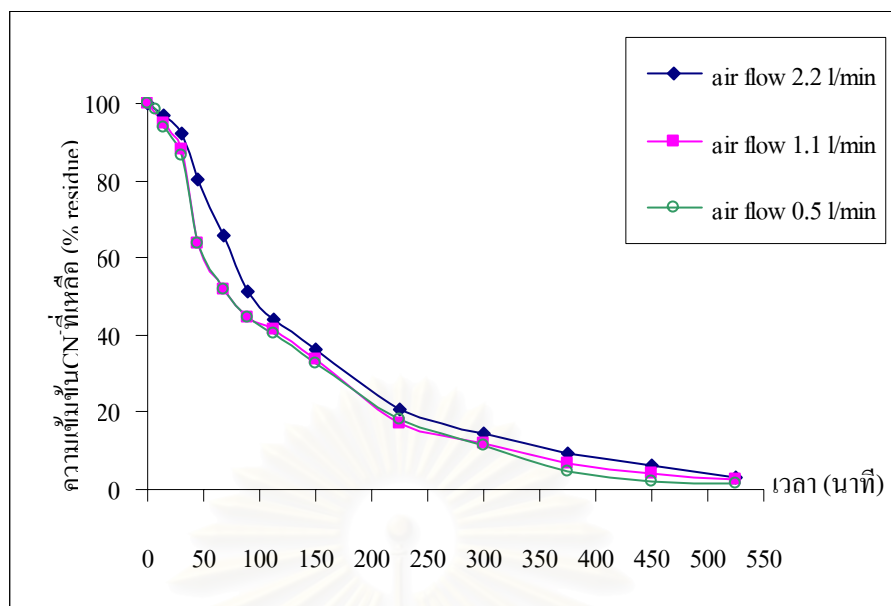
**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการทดลองดังกล่าว อาจสรุปได้ว่า เมื่อค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลและฟรีเรดิคัลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ (Chiang และคณะ, 2003) ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดไซยาไนด์จึงมีค่าลดลง

#### 4.2.2 ผลของอัตราการเติมอากาศที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง

เมื่อทำการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศที่มีต่ออัตราการออกซิเดชันไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ได้ผลดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



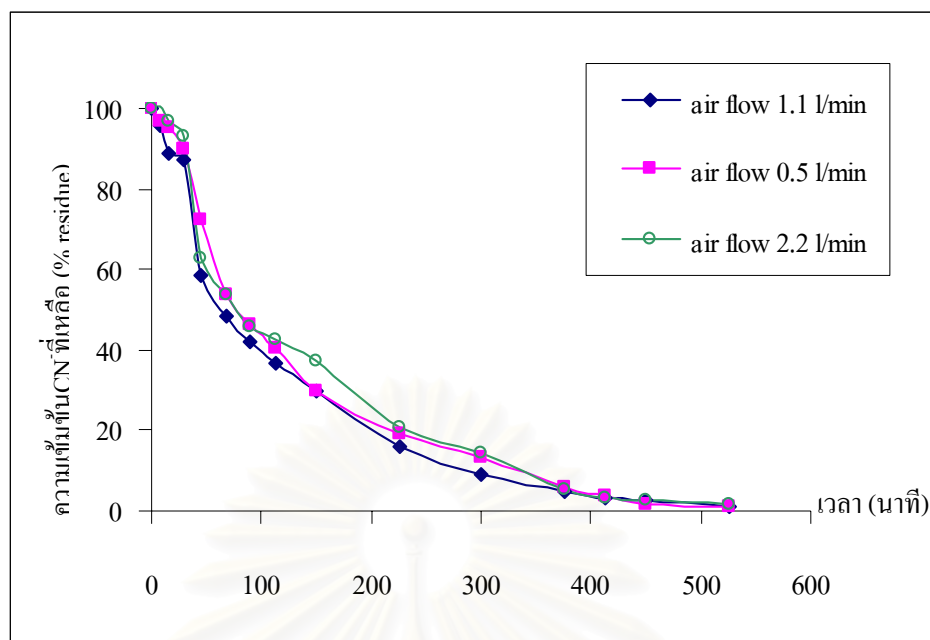


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศเมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 562.5 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 600 นาที และเมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 637.5 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว สรุปได้ว่า อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร คือ 0.5 ลิตรต่อนาที

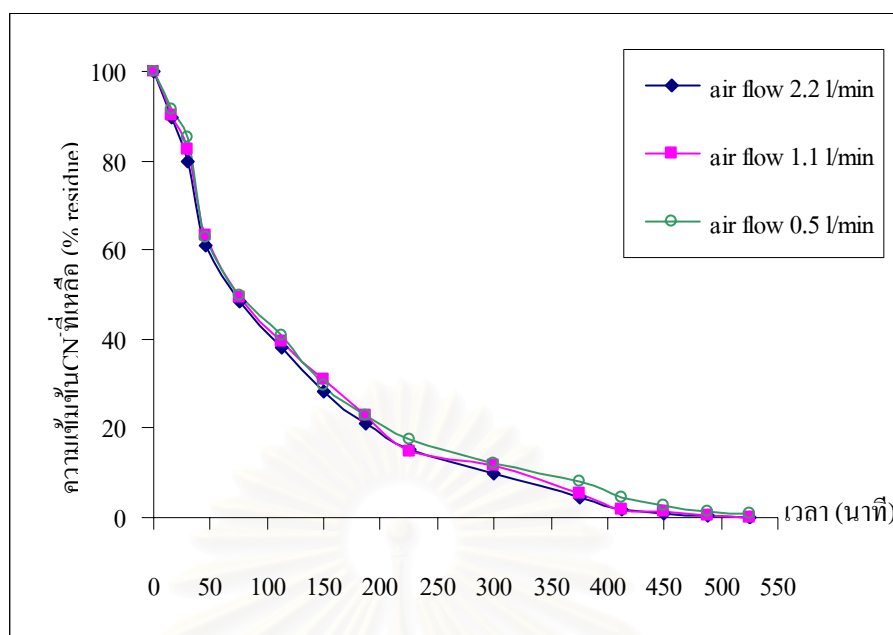
สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศเมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 562.5 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 525 นาที และเมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 600 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว สรุปได้ว่า อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร คือ 1.1 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

จากการศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศเมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 525 นาที เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 487.5 นาที และเมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที จะได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาประมาณ 450 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าว สรุปได้ว่า อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร คือ 2.2 ลิตรต่อนาที

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ผลของอัตราการเติมอากาศในกรณีการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบการไหลต่อเนื่องจะแตกต่างจากกรณีการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบที่ละเท โดยอัตราการเติมอากาศในกรณีที่น่าเสียสักระยะไหลอย่างต่อเนื่องนี้จะค่อนข้างสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ คือ เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลา 450 นาที เท่ากัน เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการกำจัดไซยาไนด์ก็จะเพิ่มขึ้นจาก 97.85 เปอร์เซ็นต์ เป็น 98.40 เปอร์เซ็นต์ และ

99.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการใช้อัตราการเติมอากาศที่สูงขึ้นจาก 0.5 ลิตรต่อนาที เป็น 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที

ซึ่งในกรณีแบบที่ละเท่นั้นจะพบว่า อัตราการเติมอากาศที่ 2.2 ลิตรต่อนาทีจะส่งผลให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์มีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

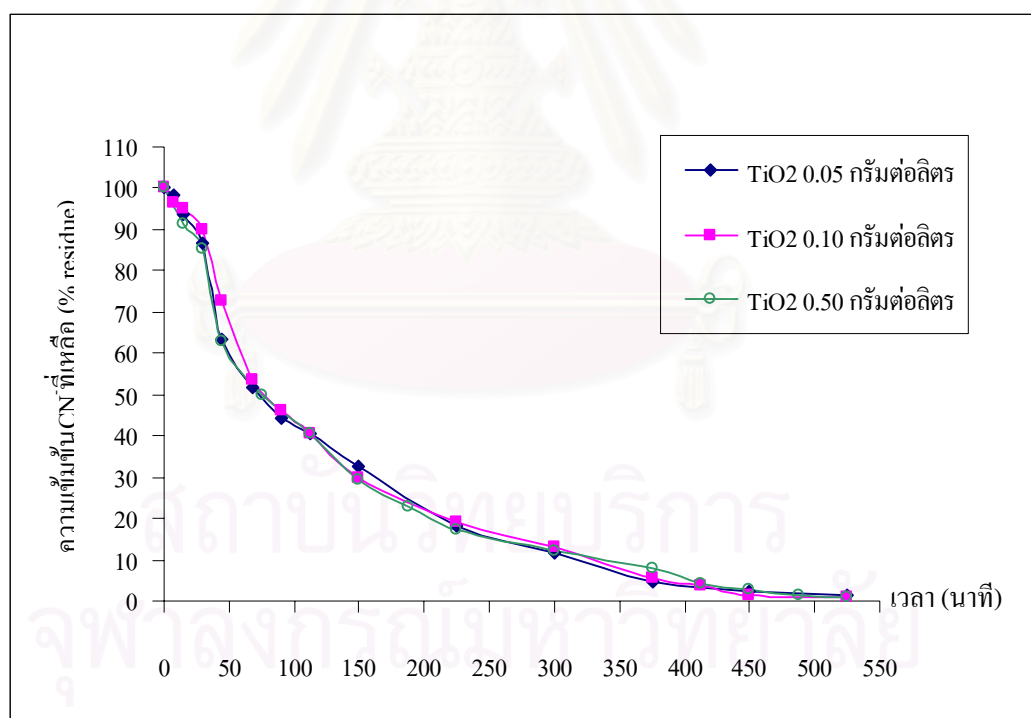
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในสภาวะต่างๆ โดยพิจารณาที่ระยะเวลาการกำจัด 420 นาทีเท่ากับกรณีแบบที่ละเท และ 450 นาทีเท่ากับ กรณีแบบไหลต่อเนื่อง

การทดลองแบบที่ละเท	อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร	96.23 %removal	96.69 %removal	95.47 %removal
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร	98.51 %removal	98.93 %removal	96.37 %removal
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร	97.68 %removal	99.70 %removal	97.72 %removal
การทดลองแบบ ไหลต่อเนื่อง	อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร	97.85 %removal	96.11 %removal	94.04 %removal
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร	98.18 %removal	98.40 %removal	97.60 %removal
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร	97.38 %removal	98.51 %removal	99.08 %removal

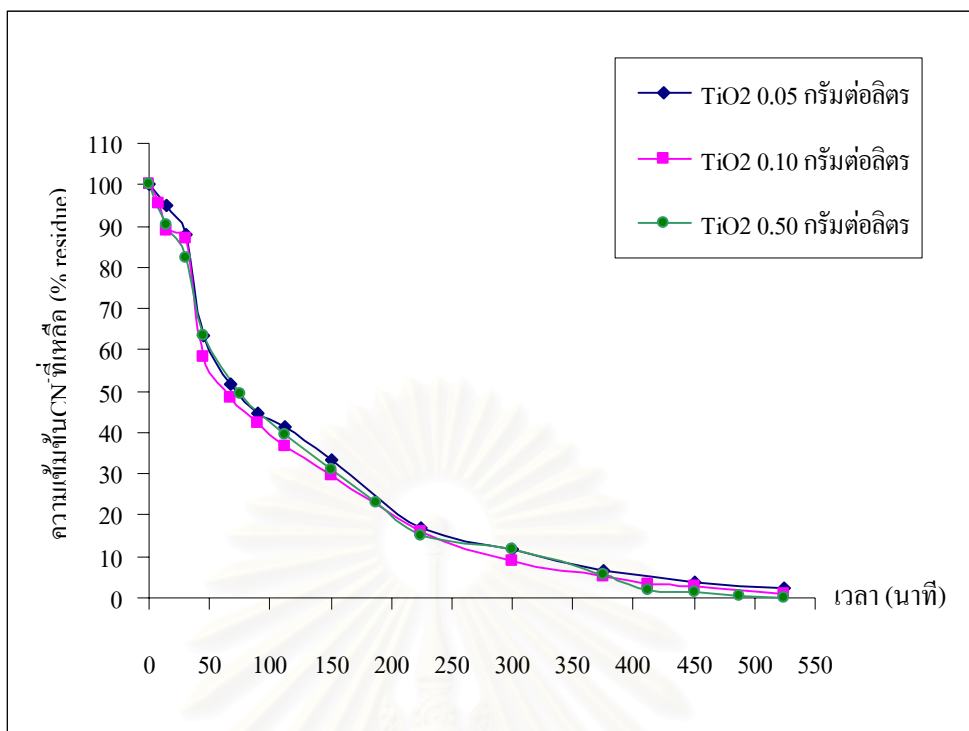
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และอัตราการเติมอากาศ ที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่อง

รูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมอากาศและความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์ พบว่า เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าว คิดเป็นอัตราส่วนเทียบกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ได้เท่ากับ 1:10 กรัม นาที ลิตร<sup>-2</sup> ซึ่งจากตารางที่ 4.1 จะเห็น

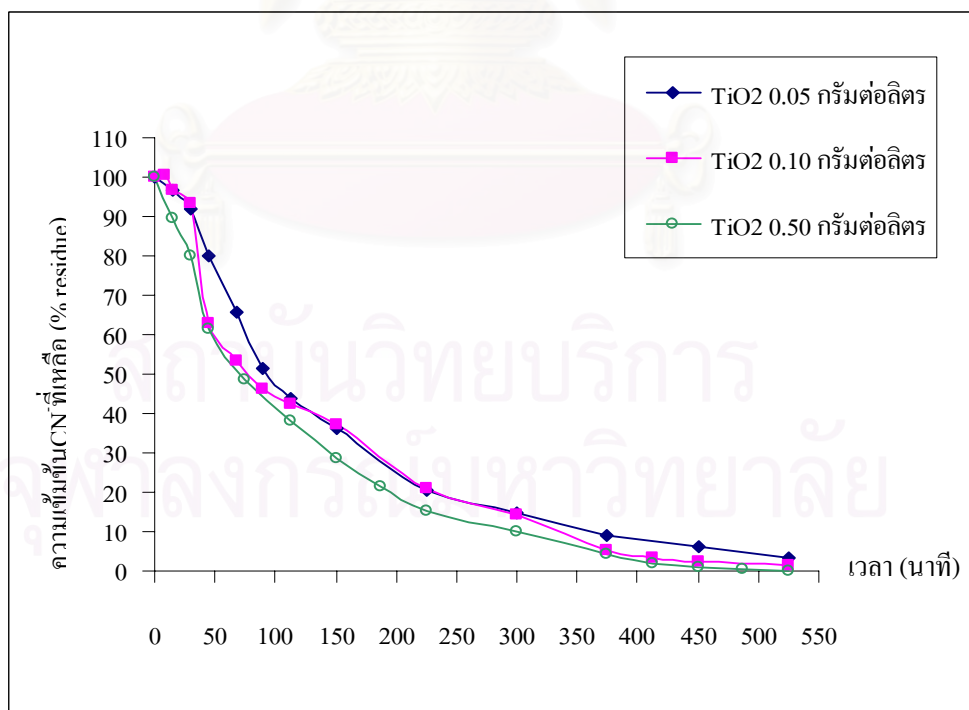
ได้ว่า เมื่อค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมกับการกำจัดไซยาไนด์จะมีค่าประมาณ 10 เท่าของความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนเทียบกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 1:4 กรัม นาที่ ลิตร<sup>2</sup> ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่ระบบตัวเร่งเป็นสารแขวนลอยในสารละลายนั้น จะมีข้อจำกัดในเรื่องของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องอยู่ในระดับเหมาะสม เนื่องจากการมีสารแขวนลอยอยู่ในสารละลายมากเกินไปจะไปจำกัดการส่องผ่านของแสง (Dijkstra และคณะ, 2001) ซึ่งความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0.50 กรัมต่อลิตรอาจจะทำให้สารละลายมีความขุ่นมากพอที่จะไปขัดขวางการส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเลตแล้ว ดังนั้น เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศที่มากเกินไป ฟองอากาศที่ได้จะมีขนาดใหญ่มากจนบดบังทางเดินของรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นผลให้อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตรนี้มีค่าต่างไปจากอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเมื่อคิดเทียบกับความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ใช้อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ต่อเวลา ที่ค่าอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

### 4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์กับการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการตรวจวัดความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระดับความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตร จากระดับผิวของสารละลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.2 4.3 และ 4.4 เพื่อใช้ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์และอัตราการเติมอากาศ โดยจะศึกษาถึงปริมาณการตกตะกอน และการกระจายตัวอย่างทั่วถึงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆกัน โดยการชั่งน้ำหนักสารไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำไปละลายน้ำ จากนั้นจึงดูดสารละลายขึ้นมาตรวจวัดด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร (Kagaya และคณะ, 2001)

#### 4.3.1 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

การทดลองแบบที่ละเท	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.056	0.057	0.059
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.056	0.056	0.059
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.055	0.055	0.057
การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.048	0.047	0.050
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.047	0.047	0.049
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.048	0.048	0.049

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร พบว่า การตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกรณีของถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทและแบบไหลต่อเนื่องนั้นมีค่าไม่ต่างกัน โดยที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.002-0.003 กรัมต่อลิตร

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.002-0.003 กรัมต่อลิตร

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.001-0.002 กรัมต่อลิตร

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการตกตะกอนที่ก้นถังปฏิกรณ์ไม่ต่างกันทั้งการทดลองแบบที่ละเท และการไหลแบบต่อเนื่อง ในทุกอัตราการเติมอากาศ (0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที) การเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาทีไม่ได้ช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีขึ้นแต่อย่างใด ยังกลับทำให้การกำจัดไซยาไนด์ใช้เวลานานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของฟองอากาศที่ใหญ่และมีปริมาณมากเกินไปส่งผลให้การส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเลตถูกขัดขวาง

#### 4.3.2 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร พบว่า การตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกรณีของถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทและแบบไหลต่อเนื่องนั้นมีค่าไม่ต่างกัน โดยที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.006 กรัมต่อลิตร

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.005-0.006 กรัมต่อลิตร

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที จะมีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่ก้นถังปฏิกรณ์ประมาณ 0.004 กรัมต่อลิตร

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการตกตะกอนที่ก้นถังปฏิกรณ์ไม่ต่างกันทั้งการทดลองแบบที่ละเท และการไหลแบบต่อเนื่อง ในทุกอัตราการเติมอากาศ (0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที) แต่สาเหตุที่ทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาทีดีที่สุด เนื่องจาก การเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นมีน้อยจนไม่สามารถไปยับยั้งการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและช่องว่างบนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทันทีที่จะเกิดปฏิกิริยาการกำจัดไซยาไนด์ และการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาทีทำให้ฟองอากาศเกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากเกินไปจนบดบังการส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเลต



ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.10 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

การทดลองแบบทีละเท	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.102	0.100	0.108
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.102	0.102	0.107
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.101	0.102	0.105
การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.140	0.139	0.146
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.139	0.139	0.145
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.141	0.140	0.145

#### 4.3.3 ผลการทดลองการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที การตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบทีละเทจะมีค่าประมาณ 0.058 กรัมต่อลิตร และการตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องนั้นมีประมาณ 0.047 กรัมต่อลิตร (การตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบทีละเทมีมากกว่าแบบไหลต่อเนื่องประมาณ 0.011 กรัมต่อลิตร)

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที การตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบทีละเทจะมีค่าประมาณ 0.055 กรัมต่อลิตร และการตกตะกอนของไทเทเนียมได

ออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องนั้นมีประมาณ 0.044 กรัมต่อลิตร (การตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเทมิมากกว่าแบบไหลต่อเนื่องประมาณ 0.011 กรัมต่อลิตร)

ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที การตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเทจะมีค่าประมาณ 0.053 กรัมต่อลิตร และการตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องนั้นมีประมาณ 0.036 กรัมต่อลิตร (การตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเทมิมากกว่าแบบไหลต่อเนื่องประมาณ 0.017 กรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อใช้เริ่มต้น 0.50 กรัมต่อลิตร ที่ช่วงความลึก 15.0 และ 37.0 เซนติเมตรวัดจากระดับผิวสารละลาย เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศต่างๆ

การทดลองแบบที่ละเท	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.525	0.542	0.583
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.524	0.545	0.579
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.525	0.547	0.578
การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) เริ่มต้น	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 15.0 cm.	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/l) ที่ระดับความลึก 37.0 cm.
อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที	0.521	0.533	0.568
อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที	0.523	0.534	0.567
อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที	0.522	0.533	0.558

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการตกตะกอนที่กั้นถึงปฏิกรณ์ค่อนข้างต่างกันในการทดลองแบบที่ละเท และการไหลแบบต่อเนื่อง ในทุกอัตราการเติมอากาศ (0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที) อาจเป็นสาเหตุจากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ไหลออกไปตามท่อสารละลายขาออกในกรณีการทดลองแบบต่อเนื่อง แต่สาเหตุที่ทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาทีดีที่สุดที่สุดในกรณีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง เนื่องจากการเติมอากาศ 0.5 และ 1.1 ลิตรต่อนาที ปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นมีน้อยจนไม่สามารถไปยับยั้งการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและช่องว่างบนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทันทีที่จะเกิดปฏิกิริยากำจัดไซยาไนด์ได้ (Chiang และคณะ, 2003)

จากผลการทดลองการกระจายตัวและการตกตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าว อาจสรุปได้ว่า การทดลองแบบที่ละเท จะมีตะกอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์มากกว่าการไหลต่อเนื่อง เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร แต่ไม่ได้หมายความว่า การทดลองแบบที่ละเทจะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ตกตะกอนมากกว่าแบบไหลต่อเนื่อง โดยผลการทดลองที่ได้นี้อาจเกิดจากการที่สารละลายมีการไหลอย่างต่อเนื่องนั้นจะพัดพาเอาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่กั้นถึงปฏิกรณ์ไปด้วย

และเมื่อเปรียบเทียบผลของการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์กับประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์ พบว่า ในกรณีถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเท ค่าการกำจัดไซยาไนด์ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที ในทุกความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (พิจารณาตารางที่ 4.1 ประกอบ) แต่เมื่อพิจารณาประกอบกับผลของการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะเลือกพิจารณาความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที จะมีตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์อยู่ 0.006 0.005 และ 0.004 ตามลำดับ ซึ่งไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ที่อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาทีมีค่าดีกว่าการใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 และ 2.2 ลิตรต่อนาทีนั้น น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของฟองอากาศและขนาดของฟองอากาศ โดยอัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที จะเกิดขนาดฟองอากาศที่ใหญ่มาก (รูปที่ 4.3 ก ถึง ค) ทำให้บดบังทางเดินของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

กรณีถึงปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง อัตราการเติมอากาศที่ให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ที่ดีที่สุดในแต่ละความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จะแตกต่างกันไป (พิจารณาตารางที่ 4.1 ประกอบ) โดยความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์สูงสุดเท่ากับ 98.75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.10 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์สูงสุดเท่ากับ 98.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าการ

กำจัดไซยาไนด์สูงสุดเท่ากับ 99.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที เมื่อพิจารณาประกอบกับผลของการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร จะเกิดการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์ 0.002 0.002 และ 0.004 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร จะเกิดการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์ 0.006 0.006 และ 0.004 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร จะเกิดการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์ 0.047 0.044 และ 0.036 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

การตกตะกอนที่กั้นถึงปฏิกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่องนั้น เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตร จะมีปริมาณการตกตะกอนที่กั้นถึงปฏิกรณ์ไม่มากนัก อาจเป็นผลมาจากการเติมอากาศช่วยในการกระจายไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีในความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับหนึ่ง และเมื่อความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีมาก (0.50 กรัมต่อลิตร) จนปริมาณอากาศที่เติมเข้าไปไม่สามารถทำให้กระจายตัวได้ทั่วถึง จึงตกตะกอนอยู่ที่กั้นถึงปฏิกรณ์ในอัตราที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร แม้จะมีปริมาณการตกตะกอนมาก แต่ก็ให้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ดีที่สุด เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยังคงแขวนลอยอยู่ในสารละลายยังคงมีมากพอที่จะเกิดฟิรเรคคูลเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ในสารละลายได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์ ในแบบที่ละเท และแบบการไหลต่อเนื่อง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบที่ละเท นั้น คือ ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที โดยระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์ให้ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 99 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้เวลาเท่ากับ 300 นาที และ 360 นาที ตามลำดับ

2. สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่องนั้น คือ ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อนาที โดยระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อกำจัดไซยาไนด์ให้ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 99 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้เวลาเท่ากับ 300 นาที และ 450 นาที ตามลำดับ

3. การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบที่ละเท เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมในแต่ละค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาทีเท่าเดิม

4. การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบการไหลต่อเนื่องนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.50

กรัมต่อลิตร จะต้องให้ค่าอัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.1 และ 2.2 ลิตรต่อนาที่ตามลำดับ ด้วย เพื่อให้ได้ค่าการกำจัดไซยาไนด์ที่มากที่สุดในแต่ละสภาวะ คือ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 562.5 525 และ 450 นาที ตามลำดับ

5. การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมในแต่ละค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ คิดเป็นอัตราส่วนความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการเติมอากาศ เท่ากับ 1:10 1:10 และ 1:4  $\text{g min l}^{-2}$  ตามลำดับ

6. กรณีการทดลองแบบที่ละเท อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมในแต่ละค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที่ เนื่องจากมีการใช้แท่งแม่เหล็กช่วยกวนที่กั้นถึงปฏิกรณ์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายอย่างทั่วถึงในสารละลายมากกว่ากรณีแบบไหลต่อเนื่อง ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์จะขึ้นกับขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ถ้าใช้อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที่ ปริมาณออกซิเจนจะมีไม่เพียงพอในการยับยั้งการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและช่องว่างบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และหากใช้อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที่ จะทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่เกินไป บดบังทางเดินรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่จะส่องเข้าไปทำปฏิกิริยาบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

7. กรณีการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ โดยการให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.50 กรัมต่อลิตร ค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 2.2 ลิตรต่อนาที่ โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นแม้จะมีขนาดใหญ่แต่ก็ให้ค่าระยะเวลาการกำจัดไซยาไนด์ได้ดีกว่าอัตราการเติมอากาศ 0.5 และ 1.1 ลิตรต่อนาที่ เนื่องจากถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อใช้ในการกวนได้ จึงทำให้มีไทเทเนียมไดออกไซด์ตกตะกอนที่กั้นถึงปฏิกรณ์ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่กำหนดประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์จะขึ้นกับอัตราการเติมอากาศที่ป้อนเข้าไปเพื่อทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในสารละลายและสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาโดยทดลองใช้บำบัดน้ำเสียจริง ซึ่งอาจจะมีการเจือจางน้ำเสียก่อนก็ได้ เพื่อพิจารณาผลกระทบจากสารเคมีในน้ำเสียตัวอื่นๆ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ เป็นต้น ที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต
2. ศึกษาผลของการกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในการไหลแบบต่อเนื่อง เมื่อในสารละลายสังเคราะห์ไซยาไนด์มีส่วนประกอบของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์รวมอยู่ด้วย โดยอาจทดลองศึกษาเพียงตัวหลักๆ ที่พบในน้ำเสียไซยาไนด์ เช่น สังกะสี เหล็ก นิกเกิล แคดเมียม เป็นต้น
3. ศึกษาหาวิธีปรับปรุงการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการทดลองมากที่สุด เนื่องจากยังพบปัญหาของการตกตะกอนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กั้นถึงปฏิกรณ์อยู่พอสมควร โดยอาจมีการฉาบที่ผิวแก้ว หรือการออกแบบถังปฏิกรณ์ให้มีส่วนช่วยในการกระจายผงไทเทเนียมอย่างทั่วถึงในสารละลาย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ชุดิพงษ์ วิวัฒน์ภูวพงศ์ และ ปรีชนันท์ เพชรสุวรรณ. การสลายพันธะระหว่างไอออนโลหะกับไซยาไนด์ไอออนในสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต. งานวิจัยสำหรับหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานน้ำทิ้งออนไลน์.

แหล่งที่มา : <http://www.pcd.go.th/?1.02411305> [2547, ส.ค.]

นรา โดแฮม; เอกชัย ทวีกิจวานิช; ศิริวรรณ ป็องป้อม และ ณัฐกรณ์ แซ่ลิ้ม. การศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับโครเมียมบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์. โครงการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

บัณฑิต ชูเชิดวัฒน์ศักดิ์. ผลของอัตราที่เอต่อการออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยกระบวนการใช้ไฟฟ้าและรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ราชกิจจานุเบกษา 113 (2539).

เพชรจิตต์ ชัยศรีสวัสดิ์สุข. การลดปริมาณไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากขบวนการชุบโลหะด้วยทองแดง โดยวิธีออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขานานาชาติสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2527.

มันลิน ตัฒกุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

รัฐพนธ์ ทาทอง. การใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำในการบำบัดน้ำดิบที่ปนเปื้อนโคลิฟอร์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

สาโรช บุญยกิจสมบัติ. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะ-ชุบโครเมียม. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 2547.

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

อภิชน วัชรนทร์วงศ์. การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.



## ภาษาอังกฤษ

- Augugliaro, V.; Loddo, V.; Marci, G.; Palmisano, L.; and Lopez-Munoz, M.J. Photocatalytic oxidation of cyanides in aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions. Journal of Catalysis 166 (1997): 272-283.
- Aguado, J.; Grieken, R.; Lopez-Munoz, M.J.; and Marugan, J. Removal of cyanides in wastewater by supported TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts. Catalysis Today, 75 (2002) 95-102.
- Barakat, M.A.; Chen, Y.T.; and Huang, C.P. Removal of toxic cyanide and Cu(II) ions from water by illuminated TiO<sub>2</sub> catalyst. Applied Catalysis B:Environmental 53 (2004): 13-20.
- Benfield, L.D.; Judkins, J.F.; and Weand, B.L. Process chemistry for water and wastewater treatment. NJ: Prentice-Hall, 1982.
- Carrillo-Pedroza, F.R.; Nava-Alonso, F.; and Uribe-Salas, A. Cyanide oxidation by ozone in cyanidation tailings: Reaction kinetics. Mineral Engineering 13 (2001): 541-548.
- Chang, H.T.; Wu, N.M.; and Zhu, F. A kinetic model for photocatalytic degradation of organic contaminants in a thin-film TiO<sub>2</sub> catalyst. Water Research 34 (2000): 407-416.
- Chiang, K.; Amal, R.; and Tran, T. Photocatalytic Oxidation of cyanide: Kinetic and Mechanistic Studies. J. Molecular Catalysis A: Chemical 193 (2003): 285-297.
- Dabrowski, B.; Zaleska, A.; Janczarek, M. Hupka, J.; and Miller, J.D. Photo-oxidation of dissolved cyanide using TiO<sub>2</sub> catalyst. J.Photochem.Photobiol.A:Chem. 151 (2002): 201-205.
- Danald, L.S. Environmental Soil Chemistry. USA: Academic press, 1995.
- Degussa. Titanium Dioxide P25 as Photocatalyst. JJ-Degussa chemical Ltd., 2002.
- Dijkstra, M.F.J.; Buwalda, H.; Michorius, A.; and Winkelman, J.G.M. Experimental comparison of three reactor designs for photocatalytic water purification. Chemical Engineering Science 56 (2001): 547-555.
- Eilbeck, W.J.; and Mattock, G. Chemical processes in wastewater treatment. Ellis Horwood, 1987.
- Fernando, J.B.; Jose, M.E.; and Juan, F.G. UV radiation in the presence and absence of hydrogen peroxide. Water Research 31 (1997): 2405-2414.
- Frank, L.S. Adsorption Technology: A step-by-step approach to process evaluation and application. 1<sup>st</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 1985.
- Hartinger, L. Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry. 2<sup>nd</sup> ed. Finishing Publications, 1994.

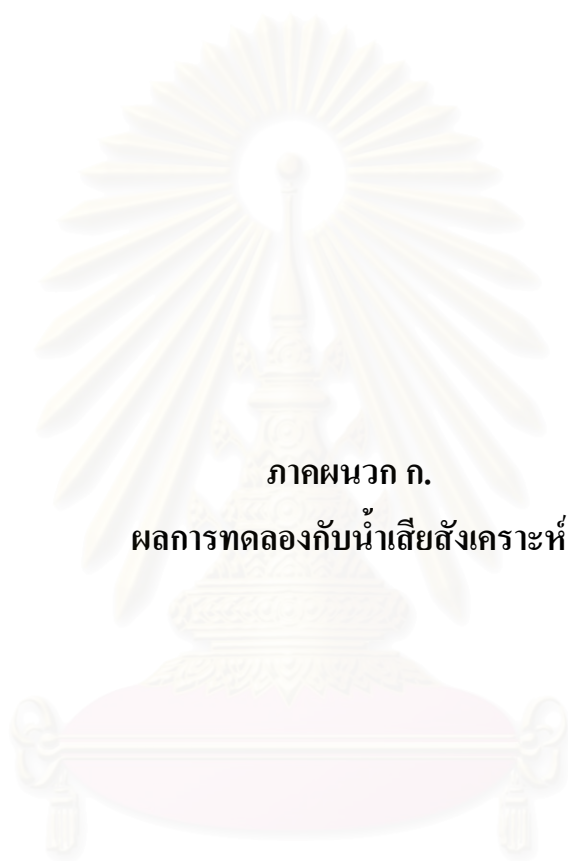
- Hong, F.L.; Ravikrishna, R.; and Valsaraj, K.J. Reusable adsorbents for dilute solution separation. 6. Batch and continuous reactors for the adsorption and degradation of 1,2-dichlorobenzene from dilute wastewater streams using titania as a photocatalyst. Separation and Purification Technology 28 (2002): 87-102.
- Huang, C.P.; Dong, C.; and Tang, Z. Advanced Chemical Oxidation: Its present role and potential future in hazardous waste treatment. Waste Management (1993).
- INCO. Cyanide destruction: The Inco SO<sub>2</sub>/Air process. Inco Exploration and Technical Services, 1993.
- Ismail, A.A.; Ibrahim, I.A.; and Mohamed, R.M. Sol-gel synthesis of vanadia-silica for photocatalytic degradation of cyanide. Applied Catalysis B:Environmental 45 (2003): 161-166.
- Kagaya, S., Shimizu, K., Arai, R.; and Hasegawa, K. Separation of Titanium Dioxide photocatalyst in its aqueous suspension by coagulation with basic aluminium chloride. Water Research 35 (2001) : 1256 - 1262.
- Kim, H-J.; Lu, L.; Kim J-H.; Lee, C-H.; Hyeon, T.; Choi, W.; and Lee, H-I. UV light induced Photocatalytic degradation of cyanides in aqueous solution over modified TiO<sub>2</sub>. Bull.Korean Chem. Soc. 22 (2001): 1371-1374.
- Kohan, C. UV Light Works Photochemically. Ultraviolet Disinfection System (1996): 7-17.
- Lea, J.; and Adesoji, A. Continuous flow bubble column reactor for the photocatalytic causticisation of sodium oxalate. Chemical Engineering Science 54 (1999): 2209-2216.
- Lehr, J.H.; Tyler, E.G.; Wayne, A.P.; and Demarre, J. Domestic Water Treatment. Magraw-Hill, 1980.
- Lowitz, J.T. History of Carbon and Carbon Materials-Center for Applied Energy[online]. Available from : <http://www.caer.uky.edu/carbon/history/carbonhistory.shtml> [2006, July]
- Madden, T.H.; Datye, A.K.; Fulton, M.; Prairie, M.R.; Majumdar, S.A.; and Stange, B.M. Oxidation of metal-EDTA complexes by TiO<sub>2</sub> photocatalysis. Environ. Sci. Technol. 31 (1997): 3475-3481.
- Ogutveren, U.B.; Toru, E.; and Kopardal, S. Removal of cyanide by anodic oxidation for wastewater treatment. Water Research 33 (1999): 1851-1856.
- Parga, J.R.; Shukla, S.S.; and Carrillo-Pedroza, F.R. Destruction of cyanide waste solutions using chlorine dioxide, ozone and titania sol. Waste Management 23 (2003): 183-191.

- Parsons, S. Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. 1<sup>st</sup> ed. London: IWA Publishing, 2004.
- Patterson, J.W. Industrial wastewater treatment technology. 2<sup>nd</sup> ed. Butterworths, 1985.
- Rader, W.S.; Solujic, L.; Milosavljevic, E.B.; Hendrix, J.L.; and Nelson, J.H. Photocatalytic Detoxification of cyanide and Metal cyano-species from Precious-metal mill Effluents. Environmental Pollution 90 (1995): 331-334.
- Robert, J. Ultraviolet/Oxidation Treatment. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 1996.
- Salaices, M.; Serrano, B.; and de Lasa, H.I. Photocatalytic conversion of phenolic compounds in slurry reactors. Chemical Engineering Science 59 (2004): 3-15.
- Sarla, M.; Pandit, M.; Tyagi, D.K.; and Kapoor, J.C. Oxidation of cyanide in aqueous solution by chemical and photochemical process. Journal of Hazardous Materials (In press)
- Selm, R.P. Ozone oxidation of aqueous cyanide waste solution in stirred batch reactors and packed tower. Ozone Chemistry and Technology. Washington: American Chemical Society, 1959.
- Singer, P.C.; and Zilli, W.B. Ozonation of ammonia in wastewater. Water Research 9 (1975): 127-134.
- Solvay, I. Cyanide detoxification with hydrogen peroxide[online]. 2001. Available from: <http://www.solvayinterox.com> [2003, Nov 6]
- Tyler, R.G.; Maske, W.; Westin, M.J.; and Matthews, W. Ozonation of cyanide wastes. Sewage Ind. Wastes 23 (1951): 1150-1153.
- U.S.EPA. Capsule report-Managing cyanide in metal finishing. OH: U.S.EPA, 2000.
- Vohra, M.S.; and Davis, A.P. TiO<sub>2</sub>-assisted photocatalysis of lead-EDTA. Water Research 34 (2000): 952-964.
- Wang, H.; and Adesoji, A. Photocatalytic causticization of sodium oxalate using commercial TiO<sub>2</sub> particles. Applied Catalysis and Environmental 14 (1997): 241-247.
- Willy, J.; Masschelein, Ph.D. Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation. New York: Lewis Publishers, 2002.
- Zeevalkink, J.A.; Visser, D.C., Arnoldy, P.; and Boelhouwer, C. Mechanism and kinetics of cyanide ozonation in water. Water Research 14 (1980): 1375-1385.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.  
ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	103.54	3.98	100.00	0.00	0.00
30	93.88	3.61	90.67	9.33	2.67
60	79.86	3.07	77.13	22.87	1.48
90	74.17	2.85	71.63	28.37	0.53
120	68.40	2.63	66.06	33.94	0.72
180	53.69	2.07	51.85	48.15	1.62
240	38.93	1.50	37.60	62.40	2.47
300	23.74	0.91	22.93	77.07	1.93
360	14.65	0.56	14.15	85.85	1.63
420	7.06	0.27	6.82	93.18	0.44
480	4.53	0.17	4.38	95.62	0.28
500	3.18	0.12	3.07	96.93	0.51

ตาราง ก.2 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	119.09	4.58	100.00	0.00	0.00
30	104.88	4.03	88.07	11.93	0.93
60	90.57	3.48	76.05	23.95	1.50
90	83.52	3.21	70.13	29.87	1.32
120	72.66	2.79	61.01	38.99	4.41
180	52.18	2.01	43.82	56.18	1.34
240	35.49	1.37	29.8	70.20	3.22
300	16.81	0.65	14.12	85.88	0.89
360	7.72	0.3	6.48	93.52	0.52
420	3.95	0.15	3.32	96.68	0.23
480	2.31	0.09	1.94	98.06	0.06
500	1.64	0.06	1.38	98.62	0.12

ตาราง ก.3 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	101.57	3.91	100.00	0.00	0.00
30	94.50	3.63	93.04	6.96	2.24
60	79.34	3.05	78.11	21.89	1.24
90	70.15	2.70	69.07	30.93	1.21
120	64.76	2.49	63.76	36.24	0.67
180	57.30	2.20	56.41	43.59	1.55
240	38.17	1.47	37.58	62.42	4.87
300	20.47	0.79	20.15	79.85	3.62
360	13.63	0.52	13.42	86.58	4.18
420	7.94	0.31	7.82	92.18	2.85
480	4.59	0.18	4.52	95.48	1.77
500	3.72	0.14	3.66	96.34	2.01



ตาราง ก.4 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	105.45	4.06	100.00	0.00	0.00
30	94.43	3.63	89.55	10.45	2.61
60	82.68	3.18	78.41	21.59	1.05
90	72.33	2.78	68.59	31.41	0.38
120	58.14	2.24	55.14	44.86	1.60
180	43.35	1.67	41.11	58.89	3.82
240	25.18	0.97	23.88	76.12	2.91
300	11.05	0.43	10.48	89.52	2.15
360	3.64	0.14	3.45	96.55	0.72
420	1.57	0.06	1.49	98.51	1.08
500	0.00	0.00	0.00	100.00	0.44

ตาราง ก.5 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	113.45	4.36	100.00	0.00	0.00
30	98.58	3.79	86.89	13.11	2.14
60	83.87	3.23	73.93	26.07	2.17
90	74.16	2.85	65.37	34.63	1.02
120	58.93	2.27	51.94	48.06	1.74
180	44.51	1.71	39.23	60.77	0.40
240	20.79	0.80	18.33	81.67	0.74
300	10.97	0.42	9.67	90.33	1.22
360	2.663	0.10	2.35	97.65	0.18
420	1.140	0.04	1.00	99.00	0.10
480					
500					

ตาราง ก.6 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัตราไอโอเดตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	108.56	4.18	100.00	0.00	0.00
30	97.87	3.76	90.15	9.85	2.68
60	88.63	3.41	81.64	18.36	6.19
90	75.98	2.92	69.99	30.01	2.02
120	63.20	2.43	58.22	41.78	10.11
180	47.51	1.83	43.76	56.24	7.87
240	28.74	1.11	26.47	73.53	4.14
300	16.82	0.65	15.49	84.51	2.17
360	7.65	0.29	7.05	92.95	4.02
420	3.94	0.15	3.63	96.37	2.34
500	1.14	0.04	1.05	98.95	3.57

ตาราง ก.7 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.05 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	98.79	3.80	100.00	0.00	0.00
30	90.24	3.47	91.35	8.65	2.11
60	72.16	2.78	73.04	26.96	2.31
90	66.50	2.56	67.31	32.69	1.14
120	51.06	1.96	51.69	48.31	2.07
180	30.83	1.19	31.21	68.79	1.72
240	16.90	0.65	17.11	82.89	2.55
300	10.56	0.41	10.69	89.31	1.82
360	5.78	0.22	5.85	94.15	0.70
420	2.44	0.09	2.47	97.53	3.42
480	1.36	0.05	1.38	98.62	1.79
500	0.25	0.01	0.25	99.75	1.52

ตาราง ก.8 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	102.52	3.94	100.00	0.00	0.00
30	90.73	3.49	88.50	11.50	2.50
60	73.82	2.84	72.01	27.99	1.73
90	62.95	2.42	61.40	38.60	1.27
120	47.28	1.82	46.12	53.88	3.05
180	28.40	1.09	27.70	72.30	0.27
240	13.05	0.50	12.73	87.27	1.06
300	3.19	0.12	3.11	96.89	0.18
360	0.82	0.03	0.80	99.20	0.58
420	0.31	0.01	0.30	99.70	1.90
480	0.07	0.00	0.07	99.93	3.12
500	0.00	0.00	0.00	100.00	0.41

ตาราง ก.9 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบทีละเท ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0	85.884	3.30	100.00	0.00	0.00
30	75.28	2.90	87.66	12.34	3.68
60	60.947	2.34	70.96	29.04	2.93
90	51.69	1.99	60.19	39.81	1.55
120	41.338	1.59	48.13	51.87	2.01
180	22.941	0.88	26.71	73.29	0.33
240	11.674	0.45	13.59	86.41	0.48
300	2.908	0.11	3.39	96.61	0.29
360	0.744	0.03	0.87	99.13	0.17
420	0.237	0.01	0.28	99.72	0.82
480					
500					

ตาราง ก.10 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	104.38	4.01	100.00	0.00	0.00
7.5	102.59	3.95	98.29	1.71	5.84
15.0	98.03	3.77	93.92	6.08	7.29
30.0	90.36	3.48	86.57	13.43	3.29
45.0	66.28	2.55	63.50	36.50	2.10
67.5	53.90	2.07	51.64	48.36	2.01
90.0	46.28	1.78	44.34	55.66	1.52
112.5	42.39	1.63	40.61	59.39	0.39
150.0	33.85	1.30	32.43	67.57	1.20
225.0	18.97	0.73	18.18	81.82	0.88
300.0	12.01	0.46	11.51	88.49	0.54
375.0	4.67	0.18	4.48	95.52	0.29
450.0	2.24	0.09	2.15	97.85	1.76
525.0	1.47	0.06	1.41	98.59	0.59

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.11 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาทีก)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	110.24	4.24	100.00	0.00	0.00
15.0	104.56	4.02	94.85	5.15	7.85
30.0	97.02	3.73	88.01	11.99	3.49
45.0	70.03	2.69	63.52	36.48	2.81
67.5	57.14	2.20	51.83	48.17	1.67
90.0	49.20	1.89	44.63	55.37	3.14
112.5	45.64	1.76	41.40	58.60	2.44
150.0	36.91	1.42	33.48	66.52	0.87
225.0	18.85	0.72	17.10	82.90	1.25
300.0	12.91	0.50	11.71	88.29	0.92
375.0	7.32	0.28	6.64	93.36	0.19
450.0	4.29	0.17	3.89	96.11	1.82
525.0	2.67	0.10	2.42	97.58	0.70

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ก.12 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	106.53	4.10	100.00	0.00	0.00
15.0	103.07	3.96	96.75	3.25	4.38
30.0	97.99	3.77	91.98	8.02	2.67
45.0	85.37	3.28	80.14	19.86	1.19
67.5	70.21	2.70	65.91	34.09	0.92
90.0	54.82	2.11	51.46	48.54	2.18
112.5	46.73	1.80	43.87	56.13	4.58
150.0	38.49	1.48	36.13	63.87	3.98
225.0	22.01	0.85	20.66	79.34	4.10
300.0	15.59	0.60	14.64	85.36	1.02
375.0	9.85	0.38	9.24	90.76	0.78
450.0	6.35	0.24	5.96	94.04	0.53
525.0	3.39	0.13	3.18	96.82	1.44

ตาราง ก.13 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	109.10	4.20	100.00	0.00	0.00
7.5	105.43	4.05	96.63	3.37	6.71
15.0	103.82	3.99	95.16	4.84	4.32
30.0	97.96	3.77	89.79	10.21	8.29
45.0	79.14	3.04	72.53	27.47	4.33
67.5	58.45	2.25	53.57	46.43	2.70
90.0	50.50	1.94	46.29	53.71	3.18
112.5	44.33	1.70	40.63	59.37	2.08
150.0	35.54	1.37	32.58	67.42	1.03
225.0	24.02	0.92	22.02	77.98	0.78
300.0	16.43	0.63	15.06	84.94	0.53
375.0	8.11	0.31	7.43	92.57	0.18
412.5	4.27	0.16	3.91	96.09	1.78
450.0	2.74	0.11	2.51	97.49	1.97
525.0	1.73	0.07	1.59	98.41	3.89
562.5	0.23	0.01	0.21	99.79	0.12
600.0	0.00	0.00	0.00	100.00	2.84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.14 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	113.19	4.35	100.00	0.00	0.00
7.5	108.22	4.16	95.61	4.39	7.93
15.0	100.76	3.88	89.02	10.98	6.20
30.0	98.66	3.79	87.17	12.83	2.41
45.0	70.15	2.70	61.98	38.02	3.58
67.5	58.85	2.26	51.99	48.01	4.57
90.0	52.66	2.03	46.52	53.48	1.03
112.5	45.77	1.76	40.44	59.56	1.55
150.0	36.47	1.40	32.22	67.78	0.29
225.0	23.06	0.89	20.37	79.63	1.38
300.0	12.33	0.47	10.89	89.11	1.47
375.0	5.70	0.22	5.04	94.96	0.74
412.5	2.98	0.11	2.63	97.37	1.58
450.0	2.03	0.08	1.79	98.21	2.99
525.0	0.57	0.02	0.50	99.50	3.14
562.5	0.00	0.00	0.00	100.00	1.08

ตาราง ก.15 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	107.03	4.12	100.00	0.00	0.00
7.5	107.64	4.14	100.57	-0.57	12.79
15.0	103.54	3.98	96.74	3.26	8.90
30.0	99.74	3.84	93.19	6.81	3.52
45.0	67.38	2.59	62.96	37.04	2.19
67.5	57.30	2.20	53.54	46.46	3.82
90.0	49.19	1.89	45.96	54.04	3.17
112.5	45.35	1.74	42.37	57.63	1.82
150.0	39.98	1.54	37.35	62.65	5.64
225.0	22.40	0.86	20.93	79.07	2.17
300.0	15.54	0.60	14.52	85.48	0.71
375.0	5.42	0.21	5.06	94.94	1.95
412.5	3.38	0.13	3.15	96.85	2.16
450.0	2.57	0.10	2.40	97.60	0.87
525.0	1.65	0.06	1.54	98.46	2.53

ตาราง ก.16 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	110.81	4.26	100.00	0.00	0.00
15.0	101.44	3.90	91.55	8.45	10.31
30.0	94.32	3.63	85.12	14.88	3.79
45.0	69.76	2.68	62.96	37.04	1.54
75.0	55.37	2.13	49.97	50.03	5.61
112.5	45.10	1.73	40.71	59.29	2.80
150.0	32.74	1.26	29.55	70.45	0.95
187.5	25.31	0.97	22.84	77.16	1.20
225.0	19.34	0.74	17.45	82.55	1.31
300.0	13.28	0.51	11.98	88.02	1.25
375.0	9.02	0.35	8.14	91.86	0.88
412.5	4.78	0.18	4.31	95.69	3.16
450.0	2.90	0.11	2.62	97.38	0.47
487.5	1.58	0.06	1.43	98.57	1.50
525.0	0.87	0.03	0.79	99.21	1.33

ตาราง ก.17 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 1.1 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	102.55	3.94	100.00	0.00	0.00
15.0	92.31	3.55	90.02	9.98	6.50
30.0	84.55	3.25	82.45	17.55	2.87
45.0	64.93	2.50	63.32	36.68	1.17
75.0	50.75	1.95	49.49	50.51	4.35
112.5	40.28	1.55	39.28	60.72	2.19
150.0	31.75	1.22	30.96	69.04	6.70
187.5	23.64	0.91	23.05	76.95	2.33
225.0	15.20	0.58	14.83	85.17	1.72
300.0	11.81	0.45	11.52	88.48	0.93
375.0	5.65	0.22	5.51	94.49	1.23
412.5	2.02	0.08	1.97	98.03	0.52
450.0	1.37	0.05	1.34	98.66	3.48
487.5	0.48	0.02	0.47	99.53	1.71
525.0	0.16	0.01	0.15	99.85	1.49

ตาราง ก.18 ข้อมูลการวัดค่าไซยาไนด์ จากการทดลองด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.50 กรัมต่อลิตร อัตราการเติมอากาศ 2.2 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	[CN <sup>-</sup> ] (มก./ลิตร CN <sup>-</sup> )	[CN <sup>-</sup> ] (มิลลิโมลาร์)	%[CN <sup>-</sup> ] ที่เหลืออยู่	%[CN <sup>-</sup> ] ที่ถูกกำจัด	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของ การทดลอง 3 ซ้ำ
0.0	106.43	4.09	100.00	0.00	0.00
15.0	95.37	3.67	89.61	10.39	3.55
30.0	85.19	3.28	80.04	19.96	2.72
45.0	65.13	2.51	61.20	38.80	3.46
75.0	51.48	1.98	48.37	51.63	1.67
112.5	40.48	1.56	38.03	61.97	0.56
150.0	30.23	1.16	28.41	71.59	2.90
187.5	22.57	0.87	21.21	78.79	1.24
225.0	16.18	0.62	15.20	84.80	0.18
300.0	10.57	0.41	9.94	90.06	3.07
375.0	4.75	0.18	4.46	95.54	1.95
412.5	1.87	0.07	1.76	98.24	4.54
450.0	1.01	0.04	0.95	99.05	2.31
487.5	0.36	0.01	0.33	99.67	0.83
525.0	0.00	0.00	0.00	100.00	1.77



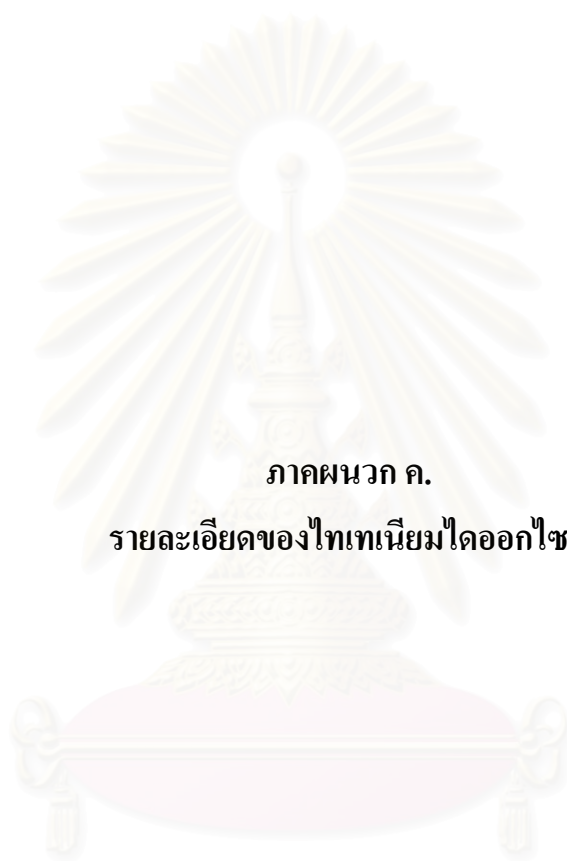
ภาคผนวก ข.  
รายละเอียดของหลอดยูวี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





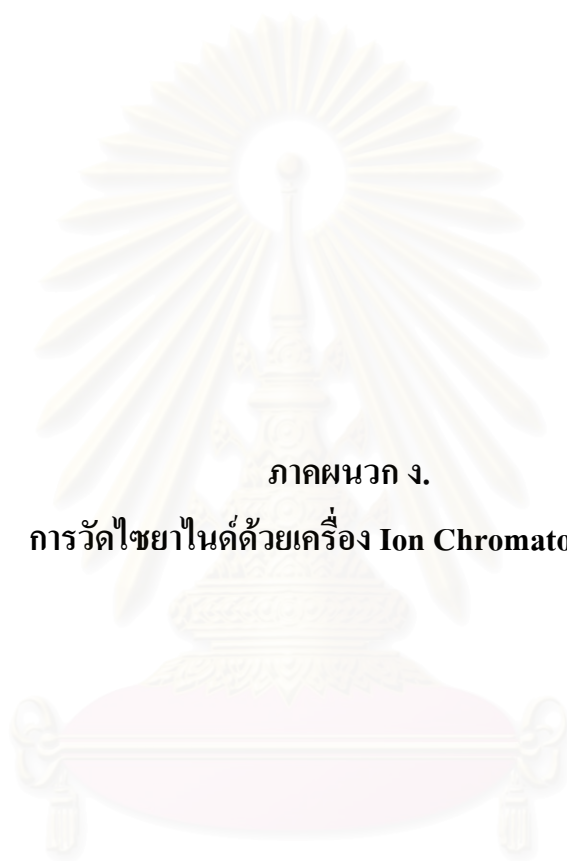
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค.

รายละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง.

การวัดไซยาไนต์ด้วยเครื่อง Ion Chromatography

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไซยาไนด์สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี โดยมีส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ ดังนี้ ส่วนแยกสาร คือ คอลัมน์ AS7 ส่วนตรวจวัดคือ เครื่องตรวจวัดรุ่น ED50 ประกอบกับ Electrochemical Cell โดยใช้ Silver working Electrode ที่ 0.00 V และใช้ Ag/AgCl reference Mobile phase ที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมอะซิเตท (Sodium Acetate) 0.5 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) 0.1 โมลาร์ และเอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) 5% v/v ที่อัตราการไหล 1 มล./นาทึ ระบบที่ใช้มีสัญญาณการตรวจวัดของไซยาไนด์ดังรูปที่ ง.1 ไซยาไนด์จะปรากฏสัญญาณที่เวลาประมาณ 6.4-7.0 นาที



รูปที่ ง.1 สัญญาณของไซยาไนด์จากการตรวจวัดด้วยเครื่องไอออนโครมาโตกราฟี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรีศนีย์ เจริญสิน เกิดเมื่อวันที่ 22 เดือนสิงหาคม พ.ศ.2523 จังหวัด  
ราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)  
จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อใน  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย