

การคูณซ้ำไชนาไนด์ โครเมียมและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์  
โดยใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล



นายภาคย์ ชาตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

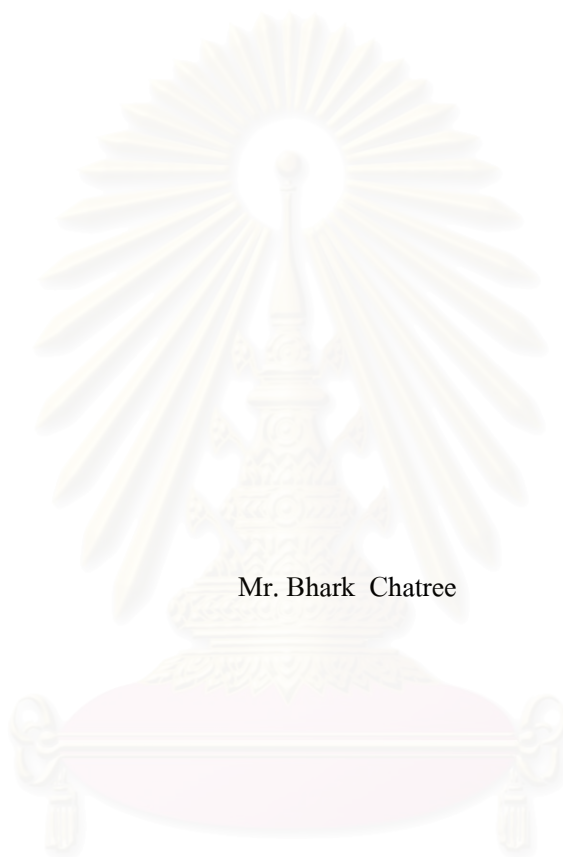
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2426-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF CYANIDE CHROMIUM AND ZINC FROM SYNTHETIC  
WASTEWATER USING NICKEL-IMPREGNATED ALUMINA



Mr. Bhark Chatree

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

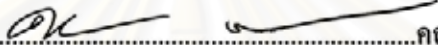
Academic Year 2005

ISBN 974-53-2426-4

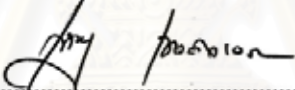
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล
โดย	นายภาคย์ ชาตรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิเรก ลาวณิชศิริ)

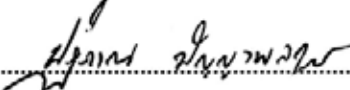
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนันธ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

ภาคย์ ชาติรี : การดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล (ADSORPTION OF CYANIDE CHROMIUM AND ZINC FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING NICKEL-IMPREGNATED ALUMINA)  
 อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สุธา ขาวเขียว,อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุนา, 128 หน้า.  
 ISBN 974-53-2426-4

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีโดยใช้อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางในการดูดซับ แบ่งการทดลองเป็นแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ผลการทดลองแบบที่ละเทพบว่า ในกรณีน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดี่ยวหรือสังกะสีอย่างเดี่ยว นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าอะลูมินา แต่ค่าความสามารถในการดูดซับของตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าต่ำมาก ทำให้อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ดูดซับไซยาไนด์อย่างเดี่ยวหรือสังกะสีอย่างเดี่ยว ส่วนในกรณีที่น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีมากกว่าอะลูมินา ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่อัตราส่วนไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มีค่า 11.00 มก./ก.และ 18.50 มก./ก.ตามลำดับ ปริมาณไซยาไนด์ที่มากเกินพอมีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีลดลง ที่สภาวะสมดุลสัดส่วนโมลไซยาไนด์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์เป็นไปตามรูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่มีในระบบ โดยที่อัตราส่วนไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 50:20:100 มีค่า 1:1 อัตราส่วน 100:20:100 มีค่า 1.5:1 และอัตราส่วน 200:20:100 มีค่า 3:1 ตามลำดับ ผลการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่า นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีมากกว่าอะลูมินา ที่อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า เวลาสัมผัสที่มากขึ้นมีผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อัตราส่วนไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่อัตราการไหล 8 มล./นาที มีค่า 10.90 มก./ก. และ 17.80 มก./ก. และอัตราการไหล 4 มล./นาที มีค่า 12.83 มก./ก. และ 21.17 มก./ก. ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่มากเกินพอมีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีลดลง ที่จุดเบรคทรูสัดส่วนโมลไซยาไนด์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์เป็นไปตามรูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่มีในระบบ ซึ่งอัตราส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองแบบที่ละเท

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
 ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิติศ.....ภาดย์ ชาติรี.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4670429821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : ADSORPTION / CYANIDE / CHROMIUM / ZINC / NICKEL- IMPREGNATED  
ALUMINA / IMPREGNATION / CYANIDE REMOVAL / HEAVY METALS REMOVAL

BHARK CHATREE : ADSORPTION OF CYANIDE CHROMIUM AND ZINC FROM  
SYNTHETIC WASTEWATER USING NICKEL-IMPREGNATED ALUMINA. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., THESIS COADVISOR :

JIRDSAK TSCHAIKUNA, Ph.D., 128 pp. ISBN 974-53-2426-4

This research investigated the efficiency of cyanide chromium and zinc adsorption from synthetic wastewater using alumina and nickel oxide as media. The experiment was divided in to two parts, i.e., batch experiment and continuous column experiment. For batch experiment, it was found that the adsorption capacity of nickel oxide for cyanide from cyanide synthetic wastewater and zinc from zinc synthetic wastewater was higher than those of alumina. The adsorption capacity of both media were low. Consequently, nickel oxide and alumina were unsuitable for cyanide and zinc adsorption. For cyanide and zinc adsorption from synthetic wastewater containing cyanide, chromium, and zinc, it was found that the adsorption efficiency of nickel oxide was higher than alumina and adsorption capacity of cyanide was increased when the concentration of zinc was increased. The adsorption capacity of cyanide and zinc were 11 mg/g and 18.50 mg/g, respectively at the ratio 100:20:100 of CN:Cr:Zn. The excess cyanide effected the adsorption of zinc cyanide complex. The excess cyanide decreased the cyanide and zinc adsorption capacity. At equilibrium condition, cyanide and zinc and their complex were adsorbed on nickel oxide that could be calculated in mole fraction of cyanide and zinc were 1:1, 1.5:1 and 3:1 for the ratio CN:Cr:Zn of 50:20:100, 100:20:100 and 200:20:100, respectively For column experiment, it was found that the increasing of contact time slightly increased adsorption capacity. For the treatment of synthetic wastewater with the ratio of CN:Cr:Zn equal to 100:20:100, the capacity of cyanide and zinc adsorption were 10.90 mg/g and 17.80 mg/g, respectively at service flow rate 8 ml/min and were 12.83 mg/g and 21.17 mg/g, respectively at service flow rate 4 ml/min. The excess cyanide decreased the cyanide and zinc adsorption capacity. The mole fraction of adsorbed cyanide and zinc from column experiment was comparable to that of batch experiment.

Department.....Environmental Engineering....

Field of Study.....Environmental Engineering....

Academic Year.....2005.....

Student's signature..........

Advisor's signature..........

Co-advisor's signature..........



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ รวมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.เขมรัฐ โสสถาพันธ์และอาจารย์ ดร.ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ มาลาตี ทัยยะคุปต์ อาจารย์ประจำภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับการทำ XRD

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และห้องปฏิบัติการในการเตรียมตัวกลางสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุญาตให้ใช้อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน และครูผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการต่างๆ ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ รวมถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่างๆ สำหรับงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.2 ขั้นตอนการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....	3
2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย.....	4
2.2 ไชยาไนต์.....	5
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบ โลหะ .....	6
2.3.1. การตกผลึก.....	6
2.3.2. การออกซิเดชันรีดักชัน.....	7
2.3.3. กระบวนการเมมเบรน.....	7
2.3.4. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	8
2.3.5. กระบวนการดูดซับ.....	8
2.4 กระบวนการดูดซับ.....	10
2.4.1 กลไกการดูดซับ.....	10
2.4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายมวล.....	10
2.5 แกมมาอะลูมินา.....	11
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ.....	12
2.6.1 รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ.....	12
2.6.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ.....	12
2.6.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบผิว.....	13

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี.....	19
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	19
3.1.2 สารเคมี.....	19
3.2 ตัวกลางในการดูดซับ.....	20
3.2.1 การเตรียมตัวกลางการดูดซับนิกเกิลออกไซด์.....	20
3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์.....	23
3.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของนิกเกิลออกไซด์.....	25
3.2.4 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์.....	25
3.3 นำเสี้ยนที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.4 ตัวแปรประเภทต่างๆ ในการทดลอง.....	27
3.5 การดำเนินการทดลอง.....	33
ก. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินา เปรียบเทียบกับนิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch)	
3.5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12.....	33
3.5.2 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....	34
3.5.3 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12.....	35
3.5.4 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12.....	36
3.5.5 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ และสังกะสีที่พีเอช 12.....	37
3.5.6 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ และโครเมียมที่พีเอช 12.....	38
3.5.7 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12.....	39
ข. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินา เปรียบเทียบกับนิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column)	
3.5.8 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสี แบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	41



3.5.9	การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ : โครเมียม :สังกะสีเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	42
3.6	วิธีการวิเคราะห์.....	43
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติ निकเกิดออกไซด์.....	44
4.1.1	การวิเคราะห์ปริมาณ निकเกิดบนตัวกลาง निकเกิดออกไซด์.....	44
4.1.2	การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ निकเกิดออกไซด์.....	44
4.1.3	การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของ निकเกิดออกไซด์.....	45
4.2	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี.....	46
4.2.1	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12.....	46
4.2.2	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....	49
4.2.3	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12.....	52
4.2.4	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12.....	53
4.2.5	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....	54
4.2.6	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....	59
4.2.7	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12.....	62
4.2.8	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์, โครเมียมและสังกะสีแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสีเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	70
4.2.9	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์, โครเมียมและสังกะสีแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสีเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	74
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	78
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	79
	รายการอ้างอิง.....	80

ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.    มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งประเภทต่าง ๆ.....	84
ภาคผนวก ข.    ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะและ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ निकเกิดออกไซด์.....	90
ภาคผนวก ค.    ข้อมูลผลการทดลอง.....	94
ภาคผนวก ง.    การคำนวณรูปต่างๆ ของไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ลักษณะน้ำเสียจาก โรงงานชุบ โลหะ.....4
ตารางที่ 2.2	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจาก โรงงานชุบ โลหะด้วยไฟฟ้า.....9
ตารางที่ 3.1	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ ในการทดลองที่ 3.5.1 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ ที่พีเอช 12.....28
ตารางที่ 3.2	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.2 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....28
ตารางที่ 3.3	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.3 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12.....29
ตารางที่ 3.4	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.4 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12.....29
ตารางที่ 3.5	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.5 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....30
ตารางที่ 3.6	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.6 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....30
ตารางที่ 3.7	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.7 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีที่พีเอช 12....31
ตารางที่ 3.8	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.8 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มก./ล.....31
ตารางที่ 3.9	แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.9 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มก./ล.....32
ตารางที่ 3.10	แสดงรายการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....43
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของนิกเกิลออกไซด์.....44
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบค่า Regression ฟรอนด์ลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม ของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ของไซยาไนด์ในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12.....48
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบค่า Regression ฟรอนด์ลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม ของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ของสังกะสีในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....51

ตาราง ก-1	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	85
ตาราง ก-2	มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล.....	87
ตาราง ก-3	มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อม กับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่ชลประทาน.....	88
ตารางที่ ข-1	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะบริเวณ วงแหวนแสงประทีป เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร.....	91
ตารางที่ ข-2	การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์.....	93
ตารางที่ ข-3	การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์.....	93
ตารางที่ ค-1	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12.....	95
ตารางที่ ค-2	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....	98
ตารางที่ ค-3	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12.....	103
ตารางที่ ค-4	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12.....	105
ตารางที่ ค-5	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....	106
ตารางที่ ค-6	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ และโครเมียมที่พีเอช 12.....	109
ตารางที่ ค-7	ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12.....	112
ตารางที่ ค-8	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์, โครเมียมและสังกะสี แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	115
ตารางที่ ค-9	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์, โครเมียมและสังกะสี แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	118
ตารางที่ ง-1	แสดงรูปต่างๆ ของสารประกอบสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่างๆ.....	123
ตารางที่ ง-2	แสดงรูปต่างๆ ของสารประกอบโครเมียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอชต่างๆ.....	124
ตารางที่ ง-3	แสดงรูปต่างๆ ของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	125
ตารางที่ ง-4	แสดงรูปต่างๆ ของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	126
ตารางที่ ง-5	แสดงรูปต่างๆ ของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	127

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า.....3
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮยาไนด์ไอออน และไฮโครเจนไฮยาไนด์ ที่พีเอชต่าง ๆ.....5
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ.....6
รูปที่ 2.4	รูปแบบต่างๆ ของอะลูมินา.....11
รูปที่ 2.5	รูปแบบการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวดำรงรับ.....12
รูปที่ 2.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบผิว.....14
รูปที่ 2.7	การกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวดำรงรับที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบ.....15
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงการเคลือบผิวนิกเกิลออกไซด์.....21
รูปที่ 3.2	ชุดเครื่องมือการเคลือบผิวแบบแห้ง.....22
รูปที่ 3.3	ชุดเครื่องมือแคลซิเนชัน.....22
รูปที่ 3.4	แผนผังแสดงการวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์.....24
รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงการวิเคราะห์ค่าประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์.....26
รูปที่ 3.6	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไฮยาไนด์ที่พีเอช 12.....33
รูปที่ 3.7	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....34
รูปที่ 3.8	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12.....35
รูปที่ 3.9	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12.....36
รูปที่ 3.10	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไฮยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....37
รูปที่ 3.11	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไฮยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....38
รูปที่ 3.12	การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไฮยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีที่พีเอช 12.....39
รูปที่ 3.13	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง.....40
รูปที่ 3.14	การหาประสิทธิภาพการดูดซับไฮยาไนด์ โครเมียม และสังกะสี แบบต่อเนื่องโดยมีอัตราส่วนไฮยาไนด์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....41
รูปที่ 3.15	การหาประสิทธิภาพการดูดซับไฮยาไนด์ โครเมียม และสังกะสี แบบต่อเนื่องโดยมีอัตราส่วนไฮยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....42



รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวและค่าพีเอช.....	45
รูปที่ 4.2	ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12 .....	47
รูปที่ 4.3	ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12 .....	47
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ที่จุดสมดุลในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12 .....	48
รูปที่ 4.5	ความเข้มข้นสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....	50
รูปที่ 4.6	ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในการทดลองหาประสิทธิภาพ ในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7.....	50
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของสังกะสี ที่จุดสมดุลในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 .....	51
รูปที่ 4.8	ความเข้มข้นสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพ การดูดซับสังกะสี ที่พีเอช 12.....	53
รูปที่ 4.9	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสี ที่พีเอช 7 และ 12.....	53
รูปที่ 4.10	ความเข้มข้นไซยาไนด์และสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลอง หาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....	55
รูปที่ 4.11	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....	57
รูปที่ 4.12	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12.....	57
รูปที่ 4.13	ความเข้มข้นไซยาไนด์และโครเมียมที่เวลาต่างๆ ในการทดลอง หาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....	60
รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....	61
รูปที่ 4.15	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12.....	61
รูปที่ 4.16	ความเข้มข้นไซยาไนด์และสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลอง หาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12.....	63

รูปที่ 4.17	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี ที่พีเอช 12.....	65
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี ที่พีเอช 12.....	66
รูปที่ 4.19	ภาพถ่าย XRD ของอะลูมินา.....	67
รูปที่ 4.20	ภาพถ่าย XRD ของนิกเกิลออกไซด์.....	68
รูปที่ 4.21	ภาพถ่าย XRD ของนิกเกิลออกไซด์ที่ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น ไซยาไนต์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้น100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	69
รูปที่ 4.22	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนต์และสังกะสีที่ปริมาตรเบตต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้น ไซยาไนต์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	71
รูปที่ 4.23	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนต์และสังกะสีที่ปริมาตรเบตต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้น ไซยาไนต์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	72
รูปที่ 4.24	การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีของอะลูมินา และนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้น ไซยาไนต์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	73
รูปที่ 4.25	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนต์และสังกะสีที่ปริมาตรเบตต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้น ไซยาไนต์ :โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	75
รูปที่ 4.26	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนต์และสังกะสีที่ปริมาตรเบตต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 4 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้น ไซยาไนต์ :โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	76
รูปที่ 4.27	การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีของอะลูมินา และนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้น ไซยาไนต์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ประกอบด้วยไซยาไนด์และโลหะหนักเป็นองค์ประกอบสำคัญ ไซยาไนด์และโลหะหนักนี้เป็นอันตรายอย่างมากหากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม หน่วยงานภาครัฐจึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ เพื่อควบคุมไม่ให้มีปริมาณสูงจนเป็นอันตราย การกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนัก ด้วยวิธีการที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้น จะทำการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ก่อน แล้วตามด้วยการตกตะกอนโลหะหนักด้วยสารเคมี ซึ่งเป็นวิธีการที่ยังขาดต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและการกำจัดตะกอนโลหะหนัก อีกทั้งต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ในการควบคุมระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพ ทำให้โรงงานชุบโลหะขนาดกลางและขนาดเล็กมักละเลยการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยตัวกลางการดูดซับที่เหมาะสม จะช่วยให้ปัญหาเหล่านี้ลดน้อยลง

ในการพิจารณาตัวกลางการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับบำบัดไซยาไนด์และโลหะหนักนั้น อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางที่น่าสนใจอันหนึ่ง เนื่องจากนิกเกิลสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับไซยาไนด์เกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลไซยาไนด์ได้ ส่วนอะลูมินาซึ่งเป็นตัวรองรับสามารถดูดซับโลหะหนักได้ และในการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์นั้น ต้องใช้ความร้อนสูง อะลูมินาเป็นตัวรองรับที่สามารถทนต่อสภาวะดังกล่าวได้โดยไม่เสียรูป รวมถึงโครงสร้างของอะลูมินามีความเหมาะสมในการใช้เป็นตัวรองรับ เนื่องจากขนาดรูพรุนมีลักษณะคงที่เป็นเอกลักษณ์

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี โดยใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางในการดูดซับ เพื่อนำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางในการดูดซับ
- 1.2.2 เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ทำการเตรียมตัวกลางอะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากงานวิจัยของพิชาญ ดันติชัยปกรณ์ (2541) ที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้วนำตัวกลางที่เตรียมได้มาทดลองดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีทั้งแบบทีละเท (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Column) โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย น้ำเสียที่ใช้ทดลองนั้นใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์อ้างอิงจากงานวิจัยของธนพร เหล่าไพโรจน์ (2548) ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะบริเวณ วงแหวนแสงประทีป (ชัชวาล) เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

การวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

- ส่วนที่ 1           ทำการเคลือบผิวอะลูมินาด้วยนิกเกิลออกไซด์แบบแห้ง           เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี
- ส่วนที่ 2           ทำการทดลองแบบทีละเท เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีของตัวกลางนิกเกิลออกไซด์บนอะลูมินา ซึ่งทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียว โลหะหนักอย่างเดียว และไซยาไนด์ผสมโลหะหนัก ที่พีเอช 12 โดยกำหนดความเข้มข้นไซยาไนด์ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- ส่วนที่ 3           การทดลองแบบต่อเนื่อง เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีของตัวกลางนิกเกิลออกไซด์บนอะลูมินา ซึ่งทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ผสมโครเมียมและสังกะสี ที่พีเอช 12 โดยกำหนดความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

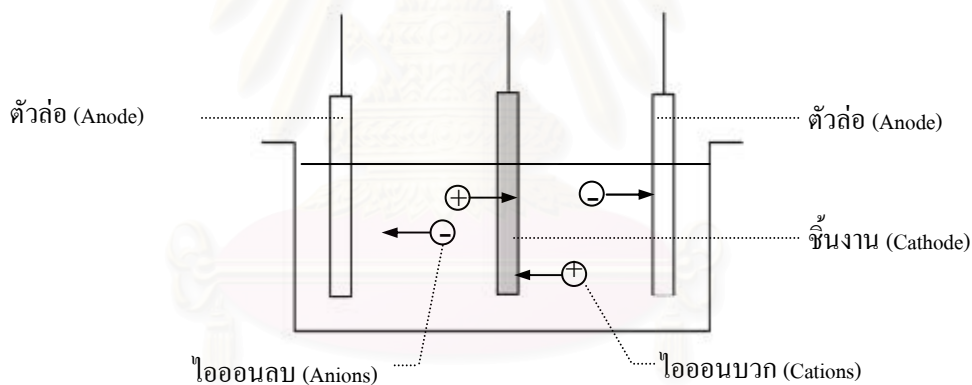
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

##### 2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.Current) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี โดยที่ชิ้นงานต่ออยู่กับขั้วลบ (Cathode) ส่วนโลหะที่จะใช้ชุบชิ้นงานต่ออยู่กับขั้วบวก (Anode) ซึ่งแช่อยู่ในน้ำยาชุบที่มีไอออนโลหะที่จะเคลือบผสมอยู่ เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนโลหะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบเกิดเป็นโลหะเคลือบผิวชิ้นงาน ส่วนที่ขั้วบวก โลหะจะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอนกับวงจรภายนอก ทำให้ได้ไอออนบวกสลายลงสู่สารละลาย



รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สุชาติ ไชยสวัสดิ์ และคณะ, 2542)

##### 2.1.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีขั้นตอนดังนี้ คือ การขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้มีขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน จุ่มกรดเพื่อกำจัดสนิม แล้วจึงนำชิ้นงานไปชุบโลหะตามต้องการ เสร็จแล้วนำไปอบแห้ง อาจมีการชุบสีเพื่อความสวยงามและป้องกันสนิม สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ



### 2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
- 2) น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- 3) น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- 4) น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- 5) น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

น้ำเสียส่วนใหญ่จากโรงงานชุบโลหะจะมาจากน้ำล้างในขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน น้ำล้างในขั้นตอนการจุ่มเงา กำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา ซึ่งจะมีปริมาณมาก และมีส่วนประกอบของโลหะและสารเคมีหลายชนิด และสารเคมีชนิดหนึ่งที่ใช้มากในกระบวนการชุบโลหะ คือ โซยาไนต์ ซึ่งใช้เป็นสารกัลวานิก เพื่อให้โลหะสามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานชุบโลหะนอกจากจะมีโลหะหนักแล้วยังมีโซยาไนต์ปนอยู่ด้วย ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (ประยูร ฟองสถิตย์กุล และคณะ, 2542)

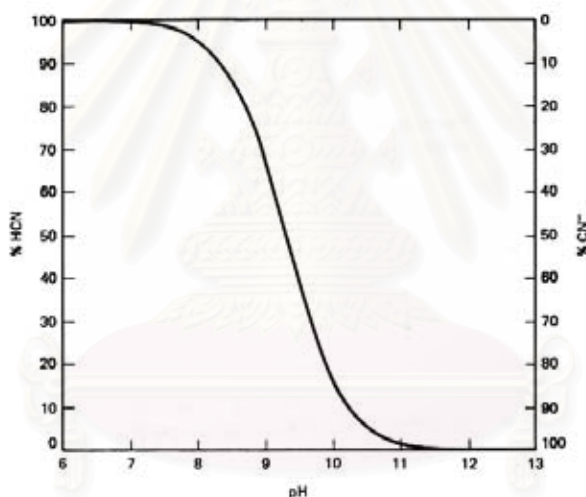
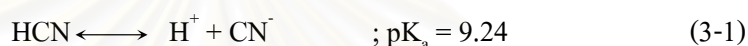
พารามิเตอร์	ช่วงค่า	หน่วย
อุณหภูมิ (Temperature)	27-29	องศาเซลเซียส
พีเอชของน้ำเสียที่มีโซยาไนต์ปนเปื้อน pH (Cyanide Contaminated WW)	11.1-12.5	
โซยาไนต์ (CN <sup>-</sup> )	316-442	ส่วนในล้านส่วน
ของแข็งทั้งหมด (Total solids)	4,780-6,600	ส่วนในล้านส่วน
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	290-430	ส่วนในล้านส่วน
ของแข็งละลาย (Dissolve Solids)	4,490-6,170	ส่วนในล้านส่วน
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids)	1,010-1,810	ส่วนในล้านส่วน
ของแข็งคงตัว (Fixed solids)	3,777-4,967	ส่วนในล้านส่วน
ซีโอดี (COD)	299-473	ส่วนในล้านส่วน

## 2.2 ไชยาไนต์

### ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนต์

ไชยาไนต์ หมายถึง หมู่ไชยาไนต์ (CN) ที่มีในสารประกอบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณออกมาได้ในรูปไชยาไนต์ไอออน สารประกอบไชยาไนต์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ไชยาไนต์อิสระ คือ ไชยาไนต์ที่อยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจนไชยาไนต์ หรือกรดไชยานิก (HCN) และไชยาไนต์ไอออน (CN<sup>-</sup>) ซึ่งสัดส่วนของไฮโดรเจนไชยาไนต์และไชยาไนต์ไอออนขึ้นอยู่กับพีเอชและค่าคงที่การแตกตัว (K<sub>a</sub>) ซึ่งมีค่า  $4.6 \times 10^{-10}$  ที่ 25 °ซ. ตามสมการ 3.1



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไชยาไนต์ไอออน และไฮโดรเจนไชยาไนต์ที่พีเอชต่าง ๆ (Benfield, Judkins และ Weand, 1982)

2. สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อน หมายถึง สารประกอบของไชยาไนต์กับโลหะหนัก สารประกอบเหล่านี้ สามารถที่จะแตกตัวให้ไชยาไนต์อิสระได้ ซึ่งความสามารถในการแตกตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่เสถียรภาพ (Stability Constants) สารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อนที่มีค่าคงที่เสถียรภาพต่ำ สามารถแตกตัวให้ไชยาไนต์อิสระได้มากกว่าสารประกอบไชยาไนต์เชิงซ้อนที่มีค่าคงที่เสถียรภาพสูงกว่า

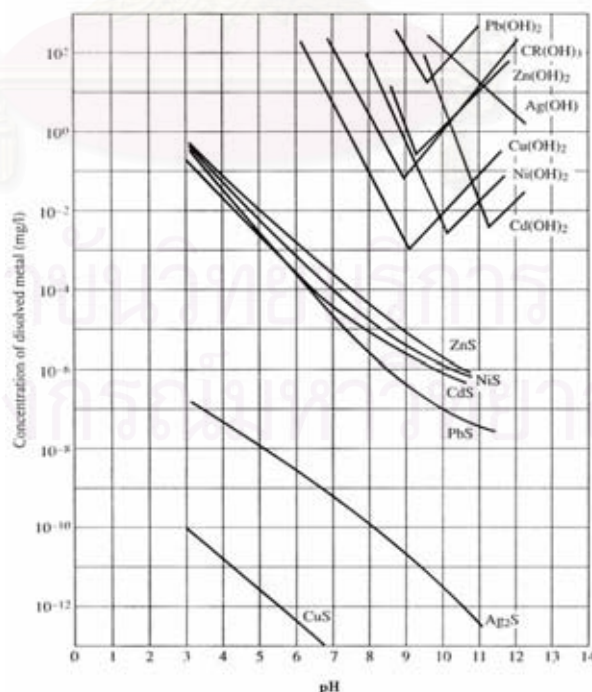
## 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมีกระบวนการมากมายซึ่งมักใช้ร่วมกันเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนี้

**2.3.1. การตกผลึก (Precipitation)** เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะหนักที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง สามารถทำได้โดย

1. การเติมสารเคมี เช่น สารประกอบซัลไฟด์, สารประกอบไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ในการเติมสารเคมีแต่ละชนิดจะทำให้ได้ปริมาณตะกอนของโลหะหนักที่แตกต่างกัน เช่น การกำจัดโครเมียมโดยการตกตะกอน เมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) ปริมาณและความเข้มข้นของตะกอนที่ได้จะมากกว่าการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) (สารโฆ นุญยกิจสมบัติ, 2535) และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจะต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีเพราะจัดว่าเป็นของเสียอันตราย

2 การปรับพีเอช การตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมคือ 9-11 ทองแดงคือ 7.5-11 นิกเกิลคือ 10.5-11 สังกะสีคือ 9.5-11 และทองแดงกับนิกเกิลและสังกะสีคือ 9.5-11 สังกะสีกับไซยาไนด์คือ 8-10.5 (สารโฆ นุญยกิจสมบัติ, 2535) สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ ปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{HO})_2$ ) และโซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ แสดงในรูป 3.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ (Eckenfelder, 2000)

**2.3.2. การออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation-Reduction)** เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน (Oxidation Number) เพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลง และสามารถกำจัดได้ง่าย เช่น การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ด้วยคลอรีน หรือรีดักชันโครเมียมประจุบวกหกเป็นประจุบวกสาม

ฟิเอชเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิไดซ์ เมื่อใช้คลอรีนไดออกไซด์ ( $\text{ClO}_2$ ) สำหรับการออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพร้อยละ 99.9 ทุกค่าฟิเอช (2.57, 9.20 และ 11.23) ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์จะถูกทำลายได้ดีที่ฟิเอชสูง โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 78.8 ที่ฟิเอช 11.23 สำหรับการออกซิไดซ์ด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า จะเกิดได้ดีที่ฟิเอช 10 โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโพแทสเซียมเพอร์ไซยาไนด์ ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) 1 มิลลิโมล/ลิตร (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003) สำหรับการกำจัดไซยาไนด์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ( $\text{NaOCl}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) มีฟิเอชที่เหมาะสมคือ 11 (อู่แก้ว เอี่ยมสำอาง, 2547)

**2.3.3. กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)** กระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (Semi Permeable Membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำ ซึ่งความสามารถในการแยกขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่าง (Pore Size) ของเมมเบรน และจะต้องมีแรงขับเคลื่อนที่ทำให้สารละลายไหลผ่านและเกิดการแยกขึ้น กระบวนการที่นำมาใช้กับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในปัจจุบัน ได้แก่ Ultrafiltration , Nanofiltration , Reverse Osmosis และ Electrodialysis เป็นต้น

การใช้กระบวนการเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะนั้น ต้องมีระบบบำบัดขั้นต้น มีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ระบบออสโมซิสย้อนกลับพบว่า ต้องทำการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย กำจัดของแข็งโดยใช้การกรองขนาด 5 ไมโครเมตร และต้องมีการปรับฟิเอชให้เหมาะสม ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบออสโมซิสย้อนกลับ ซึ่งสามารถกำจัดโลหะได้เกือบทั้งหมด และได้ปริมาณน้ำสะอาดที่บำบัดแล้วประมาณร้อยละ 75-95 ของปริมาณน้ำที่นำมาบำบัด (Benito และ Ruiz, 2002)

เนื่องจากกลไกในการแยกไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียนั้น ต้องใช้ความดันทำให้คุณภาพและปริมาณน้ำสะอาดที่ได้ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้และอุณหภูมิที่บำบัด โดยคุณภาพน้ำจะแปรผันตรงกับความดันและอุณหภูมิ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบออสโมซิสย้อนกลับอีกอย่างหนึ่ง คือ ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเมมเบรน (Concentration Polarization) เมื่อความเข้มข้นที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงดันเพิ่มขึ้น มีผลให้อัตราการผลิตน้ำสะอาดลดลง (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

**2.3.4. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)** น้ำเสียที่มีโลหะหนักหรือไอออนของสารประกอบ เมื่อผ่านเรซิน จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนอิสระในเรซิน ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดี แต่หลังจากใช้งานสักระยะเวลาประสิทธิภาพจะต่ำลง ต้องนำเรซินนั้นมาทำการล้างฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เพื่อฟื้นฟูอำนาจให้กับเรซินด้วยสารล้างฟื้นฟูสภาพ (Regenerant) ไอออนที่เรซินจับไว้จะออกมาพร้อมกับสารล้างฟื้นฟูสภาพ ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักหรือสารประกอบไอออนสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ชนิดของเรซินมีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและประสิทธิภาพในการนำสารละลายโลหะเข้มข้นกลับมาใช้ใหม่ เช่น การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์นิเกิลด้วยเรซินแบบกรดแก่ และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมด้วยเรซินแบบด่างแก่ พบว่า เมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียนิกเกิลและน้ำเสียโครเมียมมีค่าน้อยกว่า 300 และ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง และเวลากักเก็บในชั้นเรซินต้องมากกว่า 3 นาที (คลเดช ตั้งตระการพงษ์, 2539) และมีการเปรียบเทียบการใช้สารคีเลตติงเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินแบบกรดแก่ และเรซินแบบกรดอ่อน พบว่า คีเลตติงเรซินสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะได้ โดยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าเรซินแบบกรดแก่และเรซินแบบกรดอ่อน แต่การกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะหนักเกิดได้ไม่ดี (Koivula และคณะ, 2000)

**2.3.5. กระบวนการดูดซับ (Adsorption)** เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวกลาง (Adsorbent) ที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำเสีย (Adsorbate) ให้มาเกาะติดบนผิวของตัวกลาง ตัวกลางในดูดซับที่ใช้งานกันทั่วไปคือถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เพราะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง แต่ความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับไอออนโลหะหนักมีจำกัด จึงมีการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ให้มีความเหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ Tetrabutyl ammonium iodide (TBAI) และ Sodium diethyl dithiocarbamate (SDDC) สำหรับกำจัดทองแดง สังกะสี โครเมียมและไซยาไนด์ โดยใช้คอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์ TBA สำหรับกำจัดไซยาไนด์ ส่วนคอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์ SDDC สำหรับกำจัดไอออนโลหะ โดยที่ถ่านกัมมันต์ TBA มีความสามารถในการกำจัด 29.2 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 5 เท่าของถ่านปกติ ส่วนถ่านกัมมันต์ SDDC มีความสามารถในการกำจัด 38 , 9.9 และ 6.84 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงประมาณ 5 เท่า สังกะสีประมาณ 4 เท่า โครเมียมประมาณ 2 เท่า ของถ่านปกติ (Monser และ Adhoum, 2002) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยเงินและการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยนิกเกิล เพื่อกำจัดไซยาไนด์อิสระ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลมีความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์อิสระประมาณ 2 เท่าของถ่านกัมมันต์ปกติ (Adhoum และ Monser, 2002)



สำหรับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการบำบัดแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่รางระบาย  
สาธารณะ จะต้องมึคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า  
ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า  
(กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. พีเอช (pH value)	5.5-9.0
2. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
3. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร
4. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร
5. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร
6. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร
7. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ปรากฏการณ์นี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่กักเก็บตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

### 2.4.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่มาเกี่ยวข้อง

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับเนื่องจากแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals Forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayers) โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ

2. การดูดซับทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีขึ้น ผลจากการเปลี่ยนแปลงพันธะเคมี ทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่กับที่ จึงกล่าวได้ว่าเป็นปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

### 2.4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายมวล (Rate of Mass Transfer)

ในการดูดซับ การที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ถูกกำหนดโดยขั้นตอนการดูดซับที่ช้าที่สุด โดยขั้นตอนการดูดซับมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลว (Bulk Transfer) ไปยังผิวหน้าตัวดูดซับที่มีชั้นของเหลวบางๆ ห่อหุ้มอยู่

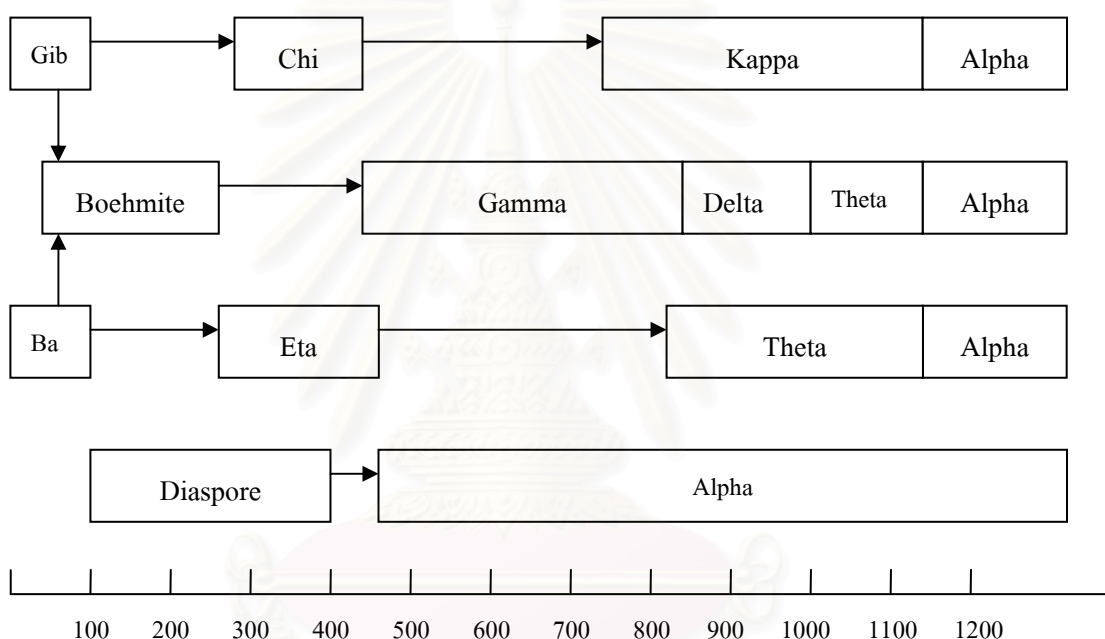
2. การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังชั้นฟิล์ม (Film Transfer) โดยที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion)

3. การเคลื่อนย้ายโมเลกุลภายในอนุภาค (Interparticle Transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้น

ภายใต้สภาวะหนึ่งๆ การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่า ภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลภายในตัวดูดซับจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว

## 2.5 แกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ )

แกมมาอะลูมินาถูกใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายๆ ด้าน เช่น มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง มีรูพรุนเปิด มีความแข็งแรงเพียงพอสามารถทนต่อความร้อนและความดันสูงได้โดยไม่เสียรูป ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากของตัวรองรับ อะลูมินามีหลายรูป โดยในแต่ละรูปมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น การกระจายตัวของรูพรุน ความเป็นกรดที่ผิว และโครงสร้างผลึกแต่ละรูปที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการเตรียม ความบริสุทธิ์ และประวัติการผ่านความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบต่างๆ ของอะลูมินา (Gates, 1991)

อะลูมินาส่วนใหญ่เตรียมได้จากการตกตะกอน ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ทั้งกรดและเบส อะลูมินาเป็นแอมโฟเทอริก (Amphoteric Oxide) ซึ่งละลายได้ในช่วงพีเอชต่ำกว่า 6 และพีเอชสูงกว่า 12 เมื่อตกตะกอนที่พีเอช 11 จะได้อะลูมินาที่มีโมเลกุลของน้ำสามโมเลกุล ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเรียกว่า Bayerite เมื่อตกตะกอนที่พีเอช 9 จะได้อะลูมินาที่มีน้ำหนึ่งโมเลกุล ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเรียกว่า Boehmite

แกมมาอะลูมินาหรืออาจเรียกว่า Activated Alumina เป็นรูปที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง โดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 100-400 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการเผา Boehmite ที่ 500-800 °C. และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1150 °C. จะได้แอลฟาอะลูมินา ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) หรือ Corundum

## 2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีที่สนใจ ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเข้าสู่สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium) ได้เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ของปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นสมดุลเคมีเดียวกัน

### 2.6.1 รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ

รูปแบบการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับ มี 4 แบบ ดังนี้คือ

1. แบบเอกกรุป (Uniform) โลหะกระจายตัวตลอดครัมภ์ของตัวรองรับ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ต้องการ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด
2. แบบเปลือกไข่ (Egg-Shell) โลหะกระจายตัวบริเวณขอบนอกของตัวรองรับ
3. แบบไข่ขาว (Egg-White) โลหะกระจายตัวเป็นแถบคล้ายไข่ขาวบนพื้นผิวตัวรองรับ
4. แบบไข่แดง (Egg-Yolk) โลหะกระจายตัวเป็นชั้นอยู่บริเวณศูนย์กลางของตัวรองรับ



รูปที่ 2.5 รูปแบบการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับ (Lee และ Aris, 1985)

### 2.6.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับ

ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับโดยทั่วไป สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ (Bond, 1987)

1. การเตรียมพื้นผิว (Precursor)
2. การทำให้แห้ง (Drying)
3. การทำแคลซิเนชัน (Calcination)
4. การทำปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction)

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยในแต่ละวิธีจะให้สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องประสิทธิภาพ ร้อยละการกระจายของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับ และความยากง่ายในการเตรียม เป็นต้น ซึ่งวิธีการเตรียมที่นิยมใช้คือ

1. การตกตะกอน (Precipitation)
2. การตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation)
3. การเตรียมแบบวิธีเอแอลอี (Atomic Layer Epitaxy : ALE)
4. การพอกพูน-การตกตะกอน (Deposition-Precipitation)
5. การเคลือบผิว (Impregnation)

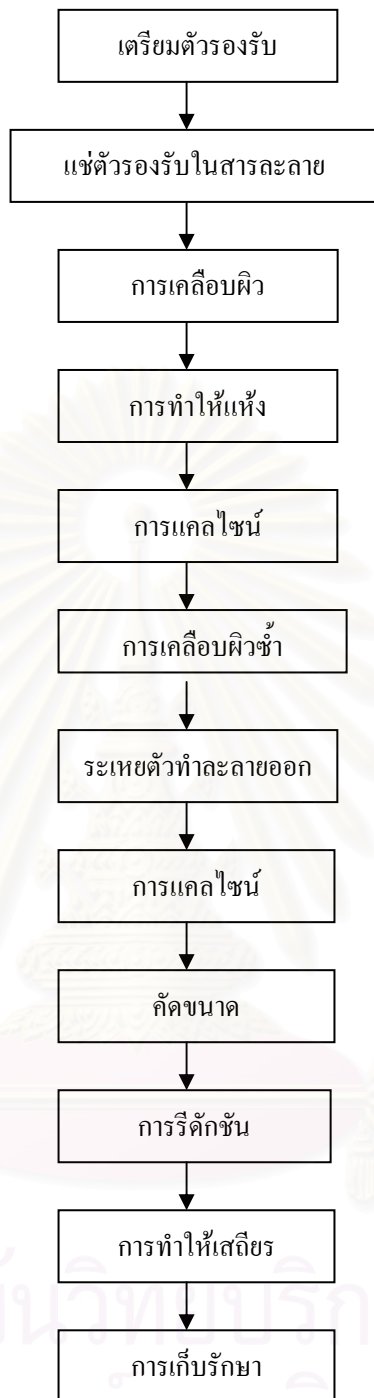
ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะบนตัวรองรับที่เตรียมด้วยวิธีที่ต่างกัน และมีตัวรองรับที่แตกต่างกัน โดยมีโลหะที่พื้นผิวตัวเดียวกัน จะให้ความว่องไวของปฏิกิริยาที่ต่างกัน ในการศึกษาความว่องไวของปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  Reforming Reaction) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินา ( $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผิวให้การเปลี่ยนแปลงมีเทน ( $\text{CH}_4$  Conversion) ร้อยละ 95.8 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนซิลิกา ( $\text{Ni-SiO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผิวให้การเปลี่ยนแปลงมีเทนร้อยละ 6.9 และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{Ni-MgO}$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมให้การเปลี่ยนแปลงมีเทนร้อยละ 10 (Shaobin และ Lu, 1998)

### 2.6.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบผิว (Impregnation)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้นิยมใช้กันมาก เนื่องจากให้ร้อยละการกระจายสูง ประหยัด และง่าย ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยในขั้นแรกเป็นการไล่ความชื้นออกจากตัวรองรับ แล้วนำตัวรองรับมาแช่ในสารละลายอิมเพกเนนต์ (ไอออนโลหะ) จากนั้นทำให้แห้ง และเคลือบตามลำดับ ตามด้วยการเคลือบผิวซ้ำ (Reimpregnation) ด้วยสารละลายตัวที่สอง (Secondary Impregnation Solution) แล้วระเหยตัวทำละลายออก ตามด้วยแคลไซน์ คัดขนาด และรีดักชันให้ได้โลหะที่ไม่มีประจุ (Zero Valency) กระจายบนพื้นผิวตัวรองรับ ตามลำดับ เพื่อให้สะดวกในการเก็บรักษาจึงต้องเพิ่มความเสถียรโดยการลดความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการเก็บต่อไป

ในขั้นตอนระเหยเอาตัวทำละลายที่มากเกินไป ผลึกขนาดเล็กของเกลือไอออนโลหะจะเกาะติดกับผนังของตัวรองรับ หลังจากนั้นทำการรีดักชันโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน จะได้อนุภาคโลหะเท่านั้นที่เกาะติดกับพื้นผิวตัวรองรับ โดยที่ขนาดของอนุภาคโลหะจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ หากใช้ความเข้มข้นสูง แนวโน้มที่จะเกิดอนุภาคขนาดใหญ่จะมีมากกว่าใช้ความเข้มข้นต่ำ

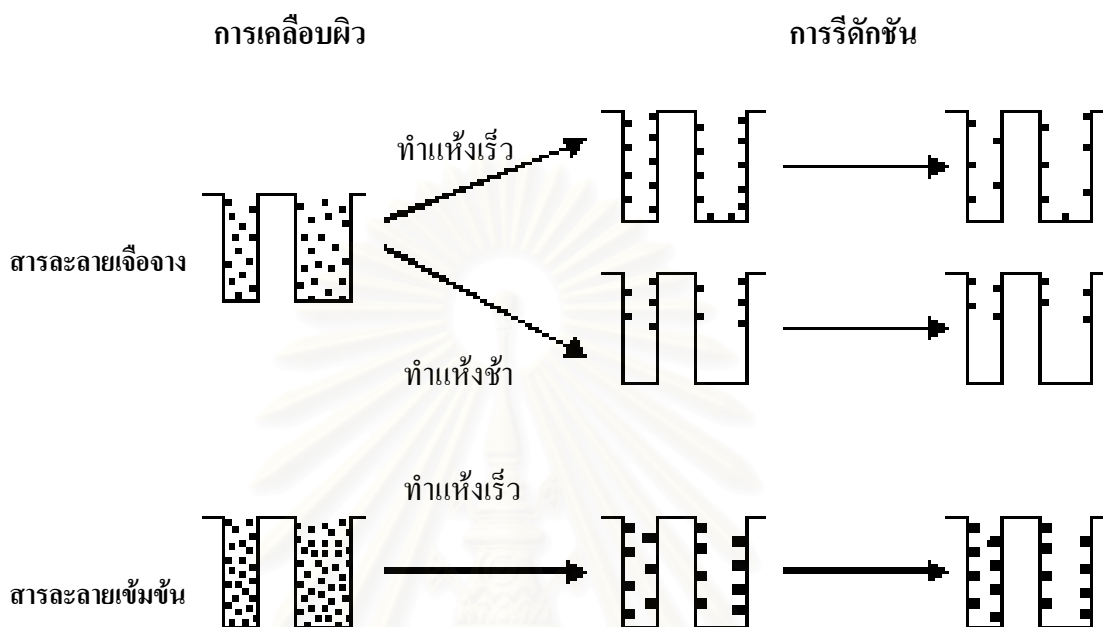




รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบผิว (Stiles, 1983)

ขั้นตอนการทำให้แห้งมีความสำคัญมากต่อการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวของตัวรองรับ หากการทำให้แห้งเป็นไปอย่างช้าๆ จะทำให้เกลือของโลหะถูกเคลื่อนย้ายมาอยู่บริเวณปากกรูพูน ทำให้การกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับไม่สม่ำเสมอ จึงต้องมีการระเหยตัวทำละลายอย่างรวดเร็วในขั้นตอนการทำให้แห้ง เพื่อให้การกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับสม่ำเสมอ การกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวตัวรองรับแสดงในรูปที่ 2.7 (Bond, 1987)

ขั้นตอนการรีดักชัน เป็นการเปลี่ยนสารประกอบโลหะให้เป็นโลหะ ในขณะที่การทำแคลซิเนชันเป็นการทำให้พื้นผิวดักรองรับ เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ เพื่อให้ง่ายต่อการทำรีดักชัน



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวดักรองรับที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผิว (Bond, 1987)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบผิวที่ดี รูปแบบการกระจายตัวของโลหะบนพื้นผิวดักรองรับจะเป็นแบบเปลือกไข่ มีการสร้างแบบจำลองในการประมาณการกระจายตัวของโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาโดยวิธีการเคลือบผิว โดยใช้นิกเกิลไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) ในสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น ( $\text{NH}_3$ ) พีเอช 11.6 และใช้แกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นตัวรองรับซึ่งมีพื้นที่ผิว 170 ตารางเมตร/กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีลักษณะการกระจายแบบเปลือกไข่ (Li และคณะ , 1994)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิชาญ ดันติชัยปกรณ์ (2541) ศึกษาการกำจัดสารประกอบของอาร์เซนิกและปรอทจากไฮโดรคาร์บอนเหลวบนตัวดูดซับอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) นิกเกิลออกไซด์บนอะลูมินา ( $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์บนอะลูมินา ( $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ นิกเกิลคอปเปอร์บนอะลูมินา ( $\text{Ni-Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยทดลองที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิก 10 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นเริ่มต้นของปรอท 1 ส่วนในล้านส่วน พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบอาร์เซนิกและปรอทเพิ่มขึ้นดังนี้ ตัวดูดซับคอปเปอร์ ตัวดูดซับนิกเกิล ตัวดูดซับอะลูมินา ตามลำดับ

อภิสิทธิ์ สายสาหร่าย (2542) ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนอะลูมินาโดยวิธีการเคลือบผิว (Impregnation) ตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายอิมเพรกแนนต์ (1.0 1.25 1.5 2.0 2.50 3.0 และ 5.0 ร้อยละนิกเกิล) ปริมาตรสารละลายอิมเพรกแนนต์ (50 100 150 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร) เวลาการเคลือบผิว (0.5 1.0 1.5 2.0 4.0 และ 8.0 ชั่วโมง) และอุณหภูมิการเคลือบผิว (30 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส) โดยใช้ อะลูมินาจำนวน 10 กรัม มีนิกเกิลในสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นเป็นสารละลายอิมเพรกแนนต์ที่พีเอช 11.6 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีลักษณะการกระจายแบบเปลือกไข่ มีร้อยละการกระจาย 80.05 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอิมเพรกแนนต์ร้อยละ 2.00 ของนิกเกิล ปริมาตรสารละลายอิมเพรกแนนต์ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เวลาการเคลือบผิว 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

อุดมชัย กฤษณีไพบุลย์ (2544) ศึกษาการกำจัดสารประกอบปรอทจากไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวดูดซับ คือ นิกเกิล (Ni) นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และนิกเกิลซัลไฟด์ (NiS) บนตัวรองรับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ปริมาณนิกเกิลบนตัวดูดซับ คือ ร้อยละ 2.0 และ ร้อยละ 4.0 ของน้ำหนักตัวรองรับ ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 1 ส่วนในล้านส่วน พบว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับ ประสิทธิภาพการกำจัดเมอร์คิวริกคลอไรด์ ( $\text{HgCl}_2$ ) ซึ่งเป็นตัวแทนของสารประกอบปรอทอินทรีย์ เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนี้ นิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิล นิกเกิลออกไซด์ พบสารประกอบนิกเกิลเมอร์คิวรี ( $\text{NiHg}$ ) บนตัวดูดซับนิกเกิล สารประกอบเมอร์คิวริกซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) บนตัวดูดซับนิกเกิลซัลไฟด์ ส่วนการดูดซับไดฟิซิลเมอร์คิวรี ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{Hg}$ ) ซึ่งเป็นตัวแทนของสารประกอบปรอทอินทรีย์ ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทของตัวดูดซับแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน

Baumgarten และ Dusing (1997) ศึกษาการตกตะกอนและการดูดซับของไอออนโลหะ (Co(II), Ni(II), Cu(II) and Cr(III)) บนแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) โดยใช้ น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก  $7.8 \times 10^{-5}$  โมล/ลิตร พบว่า แกมมาอะลูมินา มีค่าประจุที่พื้นผิวเป็นกลาง (PZC) ที่พีเอช 7.4 การดูดซับของทองแดงเข้าสู่สมดุลใน 25 ชั่วโมง มีการศึกษาผลการคายการดูดซับ (Desorption) ของทองแดงเมื่อมีการเติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) มีค่าสูงถึงร้อยละ 90 ในกรณีของ Co(II) กลไกส่วนใหญ่เป็นการตกตะกอน ส่วนไอออนโลหะอื่นๆ การดูดซับเป็นกลไกสำคัญ การตกตะกอนและการดูดซับของทองแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งหมดที่พีเอชมากกว่า 7 โครเมียมมีประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งหมดที่พีเอชมากกว่า 7 และนิกเกิลมีประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งหมดที่พีเอชมากกว่า 8

Csoban และ Joo (1998) ศึกษาการดูดซับโครเมียมประจุสามบวกบนซิลิกาและอะลูมินาแบบกรด (acidic aluminium oxide) พบว่า ซิลิกาไม่สามารถแสดงค่าประจุบวกได้ที่พีเอชต่ำกว่า 2 อะลูมินาแบบกรดมีค่าประจุที่พื้นผิวเป็นกลาง (PZC) ที่พีเอช 8.7 การดูดซับโครเมียมบนซิลิกาเริ่มเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 4.5-6 ส่วนอะลูมินาแบบกรดเริ่มเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 4-5.5 โดยเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมมากขึ้น มีผลทำให้พีเอชในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น และพบว่าการดูดซับโครเมียมบนอะลูมินามีสูงกว่าบนซิลิกา ในซิลิกาเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 90 แล้วนั้น การเพิ่มพีเอชไม่มีผลทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นกำลังไอออน (Ionic Strength) ของโพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) ที่ทดลองมีค่า  $10^{-4} - 10^{-2}$  โมล/ลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีผลให้การดูดซับบนซิลิกาต่ำลง

Chang, Huang และ Pan (1999) ศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนเหล็กไซยาไนด์บนแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) โดยมีความเข้มข้นอะลูมินา 1.5 กรัม/ลิตร เพื่อกำจัด  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ,  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  พบว่า การดูดซับ Ferrocyanide และ Ferricyanide เป็นปฏิกิริยาการดูดซับแบบภายนอก ค่า SCC (Significant Coagulation Concentration) ที่พีเอช 5 ไม่มีความสัมพันธ์ต่อความเข้มข้นของอะลูมินาในแบบสโตอิชิโอเมตริก (Stoichiometric) การทดลองแปรค่าพีเอช (2, 3, 4, 5 และ 6.6) มีผลทำให้ค่า SCC เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพีเอชมีค่าต่ำลง เนื่องจากพื้นผิวของอะลูมินาแสดงประจุบวกมากขึ้น ในแต่ละค่าพีเอช ค่า SCC ของ Ferrocyanide มีค่าต่ำกว่า Ferricyanide และความแตกต่างนี้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากประจุที่สูงกว่าของ Ferrocyanide สามารถที่จะเกิดคู่กรด-เบส (Conjugate)  $\text{HFe}(\text{CN})_6^{3-}$  และ  $\text{H}_2\text{Fe}(\text{CN})_6^{2-}$  ( $\text{pK}_{a1} = 2.1$  และ  $\text{pK}_{a2} = 4.3$ ) ในขณะที่ Ferricyanide ไม่สามารถเกิดคู่กรด-เบสได้ที่พีเอชต่ำกว่า 1 ดังนั้น ความแตกต่างของประจุระหว่าง Ferrocyanide และ Ferricyanide ที่พีเอชต่ำๆ จะไม่มีผลต่อค่า SCC

Trainor, Gordon และ Parks (2000) ศึกษาการตกตะกอนและการดูดซับของสังกะสี ประจุสองบวกบนอะลูมินา โดยใช้ตัวอย่างสังเคราะห์ซึ่งคี่ไนเตรต ( $Zn(NO_3)_2$ ) ในการทดลอง การตกตะกอนของสังกะสี ใช้ความเข้มข้นของซึ่งคี่ไนเตรต 10.5 มิลลิโมลต่อลิตร ที่พีเอช 7.2 โดยไม่มีอะลูมินา พบว่า การตกตะกอนของสังกะสีถูกควบคุมโดย Zincite ( $ZnO$ ) ในการทดลอง การดูดซับที่พีเอช 7.0-8.2 พบว่า สังกะสีสามารถดูดซับบนอะลูมินาได้ โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.2-3.3 ไมโครโมลต่อตารางเมตร โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ การละลายของสังกะสี

Adhoum และ Monser (2002) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์อิสระโดยการใช้อ่านกัมมันต์ที่มีการเคลือบผิวด้วยโลหะเงินและนิกเกิล พบว่า อ่านกัมมันต์ปกติสามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ 7.1 มิลลิกรัม/กรัม อ่านกัมมันต์ที่เคลือบผิวด้วยเงินสามารถกำจัดไซยาไนด์อิสระได้ 26.5 มิลลิกรัม/กรัม (4 เท่าของอ่านปกติ) และอ่านกัมมันต์ที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 15.4 มิลลิกรัม/กรัม (2 เท่าของอ่านปกติ) ในการเคลือบผิวอ่านกัมมันต์มีปริมาณเงินอยู่ร้อยละ 4 ของมวลอ่านกัมมันต์ปกติ และมีปริมาณนิกเกิลอยู่ร้อยละ 0.4 ของมวลอ่านกัมมันต์ปกติ กลไกในการกำจัดไซยาไนด์อิสระเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $Ag(CN)_2^-$  และ  $Ni(CN)_2^-$

### สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่รวบรวมมานั้น มีการศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมต่อการเตรียมตัวกลางในการดูดซับ โดยใช้ นิกเกิลออกไซด์เคลือบผิวบนตัวรองรับทั้งซิลิกาและอะลูมินา แทนการใช้อ่านกัมมันต์ เนื่องจากข้อจำกัดของอ่านกัมมันต์ในหลายๆ ด้าน เช่น รูพรุนของอ่านกัมมันต์มีขนาดไม่คงที่ (Nonuniform Pore Structure) รวมถึงเมื่อมีการเคลือบผิวโดยใช้ความร้อนนั้น อ่านกัมมันต์ ไม่เหมาะสมต่อสถานะดังกล่าว จึงมีการใช้ตัวรองรับที่เหมาะสม เช่น อะลูมินา หรือ ซิลิกา เพราะว่า มีขนาดรูพรุนคงที่

งานวิจัยที่ศึกษาถึงการใช้นิกเกิลในการกำจัดไซยาไนด์แสดงถึงกลไกการกำจัด โดยเกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลไซยาไนด์ ส่วนโลหะหนักนั้นก็มียางานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า สามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวอะลูมินาได้

ในงานวิจัยที่ศึกษานี้ จึงเลือกใช้อะลูมินาที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องมือการเคลือบผิวแบบแห้ง (Dry Impregnation)
2. ชุดเครื่องมือแคลซิเนชัน (Calcination)
3. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer)
4. เครื่อง XRD (X-Ray diffraction Spectrometer)
5. เครื่อง IC (Ion Chromatograph)
6. เครื่อง AAs (Atomic Adsorption Spectrophotometer)
7. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter)
8. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter)
9. เครื่องชั่งแบบละเอียด (Analytical Balance)
10. เครื่องเขย่า (Shaker)

##### 3.1.2 สารเคมี

1. แกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ )
2. โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN)
3. นิกเกิลไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
4. โครเมียมไนเตรต ( $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )
5. สังกะสีไนเตรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
6. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )
7. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
8. กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
9. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
10. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
12. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

## 3.2 ตัวยกกลางในการดูดซับ

### 3.2.1 การเตรียมตัวยกกลางการดูดซับนิกเกิลออกไซด์

ตัวยกกลางในการดูดซับสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้ตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ที่มีพื้นผิวเป็นกลาง (Neutral Gamma Alumina) และมีโลหะนิกเกิลออกไซด์เคลือบผิวบนตัวรองรับอะลูมินา ( $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มีร้อยละนิกเกิล 2.50 โดยน้ำหนัก ทำการเคลือบผิวแบบแห้ง ใช้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวยกกลางการดูดซับ จากงานวิจัยของนายพิชาน ตันติชัยปกรณ์ (2541) ซึ่งต่อไปจะเรียกตัวยกกลางการดูดซับนี้ว่า นิกเกิลออกไซด์

การเคลือบผิวอะลูมินาด้วยนิกเกิลออกไซด์แบบแห้ง มีวิธีการเตรียมดังรูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือการเคลือบผิวแบบแห้ง (Dry Impregnation) ดังรูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือแคลซิเนชัน (Calcination) ดังรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดการเตรียมตัวยกกลางดังนี้

1. นำแกมมาอะลูมินาประมาณ 20 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ก้นกลม (Round Bottom Flask) ที่ตั้งอยู่บนเครื่องให้ความร้อน (Heater) โดยให้อุณหภูมิคงที่ 120 องศาเซลเซียส ที่ปากขวดรูปชมพู่ก้นกลมต่ออยู่กับปิเปต (Pipette) และปั๊มดูดอากาศ (Vacuum Pump) เพื่อควบคุมความดันภายในขวดรูปชมพู่ก้นกลม ให้มีค่าประมาณ 10 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากอะลูมินาก่อนทำการเคลือบผิว จากนั้น ตั้งขวดชมพู่ก้นกลมทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2. นำอะลูมินามาเคลือบผิวภายใต้ความดัน โดยใช้สารละลายนิกเกิลในเตรด ปริมาตรของสารละลายที่ใช้เท่ากับปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) ของอะลูมินา 20 กรัม ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ขนาดรูพรุน โดยมีความเข้มข้นตามที่คำนวณได้จากปริมาณนิกเกิลร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก หลังจากการเคลือบผิวยังคงรักษาความดันให้คงที่ประมาณ 30 นาที จากนั้นจึงปรับความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. นำอะลูมินาที่เคลือบผิวแล้วมาทำแคลซิเนชัน (Calcination) ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้อากาศแห้งที่มีอัตราเร็ว 12 ลิตร/ชั่วโมง โดยเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 1 องศาเซลเซียส/นาที จนมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมินี้ ให้คงที่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นลงด้วยอากาศจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จะได้นิกเกิลออกไซด์เคลือบผิวบนอะลูมินา ซึ่งต่อไปจะเรียกตัวยกกลางการดูดซับนี้ว่า นิกเกิลออกไซด์

4. วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวยกกลางนิกเกิลออกไซด์ การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของนิกเกิลออกไซด์ และวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์ (Surface Charge Density)

### รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการเคลือบผิว निकิลออกไซด์

นำแกมมาอะลูมินา 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ก้นกลม ที่อุณหภูมิ 120 °ซ. ความดัน 10 มม.ปรอท มีการดูดอากาศ เป็นเวลา 3 ชม. จากนั้นทิ้งให้มีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิห้อง



เคลือบผิวด้วยสารละลาย निकิลในเตรต ภายใต้ ความดันคงที่ 30 นาที จากนั้นปรับความดัน ให้เท่ากับความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 24 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้แห้งที่ 110 °ซ. เป็นเวลา 12 ชม.



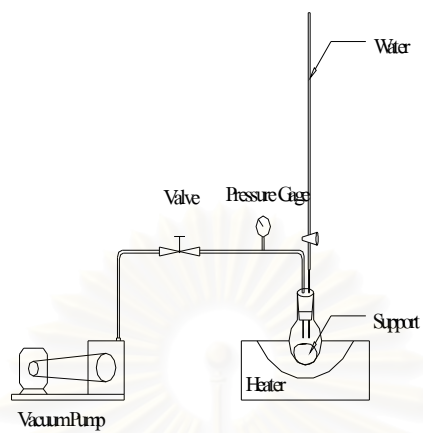
แคลซิเนชันภายใต้ความดันบรรยากาศโดยใช้อากาศแห้ง อัตราไหล 12 ล/ชม. เพิ่มอุณหภูมิ 1 °ซ./นาที จนมีอุณหภูมิ 400 °ซ. รักษาอุณหภูมิให้คงที่ 3 ชม. ทำให้เย็นลงด้วยอากาศแห้งจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง



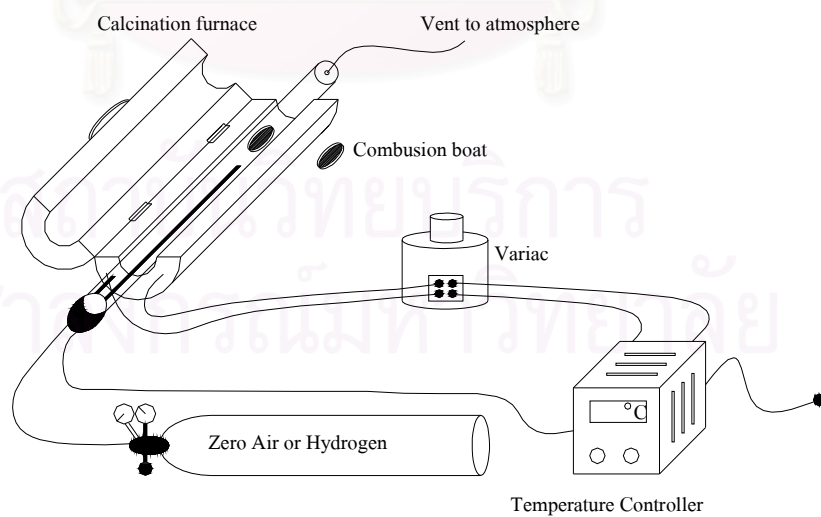
นิกิลออกไซด์



วิเคราะห์ปริมาณ निकิลบนตัวกลางนิกิลออกไซด์  
วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของนิกิลออกไซด์  
วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกิลออกไซด์



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือการเคลือบผิวแบบแห้ง (Dry Impregnation)



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือแคลซิเนชัน (Calcination)

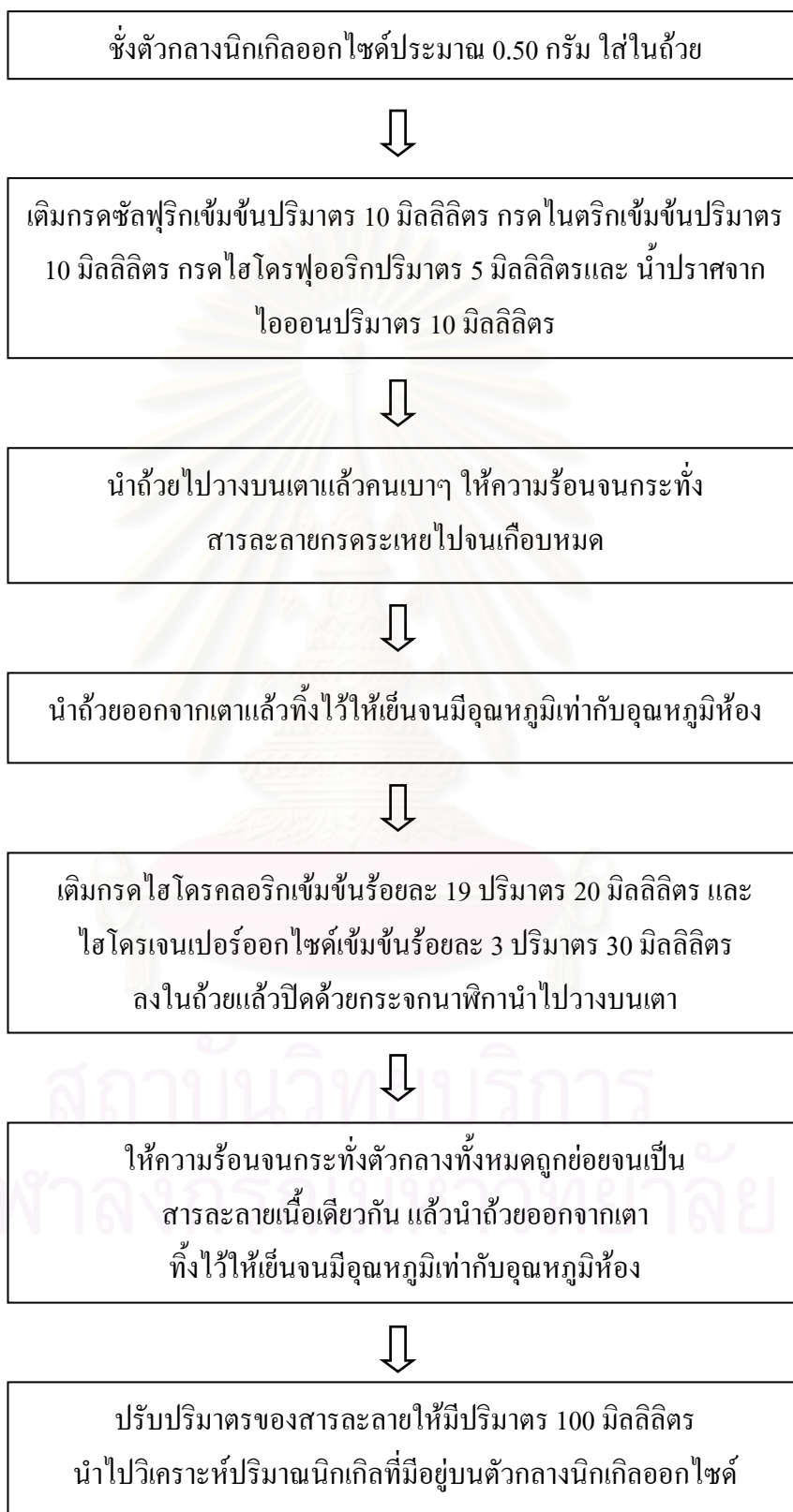
### 3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะบนตัวกลางโดยการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน ASTM D1977-91. มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 และรายละเอียดดังนี้

1. ชั่งตัวกลางนิกเกิลออกไซด์ประมาณ 0.50 กรัม ใส่ในถ้วย (Crucible)
2. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร กรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริกปริมาตร 5 มิลลิลิตรและน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตร
3. นำถ้วยไปวางบนเตา (Hot Plate) แล้วคนเบาๆ ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายกรดระเหยไปจนเกือบหมด
4. นำถ้วยออกจากเตาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
5. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 19 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงในถ้วยแล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา (Watch Glass) นำไปวางบนเตา
6. ให้ความร้อนจนกระทั่งตัวกลางทั้งหมดถูกย่อยจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วนำถ้วยออกจากเตา ทิ้งไว้ให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
7. ปรับปริมาตรของสารละลายให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลที่มีอยู่บนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์



### 3.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของนิกเกิลออกไซด์

เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลออกไซด์ โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.4 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์

การวิเคราะห์มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.5 และรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.0025 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร
2. ชั่งตัวกลางนิกเกิลออกไซด์ 0.10 กรัม ลงในขวดเขย่า
3. เติมน้ำกลั่น 0.50 มิลลิลิตร ลงในขวดเขย่า
4. เติมน้ำปราศจากไอออน โดยคำนวณให้สารละลายทั้งหมดในขวดเขย่ามีปริมาตร 20 มิลลิลิตร และค่ากำลังไอออนเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร
5. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 2-4 โดยเพิ่มปริมาตรสารละลายไฮโดรคลอริก จนกระทั่งแน่ใจว่าพีเอชของสารละลายทั้งหมดในขวดเขย่ามีค่าน้อยกว่า 4
6. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 โดยเปลี่ยนจากสารละลายไฮโดรคลอริก เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเพิ่มปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งแน่ใจว่าพีเอชของสารละลายทั้งหมดในขวดเขย่ามีค่ามากกว่า 12
7. นำขวดเขย่าทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8. วัดพีเอชของสารละลายในแต่ละขวด
9. คำนวณค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นประจุที่พื้นผิว} = \{ [\text{HCl}] - [\text{NaOH}] - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-] \} \times 96500 / (w \times A) \}$$

เมื่อ	[HCl]	ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)
	[NaOH]	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)
	[H <sup>+</sup> ]	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (โมลต่อลิตร)
	[OH <sup>-</sup> ]	ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (โมลต่อลิตร)
	w	น้ำหนักของตัวกลาง (กรัม)
	A	พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวกลาง (ตารางเมตรต่อกรัม)

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการวิเคราะห์ค่าประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์



### 3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนั้น จำลองมาจากข้อมูลน้ำเสียจริง จากงานวิจัยของ ธนพร เหล่าไพโรจน์ (2548) ที่ทำการเก็บตัวอย่างจากโรงงานชุบโลหะ บริเวณวงแหวนแสงประทีป (รัชกาล) เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียรวมทั้งสิ้น 9 โรงงาน แบ่งเป็น โรงงานชุบโครเมียม 2 โรงงาน โรงงานชุบสังกะสี 3 โรงงาน โรงงานชุบนิกเกิล 1 โรงงาน โรงงานชุบนิกเกิล-โครเมียม 2 โรงงาน และ โรงงานชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม 1 โรงงาน ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 1 เดือนต่อครั้ง เป็นจำนวน 2 ครั้ง ผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1

ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนำมากำหนดค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเข้มข้นไซยาไนด์รวม เท่ากับ 50,100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ค่าความเข้มข้นสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ค่าความเข้มข้นโครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.4 ตัวแปรประเภทต่างๆ ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินา เปรียบเทียบกับนิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch)
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินา เปรียบเทียบกับนิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column)

สำหรับตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables) ในการทดลองแต่ละขั้นตอนแสดงในตารางที่ 3.1–3.9 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.1 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ ที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	50,100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
2. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
3. พีเอช	12
4. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
5. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลือ

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.2 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นสังกะสี	10, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
2. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
3. พีเอช	7
4. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
5. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นสังกะสีที่เหลือ



ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.3 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นสังกะสี	10, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3.ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
2. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
3. พีเอช	12
4. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
5. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นสังกะสีที่เหลือ

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.4 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นโครเมียม	10, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3.ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
2. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
3. พีเอช	12
4. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
5. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.5 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนต์	50, 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นสังกะสี	100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
3. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
4. พีเอช	12
5. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
6. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนต์และสังกะสีที่เหลือ

ตารางที่ 3.6 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.6 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนต์	50, 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นโครเมียม	20 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
3. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
4. พีเอช	12
5. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
6. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนต์และโครเมียมที่เหลือ

ตารางที่ 3.7 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.7 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีที่พีเอช 12

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์	50, 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นสังกะสี	100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นโครเมียม	20 มิลลิกรัม/ลิตร
3. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	0.1 กรัม
4. ปริมาตรน้ำเสีย	30 มิลลิลิตร
5. พีเอช	12
6. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
7. ความเร็วในการเขย่า	200 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่เหลือ

ตารางที่ 3.8 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.8 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. อัตราการไหล	4 และ 8 มิลลิลิตรต่อนาที
2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ	อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์
3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	เก็บตัวอย่างทุก 15 นาที จนครบ 12 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์	100 มิลลิกรัม/ลิตร
2. ความเข้มข้นโครเมียม	20 มิลลิกรัม/ลิตร
3. ความเข้มข้นสังกะสี	100 มิลลิกรัม/ลิตร
4. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ	6 กรัม
5. พีเอช	12
6. อุณหภูมิการทดลอง	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่เหลือ

ตารางที่ 3.9 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ 3.5.9 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนด์ : โครเมียม :สังกะสีเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. อัตราการไหล 2. ชนิดตัวกลางในการดูดซับ 3. ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง	4 และ 8 มิลลิตรต่อนาที อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ เก็บตัวอย่างทุก 15 นาที จนครบ 12 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเข้มข้นไซยาไนด์ 2. ความเข้มข้นโครเมียม 3. ความเข้มข้นสังกะสี 4. ปริมาณตัวกลางในการดูดซับ 5. พีเอช 6. อุณหภูมิการทดลอง	200 มิลลิกรัม/ลิตร 20 มิลลิกรัม/ลิตร 100 มิลลิกรัม/ลิตร 6 กรัม 12 อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. ลักษณะน้ำเสียหลังการทดลอง	ความเข้มข้นไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่เหลือ

### 3.5 การดำเนินการทดลอง

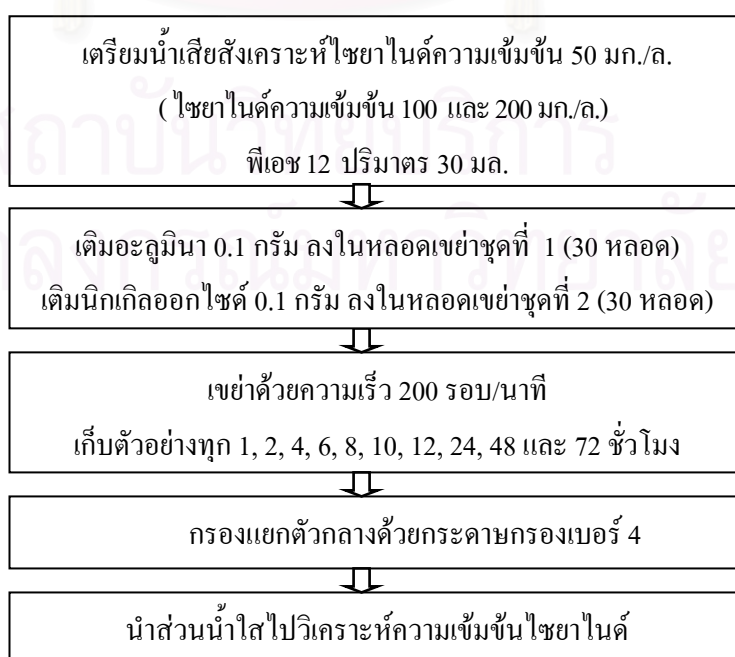
- ก. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินา เปรียบเทียบกับนิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch)

#### 3.5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.6 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลางนิกเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัม ลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นไซยาไนต์
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไซยาไนต์เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### รูปที่ 3.6 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12



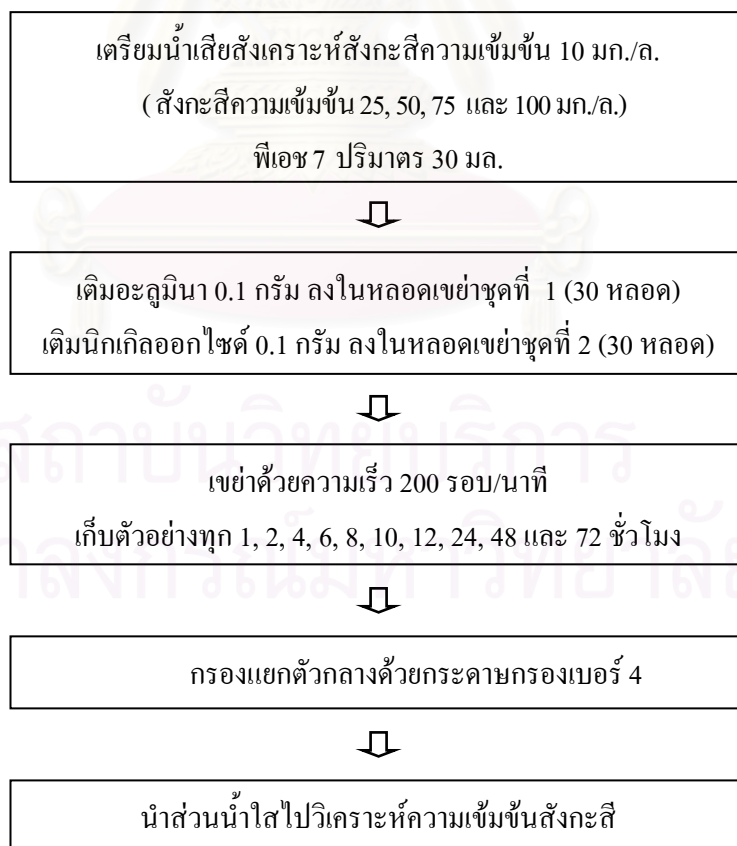


### 3.5.2 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.7 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัม ลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสังกะสีเป็น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### รูปที่ 3.7 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

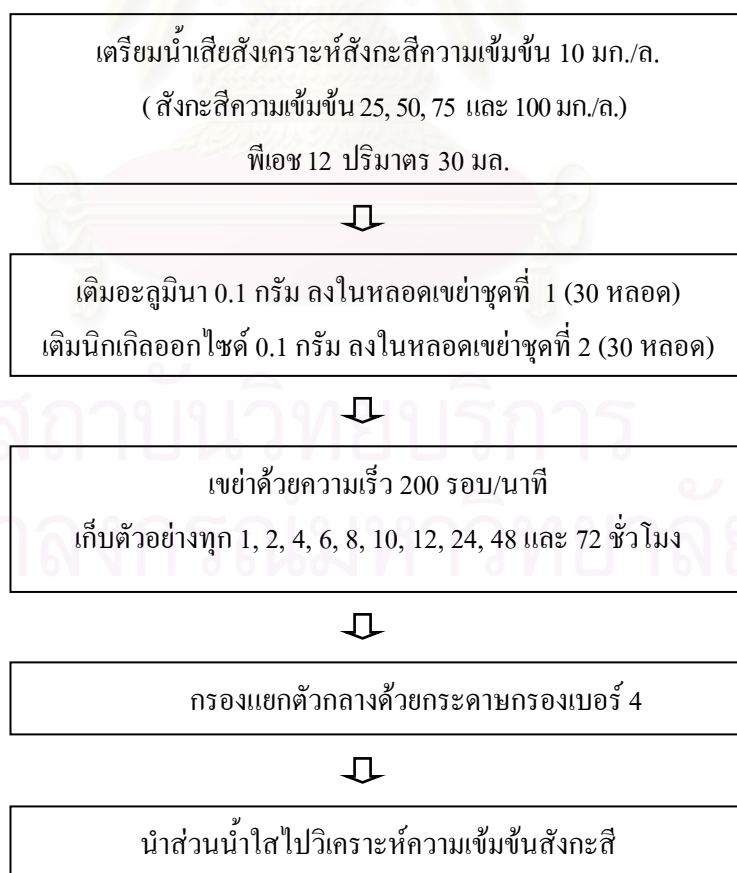


### 3.5.3 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.8 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัม ลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสังกะสีเป็น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### รูปที่ 3.8 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

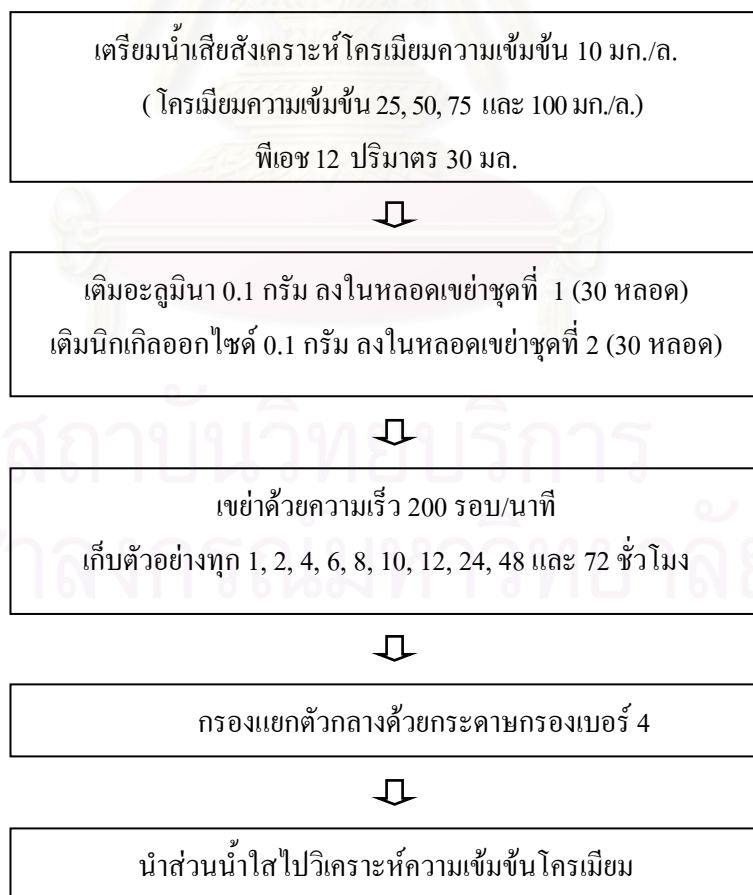


### 3.5.4 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.9 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัม ลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นโครเมียม
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นโครเมียมเป็น 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

#### รูปที่ 3.9 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12

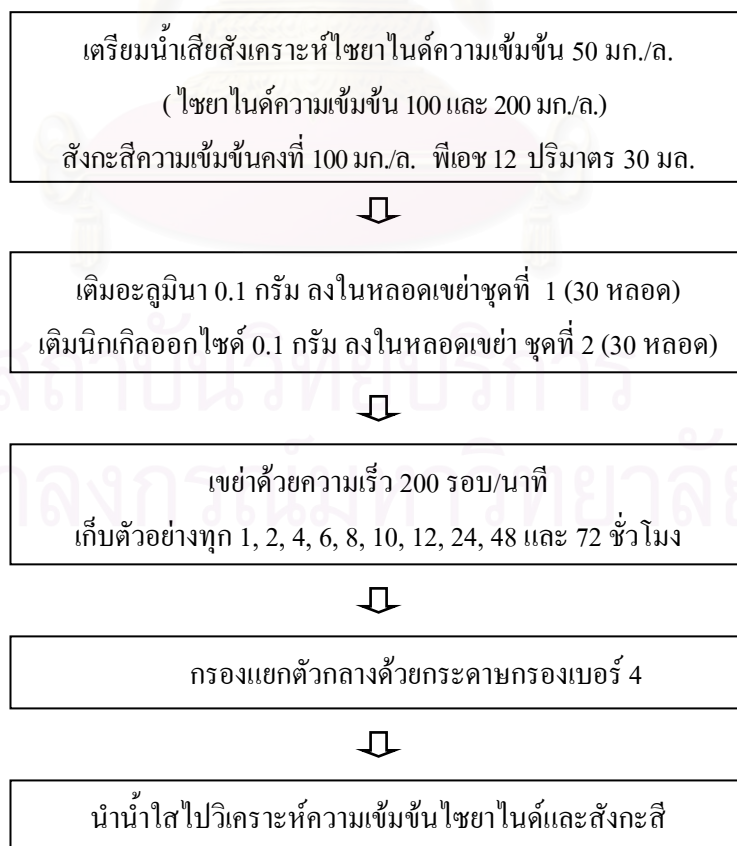


### 3.5.5 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12

วิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.10 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีความเข้มข้นคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นไซยาไนต์และสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไซยาไนต์เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นสังกะสีคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 3.10 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12

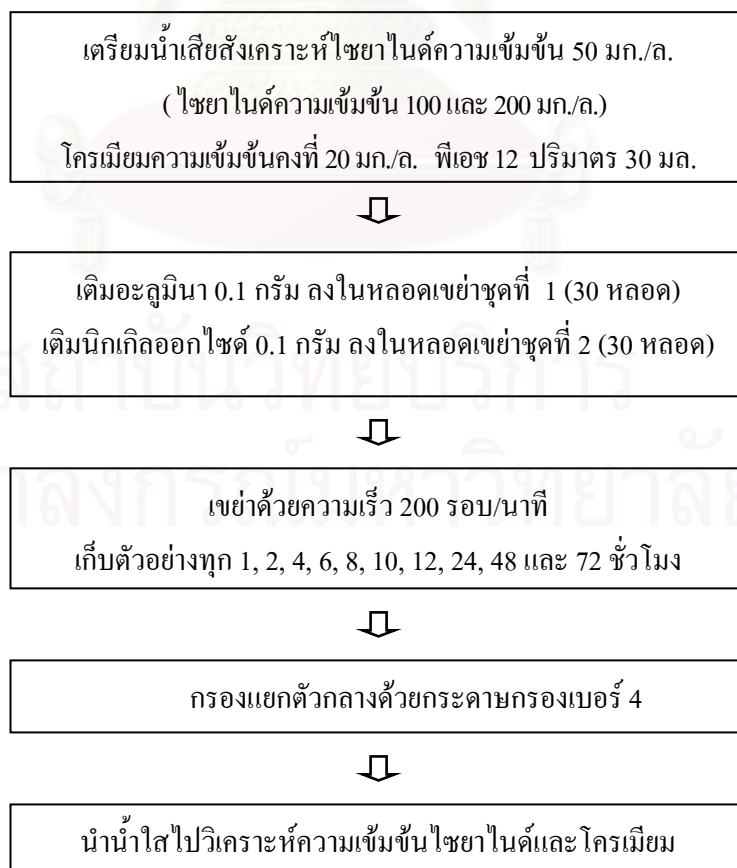


### 3.5.6 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.11 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมความเข้มข้นคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นไซยาไนต์และโครเมียม
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไซยาไนต์เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นโครเมียมคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

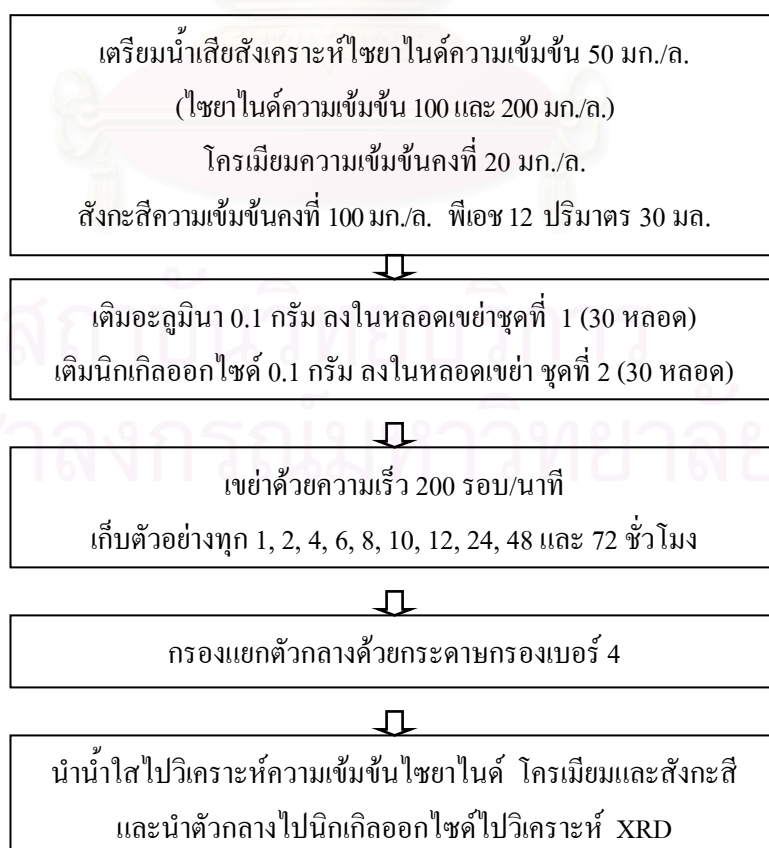
#### รูปที่ 3.11 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12



### 3.5.7 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12 มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.12 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมความเข้มข้นคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและสังกะสีความเข้มข้นคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12 ลงในหลอดเขย่า โดยแต่ละหลอดมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด ชุดละ 30 หลอด
2. เติมตัวกลางอะลูมินาจำนวน 0.10 กรัมลงในหลอดเขย่าชุดที่ 1 และเติมตัวกลาง निकเกิลออกไซด์จำนวน 0.10 กรัม ลงในหลอดเขย่าชุดที่ 2
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. กรองแยกตัวกลางด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4
5. นำส่วนน้ำใสไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี และนำตัวกลาง निकเกิลออกไซด์ไปวิเคราะห์ XRD
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไซยาไนต์เป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นโครเมียมคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเข้มข้นสังกะสีคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

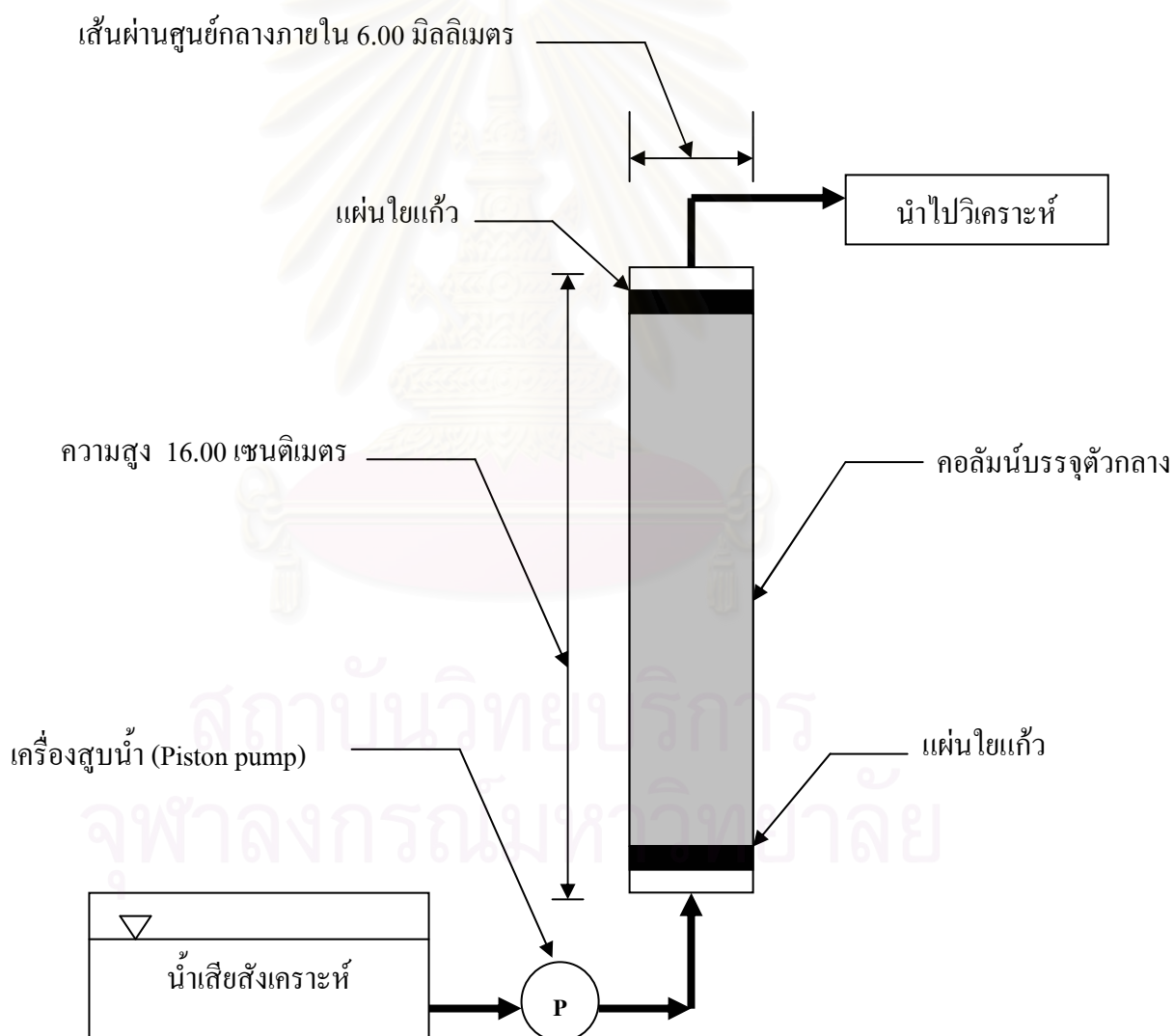
รูปที่ 3.12 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12





ข. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีด้วยอะลูมินาเปรียบเทียบกับ นิกเกิลออกไซด์ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column)

ทดลองโดยให้น้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลาง โดยใช้ปิเปตพลาสติก (Transfer pipette) ขนาด 5.00 มิลลิลิตร ตัดปลายทั้งสองด้านให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.00 มิลลิเมตร สูง 16.00 เซนติเมตร บรรจุตัวกลางน้ำหนัก 6.00 กรัม ปริมาตร 5.50 มิลลิลิตร เป็นคอลัมน์สำหรับการทดลอง โดยให้น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน มีเครื่องสูบน้ำ (Piston pump) สำหรับเพิ่มความดัน ปลายคอลัมน์มีแผ่นใยแก้วทำหน้าที่กระจายน้ำและกั้นตัวกลางไม่ให้หลุดออกมากับกระแสน้ำ ดังรูปที่ 3.13



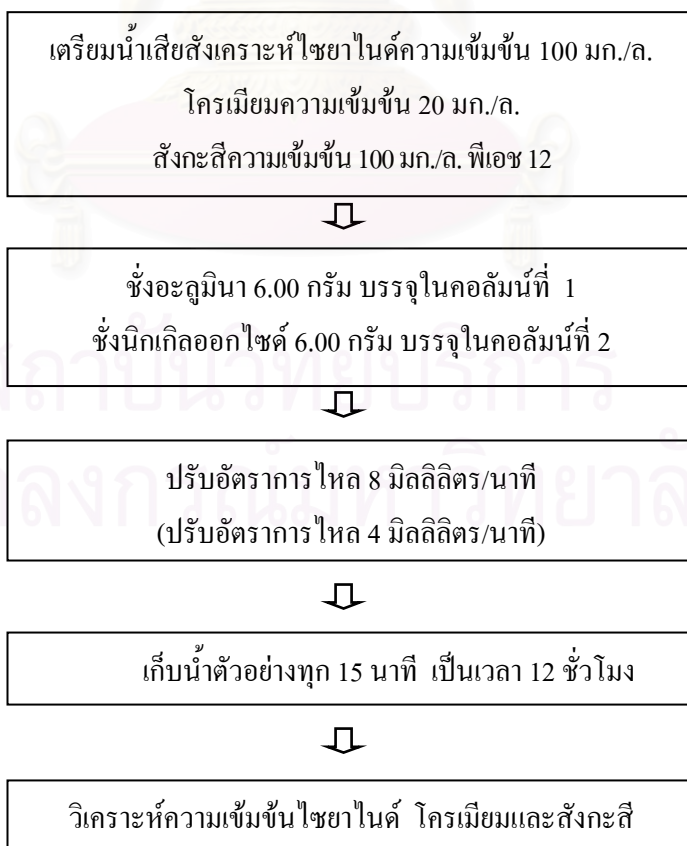
รูปที่ 3.13 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง

**3.5.8 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนต์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร**

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.14 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและสังกะสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12
2. ชั่งตัวกลาง 6.00 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ โดยตัวกลางที่ใช้คือ อะลูมินาบรรจุในคอลัมน์ที่ 1 และ निकเกิดออกไซด์บรรจุในคอลัมน์ที่ 2
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์เท่ากับ 8 มิลลิลิตรต่อนาที
4. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์แล้วทุก 15 นาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที

**รูปที่ 3.14 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนต์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร**

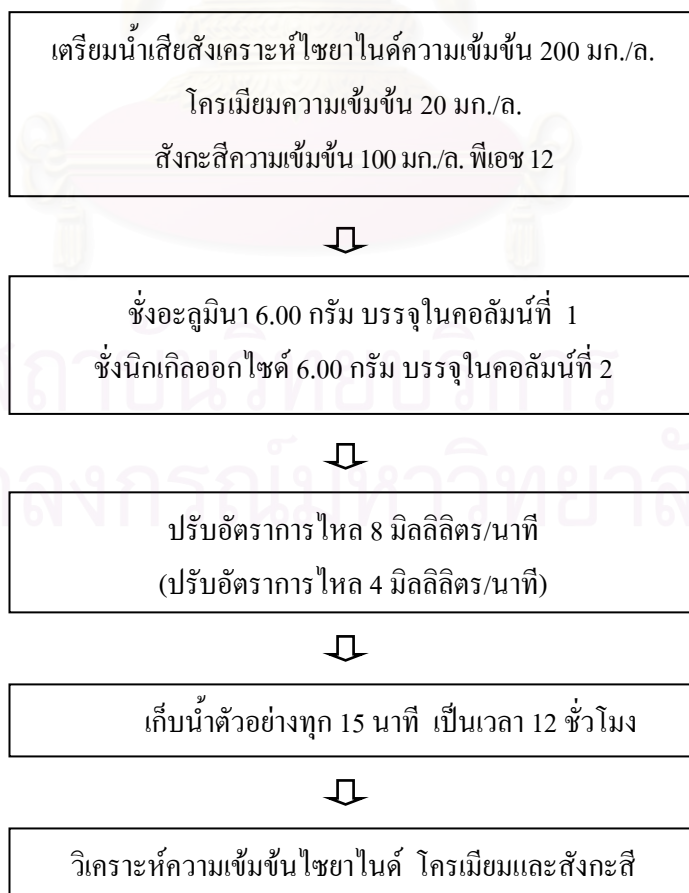


**3.5.9 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนต์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร**

มีวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.15 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนต์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและสังกะสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 12
2. ชั่งตัวกลาง 6.00 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ โดยตัวกลางที่ใช้คือ อะลูมินาบรรจุในคอลัมน์ที่ 1 และ निकเกิดออกไซด์บรรจุในคอลัมน์ที่ 2
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์เท่ากับ 8 มิลลิลิตรต่อนาที
4. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์แล้วทุก 15 นาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที

**รูปที่ 3.15 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียม และสังกะสีแบบต่อเนื่อง โดยมีอัตราส่วนไซยาไนต์ : โครเมียม :สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร**



### 3.6 วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ทางด้านคุณภาพและปริมาณของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 แสดงรายการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

รายการ	เครื่องมือวิเคราะห์	รุ่น/ยี่ห้อ
พื้นที่ผิว, ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์	Surface Area Analyzer	Quantachrome, Autosorb-1
สารประกอบนิกเกิลออกไซด์บนอะลูมินา สารประกอบสังกะสีไฮดรอกไซด์บนอะลูมินา	X-Ray diffraction Spectrometer	XRD D8 Advance, BRUKER AXS
ปริมาณไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์	Ion Chromatograph	ICS-2500, Dionex
ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	Atomic Adsorption Spectrophotometer	Avanta Ultra Z, GBC

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติ निकเกิดออกไซด์

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณ निकเกิดบนตัวกลาง निकเกิดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ निकเกิดบนตัวกลาง निकเกิดออกไซด์แสดงในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข-2 จากผลการทดลองพบว่า มี निकเกิดอยู่บนตัวกลางร้อยละ 2.22 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้อยกว่าแผนการทดลองที่คาดว่าจะมีปริมาณ निकเกิดอยู่บนตัวกลางร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนัก ผลการเตรียมตัวกลางมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 11.20 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ อุดมชัย กฤษณีไพบุลย์ (2544) ซึ่งทำการเตรียม निकเกิดออกไซด์ร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนัก โดยมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 19.60

##### 4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ निकเกิดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของอะลูมินาและ निकเกิดออกไซด์ จากวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงในตารางที่ 4.1

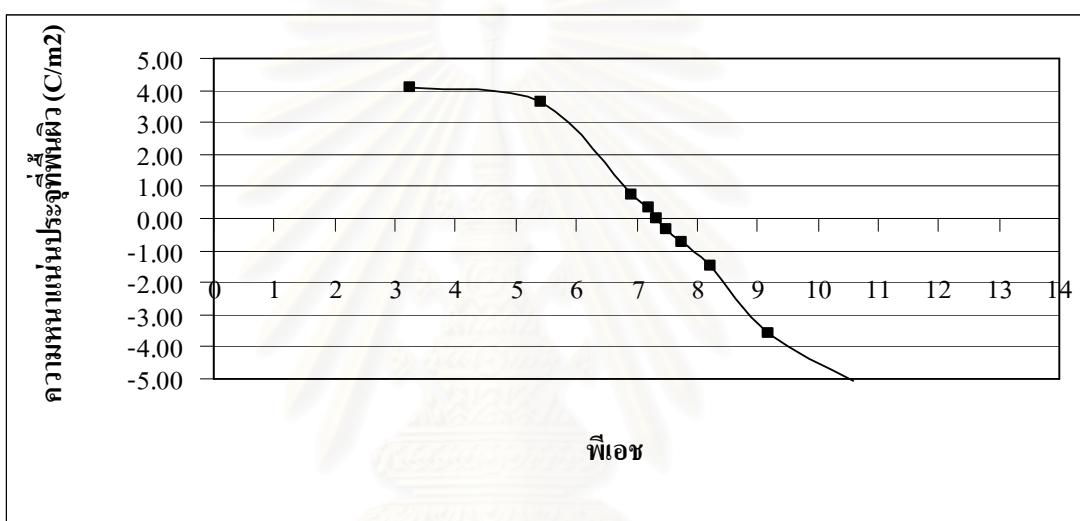
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของ निकเกิดออกไซด์

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ม. <sup>2</sup> /ก.)	ปริมาตรรูพรุน (ซม. <sup>3</sup> /ก.)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
อะลูมินา	164.22	0.2748	66.94
นิกเกิดออกไซด์	155.89	0.2561	65.71

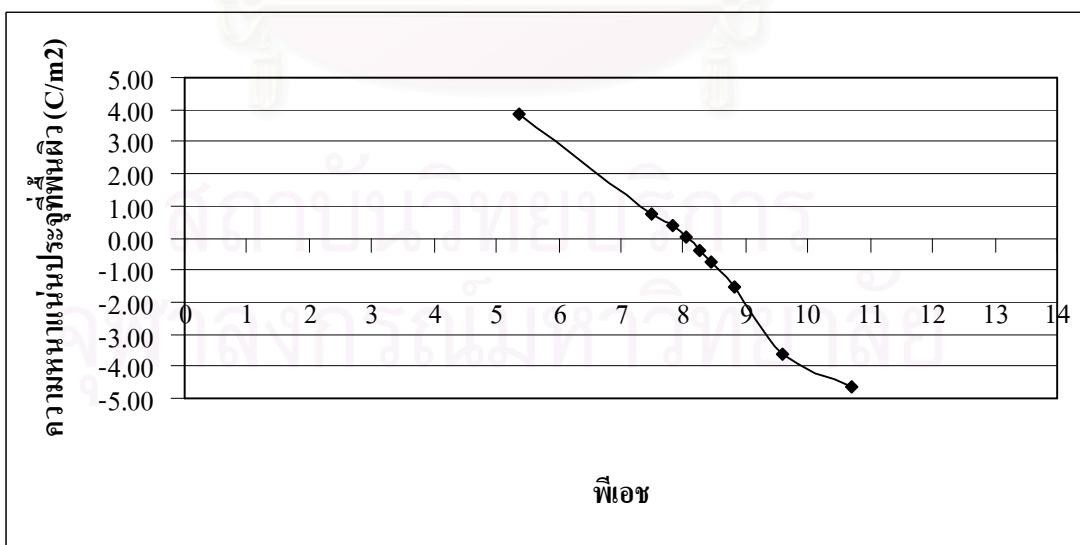
ผลการวิเคราะห์พบว่า ภายหลังจากทำการเคลือบผิวอะลูมินาด้วย निकเกิดออกไซด์ ตัวกลางมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนลดลง โดยมีพื้นที่ผิวลดลงร้อยละ 5.07 ปริมาตรรูพรุนลดลงร้อยละ 6.80 และขนาดรูพรุนลดลงร้อยละ 1.84 การเคลือบผิวอะลูมินาด้วย निकเกิดออกไซด์ทำให้คุณสมบัติทางเคมีของตัวกลางเปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่ทำให้ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า ตัวกลางอะลูมินาและ निकเกิดออกไซด์มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกันแต่มีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ แสดงในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข-3 จากผลการทดลองพบว่า อะลูมินามีประจุที่พื้นผิวเป็นกลางที่พีเอชประมาณ 7.20 และนิกเกิลออกไซด์มีประจุที่พื้นผิวเป็นกลางที่พีเอชประมาณ 8.00 แสดงในรูปที่ 4.1 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kasprzyk และ Hordern (2004) ซึ่งรวบรวมงานวิจัยต่างๆ พบว่า อะลูมินามีประจุที่พื้นผิวเป็นกลางในช่วงพีเอช 6.90-9.70 ส่วนนิกเกิลออกไซด์พีเอชที่ทำให้ประจุที่พื้นผิวเป็นกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่าประจุที่พื้นผิวเป็นกลางของอะลูมินา



ก. อะลูมินา



ข. นิกเกิลออกไซด์

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวและค่าพีเอชของ ก. อะลูมินา และ ข. นิกเกิลออกไซด์



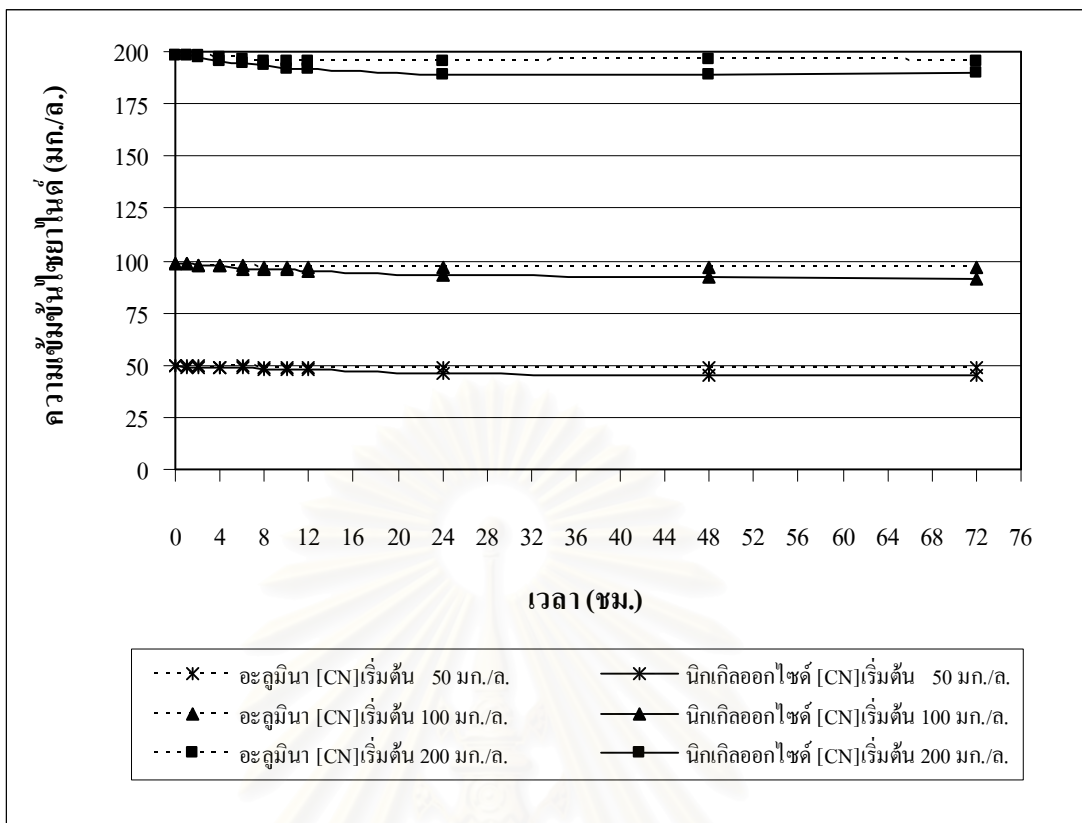
## 4.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี

### 4.2.1 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12

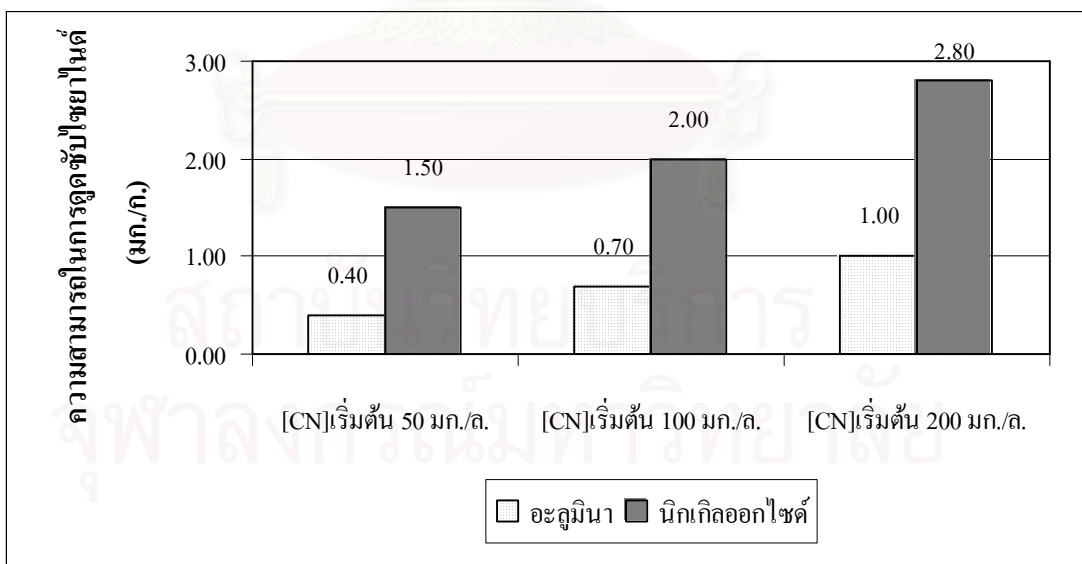
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ ทำการทดลองที่พีเอช 12 เพื่อความปลอดภัยในการทดลองเนื่องจากไซยาไนด์จะอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออน (CN<sup>-</sup>) ดังรูปที่ 2.2 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-1 จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ในเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.2 ที่สภาวะสมดุลอะลูมินามีร้อยละในการดูดซับไซยาไนด์ (% Adsorption) 2.70, 2.30 และ 1.60 ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีร้อยละในการดูดซับไซยาไนด์ 9.50, 7.20 และ 4.60 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ (Adsorption Capacity) อะลูมินามีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ 0.40, 0.70 และ 1.00 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัมอะลูมินา ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ 1.50, 2.00 และ 2.80 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัม นิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 ระยะเวลาการดูดซับไซยาไนด์จนถึงสภาวะสมดุลของอะลูมินาใช้เวลา 12-24 ชั่วโมง นิกเกิลออกไซด์ใช้เวลา 24-48 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ คือ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นมากขึ้น ระยะเวลาการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุลจะลดลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $12.00 \pm 0.50$

จากผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น พบว่า ร้อยละการดูดซับมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ของอะลูมินาพบว่า มีค่าต่ำกว่านิกเกิลออกไซด์ประมาณ 3 เท่าในทุกค่าความเข้มข้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์จากการทดลองนี้มีค่าต่ำมาก สามารถสรุปได้ว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับดูดซับไซยาไนด์

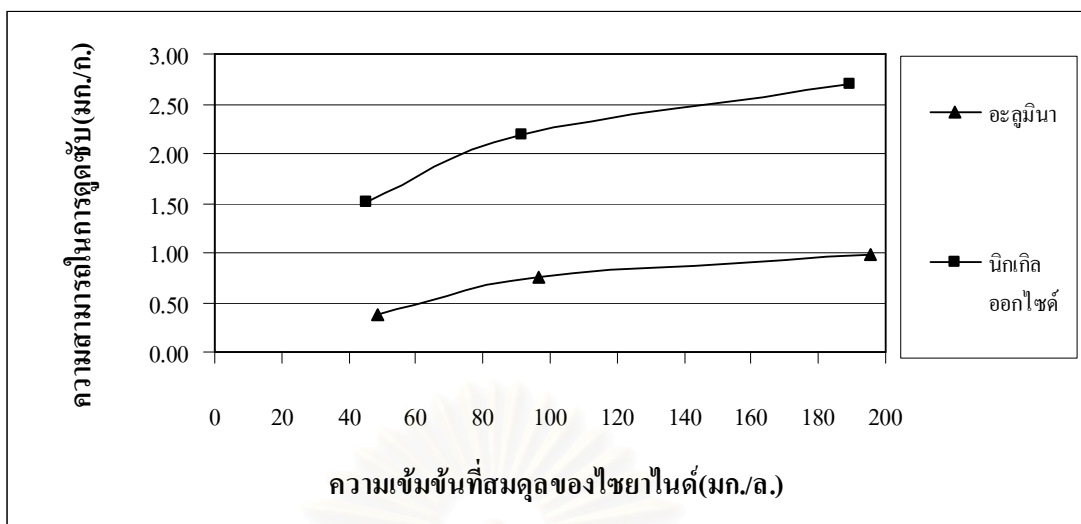
ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่จุดสมดุล ดังรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาสร้างกราฟฟรอนดลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม พบว่า เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$ (Regression) ฟรอนดลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม มีค่าใกล้เคียงกัน โดยฟรอนดลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอมของอะลูมินา มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9383 และ 0.9756 ตามลำดับ ของนิกเกิลออกไซด์ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9704 และ 0.9978 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 จากผลการทดลอง สามารถนำสมมติฐานของแลงมัวร์ไอโซเทอมมาอธิบายได้ว่า นิกเกิลออกไซด์ดูดซับไซยาไนด์แบบโมโนเลเยอร์ (Monolayer) ซึ่งอาจเกิดการดูดซับกับนิกเกิลออกไซด์กลายเป็น  $Ni(CN)_2$  ดังงานวิจัยของ Adhoum และ Monser (2002)



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นไนโตรเจนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนที่พีเอช 12



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนที่พีเอช 12



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของไซยาไนต์ที่จุดสมดุลในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า  $R^2$  ฟรอนคลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอมของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12

ฟรอนคลิชไอโซเทอม				
ตัวกลาง	สมการ	n	$K_f$	$R^2$
อะลูมินา	$\log(X/M)=0.70 \log C-1.58$	1.43	0.0263	0.9383
นิกเกิลออกไซด์	$\log(X/M)=0.40 \log C-0.48$	2.50	0.3311	0.9704
แลงมัวร์ไอโซเทอม				
ตัวกลาง	สมการ	a	b	$R^2$
อะลูมินา	$1/(X/M)=111.73(1/C)+0.34$	2.94	0.0030	0.9756
นิกเกิลออกไซด์	$1/(X/M)= 17.42(1/C)+0.27$	3.70	0.0155	0.9978

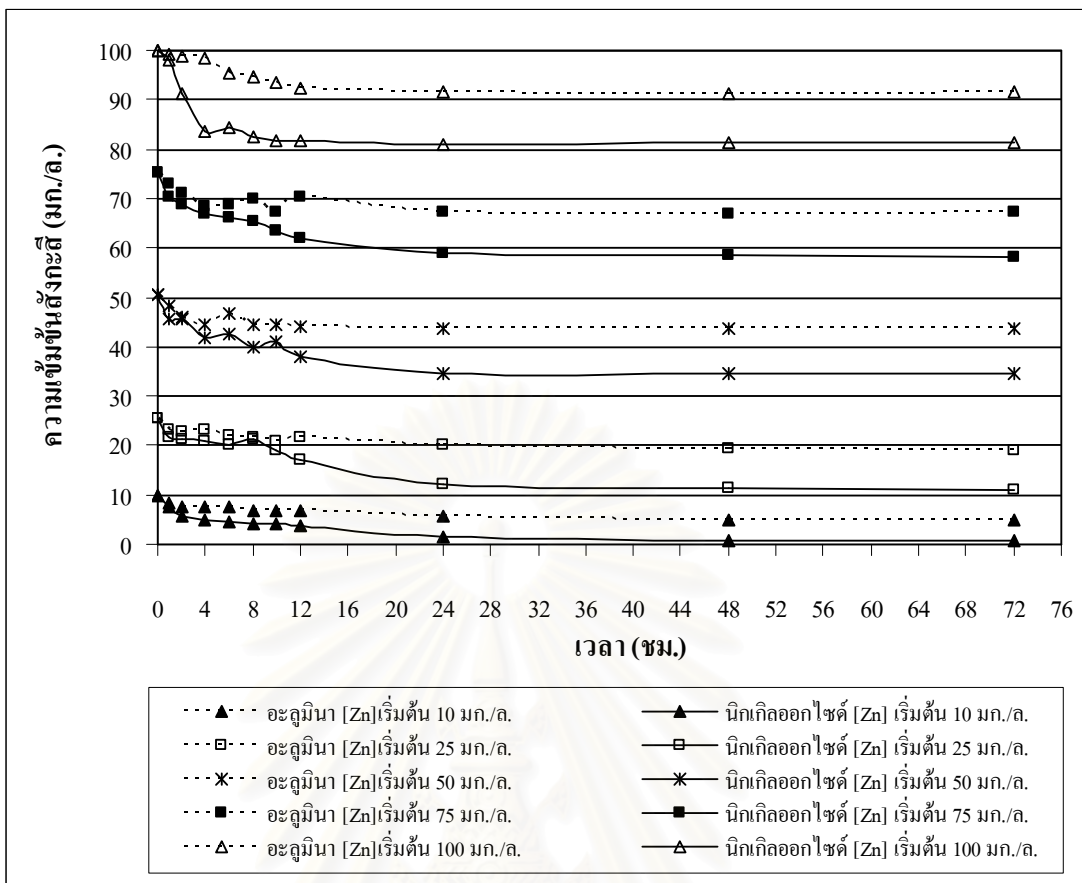
จากแลงมัวร์ไอโซเทอม นิกเกิลออกไซด์มีค่าความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์สูงสุด 3.70 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์จากการทดลองที่ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุลมีค่า 2.80 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแลงมัวร์ไอโซเทอมร้อยละ 24.32

#### 4.2.2 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

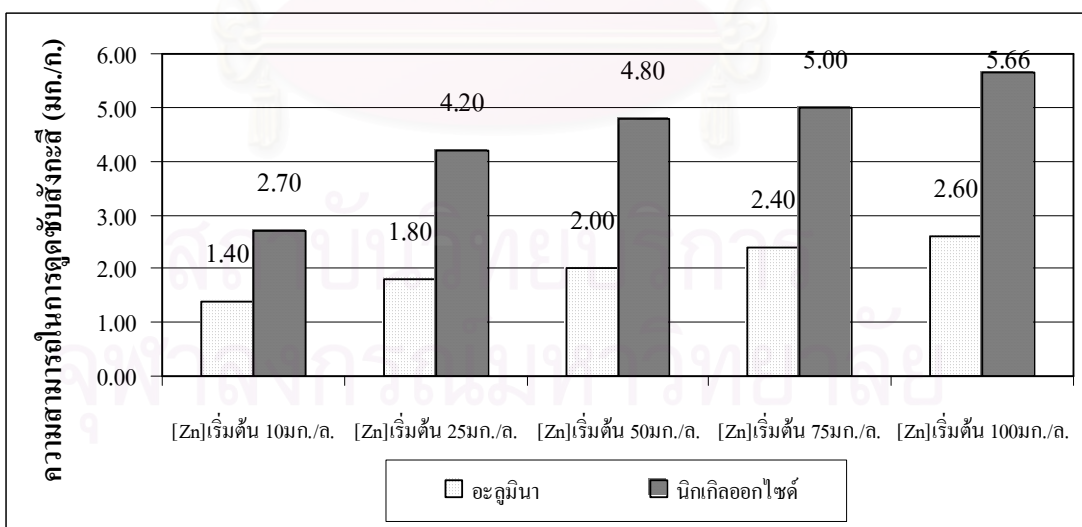
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี ทำการทดลองที่พีเอช 7 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก-2 จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10, 25, 50, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีที่เหลืออยู่ในเวลาต่างๆ ดังรูป 4.5 ที่สถานะสมดุล อะลูมินามีร้อยละในการดูดซับสังกะสี 50, 25, 13, 10, และ 8.6 ตามลำดับ ในขณะที่ निकเกิลออกไซด์มีร้อยละในการดูดซับสังกะสี 90, 55, 31, 22.5, และ 18.8 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของอะลูมินามีค่า 1.40, 1.80, 2.00, 2.40 และ 2.60 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินา ตามลำดับ ในขณะที่ निकเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสี 2.70, 4.20, 4.80, 5.00 และ 5.66 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัม निकเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 ระยะเวลาการดูดซับจนถึงสถานะสมดุลของอะลูมินาและ निकเกิลออกไซด์อยู่ในช่วงเวลาภายใน 24 ชั่วโมง ทุกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและ निकเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $7 \pm 0.50$

จากผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น พบว่า ร้อยละในการดูดซับมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นไปทั้งอะลูมินาและ निकเกิลออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีของอะลูมินาพบว่า มีค่าต่ำกว่า निकเกิลออกไซด์ประมาณ 2 เท่าในทุกค่าความเข้มข้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีของอะลูมินาและ निकเกิลออกไซด์จากการทดลองนี้มีค่าต่ำมาก สามารถสรุปได้ว่า อะลูมินาและ निकเกิลออกไซด์ไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวกลางสำหรับดูดซับสังกะสี

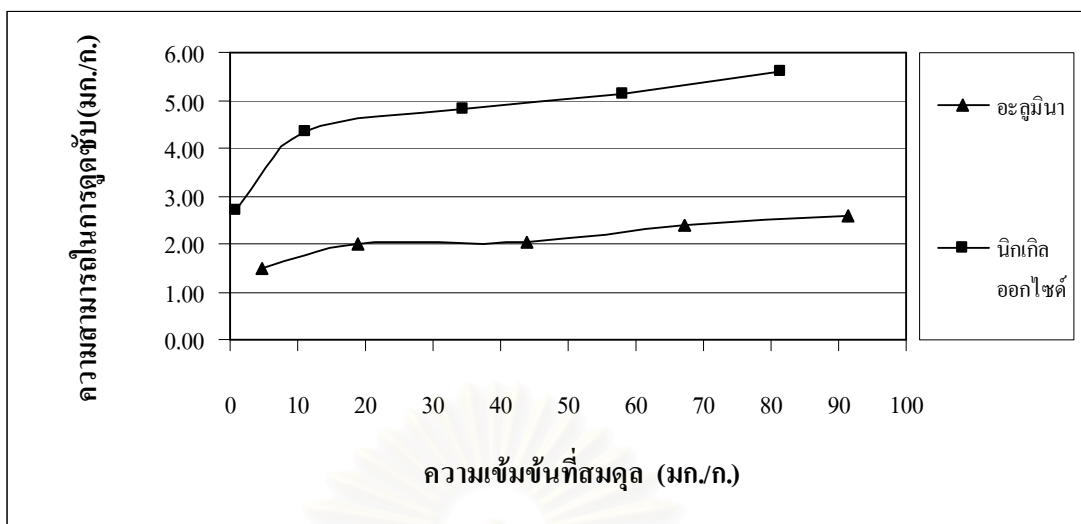
ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของสังกะสีที่จุดสมดุล ดังรูปที่ 4.7 เมื่อนำมาสร้างกราฟพหุนดลิกซ์ไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม พบว่า เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พหุนดลิกซ์ไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอม มีค่าใกล้เคียงกันโดยพหุนดลิกซ์ไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอมของอะลูมินา มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9455 และ 0.9019 ตามลำดับ ของ निकเกิลออกไซด์ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9891 และ 0.9601 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 จากสมมติฐานของแลงมัวร์ไอโซเทอม อาจสรุปได้ว่า การดูดซับสังกะสีเป็นการดูดซับแบบโมนอเลเยอร์ โดยสังกะสีสามารถถูกดูดซับบนตัวกลางทั้งสองได้ แต่ निकเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าอะลูมินา



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่พีเอช 7



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่พีเอช 7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นของสังกะสีที่จุดสมดุลในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า  $R^2$  ฟรอนคลิชไอโซเทอมและแลงมัวร์ไอโซเทอมของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

ฟรอนคลิชไอโซเทอม				
ตัวกลาง	สมการ	n	$K_f$	$R^2$
อะลูมินา	$\log(X/M)=0.17 \log C+0.06$	5.88	1.15	0.9455
นิกเกิลออกไซด์	$\log(X/M)=0.15 \log C+0.46$	6.67	2.88	0.9891
แลงมัวร์ไอโซเทอม				
ตัวกลาง	สมการ	a	b	$R^2$
อะลูมินา	$1/(X/M)=1.24 (1/C) + 0.42$	2.38	0.33	0.9019
นิกเกิลออกไซด์	$1/(X/M)=0.13 (1/C) + 0.20$	5.00	1.53	0.9601

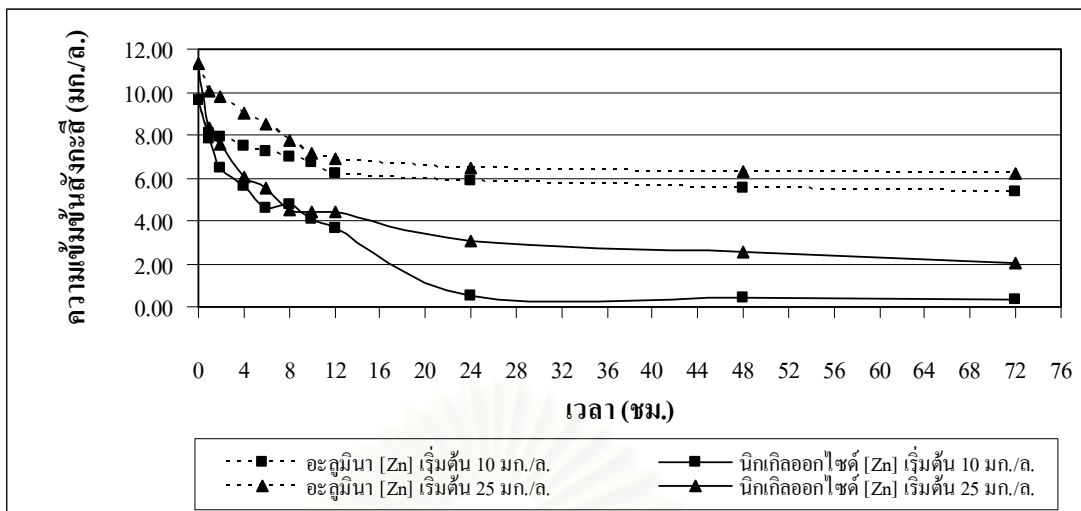
จากแลงมัวร์ไอโซเทอม นิกเกิลออกไซด์มีค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีสูงสุด 5.00 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล มีค่า 5.66 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ซึ่งมีค่ามากกว่าแลงมัวร์ไอโซเทอมร้อยละ 13.20



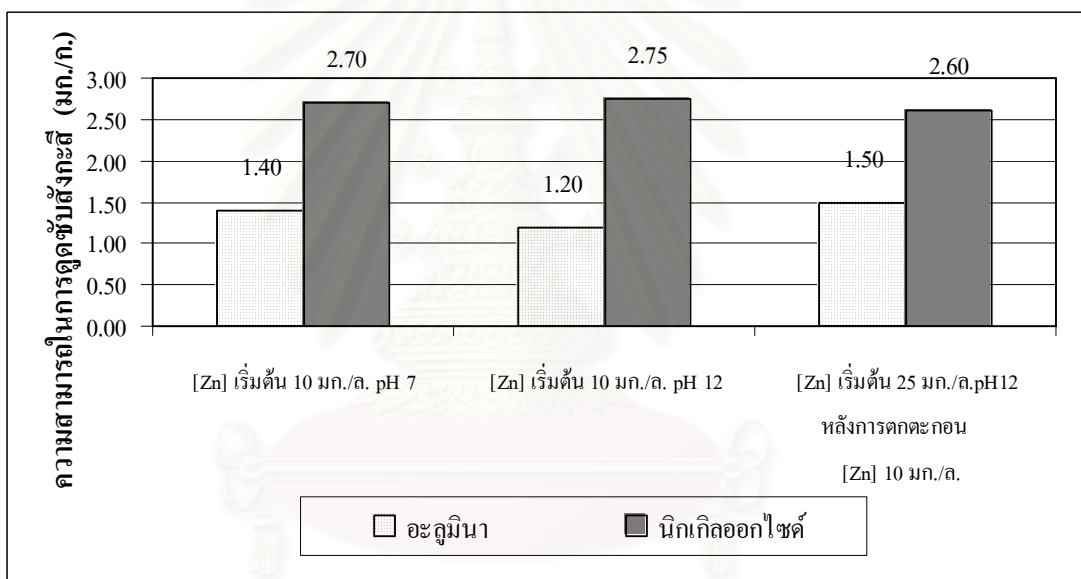
#### 4.2.3 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-3 จากการทดลองพบว่า ที่พีเอช 12 สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น ความเข้มข้นสังกะสีที่เหลืออยู่ในเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.8 ผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุลอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีร้อยละในการดูดซับสังกะสี 42.00 และ 95.00 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีค่า 1.20 และ 2.75 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมตัวกลางการดูดซับ ตามลำดับ ผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีเกิดการตกตะกอนเหลือความเข้มข้นเริ่มต้น 11.36 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการคำนวณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-1 พบว่า ที่พีเอช 12 สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 10.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงผลการทดลอง ที่สภาวะสมดุลอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีร้อยละในการดูดซับสังกะสี 44.30 และ 77.60 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีค่า 1.50 และ 2.60 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมตัวกลางการดูดซับ ตามลำดับ ระยะเวลาการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุลของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์อยู่ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $12 \pm 0.50$

ความสามารถในการละลายน้ำของสังกะสีที่พีเอช 12 มีค่าประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.2.2 การหาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 ที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความสามารถในการดูดซับสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากสังกะสีจะเปลี่ยนรูปตามการเปลี่ยนแปลงพีเอช จากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. ตารางที่ ง-1 พบว่า ที่พีเอช 7 สังกะสีจะอยู่ในรูปของ  $Zn^{2+}$  ทั้งหมด และที่พีเอช 12 สังกะสีจะอยู่ในรูปของ  $Zn(OH)_2$  ร้อยละ 20,  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 70 และ  $Zn(OH)_4^{2-}$  ร้อยละ 10 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า ที่พีเอช 7 และ 12 สังกะสีมีรูปที่แตกต่างกัน นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้ทั้งในรูปของประจุบวกที่พีเอช 7 และประจุลบที่พีเอช 12 แสดงว่าประจุไม่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีของนิกเกิลออกไซด์ เนื่องจากค่าประจุที่พื้นผิวเป็นกลางของนิกเกิลออกไซด์มีพีเอช 8.00 แต่สามารถดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 และ 12 ได้ ทั้งที่พีเอชดังกล่าวพื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์และรูปของสังกะสีที่ดูดซับมีประจุเหมือนกัน เห็นได้ชัดเจนว่าประจุไม่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีของนิกเกิลออกไซด์ การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากที่พีเอช 7 ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น ที่พีเอช 12 การทดลองไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีให้มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ เนื่องจากข้อจำกัดของความสามารถในการละลายน้ำของสังกะสี



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี ที่พีเอช 12



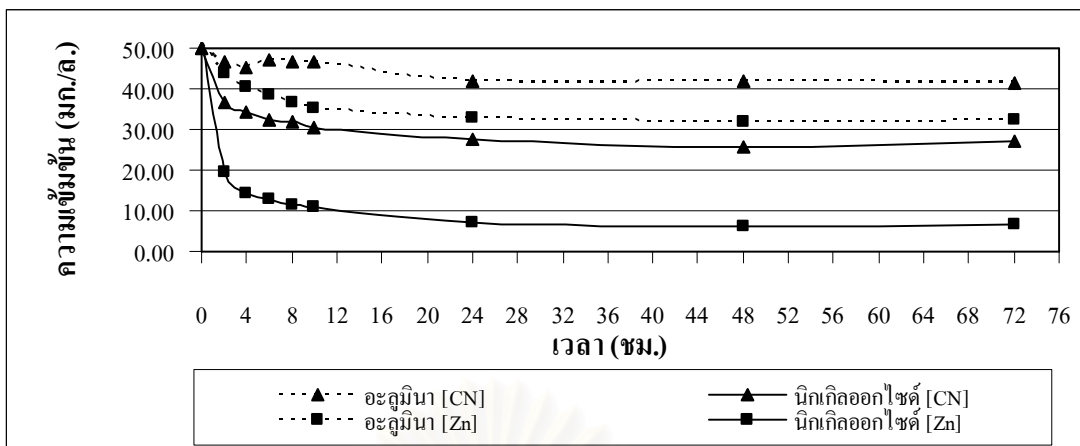
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสี ที่พีเอช 7 และ 12

#### 4.2.4 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12

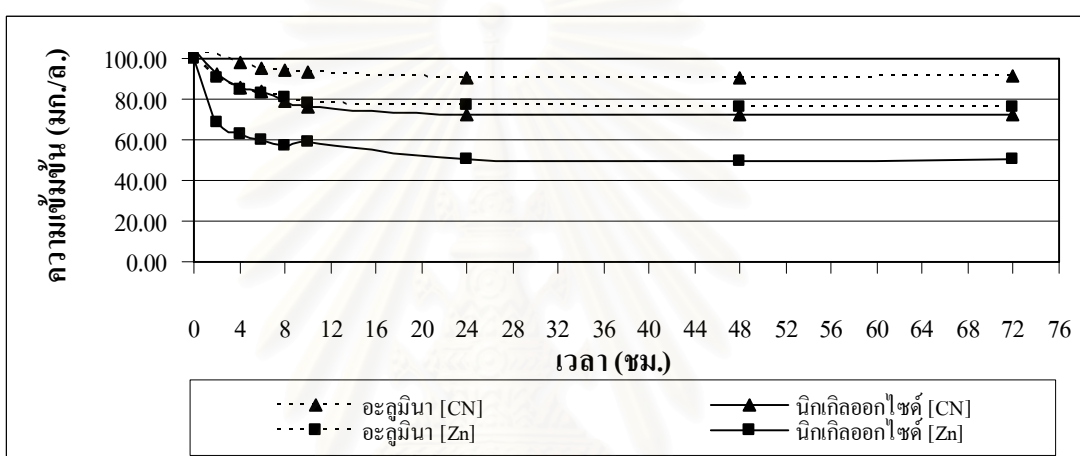
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-4 จากผลการทดลองพบว่า โครเมียมมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำมาก ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง AAs คือ มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นโครเมียม 11.07 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมจะตกตะกอนหมด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี โดยการคำนวณพบว่าโครเมียมประจุ 3+ ที่พีเอช 12 มีความสามารถในการละลายน้ำประมาณ  $7.23 \times 10^{-3}$  มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น

#### 4.2.5 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12

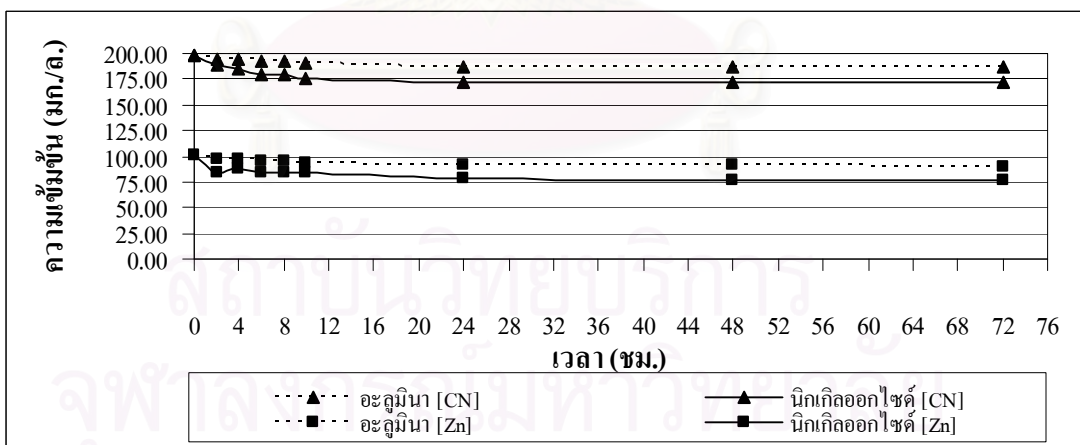
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-5 จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50.063 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 118.50 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีจะตกตะกอนจนมีความเข้มข้นเพียง 51.30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-3 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 18.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่างจากการทดลองร้อยละ 63.54 แต่เมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 104.389 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100.17 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการตกตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-4 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 41.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่างจากการทดลองร้อยละ 58.77 และเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 198.611 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100.18 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100.18 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการตกตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-5 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 102.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้นคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไซยาไนต์และสังกะสีในเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 ที่สภาวะสมดุล อะลูมินามีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 16, 13 และ 5.5 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสังกะสี 36, 24 และ 9 ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 45, 31 และ 13 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสังกะสี 86, 50 และ 23 ตามลำดับ อะลูมินามีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 2.50, 4.00 และ 3.30 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมอะลูมินา ความสามารถในการดูดซับสังกะสี 5.60, 7.20 และ 2.80 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินาตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 7.20, 9.70 และ 8.00 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสี 13.30, 15.00 และ 6.80 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ระยะเวลาการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีจนถึงสภาวะสมดุลของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ใช้เวลาภายใน 24 ชั่วโมง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $12 \pm 0.50$



ก. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 50:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Zn] 50:50 มก./ล.



ข. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 100:100 มก./ล.



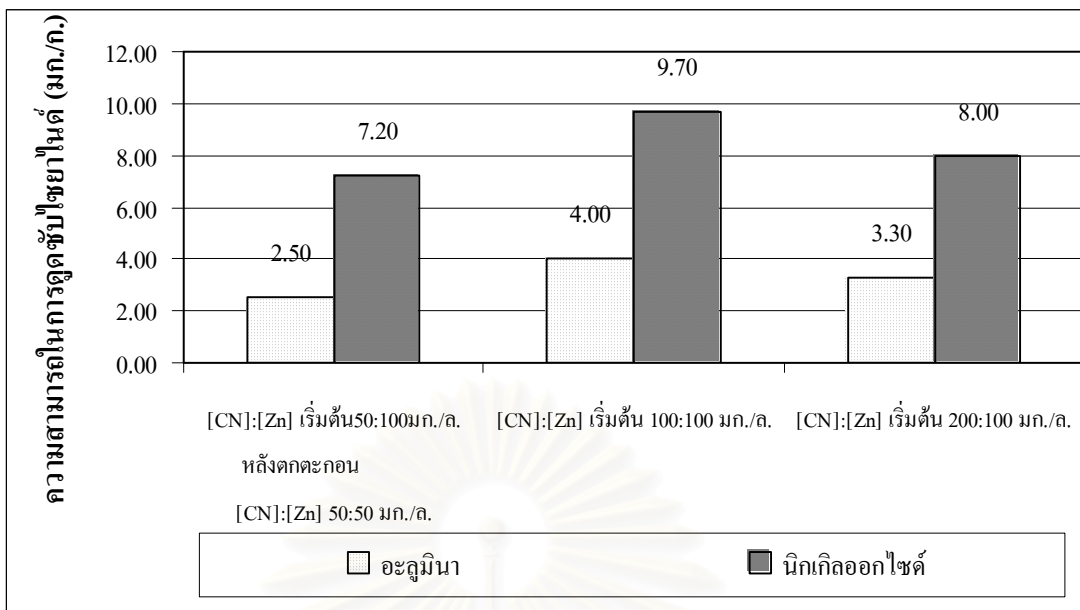
ค. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 200:100 มก./ล.

รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นไซยาไนด์และสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12 โดย ก. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 50:100 มก./ล. หลัง ตกตะกอน [CN]:[Zn] 50:50 มก./ล. ข. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 100:100 มก./ล. ค. [CN]:[Zn] เริ่มต้น 200:100 มก./ล.

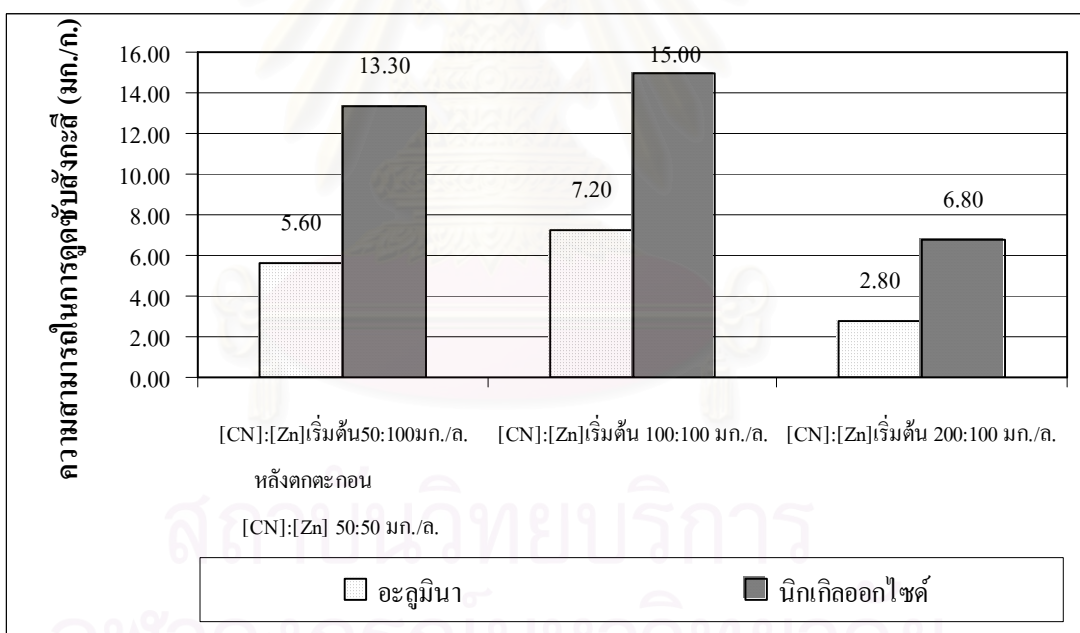
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ รูปที่ 4.11 พบว่า นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ได้ดีกว่าอะลูมินาทุกค่าความเข้มข้นไซยาไนต์ ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สังกะสีสามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก สังกะสีที่ละลายได้เพิ่มขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ จึงมีผลให้การดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ มีค่าลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้นสังกะสีในระบบมีค่าคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นไซยาไนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ไซยาไนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้อาจมีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ลดลง และจากผลการทดลองที่ 4.2.1 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12 สรุปได้ว่าอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ต่ำมาก ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีสังกะสีรวมอยู่ด้วยอาจเป็นผลจากการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่าสำหรับนิกเกิลออกไซด์

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสี รูปที่ 4.12 พบว่า นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้ดีกว่าอะลูมินาทุกค่าความเข้มข้นไซยาไนต์ ซึ่งความสามารถในการดูดซับสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสังกะสีที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นของไซยาไนต์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น สังกะสีสามารถละลายน้ำได้เพียง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไซยาไนต์เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สังกะสีละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสังกะสีจึงเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไซยาไนต์จาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นสังกะสีมีค่าคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสังกะสีมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นไซยาไนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลรบกวนความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ และผลการทดลองนี้ไม่ควรนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.2.2 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 เนื่องจากรูปของสังกะสีที่พีเอช 7 และ 12 มีรูปที่แตกต่างกัน และไม่ควรนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.2.3 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12 เนื่องจากความเข้มข้นสังกะสีในการทดลองทั้งสองมีค่าแตกต่างกันถึง 10 เท่า และรูปของสารประกอบสังกะสีในการทดลองทั้งสองยังมีรูปที่แตกต่างกัน แต่สามารถพิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมาประกอบได้ว่า ความสามารถในการดูดซับสังกะสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีสังกะสีในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์เพิ่มขึ้น





รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนและสังกะสีที่พีเอช 12



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนและสังกะสีที่พีเอช 12



เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 1:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 1.3:1 จากการคำนวณที่สภาวะดังกล่าว รูปของสารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 40 รูปของ  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 40 และรูปของ Zn-OH อื่นๆ ร้อยละ 20 แสดงในภาคผนวก ง. ซึ่งจะเห็นว่า สารประกอบสังกะสีส่วนมากอยู่ในรูป Zn-OH ร้อยละ 60 ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับสังกะสีในรูป Zn-OH สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่าน้อย และสามารถสรุปได้ว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ไอออน ( $CN^-$ ) ต่ำ เนื่องจากในระบบมีไซยาไนด์ไอออนอยู่ประมาณ 4 เท่าของรูป  $Zn(CN)_3^-$  และรูปของ Zn-OH มีอยู่ประมาณ 1.5 เท่าของรูป  $Zn(CN)_3^-$  ดังนั้น สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีควรมีค่ามากกว่า 1:1 ถ้าอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์สูง เพราะปริมาณไซยาไนด์ไอออนในระบบมีค่ามากเกินไป

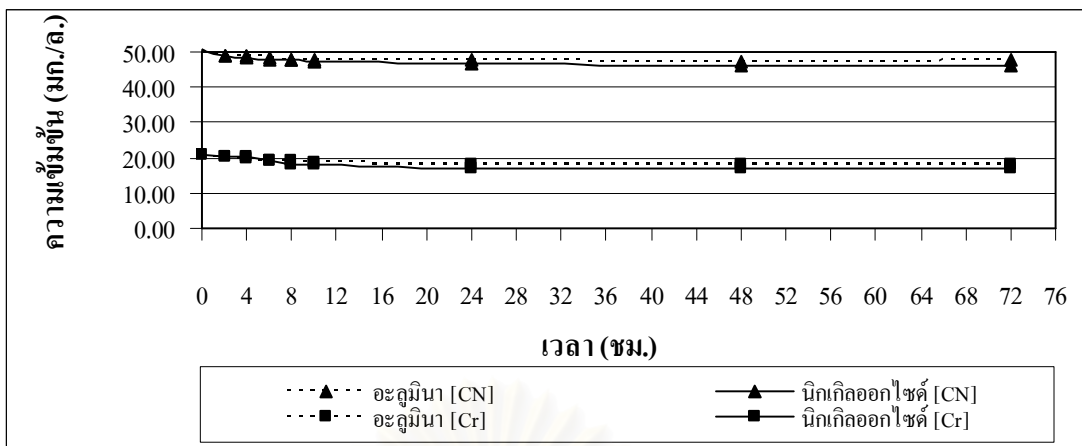
เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 1.4:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 1.6:1 จากการคำนวณที่สภาวะดังกล่าว รูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 70 และรูปของ  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 20 รูปของ  $Zn(OH)_2$  ร้อยละ 10 ซึ่งจะเห็นว่า สารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $Zn(CN)_3^-$  ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับสังกะสีในรูป  $Zn(CN)_3^-$  สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่ามากขึ้นตามรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ที่มากขึ้น และจากการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบสังกะสีในรูปของ Zn-OH มากกว่ารูปของ  $Zn(CN)_3^-$  เนื่องจากในระบบมีรูป  $Zn(CN)_3^-$  อยู่ร้อยละ 70 สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีควรมีค่าประมาณ 3:1 แต่จากการทดลองมีค่า 1.5:1 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับส่วนใหญ่เป็นการดูดซับในรูปของ Zn-OH มากกว่า  $Zn(CN)_3^-$

เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 3:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 3:1 จากการคำนวณที่สภาวะดังกล่าว รูปของสารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 90 และรูปของ  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 10 สารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $Zn(CN)_3^-$  ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับสารประกอบสังกะสีในรูป  $Zn(CN)_3^-$  สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่า 3:1

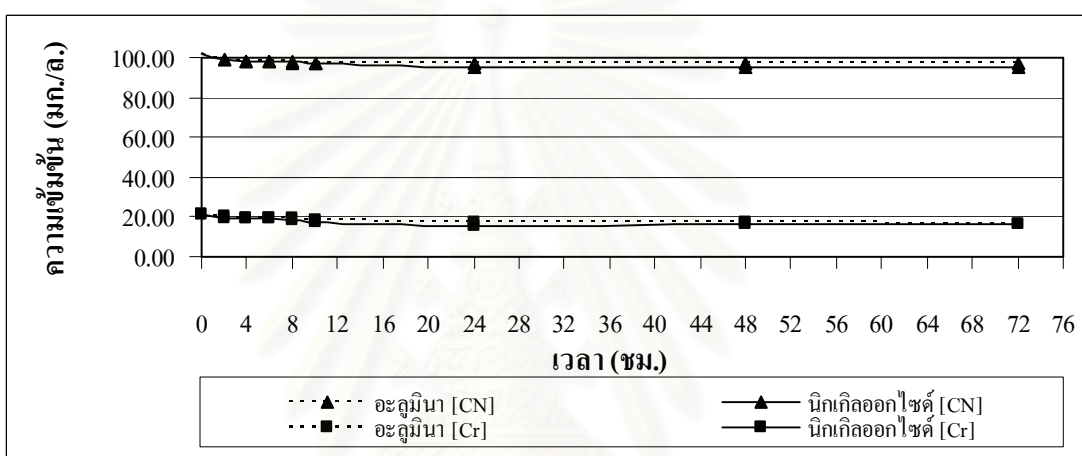
#### 4.2.6 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12

การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-6 เมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไซยาไนต์และโครเมียมที่เวลาต่างๆ ดังรูป 4.13 ที่สถานะสมดุล อะลูมินามีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 5, 4 และ 2 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับโครเมียม 14, 19 และ 23 ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 8, 6 และ 5 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับโครเมียม 18, 23 และ 27 ตามลำดับ อะลูมินามีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 0.80, 1.30 และ 1.30 มิลลิกรัม ไซยาไนต์ต่อกรัมอะลูมินา ความสามารถในการดูดซับโครเมียม 0.90, 1.20 และ 1.50 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมอะลูมินา ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 1.20, 1.90 และ 3.20 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับโครเมียม 1.20, 1.50 และ 1.80 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ระยะเวลาการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมจนถึงสถานะสมดุลของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ใช้เวลาภายใน 24 ชั่วโมง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $12 \pm 0.50$

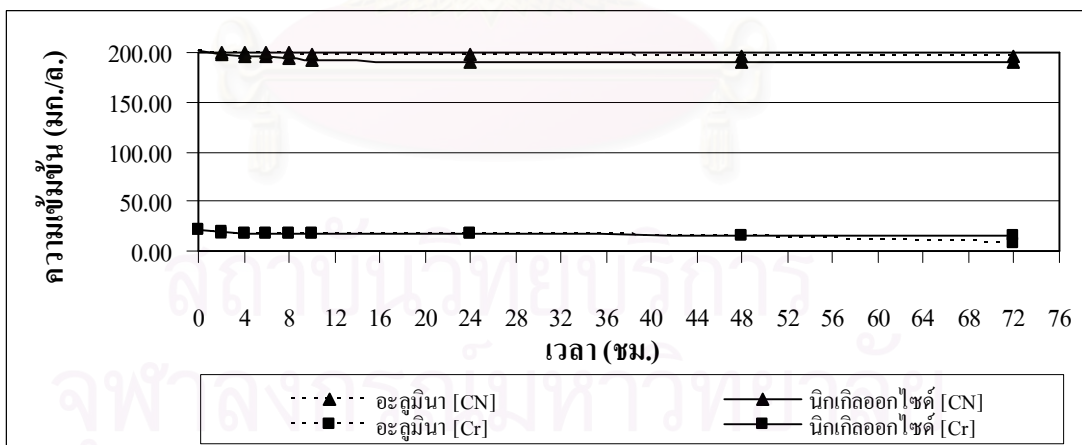
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ รูปที่ 4.14 และการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโครเมียม รูปที่ 4.15 พบว่า นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมได้ดีกว่าอะลูมินาทุกค่าความเข้มข้นไซยาไนต์ แต่ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมจากการทดลองนี้ มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสี จากการทดลองที่ 4.2.5 การหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบโครเมียมได้ต่ำกว่าการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ ที่สถานะสมดุลสัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนต์ต่อโครเมียมบนตัวกลางทั้งสอง ไม่พบความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างไซยาไนต์และโครเมียม



ก. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 50:20 มก./ล.

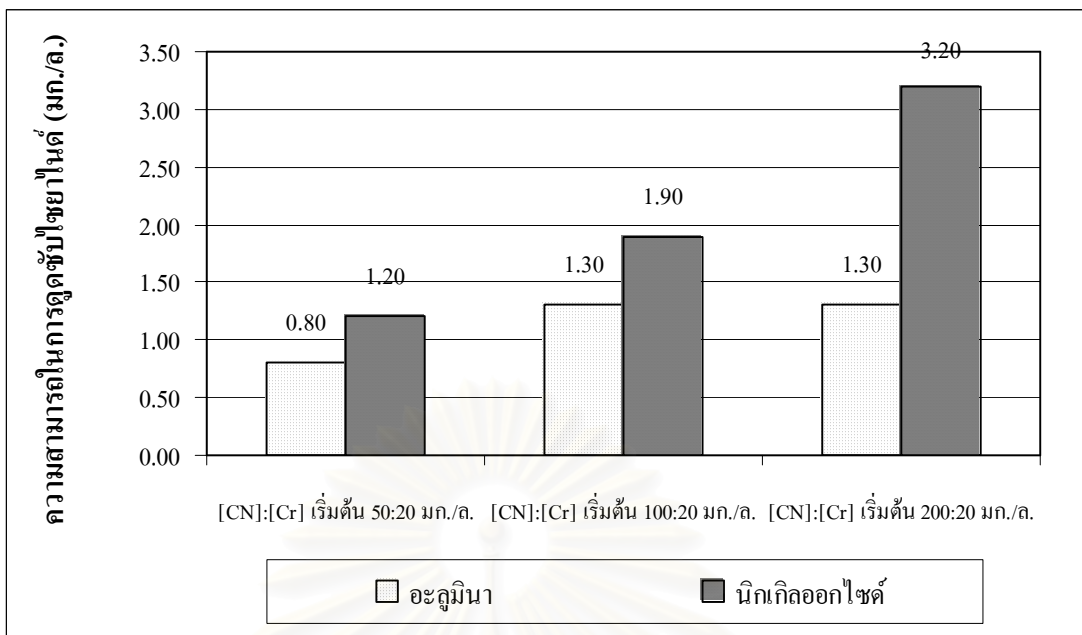


ข. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 100:20 มก./ล.

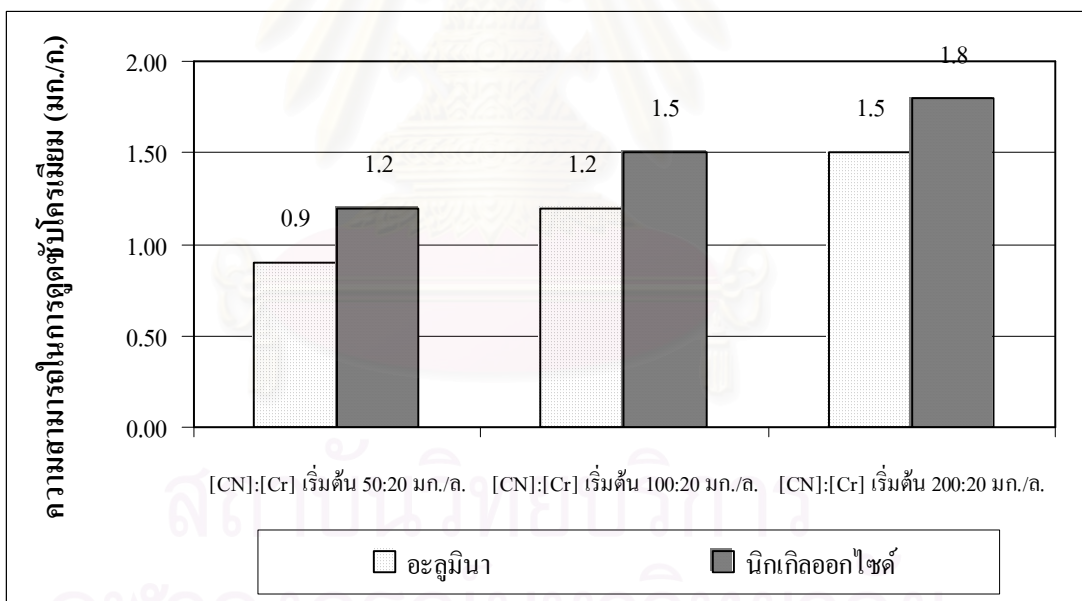


ค. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 200:20 มก./ล.

รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นไซยาไนด์และโครเมียมที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12 โดย ก. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 50:20 มก./ล. ข. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 100:20 มก./ล. และ ค. [CN]:[Cr] เริ่มต้น 200:20 มก./ล.



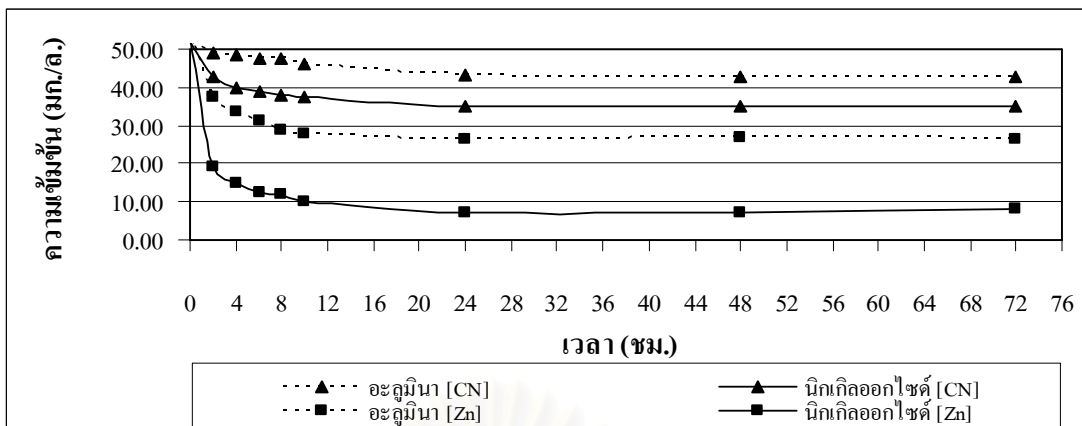
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12



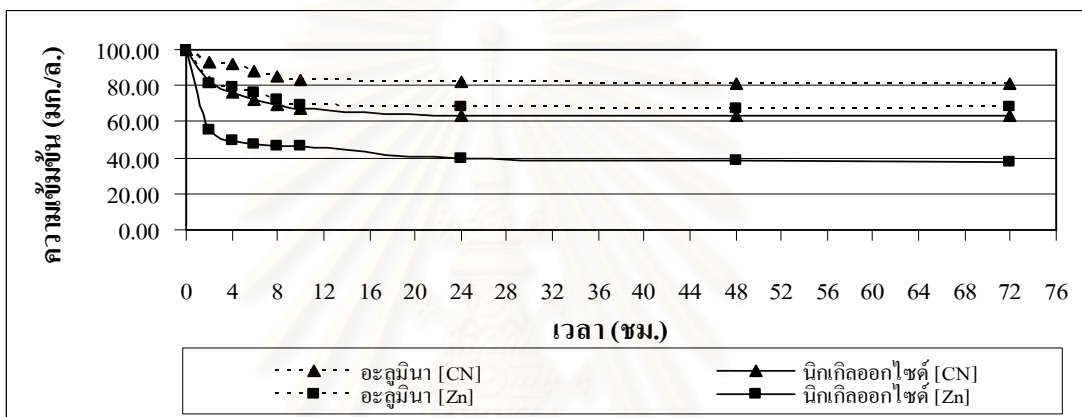
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12

#### 4.2.7 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12

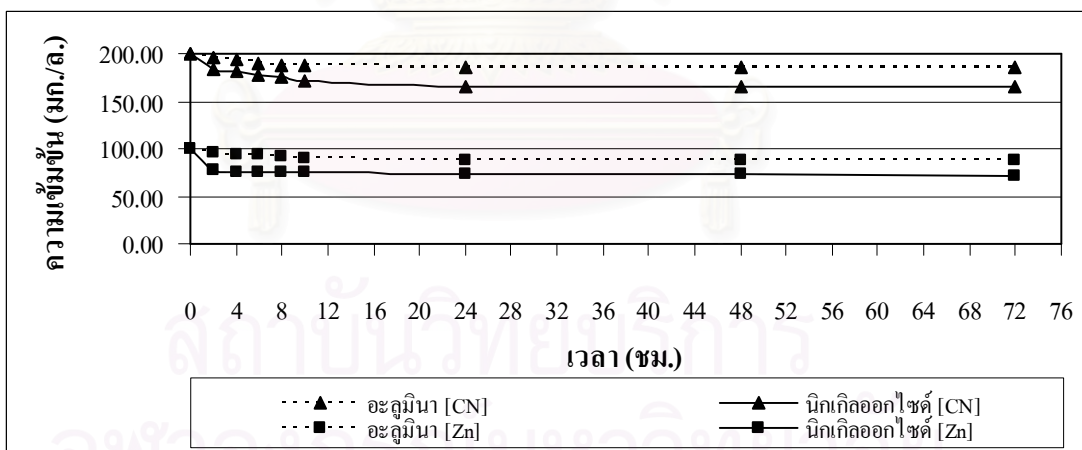
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-7 จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์ เริ่มต้น 51.955 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20.13 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 106.60 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีจะตกตะกอนจนมีความเข้มข้นเพียง 53.90 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-3 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 18.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่างจากการทดลองร้อยละ 65.31 แต่เมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์ เริ่มต้น 100.405 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20.22 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100.35 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100.35 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการตกตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-4 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 41.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่างจากการทดลองร้อยละ 58.84 และเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200.126 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20.64 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100.47 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100.47 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการตกตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-5 พบว่า สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 102.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นคงที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้นคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไซยาไนต์และสังกะสีในเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.16 ที่สถานะสมดุล อะลูมินามีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 17, 18 และ 7 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสังกะสี 50, 32 และ 12 ตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีร้อยละการดูดซับไซยาไนต์ 32, 37 และ 17 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสังกะสี 86, 61 และ 28 ตามลำดับ อะลูมินามีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 2.60, 5.60 และ 4.50 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมอะลูมินา ความสามารถในการดูดซับสังกะสี 8.20, 9.70 และ 3.70 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินาตามลำดับ นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ 5.00, 11.00 และ 10.00 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสี 14.00, 18.50 และ 8.50 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ ระยะเวลาการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีจนถึงสถานะสมดุลของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ใช้เวลาภายใน 24 ชั่วโมง ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลองนั้นพบว่า ทั้งอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง พีเอชน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ  $12 \pm 0.50$



ก.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 50:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 50:0:50 มก./ล.



ข.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 100:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 100:0:100 มก./ล.



ค.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 200:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 200:0:100 มก./ล.

รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นไซยาไนด์และสังกะสีที่เวลาต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับ

ไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12 โดย

ก.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 50:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 50:0:50 มก./ล.

ข.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 100:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 100:0:100 มก./ล.

ค.[CN]:[Cr]:[Zn] เริ่มต้น 200:20:100 มก./ล. หลังตกตะกอน [CN]:[Cr]:[Zn] 200:0:100 มก./ล.



การทดลองนี้ น้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี พบว่า โครเมียมตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.2.6 น้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์และโครเมียม พบว่า โครเมียมสามารถละลายน้ำได้ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยไม่ตกตะกอน การทดลองทั้งสองกรณีให้ผลที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้จากงานวิจัยนี้ แต่ในทางทฤษฎีโครเมียมไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโครเมียมไซยาไนด์ได้ (Benjamin, 2002)

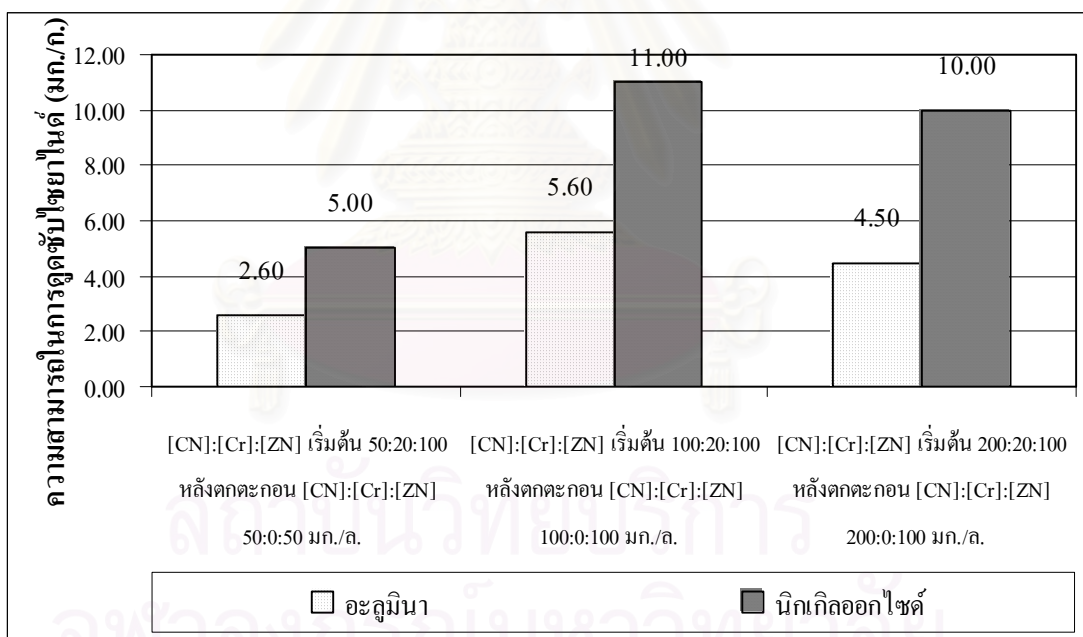
การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ รูปที่ 4.17 พบว่า นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ได้ดีกว่าอะลูมินาทุกค่าความเข้มข้นไซยาไนด์ ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์เพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สังกะสีสามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีที่ละลายได้เพิ่มขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ มีค่าลดลง เนื่องจาก ความเข้มข้นสังกะสีในระบบมีค่าคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เพิ่มขึ้นอาจมีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ลดลง

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสี รูปที่ 4.18 พบว่า นิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้ดีกว่าอะลูมินาทุกค่าความเข้มข้นไซยาไนด์ ซึ่งความสามารถในการดูดซับสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสังกะสีที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นของไซยาไนด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น สังกะสีสามารถละลายน้ำได้เพียง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไซยาไนด์เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สังกะสีละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสังกะสีจึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไซยาไนด์จาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ความเข้มข้นสังกะสีมีค่าคงที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสังกะสีมีค่าลดลง เนื่องมาจากความเข้มข้นไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลรบกวนความสามารถในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์

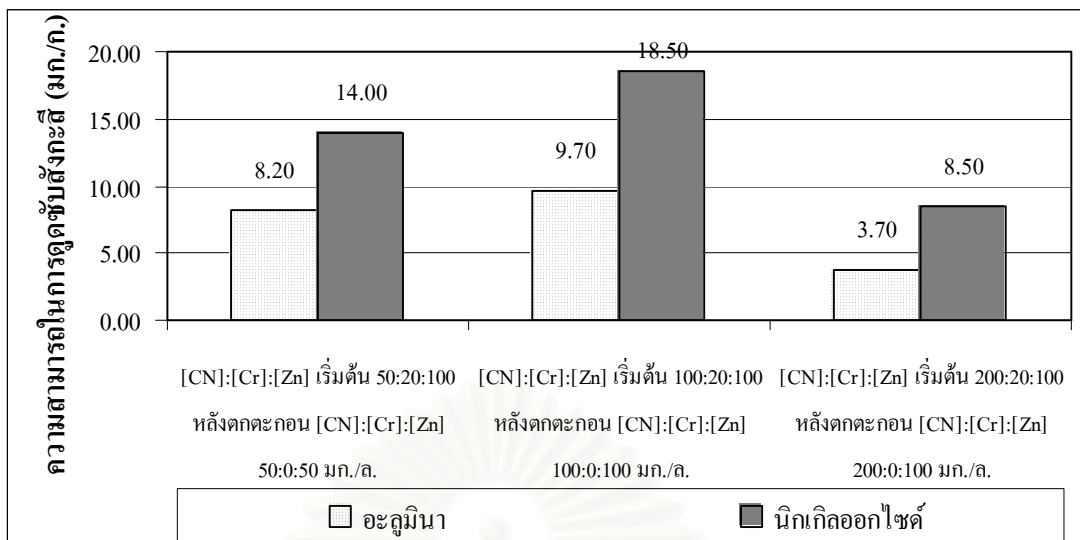
เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 0.8:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 1:1 จาก การคำนวณในภาคผนวก ง. ตารางที่ ง-3 สามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสังกะสีในรูป Zn-OH สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่าน้อย

เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 1.4:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 1.5:1 จากการคำนวณในภาคผนวก ง. ตารางที่ ง-4 พบว่า รูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 70 และรูปของ  $Zn-OH$  ร้อยละ 30 ซึ่งจะเห็นว่า สารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $Zn(CN)_3^-$  ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับสังกะสีในรูป  $Zn(CN)_3^-$  สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่ามากขึ้นตามรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ที่มากขึ้น

เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลการดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีของอะลูมินามีค่า 3:1 นิกเกิลออกไซด์มีค่า 3:1 จากการคำนวณในภาคผนวก ง. ตารางที่ ง-5 พบว่า รูปของสารประกอบสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 90 และรูปของ  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 10 ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับสารประกอบสังกะสีในรูป  $Zn(CN)_3^-$  สัดส่วนโมล การดูดซับไซยาไนด์ต่อสังกะสีจึงมีค่า 3:1



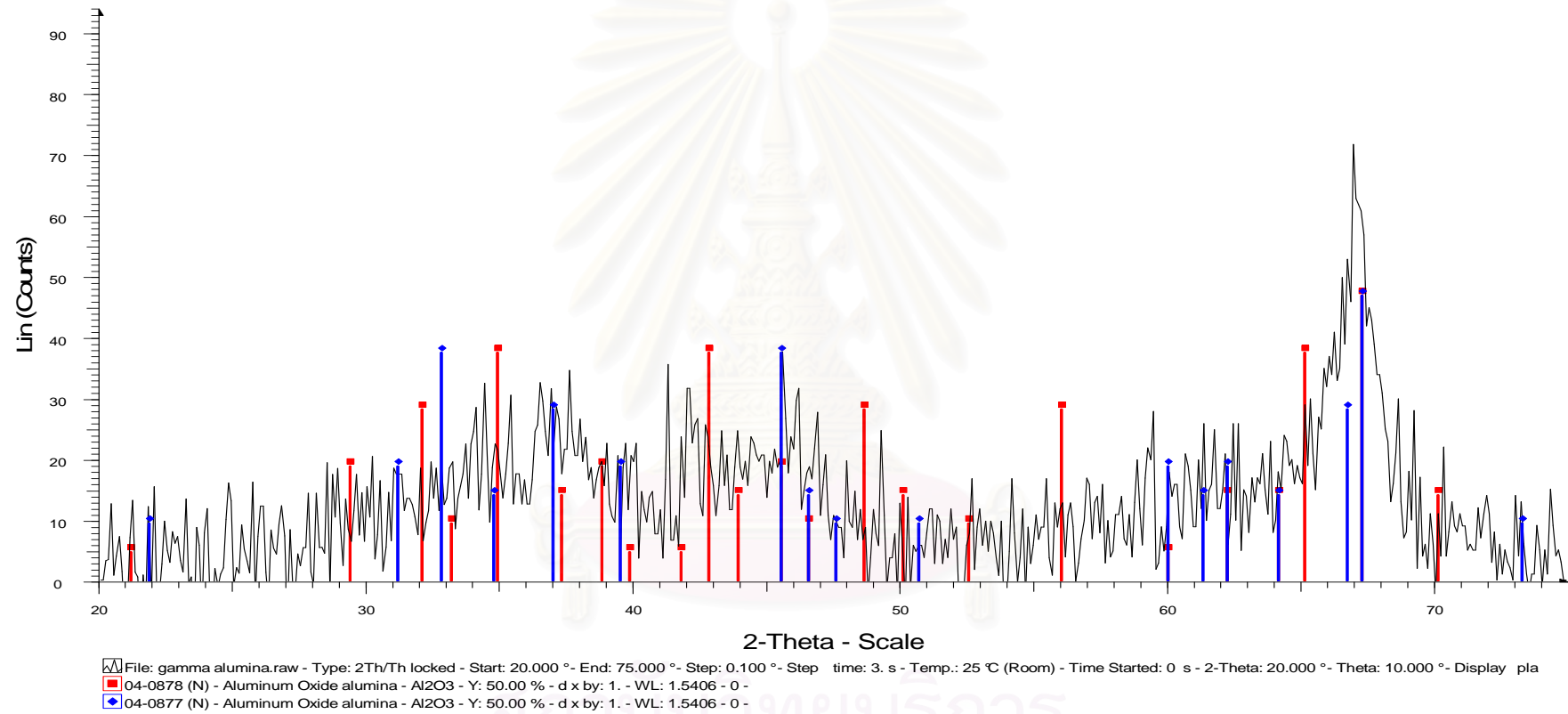
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12



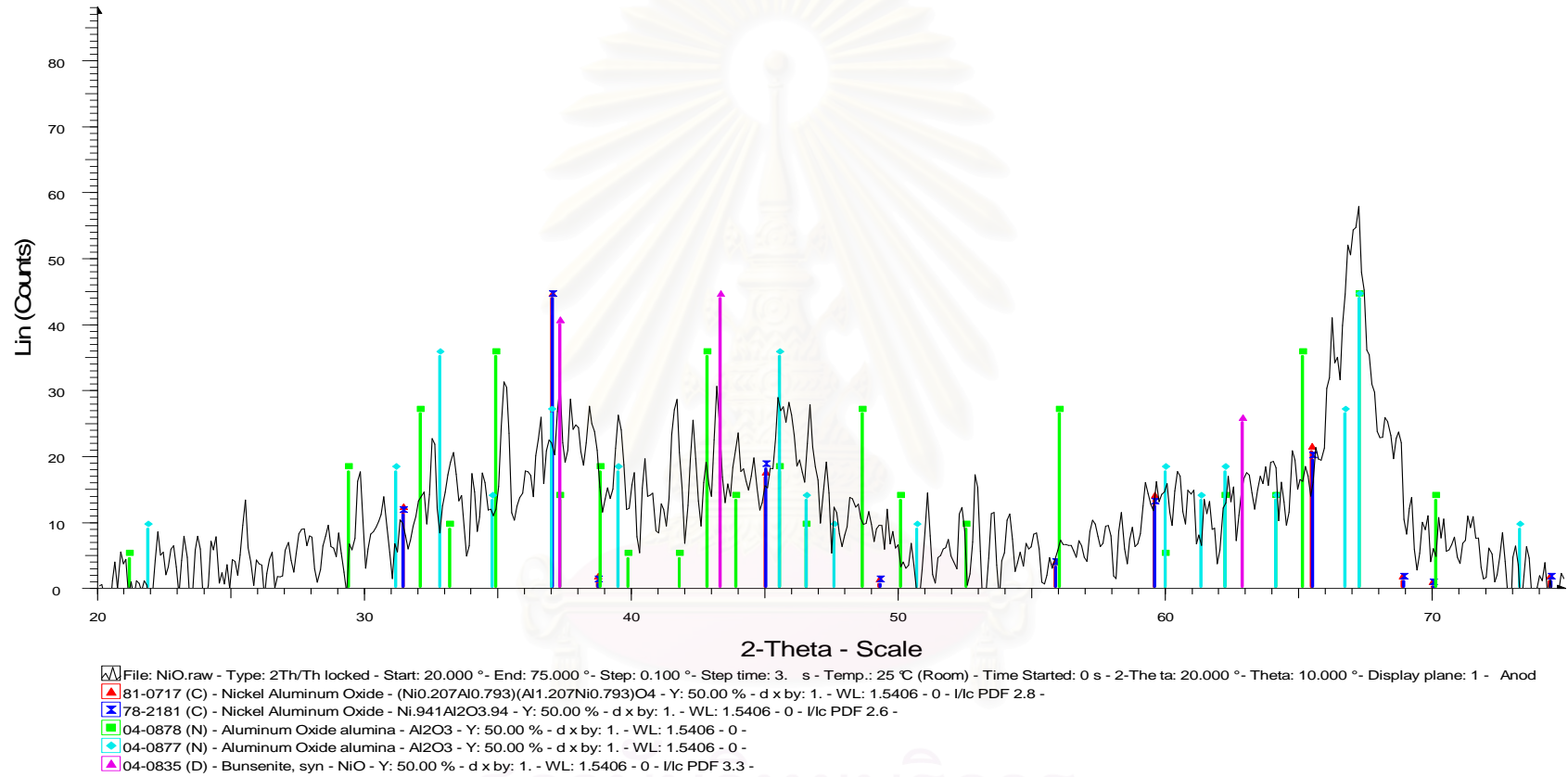
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12

ผลการตรวจวิเคราะห์ตัวกลางการดูดซับด้วยเครื่อง XRD ที่ประกอบด้วย อะลูมินา นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่ใช้ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น ไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่า กราฟทั้ง 3 มีลักษณะคล้ายกันอย่างมาก พิกัดเด่น (Peak) ในแต่ละกราฟ เมื่อวิเคราะห์แล้ว พบว่าเป็นลักษณะของฟิโคอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของตัวกลาง

พิจารณากราฟนิกเกิลออกไซด์และกราฟนิกเกิลออกไซด์ที่ใช้ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งกราฟดังกล่าวไม่สามารถแสดงพิกัดเด่นของนิกเกิลออกไซด์หรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี ไซยาไนด์ได้นั้น อาจมีสาเหตุที่สำคัญ 3 ประการคือ 1. นิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวอะลูมินามีปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมินาซึ่งเป็นตัวรองรับ ทำให้พิกัดเด่นที่แสดงในกราฟ เป็นพิกัดของอะลูมินา 2. นิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวหรือสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดซับนั้นต้องเป็นสารประกอบที่มีรูปผลึก(Crystal Form) หากเป็นสารประกอบที่ไม่มีรูปผลึก (Amorphous) การวิเคราะห์ XRD ก็จะไม่ปรากฏพิกัดให้เห็น 3. หากสารประกอบนั้นๆ มีรูปผลึกแล้ว จะต้องมึปริมาณรูปผลึกที่สมบูรณ์มากพอที่จะปรากฏพิกัดเด่นด้วย จึงสามารถวิเคราะห์พิกัดดังกล่าวได้ จากเหตุผลที่สำคัญดังกล่าวนี้ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตัวกลางอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่ใช้ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ปรากฏพิกัดเด่นของอะลูมินาเนื่องจากอะลูมินาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญและมีปริมาณมาก อีกทั้งยังเป็นสารที่มีรูปผลึกและเป็นรูปผลึกที่สมบูรณ์มากกว่ารูปผลึกของสารประกอบนิกเกิลออกไซด์หรือสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ กราฟ XRD ของตัวกลางทั้งสามจึงปรากฏพิกัดเด่นของอะลูมินาเพียงอย่างเดียว

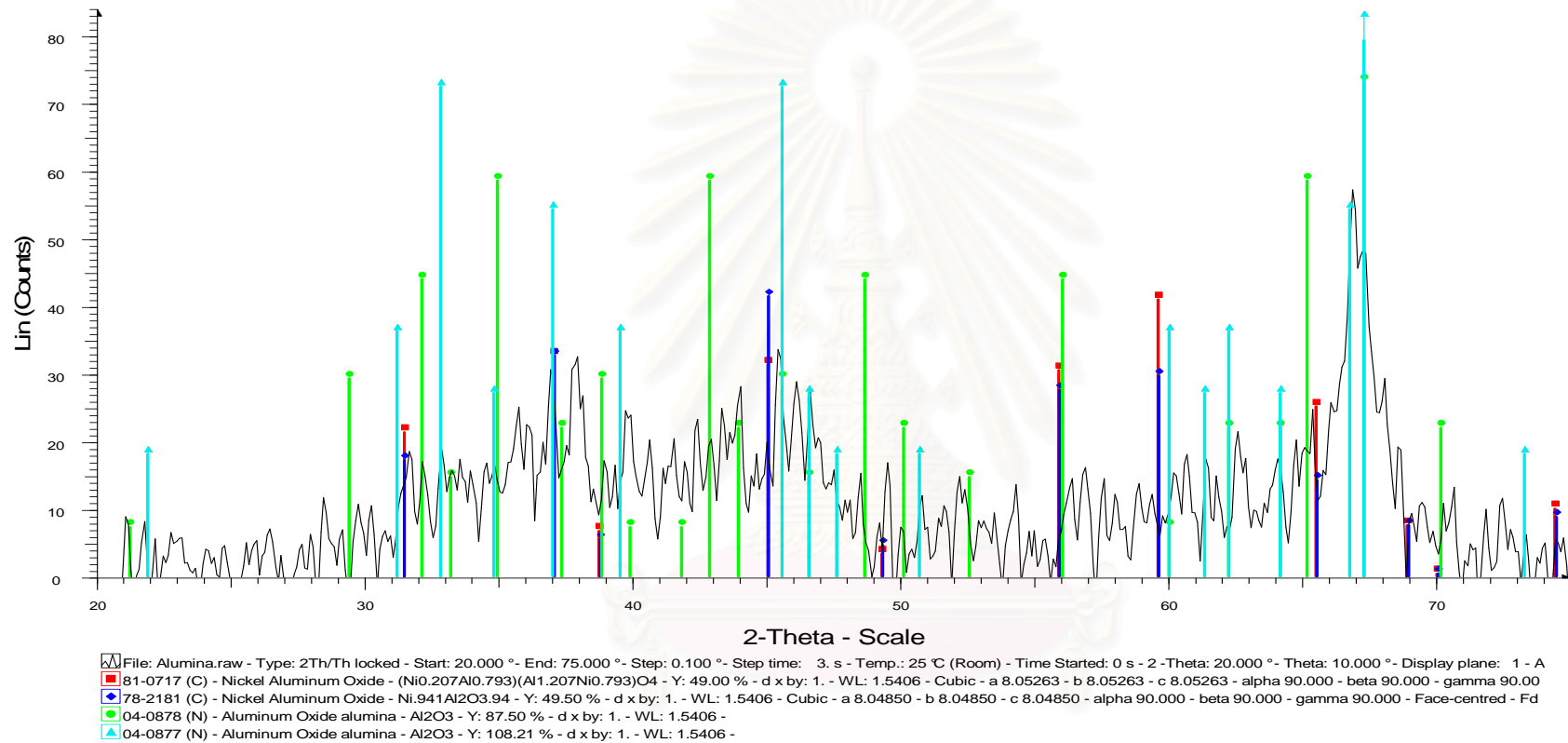


รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย XRD ของอะลูมินา



รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย XRD ของนิกเกิลออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย XRD ของนิกเกิลออกไซด์ที่ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้น100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร



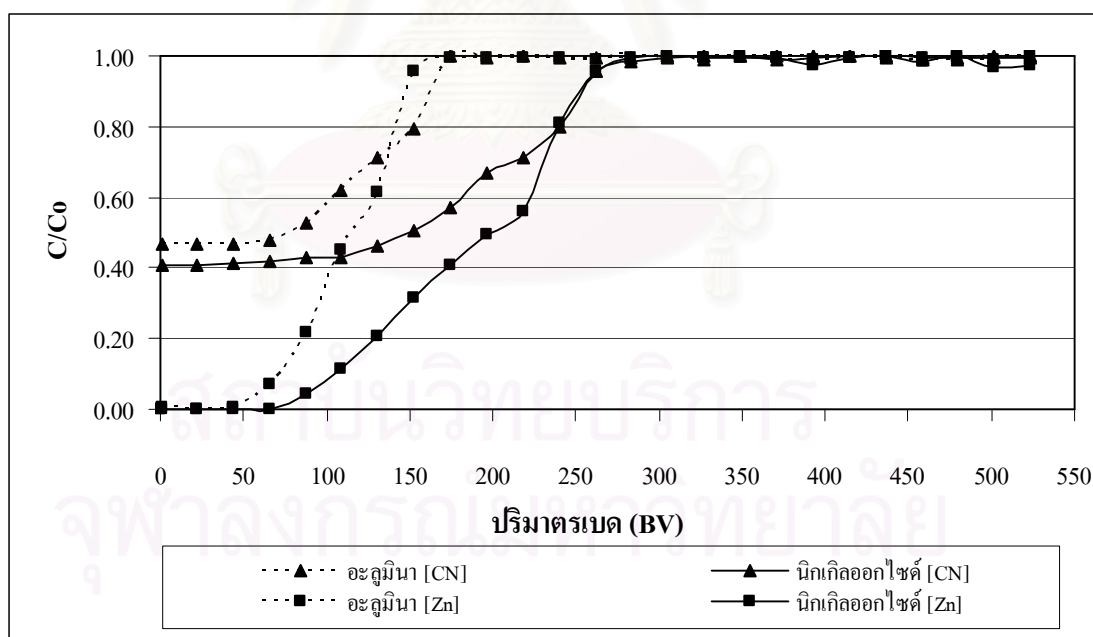
#### 4.2.8 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี แบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12 แบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-8 จากการทดลองพบว่า ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยไม่เกิดการตกตะกอน

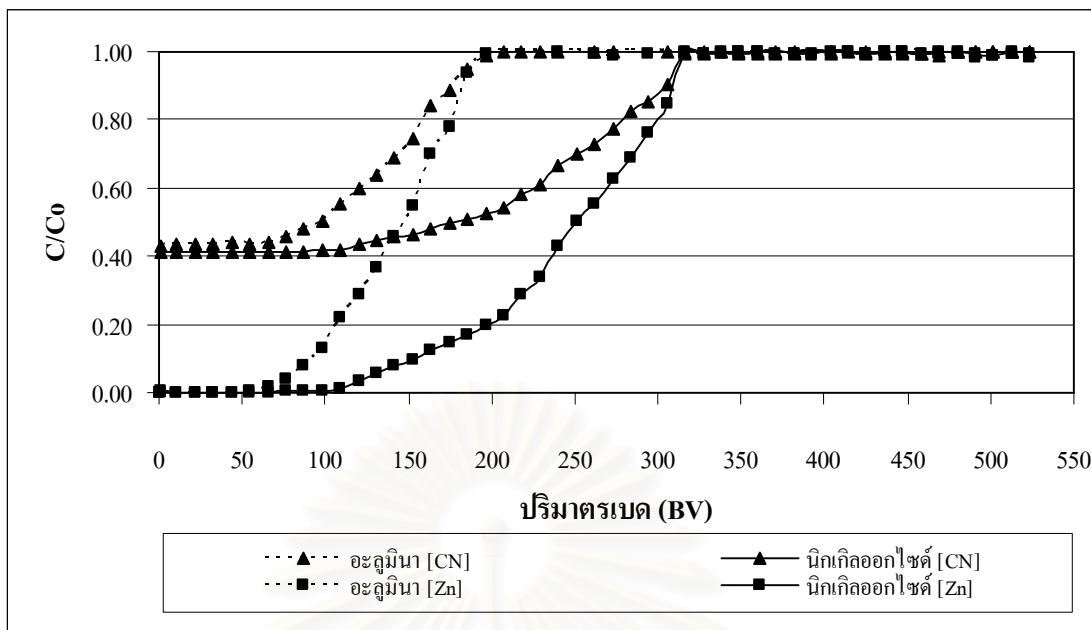
จากผลการทดลองพบว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ไม่สามารถดูดซับไซยาไนด์ให้ลดลงจนหมดได้ โดยที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ 8 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.22 อะลูมินาสามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ต่ำสุดประมาณ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 44 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 175 ปริมาตรเบค ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 38 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ เท่ากับ 6.33 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ต่ำสุดประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 65 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 327 ปริมาตรเบค ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 65 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ เท่ากับ 10.90 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ และอะลูมินาสามารถดูดซับสังกะสีได้ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 22 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 175 ปริมาตรเบค ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 64 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสี เท่ากับ 10.67 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับสังกะสีได้ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 65 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 305 ปริมาตรเบค ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 107 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสี เท่ากับ 17.80 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์

ส่วนที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.23 อะลูมินาสามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ต่ำสุดประมาณ 42 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 33 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มข้นเท่ากับ

ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 207 ปริมาตรเบด ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 43 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ เท่ากับ 7.16 มิลลิกรัม ไซยาไนด์ต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ต่ำสุดประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 109 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ประมาณ 316 ปริมาตรเบด ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 77 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ เท่ากับ 12.83 มิลลิกรัม ไซยาไนด์ต่อกรัม นิกเกิลออกไซด์ และอะลูมินาสามารถดูดซับสังกะสีได้ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 44 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 207 ปริมาตรเบด ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 75 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสี เท่ากับ 12.50 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับสังกะสีได้ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 65 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ประมาณ 316 ปริมาตรเบด ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 127 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสี เท่ากับ 21.17 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัม นิกเกิลออกไซด์



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนด์และสังกะสีที่ปริมาตรเบดต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร



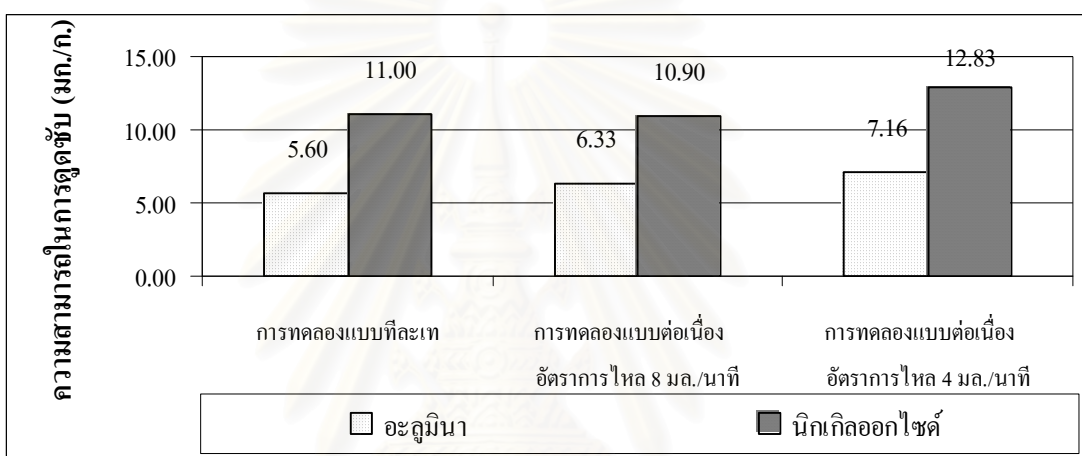
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนด์และสังกะสีที่ปริมาณเบตต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.24 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง

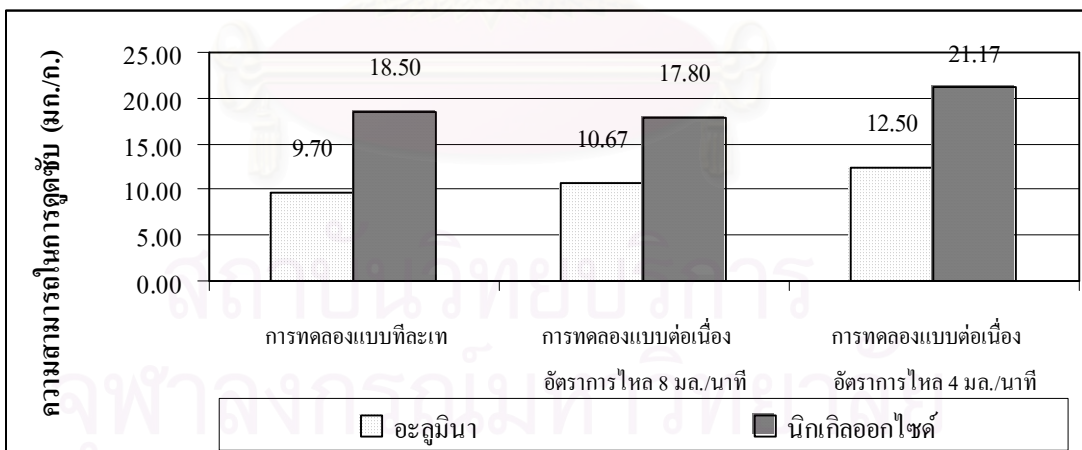
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจาก 8 เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น 2 เท่า ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ของคอลัมน์อะลูมินาและคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 13 และ 18 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของคอลัมน์อะลูมินาและคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 17 และ 19 ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจาก 8 เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีมีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ปริมาณเบตที่ค่าความเข้มข้นสังกะสีหลังจากผ่านคอลัมน์ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสมากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้ว ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไซยาไนด์ เนื่องจาก ระบบมีสังกะสีในรูปของ Zn-OH ร้อยละ 30 และ Zn-CN ร้อยละ 70 ซึ่งนิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับได้ทั้งหมด แต่การดูดซับไซยาไนด์จะเป็นการดูดซับสังกะสีในรูป Zn-CN จึงทำให้ความเข้มข้นไซยาไนด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสังกะสี และเมื่อ

วิเคราะห์สัดส่วนโมลไซยาไนต์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์ที่จุดเบรคทรู พบว่ามีค่าประมาณ 1.5:1 ใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบทีละเทที่ผ่านมา ส่วนปริมาตรเบดที่จุดเบรคทรูของไซยาไนต์และสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกันที่ 250 ปริมาตรเบดสำหรับอัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และ 300 ปริมาตรเบดสำหรับอัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับไซยาไนต์ของนิกเกิลออกไซด์ เป็นการดูดซับจากรูปสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนต์ เพราะเมื่อการดูดซับสังกะสีถึงจุดเบรคทรูแล้วมีผลทำให้ การดูดซับไซยาไนต์ถึงจุดเบรคทรูพร้อมกัน หากการดูดซับไซยาไนต์ในรูป CN<sup>-</sup> สามารถเกิดขึ้นได้ปริมาตรเบดที่จุดเบรคทรูของไซยาไนต์ควรมีค่าแตกต่างจากปริมาตรเบดที่จุดเบรคทรูของสังกะสี



ก. ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์



ข. ความสามารถในการดูดซับสังกะสี

รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นไซยาไนต์: โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ก. ความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์ และ ข. ความสามารถในการดูดซับสังกะสี

#### 4.2.9 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

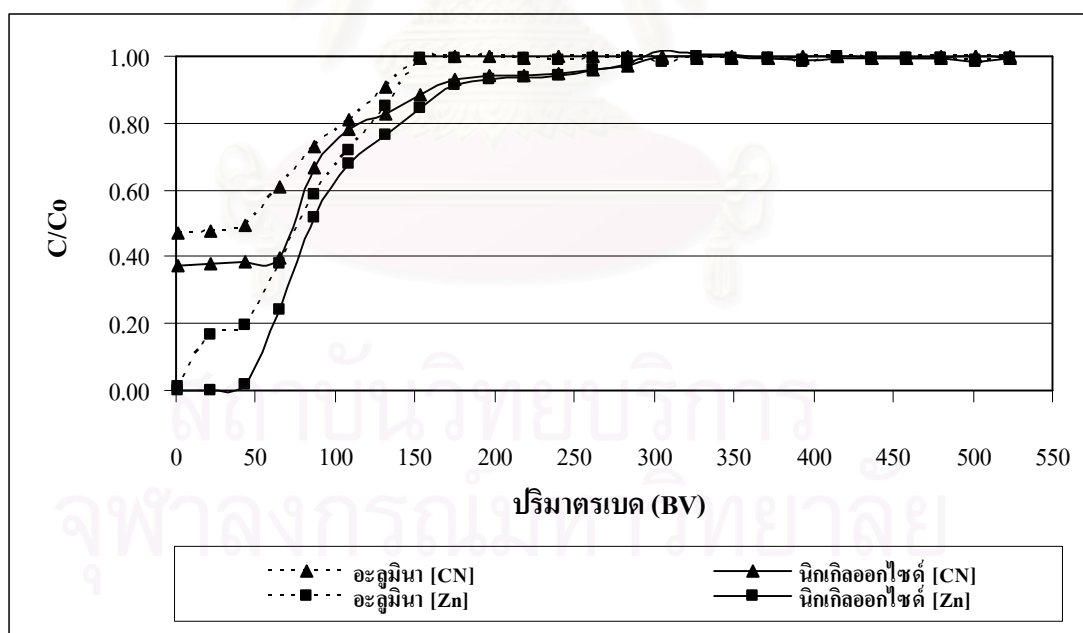
การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12 แบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-9 จากการทดลองพบว่า ที่พีเอช 12 ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีสามารถละลายน้ำได้ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการตกตะกอน

จากผลการทดลองพบว่า อะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ไม่สามารถดูดซับไซยาไนต์ให้ลดลงจนหมดได้ โดยที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ 8 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.25 อะลูมินาสามารถดูดซับไซยาไนต์ได้ต่ำสุดประมาณ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 22 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 175 ปริมาตรเบค ปริมาณไซยาไนต์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 52 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์เท่ากับ 8.67 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับไซยาไนต์ได้ต่ำสุดประมาณ 72 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 22 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 305 ปริมาตรเบค ปริมาณไซยาไนต์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 75 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนต์เท่ากับ 12.50 มิลลิกรัมไซยาไนต์ต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ อะลูมินาสามารถดูดซับสังกะสีได้ต่ำกว่า 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 1 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 153 ปริมาตรเบค ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 43 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสีเท่ากับ 7.20 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับไซยาไนต์ได้ต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 22 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 305 ปริมาตรเบค ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 60 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสีเท่ากับ 10.00 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์

ส่วนที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 4.26 อะลูมินาสามารถดูดซับไซยาไนต์ได้ต่ำสุดประมาณ 78 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 1 ปริมาตรเบค จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับ

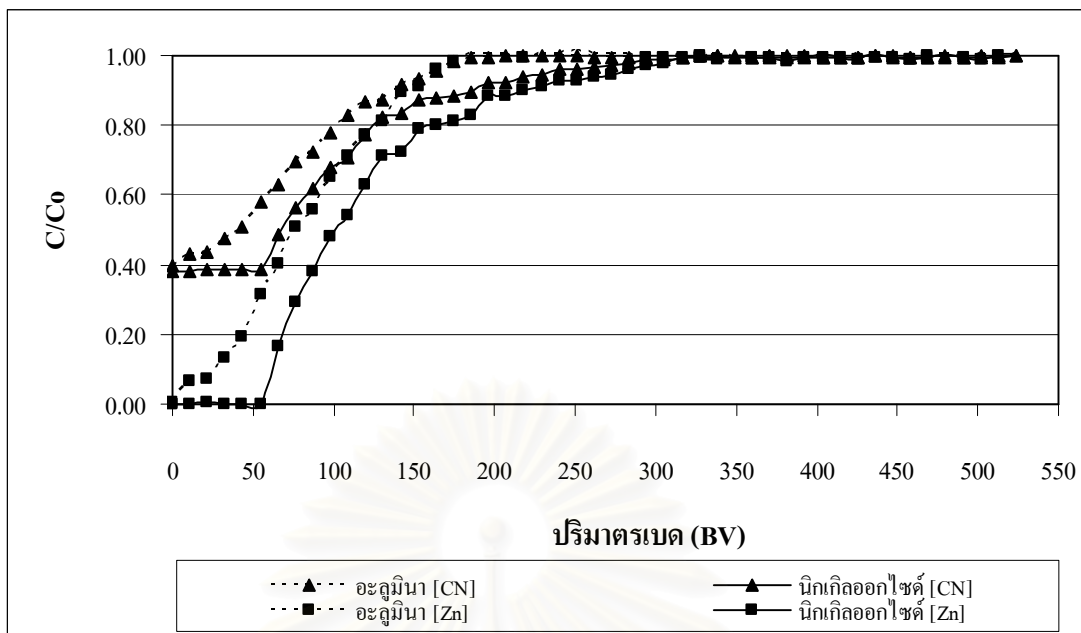


ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 207 ปริมาตรเบด ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 55 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์เท่ากับ 9.16 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับไซยาไนด์ได้ดีที่สุดประมาณ 76 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 55 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ประมาณ 327 ปริมาตรเบด ปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 82 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์เท่ากับ 13.67 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกรัม นิกเกิลออกไซด์ อะลูมินาสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีต่ำกว่า 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 1 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 207 ปริมาตรเบด ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 46 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสีเท่ากับ 7.67 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมอะลูมินา นิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับสังกะสีได้ดีต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นนี้จะคงที่อยู่ประมาณ 55 ปริมาตรเบด จากนั้นความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ประมาณ 327 ปริมาตรเบด ปริมาณสังกะสีที่ถูกดูดซับอยู่ในคอลัมน์ทั้งหมดประมาณ 66 มิลลิกรัม คิดเป็นความสามารถในการดูดซับสังกะสีเท่ากับ 11.00 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัม นิกเกิลออกไซด์



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนด์และสังกะสีที่ปริมาตรเบดต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร





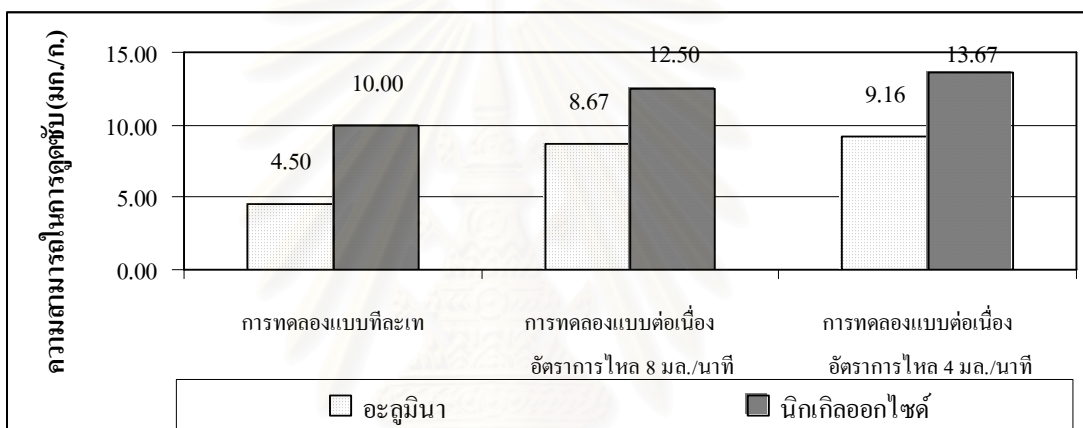
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนด์และสังกะสีที่ปริมาณเบดต่างๆ ในการทดลองแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นไซยาไนด์ : โครเมียม : สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.27 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง

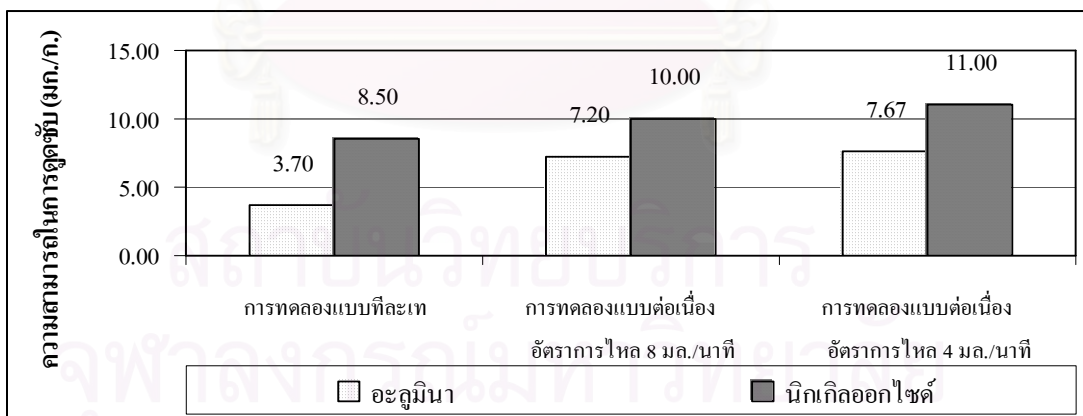
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจาก 8 เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น 2 เท่า ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ของคอลัมน์อะลูมินาและคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 5.6 และ 9.36 ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของคอลัมน์อะลูมินาและคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 6.5 และ 10 ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลจาก 8 เป็น 4 มิลลิลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการดูดซับไซยาไนด์และประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีมีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ความเข้มข้นสังกะสีหลังจากผ่านคอลัมน์อะลูมินามีค่าต่ำสุดเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ 1 ปริมาตรเบด สำหรับอัตราการไหลทั้ง 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์มีค่าต่ำสุด 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาทีที่มีปริมาตร 22 ปริมาตรเบด ที่ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีที่มีปริมาตร 55 ปริมาตรเบด สามารถสรุปได้ว่า นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีดีกว่าอะลูมินา พิจารณาคอลัมน์นิกเกิลออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความ

เข้มข้นไซยาไนด์ เนื่องจาก ระบบมีสังกะสีในรูปของ  $Zn(OH)_3^-$  ร้อยละ 10 และ  $Zn(CN)_3^-$  ร้อยละ 90 ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสังกะสีในรูป  $Zn(CN)_3^-$  จึงทำให้ความเข้มข้นไซยาไนด์เพิ่มขึ้นในอัตราที่เดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสังกะสี และเมื่อวิเคราะห์สัดส่วนโมลไซยาไนด์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์ที่จุดเบรคทฤษฎี พบว่ามีค่าประมาณ 3:1 ใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบทีละเทที่ผ่านมา ส่วนปริมาณเบดที่จุดเบรคทฤษฎีของไซยาไนด์และสังกะสีมีค่าใกล้เคียงกันที่ 305 ปริมาตรเบดสำหรับอัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และ 327 ปริมาตรเบดสำหรับอัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การดูดซับไซยาไนด์ของนิกเกิลออกไซด์เป็นการดูดซับจากรูปสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ เพราะเมื่อการดูดซับสังกะสีถึงจุดเบรคทฤษฎีแล้วมีผลทำให้ การดูดซับไซยาไนด์ถึงจุดเบรคทฤษฎีพร้อมกัน



ก. ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์



ข. ความสามารถในการดูดซับสังกะสี

รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ในการทดลองแบบทีละเทและแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นไซยาไนด์: โครเมียม:สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย ก. ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์ และ ข. ความสามารถในการดูดซับสังกะสี

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. กรณีน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยไซยาไนด์หรือสังกะสีเพียงอย่างเดียว นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าอะลูมินา แต่ค่าความสามารถในการดูดซับของตัวกลางทั้งสองชนิดมีค่าต่ำมาก ทำให้นิกเกิลออกไซด์และอะลูมินาไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ดูดซับไซยาไนด์หรือสังกะสีเพียงอย่างเดียว การเปรียบเทียบการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7 และ 12 พบว่าอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีในรูปของประจุบวกที่พีเอช 7 และประจุลบที่พีเอช 12 ได้ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีประมาณ 1.50 มิลลิกรัมต่อกรัมอะลูมินาและ 2.70 มิลลิกรัมต่อกรัมนิกเกิลออกไซด์ ตามลำดับ โดยประจุไม่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีของนิกเกิลออกไซด์

2. กรณีน้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์และสังกะสี นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีมากกว่าอะลูมินา ความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์สามารถดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ได้ดีกว่าไซยาไนด์ไอออน ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่มากเกินพอ โดยมีปริมาณมากเกินกว่าปริมาณที่ทำให้สังกะสีสามารถละลายน้ำได้ ปริมาณส่วนเกินนี้มีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ซึ่งอัตราส่วนไซยาไนด์:สังกะสี 100:100 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลออกไซด์จะมีความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีได้สูงสุด คือ 9.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 15.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลสัดส่วน โมลไซยาไนด์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์เป็นไปตามรูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่มีในระบบ โดยที่อัตราส่วนไซยาไนด์:สังกะสี เท่ากับ 50:100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 1.3:1 อัตราส่วน 100:100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 1.6:1 และอัตราส่วน 200:100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 3:1 ตามลำดับ

3. ในกรณีน้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์และโครเมียม นิกเกิลออกไซด์และอะลูมินาไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียม ที่สภาวะสมดุล สัดส่วนโมลไซยาไนด์ต่อโครเมียมที่ถูกดูดซับบนตัวกลางทั้งสองไม่พบความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างไซยาไนด์และโครเมียม แต่ในกรณีน้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี พบว่า โครเมียมตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสาเหตุที่ผลการทดลองทั้งสองกรณีแตกต่างกัน ไม่สามารถอธิบายได้จากงานวิจัยนี้ แต่ในทางทฤษฎีโครเมียมไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโครเมียมไซยาไนด์ได้

4. กรณีน้ำเสียประกอบด้วยไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสี นิกเกิลออกไซด์และอะลูมินาให้ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีเหมือนกับการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสี เนื่องจากสภาวะดังกล่าว โครเมียมเกิดการตกตะกอนจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ระบบเหลือเพียงความเข้มข้นของไซยาไนด์และสังกะสีเท่านั้น

5. การทดลองแบบต่อเนื่อง อัตราการไหล 8 และ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับพบว่า นิกเกิลออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีมากกว่าอะลูมินา เวลาสัมผัสที่มากขึ้นมีผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ความเข้มข้นไซยาไนด์ที่มากเกินไปมีผลรบกวนการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ที่จุดเบรคทรูสัดส่วนโมลไซยาไนด์ต่อสังกะสีที่ถูกดูดซับบนนิกเกิลออกไซด์เป็นไปตามรูปของสารประกอบเชิงซ้อนสังกะสีไซยาไนด์ที่มีในระบบและมีค่าใกล้เคียงการทดลองแบบที่ละเท

6. จากการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีของอะลูมินาและนิกเกิลออกไซด์ พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณนิกเกิลออกไซด์บนตัวกลางให้มีมากขึ้น

7. การนำนิกเกิลออกไซด์ไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะ ควรมีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของนิกเกิลออกไซด์ด้วยการเพิ่มปริมาณนิกเกิลออกไซด์บนตัวกลางให้มีมากขึ้น ในขณะที่ลักษณะน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนโลหะไซยาไนด์ ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้นิกเกิลออกไซด์ในการดูดซับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณนิกเกิลออกไซด์บนตัวกลางกับประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์
2. ศึกษาชนิดของตัวรองรับที่เหมาะสมในการเตรียมตัวกลางนิกเกิลออกไซด์สำหรับการดูดซับไซยาไนด์และโลหะหนักตัวอื่นๆ
3. ศึกษาการวิธีเตรียมตัวกลางนิกเกิลออกไซด์บนตัวรองรับที่รวดเร็วไม่ซับซ้อนปลอดภัยและประหยัด สำหรับนำมาเป็นตัวกลางในการดูดซับไซยาไนด์และโลหะหนักตัวอื่นๆ
4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักตัวอื่นๆ โดยใช้นิกเกิลออกไซด์เป็นตัวกลางในการดูดซับ

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม. มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 4.

กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2543.  
คลเดช ตั้งตระการพงษ์. การควบคุมมลพิษในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยวิธีการลดปริมาณของเสียและการบำบัดด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2539.

ธนพร เหล่าไฟโรจน์. การกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน : กรณีของคอตมันน์แบบเรซินรวม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ประยูร ฟองสทิษฐ์กุล, ชลาศัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และ วิสิทธิ์ สุขป้อม. การบำบัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสี โดยวิธีออกซิเดชันด้วยสารโปตัสเซียมเปอร์มังกานेट. วารสารสาธารณสุขศาสตร์ ปีที่ 29 ฉบับที่ 2 (2542): 38-46.

พิชาญ ตันติชัยปกรณ์. การกำจัดสารประกอบปรอทและอาร์เซนิกออกจากไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยการดูดซับนิกเกิลคอปเปอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมีบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

มันสิน ตันกุลเวสม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

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

สุชาดา ไชยสวัสดิ์, โสภิตา บุญอนเนกทรัพย์, สรเสกข์ กุลมัย, ชาญชัย จิตติพันธ์พรณี และ จิระพันธ์ เนื่องจากนิล. การศึกษาคุณสมบัติน้ำทิ้งในโรงงานชุบโลหะ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2542.

อภิสิทธิ์ สายสาทรายย์. ผลของตัวแปรที่มีต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/อะลูมินาโดยวิธีอิมเพรกเนชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.



อุดมชัย กฤษณีไพญุสย์. การประยุกต์ใช้ตัวดูดซับนิกเกิลในรูปแบบต่างๆ สำหรับการดูดซับสารประกอบปรอทจากไฮโดรคาร์บอนเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544

อู่แก้ว เอี่ยมสำอาง. ผลของอัตราส่วนการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยวิธีอัลคาไลน์ คลอรีเนชัน และปฏิกิริยาการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

### ภาษาอังกฤษ

- Adhoum, N.; and Monser, L. Removal of cyanide from aqueous solution using impregnated activated carbon. Chemical Engineering and Processing 41 (2002): 17-21.
- Baumgarten, E.; and Dusing, U. K. Sorption on metal ions on alumina. JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE 194 (1997): 1-9.
- Benfield, L. D.; Judkins, J. F., Jr.; and Weand, B. L. Process chemistry for water and wastewater treatment. NJ: Prentice-Hall, 1982.
- Benito, Y.; and Ruiz, M. L. Reverse osmosis applied to metal finishing wastewater. Desalination 142 (2002): 229-234.
- Benjamin, M. M. Water chemistry. McGraw-Hill, 2002
- Bond, B. C. Heterogeneous catalysis principles and applications. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- Cheng, W. P.; Huang, C.; and Pan, J. R. Adsorption behavior of iron-cyanide onto  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interface: A coagulation approach. Journal of Colloid and Interface Science 213 (1999): 204-207.
- Csoban, K.; and Joo, P. Sorption of Cr(III) on silica and aluminium oxide: Experiments and modelling. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 151 (1998): 97-112.
- Eckenfelder, W. W., Jr. Industrial water pollution control. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000.
- Gates, B. C. Catalytic chemistry. New York: John Wiley and Sons, 1991
- Kasprzyk, B.; and Hordern. Chemistry of alumina, reactions in aqueous solution and its application in water treatment. Advances in Colloid and Interface Science 110 (2004): 19-48.

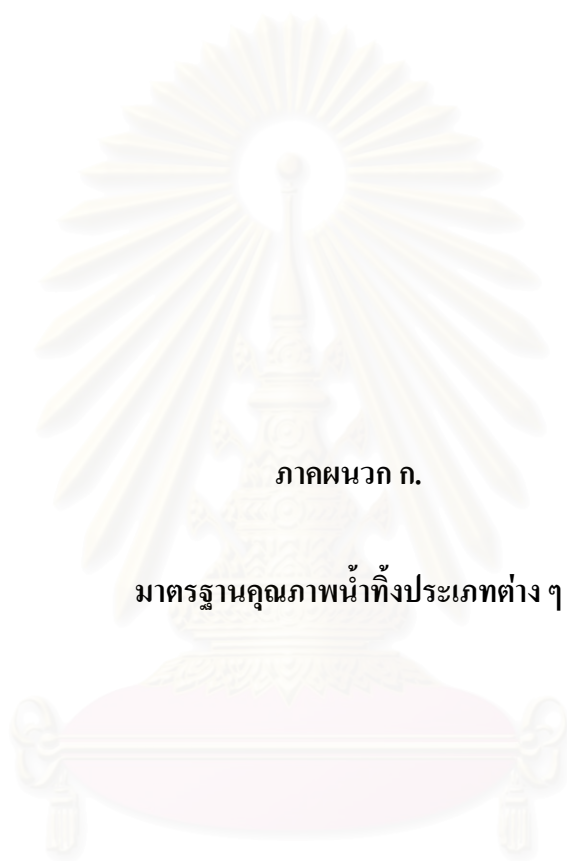


- Koivula, R.; Lehto, J.; PaJo, L.; Gale, T.; and Leinonen, H. Purification of metal plating rinse waters with chelating ion exchangers. Hydrometallurgy 56 (2000): 93 – 108.
- Lee, S. Y.; and Aris, R. The distribution of active ingredients in supported catalyst prepared by impregnation. Catal. Rev. Sci. Eng. 27 (1985): 207-340.
- Li, W. D.; Li. Y. W.; Qin, Z. F.; and Chen, S. Y. Theoretical prediction and experimental validation of the egg-shell distribution of Ni for supported Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. Chemical Engineering Science 49 (1994): 4889-4895.
- Monser, L.; and Adhoum, N. Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium and cyanide from wastewater. Separation and Purification Technology 26 (2002): 137-146.
- 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.
- Shaobin, W.; and Lu, G. Q. M. CO<sub>2</sub> reforming of methane on Ni catalysts: Effects of the support phase and preparation technique. Applied Catalysis B: Environment 16 (1998): 267-277.
- Stiles, A. B. Catalyst manufacture laboratory and commercial preparation. New York: Marcel Dekker Inc, 1983.
- Trainor, T. P.; Gordon, E. B. Jr.; and Parks, G. A. Adsorption and precipitation of aqueous Zn(II) on alumina powders. Journal of Colloid and Interface Science 231 (2000): 359-372.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งประเภทต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1      มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105° ซ. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°ซ.	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนต์	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography



ตารางที่ ก-2      มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
1. สี (Color)	ปลาตินัมโคบอลด์	50
2. ความขุ่น (Turbidity)	หน่วยความขุ่น (JTU)	50
3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.0-9.2
4. ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล.	2,000
5. บีโอดี (BOD)	มก./ล.	40
6. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	มก./ล.	5.0
7. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	มก./ล.	5.0
8. ทองแดง (Cu)	มก./ล.	1.5
9. สังกะสี (Zn)	มก./ล.	15.0
10. โครเมียม (Cr)	มก./ล.	2.0
11. สารหนู (As)	มก./ล.	0.05
12. ไซยาไนต์ (CN)	มก./ล.	0.2
13.ปรอท (Hg)	มก./ล.	0.002
14. ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.1
15. แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	0.1
16. แบเรียม (Ba)	มก./ล.	1.0

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 66 ลงวันที่ 27 มิถุนายน 2521



ตารางที่ ก-3      มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำ  
ชลประทานในเขตพื้นที่ชลประทาน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5
2. ความนำไฟฟ้า	ไมโคร โมล/ซม.	2,000
3. ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	มก./ล.	1,300
4. บีโอดี (BOD5) มิลลิกรัม/ลิตร	มก./ล.	20
5. สารแขวนลอย (SS)	มก./ล.	30
6. เปอร์มังกานต (PV)	มก./ล.	6.0
7. ซัลไฟด์คิดเทียบเป็น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	มก./ล.	1.0
8. ไซยาไนต์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจน ไซยาไนต์ (cyanide as HCN)	มก./ล.	0.2
9. น้ำมันและไขมัน (Fat ,Oil and Grease)	มก./ล.	5.0
10. ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	มก./ล.	1.0
11. ฟีนอลและ/หรือครีโซล (Phenol& Cresols)	มก./ล.	1.0
12. คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	มก./ล.	1.0
13. ขาฆ่าแมลง	มก./ล.	ไม่มีเลย
14. สารกัมมันตรังสี	มก./ล.	ไม่มีเลย
15. สี และกลิ่น (Colour and Odour)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
16. น้ำมันทาร์ (Tar)	-	ไม่มีเลย
17. โลหะหนัก - สังกะสี(Zn) - โครเมียม(Cr) - อาร์เซนิก(As) - ทองแดง(Cu) - ปรอท(Hg) - แคดเมียม(Cd)	มก./ล.	5.0 0.3 0.25 1.0 0.005 0.03

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำ  
ชลประทานในเขตพื้นที่ชลประทาน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
17. โลหะหนัก (ต่อ)		
- แบเรียม(Ba)		1.0
- ซีลีเนียม(Se)		0.02
- ตะกั่ว(Pb)	มก./ล.	0.1
- นิกเกิล(Ni)		0.2
- แมงกานีส(Mn)		0.5

แหล่งที่มา : คำสั่งกรมชลประทานที่ 883/2532 เรื่อง การป้องกันและการแก้ไขการระบายน้ำทิ้งที่มีคุณภาพต่ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทานลงวันที่ 19 ธันวาคม 2532

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ  
และผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ निकเกิลออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะบริเวณวงแหวนแสงประทีป  
เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 ธันวาคม 2546

โรงงาน ที่	ประเภท การชุบ	จุดเก็บ ตัวอย่าง	พีเอช		ไซยาไนด์ อิสระ มก./ล.	ทองแดง มก./ล.	นิกเกิล มก./ล.	โครเมียม มก./ล.	สังกะสี มก./ล.
			ก่อน ปรับ	หลัง ปรับ					
1	นิกเกิล+ โครเมียม	บ่อรวม	6	12	11.88	0.88	134.33	4.75	1.27
2	โครเมียม	บ่อรวม	7	12	0.00	0.06	1.87	3.52	0.10
3	โครเมียม	บ่อรวม	1	11	0.00	7.19	0.24	4.12	0.75
4	สังกะสี	บ่อรวม	1	11	3.69	3.82	3.35	24.96	815.22
5	สังกะสี	บ่อรวม	7	11	90.14	0.51	0.27	21.61	256.10
6	นิกเกิล	บ่อรวม	3	11	15.67	7.46	15.70	3.49	2.67
7	นิกเกิล+ โครเมียม	บ่อรวม	2	11	8.97	15.75	49.86	1.87	144.39
8	สังกะสี	บ่อรวม	4	11	0.00	0.77	17.18	0.72	283.52
9	ทองแดง +นิกเกิล +โครเมียม	น้ำล้าง ทั่วไป	6	11	0.00	3.76	8.91	0.00	0.98
		น้ำล้าง ไซยาไนด์	10	11	251.44	212.33	0.20	0.00	0.18
		น้ำล้าง โครเมียม	6	11	3.36	0.81	23.74	3.96	0.14

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะบริเวณวงแหวนแสงประทีป  
เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

เก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 มกราคม 2547

โรงงาน ที่	ประเภท การชุบ	จุดเก็บ ตัวอย่าง	พีเอช		ไซยาไนด์ อิสระ มก./ล.	ทองแดง มก./ล.	นิกเกิล มก./ล.	โครเมียม มก./ล.	สังกะสี มก./ล.
			ก่อน ปรับ	หลัง ปรับ					
1	นิกเกิล+ โครเมียม	บ่อรวม	5	11	56.16	2.36	63.88	2.69	39.56
2	โครเมียม	บ่อรวม	6	11	0.00	0.10	1.62	5.33	0.14
3	โครเมียม	บ่อรวม	1	12	0.21	6.94	0.23	123.26	0.51
4	สังกะสี	บ่อรวม	5	12	31.57	0.68	0.09	138.57	130.18
5	สังกะสี	บ่อรวม	2	11	17.73	6.98	6.76	249.36	2310.70
6	นิกเกิล	บ่อรวม	4	11	49.21	16.63	32.74	6.55	1.74
7	นิกเกิล+ โครเมียม	บ่อรวม	6	11	0.00	2.62	9.05	41.20	1.26
8	สังกะสี	บ่อรวม	5	12	0.28	0.84	1.38	0.00	37.49
9	ทองแดง + นิกเกิล +โครเมียม	น้ำล้าง ทั่วไป	7	11	0.01	15.75	13.17	0.00	0.99
		น้ำล้าง ไซยาไนด์	7	11	519.80	212.90	0.44	0.00	0.44
		น้ำล้าง โครเมียม	7	12	221.74	57.31	33.53	2.43	1.09

แหล่งที่มา : ชนพร เหล่าไพโรจน์ (2548)

ตารางที่ ข-2 การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลบนตัวกลางนิกเกิลออกไซด์

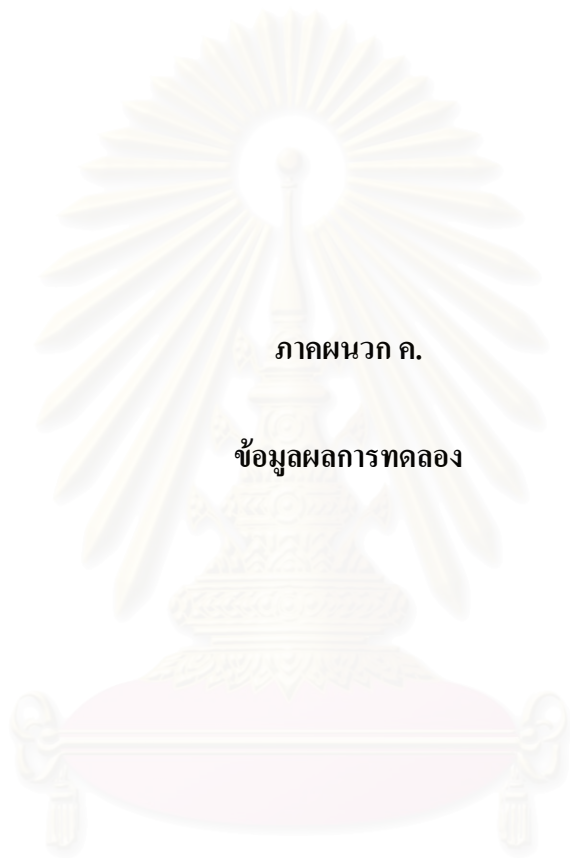
ตัวอย่าง	ปริมาณนิกเกิล (มก./ล)	ร้อยละ
1	115	2.30
2	108	2.17
3	109	2.19
เฉลี่ย	111	2.22

หมายเหตุ ปริมาณตัวอย่างนิกเกิลออกไซด์ 0.50 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข-3 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุที่พื้นผิวของนิกเกิลออกไซด์

อะลูมินา				นิกเกิลออกไซด์			
พีเอช	[HCl] (มล.)	[NaOH] (มล.)	ความหนาแน่นประจุ (คูลอมน์/ตร.ม.)	พีเอช	[HCl] (มล.)	[NaOH] (มล.)	ความหนาแน่นประจุ (คูลอมน์/ตร.ม.)
3.26	10.00	—	4.12E+00	—	10.00	—	—
5.41	5.00	—	3.65E+00	5.36	5.00	—	3.84E+00
6.91	1.00	—	7.34E-01	7.49	1.00	—	7.75E-01
7.22	0.50	—	3.68E-01	7.84	0.50	—	3.91E-01
7.32	0.00	0.00	9.46E-04	8.05	0.00	0.00	6.81E-03
7.48	—	0.50	-3.66E-01	8.26	—	0.50	-3.76E-01
7.76	—	1.00	-7.31E-01	8.45	—	1.00	-7.56E-01
8.23	—	2.00	-1.46E+00	8.83	—	2.00	-1.51E+00
9.18	—	5.00	-3.58E+00	9.58	—	5.00	-3.63E+00
10.60	—	10.00	-5.03E+00	10.70	—	10.00	-4.64E+00





ภาคผนวก ค.

ข้อมูลผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	50.221	50.121	50.018	50.120	0.102	50.221	50.121	50.018	50.120	0.102
1	50.101	50.011	49.952	50.021	0.075	49.201	49.442	49.003	49.215	0.220
2	49.502	49.480	49.773	49.585	0.163	49.344	49.011	49.412	49.256	0.215
4	49.302	49.476	48.990	49.256	0.246	48.802	48.967	47.970	48.580	0.534
6	49.286	49.483	49.392	49.387	0.099	48.041	48.864	48.954	48.620	0.503
8	48.950	49.212	49.005	49.056	0.138	48.045	48.085	48.132	48.087	0.044
10	48.979	49.324	49.071	49.125	0.179	47.135	47.931	47.740	47.602	0.416
12	49.112	48.863	49.201	49.059	0.175	47.883	47.958	48.114	47.985	0.118
24	48.615	48.875	48.771	48.754	0.131	46.808	46.025	46.501	46.445	0.395
48	48.714	48.558	48.248	48.507	0.237	45.427	45.712	45.017	45.385	0.349
72	49.722	48.889	48.011	48.874	0.856	45.876	45.341	44.038	45.085	0.945

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 100 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	98.585	98.893	99.455	98.978	0.441	98.585	98.893	99.455	98.978	0.441
1	98.021	98.608	98.008	98.212	0.343	98.224	98.025	98.344	98.198	0.161
2	98.204	98.091	98.012	98.102	0.097	97.535	97.227	98.801	97.854	0.834
4	97.859	97.925	97.178	97.654	0.414	97.534	97.854	97.586	97.658	0.172
6	96.984	97.025	97.753	97.254	0.433	96.361	96.527	96.007	96.298	0.266
8	96.587	96.192	96.975	96.585	0.392	96.054	96.007	96.608	96.223	0.334
10	96.751	96.742	95.881	96.458	0.500	95.484	95.151	96.987	95.874	0.978
12	96.003	96.781	96.968	96.584	0.512	95.259	95.055	95.447	95.254	0.196
24	96.983	96.437	96.934	96.785	0.302	93.897	93.124	93.238	93.420	0.417
48	96.584	96.548	96.842	96.658	0.160	91.254	92.211	92.104	91.856	0.524
72	96.258	96.589	96.608	96.485	0.197	91.554	91.225	92.179	91.653	0.485

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	198.982	198.548	198.231	198.587	0.377	198.982	198.548	198.231	198.587	0.377
1	197.832	197.989	198.254	198.025	0.213	197.916	197.225	198.254	197.798	0.524
2	197.258	197.748	198.317	197.774	0.530	196.573	196.987	197.008	196.856	0.245
4	196.853	197.615	196.487	196.985	0.575	195.008	194.507	195.547	195.021	0.520
6	196.774	196.574	194.728	196.025	1.128	194.854	194.332	194.388	194.525	0.287
8	195.587	195.227	195.854	195.556	0.315	192.987	192.897	193.885	193.256	0.546
10	195.653	195.020	195.081	195.251	0.349	192.584	192.897	190.776	192.086	1.145
12	195.927	194.815	194.334	195.025	0.817	192.086	192.024	191.446	191.852	0.353
24	195.157	195.574	195.038	195.256	0.281	189.825	189.784	188.465	189.358	0.774
48	195.978	195.935	195.705	195.873	0.147	189.826	188.283	189.745	189.285	0.868
72	195.061	195.187	195.619	195.289	0.293	189.547	189.745	189.461	189.584	0.146

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	9.48	10.54	9.17	9.73	0.72	9.48	10.54	9.17	9.73	0.72
1	8.13	8.53	7.92	8.19	0.31	7.42	7.81	7.69	7.64	0.20
2	7.49	7.58	7.65	7.57	0.08	5.32	5.41	6.85	5.86	0.86
4	7.97	7.39	7.03	7.46	0.47	4.98	4.85	5.28	5.04	0.22
6	7.55	7.69	7.90	7.71	0.18	4.81	4.87	4.18	4.62	0.38
8	6.55	7.25	7.09	6.96	0.37	3.42	4.92	4.53	4.29	0.78
10	6.22	6.99	7.20	6.80	0.52	4.33	4.72	3.91	4.32	0.41
12	7.12	6.63	6.45	6.73	0.35	4.25	4.12	3.45	3.94	0.43
24	5.74	6.23	5.53	5.83	0.36	1.11	1.83	1.42	1.45	0.36
48	5.51	4.80	5.09	5.13	0.36	0.92	0.94	0.88	0.91	0.03
72	4.89	4.95	4.43	4.76	0.28	0.70	0.81	0.71	0.74	0.06

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 25 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	25.64	25.97	25.31	25.64	0.33	25.64	25.97	25.31	25.64	0.33
1	22.98	23.14	23.04	23.05	0.08	21.66	21.87	21.27	21.60	0.30
2	22.58	22.98	23.13	22.90	0.28	21.05	21.08	21.67	21.27	0.35
4	23.87	23.69	21.84	23.13	1.12	21.82	20.38	21.03	21.08	0.72
6	22.13	22.98	21.25	22.12	0.87	19.89	20.52	19.60	20.00	0.47
8	22.01	21.83	21.50	21.78	0.26	21.05	21.01	21.62	21.23	0.34
10	21.07	21.43	20.65	21.05	0.39	19.29	18.97	18.71	18.99	0.29
12	21.05	21.87	21.67	21.53	0.43	17.03	16.92	17.11	17.02	0.10
24	20.15	20.38	20.04	20.19	0.17	12.07	12.85	11.83	12.25	0.53
48	19.15	19.55	19.93	19.54	0.39	11.25	11.83	11.06	11.38	0.40
72	18.62	18.81	19.51	18.98	0.47	11.28	11.17	11.09	11.18	0.10



ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 50 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	51.10	50.10	50.80	50.67	0.51	51.10	50.10	50.80	50.67	0.51
1	48.00	47.80	48.60	48.13	0.42	44.90	46.70	45.70	45.77	0.90
2	47.20	45.00	46.00	46.07	1.10	45.30	45.00	46.50	45.60	0.79
4	43.70	44.40	44.80	44.30	0.56	42.50	41.80	41.10	41.80	0.70
6	46.20	47.10	46.70	46.67	0.45	42.90	42.00	43.40	42.77	0.71
8	45.10	43.70	44.50	44.43	0.70	39.50	40.70	40.10	40.10	0.60
10	44.10	44.80	44.00	44.30	0.44	41.10	39.80	41.90	40.93	1.06
12	43.90	43.50	44.70	44.03	0.61	37.60	38.90	37.40	37.97	0.81
24	44.00	43.20	44.50	43.90	0.66	33.60	35.30	34.80	34.57	0.87
48	43.10	44.00	44.30	43.80	0.62	33.70	34.80	34.90	34.47	0.67
72	43.40	44.40	43.90	43.90	0.50	34.00	34.80	34.90	34.57	0.49

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 75 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	74.90	75.10	75.70	75.23	0.42	74.90	75.10	75.70	75.23	0.42
1	73.00	73.90	72.50	73.13	0.71	70.10	70.80	69.70	70.20	0.56
2	72.00	70.50	71.00	71.17	0.76	68.90	68.40	69.10	68.80	0.36
4	69.10	68.70	68.10	68.63	0.50	67.10	66.20	67.80	67.03	0.80
6	69.20	68.30	68.90	68.80	0.46	66.40	65.80	66.00	66.07	0.31
8	70.70	70.10	69.10	69.97	0.81	65.90	65.10	65.50	65.50	0.40
10	66.80	67.00	67.70	67.17	0.47	63.60	63.90	63.10	63.53	0.40
12	70.50	70.10	70.80	70.47	0.35	62.50	61.30	62.00	61.93	0.60
24	67.80	67.00	67.30	67.37	0.40	58.30	59.40	59.10	58.93	0.57
48	66.00	67.10	67.90	67.00	0.95	58.00	59.20	58.50	58.57	0.60
72	66.90	67.20	67.60	67.23	0.35	58.30	58.00	57.80	58.03	0.25

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 7

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	100.20	100.50	99.70	100.13	0.40	100.20	100.50	99.70	100.13	0.40
1	99.80	99.20	98.50	99.17	0.65	98.60	98.10	97.80	98.17	0.40
2	98.40	99.50	98.80	98.90	0.56	91.60	91.00	90.90	91.17	0.38
4	98.00	98.70	98.30	98.33	0.35	83.70	84.20	83.00	83.63	0.60
6	95.70	95.90	95.10	95.57	0.42	84.50	84.00	84.80	84.43	0.40
8	94.80	94.20	94.60	94.53	0.31	82.00	82.80	82.30	82.37	0.40
10	92.80	93.30	94.90	93.67	1.10	82.10	81.70	81.90	81.90	0.20
12	92.90	92.50	92.20	92.53	0.35	80.90	81.40	82.70	81.67	0.93
24	91.90	91.20	91.50	91.53	0.35	81.00	81.50	80.70	81.07	0.40
48	91.20	91.90	91.00	91.37	0.47	80.50	81.80	81.50	81.27	0.68
72	91.10	91.60	91.90	91.53	0.40	81.70	81.00	81.60	81.43	0.38

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0.00	9.81	9.75	9.32	9.63	0.27	9.81	9.75	9.32	9.63	0.27
1.00	8.11	8.18	7.98	8.09	0.10	7.89	7.42	8.08	7.80	0.34
2.00	7.93	7.84	8.07	7.95	0.12	6.85	6.78	5.81	6.48	0.58
4.00	7.54	7.58	7.48	7.53	0.05	5.18	5.78	5.97	5.64	0.41
6.00	7.03	7.89	6.72	7.21	0.61	4.77	4.84	4.25	4.62	0.32
8.00	7.08	6.24	7.63	6.98	0.70	4.76	4.75	4.70	4.74	0.03
10.00	6.88	6.87	6.48	6.74	0.23	4.05	4.87	3.23	4.05	0.82
12.00	5.58	6.68	6.48	6.25	0.59	3.85	3.04	4.05	3.65	0.53
24.00	5.98	5.71	5.82	5.84	0.14	0.67	0.48	0.46	0.54	0.12
48.00	5.60	5.97	5.06	5.54	0.46	0.48	0.47	0.42	0.46	0.03
72.00	5.89	5.02	5.04	5.32	0.50	0.34	0.32	0.38	0.35	0.03

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 25 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0.00	11.85	11.14	11.08	11.36	0.43	11.85	11.14	11.08	11.36	0.43
1.00	10.25	10.05	9.94	10.08	0.16	8.79	8.44	7.74	8.32	0.53
2.00	9.54	9.48	10.33	9.78	0.47	7.04	7.78	7.99	7.60	0.50
4.00	9.65	9.02	8.45	9.04	0.60	6.85	5.89	5.50	6.08	0.69
6.00	8.45	8.74	8.46	8.55	0.16	5.12	5.54	5.94	5.53	0.41
8.00	7.98	7.95	7.42	7.78	0.32	4.54	4.25	4.85	4.55	0.30
10.00	6.71	7.89	6.89	7.16	0.64	4.05	4.36	4.98	4.46	0.47
12.00	6.98	7.62	6.04	6.88	0.79	4.38	4.25	4.55	4.39	0.15
24.00	6.02	6.08	7.27	6.46	0.71	3.54	3.08	2.67	3.10	0.44
48.00	6.02	6.67	6.28	6.32	0.33	2.45	2.68	2.48	2.54	0.13
72.00	6.58	6.17	5.85	6.20	0.37	2.24	2.02	1.98	2.08	0.14

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล.									
	อะลูมินา					นิกเกิลออกไซด์				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0.00	11.11	11.54	10.57	11.07	0.49	11.11	11.54	10.57	11.07	0.49
1.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
2.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
4.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
6.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
8.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
10.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
12.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
24.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
48.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00
72.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.00



ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	50.023	50.120	50.045	50.063	0.05	118.50	119.10	117.90	118.50	0.60	50.023	50.120	50.045	50.063	0.05	118.50	119.10	117.90	118.50	0.60
0	50.023	50.120	50.045	50.063	0.05	50.50	51.80	51.60	51.30	0.70	50.023	50.120	50.045	50.063	0.05	50.50	51.80	51.60	51.30	0.70
2	47.281	46.945	46.254	46.827	0.52	43.80	43.30	44.00	43.70	0.36	36.541	36.024	36.895	36.487	0.44	18.70	19.30	20.00	19.33	0.65
4	45.121	45.146	45.675	45.314	0.31	41.20	40.10	40.20	40.50	0.61	34.854	34.548	34.134	34.512	0.36	14.10	13.80	15.10	14.33	0.68
6	47.210	47.587	47.214	47.337	0.22	38.50	38.70	38.00	38.40	0.36	32.478	32.875	32.101	32.485	0.39	13.20	12.50	12.80	12.83	0.35
8	46.950	46.970	46.340	46.753	0.36	36.80	36.40	37.20	36.80	0.40	31.256	31.897	31.848	31.667	0.36	11.20	10.80	11.90	11.30	0.56
10	46.792	46.810	46.210	46.604	0.34	34.70	35.00	35.90	35.20	0.62	30.982	30.075	30.014	30.357	0.54	10.60	11.40	10.90	10.97	0.40
24	41.985	41.680	42.050	41.905	0.20	32.70	33.90	32.10	32.90	0.92	27.485	27.580	27.715	27.593	0.12	7.20	7.00	7.40	7.20	0.20
48	41.768	41.625	42.174	41.856	0.28	31.40	32.10	32.50	32.00	0.56	25.892	25.985	25.542	25.806	0.23	6.08	6.02	6.31	6.14	0.15
72	41.245	41.402	41.853	41.500	0.32	32.80	32.00	32.70	32.50	0.44	27.014	27.550	27.473	27.346	0.29	7.08	7.15	6.45	6.89	0.39

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	104.154	104.854	104.158	104.389	0.40	100.10	100.60	99.80	100.17	0.40	104.154	104.854	104.158	104.389	0.40	100.10	100.60	99.80	100.17	0.40
0	104.154	104.854	104.158	104.389	0.40	100.10	100.60	99.80	100.17	0.40	104.154	104.854	104.158	104.389	0.40	100.10	100.60	99.80	100.17	0.40
2	101.424	101.851	101.975	101.750	0.29	89.80	89.90	90.50	90.07	0.38	92.850	92.070	92.431	92.450	0.39	68.90	67.40	68.90	68.40	0.87
4	98.015	98.653	98.052	98.240	0.36	85.70	84.40	85.00	85.03	0.65	85.554	85.621	85.506	85.560	0.06	63.10	63.50	63.00	63.20	0.26
6	95.584	95.487	95.298	95.456	0.15	83.50	84.20	82.10	83.27	1.07	83.529	83.950	83.140	83.540	0.41	60.90	59.80	60.10	60.27	0.57
8	94.668	94.581	94.125	94.458	0.29	80.20	81.10	81.00	80.77	0.49	78.884	78.754	78.312	78.650	0.30	57.80	57.10	56.10	57.00	0.85
10	93.054	93.563	93.152	93.256	0.27	78.60	78.10	78.90	78.53	0.40	76.282	76.053	76.025	76.120	0.14	59.97	59.47	58.98	59.47	0.50
24	90.620	90.954	90.987	90.854	0.20	76.50	76.20	77.90	76.87	0.91	72.458	72.014	71.648	72.040	0.41	50.70	50.10	51.10	50.63	0.50
48	90.898	90.975	90.775	90.883	0.10	75.90	75.50	76.50	75.97	0.50	71.589	71.890	72.394	71.958	0.41	49.70	50.30	49.60	49.87	0.38
72	91.643	91.014	91.105	91.254	0.34	76.00	76.20	76.60	76.27	0.31	72.154	72.785	71.480	72.140	0.65	51.10	50.00	51.50	50.87	0.78

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	198.578	198.589	198.665	198.611	0.05	99.90	99.70	100.90	100.17	0.64	198.578	198.589	198.665	198.611	0.05	99.90	99.70	100.90	100.17	0.64
0	198.578	198.589	198.665	198.611	0.05	99.90	99.70	100.90	100.17	0.64	198.578	198.589	198.665	198.611	0.05	99.90	99.70	100.90	100.17	0.64
2	194.586	194.235	194.858	194.560	0.31	96.00	97.00	96.70	96.57	0.51	187.852	188.554	188.854	188.420	0.51	84.90	84.80	84.30	84.67	0.32
4	194.853	193.812	194.025	194.230	0.55	95.90	96.90	97.20	96.67	0.68	185.877	185.360	185.024	185.420	0.43	87.30	87.00	87.80	87.37	0.40
6	193.011	193.064	192.985	193.020	0.04	95.20	95.70	95.80	95.57	0.32	180.021	180.614	180.415	180.350	0.30	83.60	83.10	82.90	83.20	0.36
8	192.289	192.435	192.085	192.270	0.18	94.80	95.10	95.80	95.23	0.51	178.598	178.985	178.368	178.650	0.31	83.60	84.80	83.20	83.87	0.83
10	191.887	190.896	191.664	191.482	0.52	93.90	93.00	93.50	93.47	0.45	176.502	176.875	176.092	176.490	0.39	83.20	83.00	83.60	83.27	0.31
24	187.878	187.254	187.954	187.695	0.38	91.80	92.10	91.60	91.83	0.25	171.674	171.895	171.986	171.852	0.16	77.70	78.00	78.80	78.17	0.57
48	187.058	187.084	188.610	187.584	0.89	91.10	89.70	91.80	90.87	1.07	172.365	171.895	171.925	172.062	0.26	77.90	76.90	77.10	77.30	0.53
72	187.554	187.658	187.078	187.430	0.31	91.10	90.10	90.30	90.50	0.53	171.585	171.141	171.025	171.250	0.30	77.50	76.60	77.00	77.03	0.45

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์และโครเมียมที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนต์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	50.461	50.254	50.605	50.440	0.18	21.08	21.58	20.72	21.13	0.43	50.461	50.254	50.605	50.440	0.18	21.08	21.58	20.72	21.13	0.43
0	50.461	50.254	50.605	50.440	0.18	21.08	21.58	20.72	21.13	0.43	50.461	50.254	50.605	50.440	0.18	21.08	21.58	20.72	21.13	0.43
2	48.870	49.358	49.012	49.080	0.25	20.14	21.02	19.56	20.24	0.74	48.687	48.457	49.425	48.856	0.51	20.54	20.68	20.06	20.43	0.33
4	49.021	49.002	48.636	48.886	0.22	18.84	19.95	20.45	19.75	0.82	48.052	48.667	48.042	48.254	0.36	20.18	20.08	20.34	20.20	0.13
6	48.025	48.958	48.886	48.623	0.52	20.04	19.84	18.45	19.44	0.87	48.077	47.854	48.145	48.025	0.15	19.41	19.12	19.04	19.19	0.19
8	47.968	47.996	47.992	47.985	0.02	19.02	18.64	19.82	19.16	0.60	47.971	47.983	47.221	47.725	0.44	18.77	17.85	18.45	18.36	0.47
10	47.130	47.896	47.948	47.658	0.46	19.84	17.45	18.18	18.49	1.22	46.309	46.895	47.870	47.025	0.79	18.11	17.89	17.88	17.96	0.13
24	47.625	47.985	47.056	47.555	0.47	18.05	17.54	18.89	18.16	0.68	46.642	46.975	46.258	46.625	0.36	17.02	17.89	16.73	17.21	0.60
48	47.748	47.005	47.014	47.256	0.43	18.12	19.14	17.02	18.09	1.06	46.257	46.117	46.890	46.421	0.41	17.58	17.72	16.18	17.16	0.85
72	47.882	47.254	47.820	47.652	0.35	17.55	18.54	18.25	18.11	0.51	46.213	45.893	45.931	46.012	0.17	17.11	16.85	17.18	17.05	0.17

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	101.084	101.950	101.587	101.540	0.43	20.78	22.12	20.21	21.04	0.98	101.084	101.950	101.587	101.540	0.43	20.78	22.12	20.21	21.04	0.98
0	101.084	101.950	101.587	101.540	0.43	20.78	22.12	20.21	21.04	0.98	101.084	101.950	101.587	101.540	0.43	20.78	22.12	20.21	21.04	0.98
2	98.877	99.158	99.024	99.020	0.14	20.15	20.88	19.72	20.25	0.59	99.045	98.324	99.692	99.020	0.68	20.12	19.17	19.38	19.56	0.50
4	98.984	98.024	98.611	98.540	0.48	20.10	19.73	19.81	19.88	0.19	98.478	97.293	98.980	98.250	0.87	18.21	18.45	20.41	19.02	1.21
6	98.587	98.025	97.448	98.020	0.57	19.85	18.21	20.89	19.65	1.35	98.145	98.110	97.865	98.040	0.15	19.02	19.11	18.74	18.96	0.19
8	97.112	97.454	97.995	97.520	0.45	18.74	19.28	19.04	19.02	0.27	98.632	98.004	97.784	98.140	0.44	19.26	19.27	18.02	18.85	0.72
10	96.686	97.025	98.040	97.250	0.70	18.62	18.25	18.98	18.62	0.37	97.254	96.835	96.985	97.025	0.21	16.87	18.64	17.05	17.52	0.97
24	97.186	97.868	96.021	97.025	0.93	17.85	17.68	16.42	17.32	0.78	95.875	94.165	95.021	95.020	0.86	16.02	16.21	15.73	15.99	0.24
48	97.133	97.203	97.025	97.120	0.09	16.87	17.65	16.60	17.04	0.55	94.554	95.460	95.405	95.140	0.51	16.38	15.59	16.09	16.02	0.40
72	97.097	97.150	96.932	97.060	0.11	17.05	17.11	16.78	16.98	0.18	95.586	94.213	95.322	95.040	0.73	16.89	16.47	15.40	16.25	0.77

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์และโครเมียมที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	201.736	201.024	201.002	201.254	0.42	22.36	21.41	21.31	21.69	0.58	201.736	201.024	201.002	201.254	0.42	22.36	21.41	21.31	21.69	0.58
0	201.736	201.024	201.002	201.254	0.42	22.36	21.41	21.31	21.69	0.58	201.736	201.024	201.002	201.254	0.42	22.36	21.41	21.31	21.69	0.58
2	199.968	199.845	200.612	200.142	0.41	17.44	17.85	17.60	17.63	0.21	197.025	197.738	197.882	197.548	0.46	18.94	17.98	18.97	18.63	0.56
4	199.987	200.012	199.623	199.874	0.22	17.04	16.85	17.42	17.10	0.29	195.898	196.907	195.270	196.025	0.83	18.75	17.25	18.12	18.04	0.75
6	199.668	199.218	199.875	199.587	0.34	17.12	17.85	17.58	17.52	0.37	195.224	195.806	195.721	195.584	0.31	18.05	18.24	18.45	18.25	0.20
8	199.334	198.975	198.950	199.086	0.21	16.80	17.50	16.71	17.00	0.43	193.854	193.502	193.018	193.458	0.42	18.82	18.11	18.13	18.35	0.40
10	198.664	198.021	198.076	198.254	0.36	16.92	18.04	17.78	17.58	0.59	192.025	192.712	192.068	192.268	0.38	16.28	17.73	17.12	17.04	0.73
24	197.112	197.208	196.975	197.098	0.12	15.65	16.89	18.04	16.86	1.20	190.204	190.754	190.025	190.328	0.38	17.18	16.48	16.08	16.58	0.56
48	196.114	196.985	197.595	196.898	0.74	16.84	16.21	15.28	16.11	0.78	189.992	189.685	189.978	189.885	0.17	15.33	15.87	15.67	15.62	0.27
72	196.664	196.854	197.120	196.879	0.23	16.45	16.54	16.96	16.65	0.27	190.648	190.115	190.984	190.582	0.44	15.87	15.48	16.42	15.92	0.47



ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 50 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	51.875	51.958	52.032	51.955	0.08	105.90	106.80	107.10	106.60	0.62	51.875	51.958	52.032	51.955	0.08	105.90	106.80	107.10	106.60	0.62
0	51.875	51.958	52.032	51.955	0.08	54.60	53.90	53.20	53.90	0.70	51.875	51.958	52.032	51.955	0.08	54.60	53.90	53.20	53.90	0.70
2	49.112	49.254	48.983	49.116	0.14	36.90	37.30	38.10	37.43	0.61	42.752	42.021	42.996	42.590	0.51	19.20	19.90	19.00	19.37	0.47
4	48.700	48.025	48.954	48.560	0.48	33.60	33.10	33.90	33.53	0.40	40.054	40.645	39.601	40.100	0.52	15.10	14.40	15.60	15.03	0.60
6	47.054	47.687	48.250	47.664	0.60	31.50	31.30	31.00	31.27	0.25	39.856	38.538	39.086	39.160	0.66	12.30	13.10	11.70	12.37	0.70
8	47.508	47.125	47.936	47.523	0.41	28.40	28.00	29.50	28.63	0.78	37.580	38.250	37.780	37.870	0.34	12.20	11.40	12.40	12.00	0.53
10	46.542	46.021	45.895	46.153	0.34	28.20	28.40	27.50	28.03	0.47	37.580	37.940	36.590	37.370	0.70	10.10	10.70	9.40	10.07	0.65
24	43.012	43.024	43.628	43.221	0.35	26.10	27.10	26.50	26.57	0.50	35.112	35.580	34.548	35.080	0.52	7.25	7.84	7.01	7.37	0.43
48	43.695	42.684	42.695	43.025	0.58	26.30	26.50	27.90	26.90	0.87	34.854	35.125	35.350	35.110	0.25	7.21	7.15	7.54	7.30	0.21
72	42.875	42.925	43.158	42.986	0.15	25.60	26.80	27.20	26.53	0.83	35.112	34.970	35.097	35.060	0.08	8.10	7.89	7.95	7.98	0.11

หมายเหตุ ความเข้มข้นเริ่มต้น ไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี 50:20:100 มก./ล.

ความเข้มข้นโครเมียมที่เตรียมได้เท่ากับ 20.22, 19.67 และ 20.50 มก./ล มีค่าเฉลี่ย 20.13 มก./ล. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 0.42

ภายหลังการเตรียมโครเมียมเกิดการตกตะกอน มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มก./ล.

ตารางที่ ก-7 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	100.487	100.752	99.975	100.405	0.39	100.90	99.70	100.50	100.37	0.61	100.487	100.752	99.975	100.405	0.39	100.90	99.70	100.50	100.37	0.61
0	100.487	100.752	99.975	100.405	0.39	100.90	99.70	100.50	100.37	0.61	100.487	100.752	99.975	100.405	0.39	100.90	99.70	100.50	100.37	0.61
2	93.154	93.145	92.848	93.049	0.17	81.60	81.10	80.40	81.03	0.60	82.082	81.352	83.056	82.163	0.85	54.40	55.60	55.00	55.00	0.60
4	91.354	92.486	91.845	91.895	0.57	79.20	80.00	79.50	79.57	0.40	75.908	76.818	76.016	76.247	0.50	49.90	49.30	49.00	49.40	0.46
6	88.054	88.308	88.987	88.450	0.48	76.90	75.70	76.20	76.27	0.60	72.856	72.345	72.895	72.699	0.31	48.40	47.40	47.90	47.90	0.50
8	85.465	84.885	84.710	85.020	0.40	72.90	71.40	72.50	72.27	0.78	69.660	69.156	69.875	69.564	0.37	45.50	46.60	47.20	46.43	0.86
10	83.514	83.598	83.448	83.520	0.08	70.00	69.20	69.40	69.53	0.42	67.886	67.856	67.026	67.589	0.49	46.80	46.90	45.20	46.30	0.95
24	81.226	81.542	82.919	81.896	0.90	67.90	67.60	68.40	67.97	0.40	63.690	63.860	63.075	63.542	0.41	39.90	38.70	39.10	39.23	0.61
48	81.256	81.714	81.989	81.653	0.37	68.40	67.40	66.80	67.53	0.81	63.585	63.024	63.158	63.256	0.29	37.80	38.60	38.10	38.17	0.40
72	81.254	81.035	81.266	81.185	0.13	67.00	68.10	68.50	67.87	0.78	63.928	62.820	63.015	63.254	0.59	38.10	38.30	37.70	38.03	0.31

หมายเหตุ ความเข้มข้นเริ่มต้น ไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี 100:20:100 มก./ล.

ความเข้มข้นโครเมียมที่เตรียมได้เท่ากับ 20.04, 21.04 และ 19.57 มก./ล มีค่าเฉลี่ย 20.22 มก./ล. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 0.75

ภายหลังการเตรียมโครเมียมเกิดการตกตะกอน มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มก./ล.

ตารางที่ ก-7 (ต่อ) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนด์ โครเมียมและสังกะสีที่พีเอช 12

เวลา (ชม.)	อะลูมินา										นิกเกิลออกไซด์									
	ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.					ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 200 มก./ล.					ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 100 มก./ล.				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD	1	2	3	เฉลี่ย	SD
เริ่ม	200.152	200.656	199.570	200.126	0.54	101.00	100.60	99.80	100.47	0.61	200.152	200.656	199.570	200.126	0.54	101.00	100.60	99.80	100.47	0.61
0	200.152	200.656	199.570	200.126	0.54	101.00	100.60	99.80	100.47	0.61	200.152	200.656	199.570	200.126	0.54	101.00	100.60	99.80	100.47	0.61
2	195.158	195.060	195.533	195.250	0.25	95.30	95.80	95.20	95.43	0.32	183.929	182.850	183.980	183.586	0.64	76.50	77.00	76.20	76.57	0.40
4	193.885	192.808	193.058	193.250	0.56	94.90	94.30	93.60	94.27	0.65	180.556	181.476	180.592	180.875	0.52	76.10	75.90	75.50	75.83	0.31
6	190.553	190.472	190.235	190.420	0.17	93.80	94.20	92.60	93.53	0.83	177.896	176.718	177.955	177.523	0.70	75.90	75.40	76.40	75.90	0.50
8	188.981	189.000	187.788	188.590	0.69	90.40	91.50	91.90	91.27	0.78	174.589	174.818	174.086	174.498	0.37	75.80	76.00	76.90	76.23	0.59
10	187.568	187.545	186.608	187.240	0.55	89.40	89.10	90.10	89.53	0.51	171.555	171.561	171.573	171.563	0.01	76.00	75.10	74.90	75.33	0.59
24	185.650	185.021	185.678	185.450	0.37	89.10	87.60	88.00	88.23	0.78	165.409	166.828	165.817	166.018	0.73	72.90	72.10	72.40	72.47	0.40
48	185.698	185.772	185.150	185.540	0.34	87.90	88.20	88.00	88.03	0.15	165.986	165.443	165.310	165.580	0.36	72.50	72.90	72.20	72.53	0.35
72	185.598	184.890	184.573	185.020	0.52	87.20	88.50	87.90	87.87	0.65	165.796	165.083	165.082	165.320	0.41	72.50	71.70	72.00	72.07	0.40

หมายเหตุ

ความเข้มข้นเริ่มต้น ไซยาไนด์:โครเมียม:สังกะสี 200:20:100 มก./ล.

ความเข้มข้นโครเมียมที่เตรียมได้เท่ากับ 20.89, 20.94 และ 20.10 มก./ล มีค่าเฉลี่ย 20.64 มก./ล. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 0.47

ภายหลังการเตรียมโครเมียมเกิดการตกตะกอน มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.10 มก./ล.

ตารางที่ ค-8 การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี  
แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม: สังกะสี เท่ากับ  
100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
เริ่ม	98.616	104.100	98.616	104.100
0.023	45.847	0.428	40.012	0.087
0.25	45.887	0.010	40.227	0.108
0.50	46.121	0.793	40.854	0.030
0.75	47.288	7.180	41.214	0.013
1.00	52.021	22.800	42.140	4.400
1.25	61.011	47.100	42.552	11.600
1.50	70.105	64.200	45.352	21.300
1.75	78.487	99.400	49.878	32.900
2.00	98.641	103.700	56.270	42.300
2.25	98.256	103.400	65.812	51.300
2.50	98.540	103.400	70.102	58.400
2.75	98.020	103.600	78.885	84.200
3.00	97.965	102.800	94.217	99.400
3.25	97.958	104.500	97.220	103.400
3.50	98.653	103.800	98.047	103.900
3.75	97.390	103.800	98.454	103.700
4.00	98.580	104.200	98.846	103.500
4.25	98.584	103.800	97.582	103.800
4.50	98.369	102.800	98.254	101.200
4.75	98.584	103.400	98.578	103.500
5.00	98.256	104.000	98.658	104.000
5.25	97.587	103.500	98.125	102.300
5.50	97.685	103.800	97.854	104.000
5.75	98.874	103.100	98.324	100.800
6.00	98.875	104.000	98.145	101.500

ตารางที่ ๘-8 (ต่อ) การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี  
แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี  
เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
เริ่ม	97.225	95.3	97.121	95.3
0.023	42.002	0.219	40.003	0.556
0.25	42.181	0.033	40.079	0.138
0.50	42.284	0.033	40.011	0.042
0.75	42.280	0.045	40.058	0.032
1.00	42.886	0.120	40.076	0.010
1.25	42.514	0.647	40.085	0.117
1.50	43.011	1.405	40.098	0.121
1.75	44.389	3.900	40.201	0.287
2.00	46.685	7.800	40.289	0.440
2.25	48.986	12.200	40.502	0.800
2.50	54.005	21.000	40.651	1.040
2.75	58.140	27.300	42.004	3.220
3.00	62.289	35.100	43.301	5.480
3.25	66.887	43.600	44.503	7.400
3.50	72.300	52.400	45.254	9.300
3.75	82.011	66.800	46.859	11.800
4.00	85.980	74.500	48.521	13.900
4.25	92.114	89.300	49.607	16.200
4.50	96.148	95.000	51.189	18.700
4.75	97.485	95.800	52.847	21.400
5.00	96.985	95.600	56.587	27.700
5.25	97.254	95.800	59.387	32.400
5.50	97.125	95.100	64.582	41.100
5.75	97.584	95.800	68.021	47.800
6.00	97.258	94.900	70.858	52.500
6.25	96.986	94.300	75.055	59.700
6.50	97.589	95.600	80.104	65.800

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี  
แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี  
เท่ากับ 100:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
6.75	97.510	94.800	83.021	72.900
7.00	97.046	95.800	87.896	80.700
7.25	96.879	95.000	97.321	95.200
7.50	96.879	94.800	97.025	94.800
7.75	97.879	95.000	96.985	95.400
8.00	96.985	95.300	96.698	95.100
8.25	96.874	95.100	96.856	95.400
8.50	96.875	94.700	97.254	95.600
8.75	96.789	94.800	96.850	94.800
9.00	97.698	94.100	97.829	94.700
9.25	96.584	95.500	96.987	95.600
9.50	97.859	95.200	96.856	95.400
9.75	96.856	94.600	96.896	94.800
10.00	96.487	95.500	96.998	95.100
10.25	96.895	95.100	97.025	95.400
10.50	96.852	95.800	96.589	94.700
10.75	96.3258	94.600	97.142	95.200
11.00	97.254	94.700	96.891	95.100
11.25	96.985	93.800	96.986	94.700
11.50	96.958	94.100	97.224	94.300
11.75	97.258	94.500	96.980	95.100
12.00	97.158	93.700	97.012	94.800



**ตารางที่ ค-9      การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี**  
**แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ**  
**200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที**

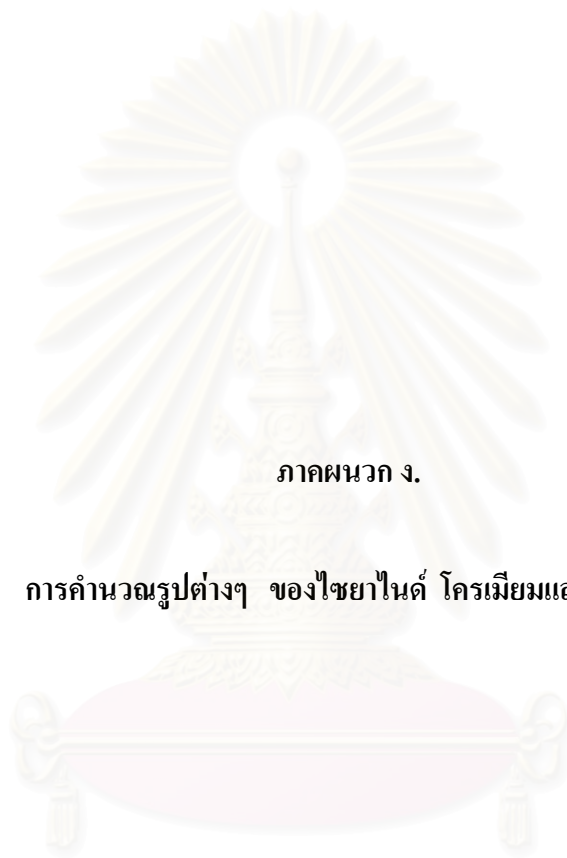
เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
เริ่ม	191.528	101.1	191.528	101.1
0.023	90.096	1.333	72.089	0.118
0.25	91.652	17.000	72.186	0.087
0.50	95.120	20.000	74.299	1.800
0.75	116.254	38.300	75.902	24.200
1.00	140.258	59.100	128.004	52.200
1.25	155.687	72.400	150.012	68.600
1.50	173.548	85.900	158.806	77.500
1.75	190.879	100.500	170.018	85.500
2.00	191.145	100.800	178.011	92.600
2.25	191.856	101.800	179.988	94.000
2.50	190.258	100.400	180.995	94.700
2.75	190.987	99.800	182.005	95.100
3.00	191.254	100.400	183.989	97.200
3.25	191.897	100.600	186.050	98.600
3.50	190.874	99.400	191.254	102.600
3.75	190.285	101.000	191.897	101.600
4.00	190.258	100.500	191.987	101.800
4.25	190.684	100.700	190.879	100.700
4.50	190.587	99.200	191.152	99.900
4.75	191.254	101.000	191.254	100.400
5.00	190.287	100.600	190.258	100.500
5.25	190.845	100.400	190.251	100.300
5.50	191.025	100.800	190.826	100.500
5.75	190.985	99.700	191.584	99.600
6.00	190.985	100.300	190.823	100.700

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี  
แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ  
200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
เริ่ม	195.41	100.1	198.863	100.1
0.023	77.982	0.775	76.100	0.005
0.25	84.521	6.460	76.108	0.011
0.50	85.295	7.100	76.400	0.285
0.75	92.387	13.200	76.602	0.086
1.00	98.896	19.200	76.788	0.113
1.25	112.886	31.600	76.889	0.116
1.50	123.561	40.200	96.500	16.400
1.75	136.008	51.100	112.458	29.200
2.00	141.485	56.000	122.989	38.000
2.25	152.003	65.300	135.522	48.100
2.50	161.897	71.100	140.828	54.000
2.75	169.010	77.500	154.002	63.000
3.00	170.882	81.200	164.012	71.100
3.25	179.112	89.400	165.895	72.600
3.50	181.921	91.200	174.025	79.200
3.75	187.240	96.400	175.022	80.000
4.00	192.235	98.400	176.024	81.500
4.25	193.856	100.400	177.975	82.700
4.50	194.002	100.800	184.011	88.400
4.75	195.550	100.900	184.020	88.700
5.00	195.244	99.800	187.025	90.200
5.25	194.985	100.800	188.229	91.200
5.50	194.879	100.900	191.024	92.800
5.75	194.875	101.500	191.125	93.100
6.00	194.598	100.800	192.047	93.900
6.25	194.365	100.700	192.982	94.700
6.50	194.856	100.500	195.005	96.500

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) การทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี  
แบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นไซยาไนต์ : โครเมียม : สังกะสี เท่ากับ  
200:20:100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชม.)	อะลูมินา		นิกเกิลออกไซด์	
	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)	ไซยาไนต์ (มก./ล.)	สังกะสี (มก./ล.)
6.75	194.856	99.800	196.254	97.200
7.00	194.852	99.500	197.052	97.900
7.25	194.584	100.500	197.898	99.300
7.50	195.214	100.600	199.092	99.800
7.75	194.879	100.500	198.854	99.200
8.00	194.687	100.200	198.875	99.500
8.25	194.550	99.300	198.284	99.300
8.50	194.875	100.700	198.258	99.800
8.75	195.054	100.500	197.582	98.700
9.00	195.022	99.600	197.985	99.500
9.25	194.563	99.600	197.921	100.500
9.50	194.587	99.800	198.254	99.800
9.75	194.852	100.500	198.250	99.200
10.00	195.852	99.400	198.824	100.500
10.25	194.878	99.700	197.593	99.300
10.50	194.584	99.200	197.582	98.900
10.75	194.823	100.200	198.282	99.400
11.00	194.587	100.500	198.853	100.700
11.25	194.854	99.500	197.982	99.800
11.50	195.542	100.500	198.025	98.900
11.75	195.856	100.300	197.853	100.400
12.00	194.936	100.500	198.741	100.500



ภาคผนวก ง.

การคำนวณรูปต่างๆ ของไซยาไนต์ โครเมียมและสังกะสี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการคำนวณ

รูปต่างๆ ของสารประกอบสังกะสี

$$\begin{aligned} \text{TOT Zn} &= [\text{Zn}^{2+}] + [\text{Zn}(\text{OH})^+] + [\text{Zn}(\text{OH})_2] + [\text{Zn}(\text{OH})_3^-] + [\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}] + \\ &[\text{Zn}(\text{CN})_2] + [\text{Zn}(\text{CN})_3^-] + [\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}] \\ &= [\text{Zn}^{2+}] + \beta_1[\text{Zn}^{2+}][\text{OH}] + \beta_2[\text{Zn}^{2+}][\text{OH}]^2 + \beta_3[\text{Zn}^{2+}][\text{OH}]^3 + \beta_4[\text{Zn}^{2+}][\text{OH}]^4 + \\ &\beta_2[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^2 + \beta_3[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^3 + \beta_4[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^4 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$[\text{Zn}^{2+}] = K_{so}/[\text{OH}]^2$$

$K_{so}$  = ค่าคงที่การละลาย (Solubility Constants)

$\beta_1$  = ค่าคงที่เสถียรภาพของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (Stability Constants for Complexation of metals)

$$\begin{aligned} \text{TOT CN} &= [\text{HCN}] + [\text{CN}^-] + 2[\text{Zn}(\text{CN})_2] + 3[\text{Zn}(\text{CN})_3^-] + 4[\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}] \\ &= [\text{H}^+][\text{CN}^-]/K_a + [\text{CN}^-] + 2\beta_2[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^2 + 3\beta_3[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^3 + \\ &4\beta_4[\text{Zn}^{2+}][\text{CN}]^4 \end{aligned}$$

เมื่อ

$[\text{CN}^-]$  = ค่าที่ได้จากวิธี Trial and Error เมื่อทราบค่า TOT CN

$K_a$  = ค่าคงที่การแตกตัวของกรด (Acidity Constants)

ตัวอย่างการคำนวณ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 มก./ล.} = 50/(26 \times 1000) \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$\text{TOT CN} = 1.92 \times 10^{-3} \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่พีเอช 12} \quad \text{มี } [\text{OH}] &= K_w/[\text{H}^+] \\ &= (10^{-14})/(10^{-12}) \\ &= 10^{-2} \end{aligned}$$

แทนค่าที่ต่างๆ ค่า TOT CN และ  $[\text{OH}]$  ลงในสมการ TOT Zn และสมการ TOT CN

จะได้ค่าต่างๆ ตามตาราง ง-3

ตารางที่ ง-1 แสดงรูปต่างๆ ของ Zn-OH ที่พีเอชต่างๆ

pH	[H <sup>+</sup> ]	[OH <sup>-</sup> ]	[Zn <sup>2+</sup> ]	[ZnOH <sup>+</sup> ]	[Zn(OH) <sub>2</sub> ]	[Zn(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	Zn-OH	Zn(mg/l)
0	1.00E+00	1.00E-14	2.82E+12	3.09E+03	3.55E-05	1.12E-16	1.78E-29	2.82E+12	1.84E+17
1	1.00E-01	1.00E-13	2.82E+10	3.09E+02	3.55E-05	1.12E-15	1.78E-27	2.82E+10	1.84E+15
2	1.00E-02	1.00E-12	2.82E+08	3.09E+01	3.55E-05	1.12E-14	1.78E-25	2.82E+08	1.84E+13
3	1.00E-03	1.00E-11	2.82E+06	3.09E+00	3.55E-05	1.12E-13	1.78E-23	2.82E+06	1.84E+11
4	1.00E-04	1.00E-10	2.82E+04	3.09E-01	3.55E-05	1.12E-12	1.78E-21	2.82E+04	1.84E+09
5	1.00E-05	1.00E-09	2.82E+02	3.09E-02	3.55E-05	1.12E-11	1.78E-19	2.82E+02	1.84E+07
6	1.00E-06	1.00E-08	2.82E+00	3.09E-03	3.55E-05	1.12E-10	1.78E-17	2.82E+00	1.84E+05
7	1.00E-07	1.00E-07	2.82E-02	3.09E-04	3.55E-05	1.12E-09	1.78E-15	2.85E-02	1.87E+03
8	1.00E-08	1.00E-06	2.82E-04	3.09E-05	3.55E-05	1.12E-08	1.78E-13	3.48E-04	2.28E+01
9	1.00E-09	1.00E-05	2.82E-06	3.09E-06	3.55E-05	1.12E-07	1.78E-11	4.15E-05	2.71E+00
10	1.00E-10	1.00E-04	2.82E-08	3.09E-07	3.55E-05	1.12E-06	1.78E-09	3.69E-05	2.42E+00
11	1.00E-11	1.00E-03	2.82E-10	3.09E-08	3.55E-05	1.12E-05	1.78E-07	4.69E-05	3.07E+00
12	1.00E-12	1.00E-02	2.82E-12	3.09E-09	3.55E-05	1.12E-04	1.78E-05	1.65E-04	1.08E+01
13	1.00E-13	1.00E-01	2.82E-14	3.09E-10	3.55E-05	1.12E-03	1.78E-03	2.94E-03	1.92E+02
14	1.00E-14	1.00E+00	2.82E-16	3.09E-11	3.55E-05	1.12E-02	1.78E-01	1.89E-01	1.24E+04



ตารางที่ ง-2 แสดงรูปต่างๆ ของ Cr-OH ที่พีเอชต่างๆ

pH	[H <sup>+</sup> ]	[OH <sup>-</sup> ]	[Cr <sup>3+</sup> ]	[CrOH <sup>2+</sup> ]	[Cr(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> ]	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]	[Cr(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]	TOTCr	Cr(mg/l)
0	1.00E+00	1.00E-14	7.41E+08	7.41E+04	1.78E-01	1.32E-08	1.26E-19	7.41E+08	3.85E+13
1	1.00E-01	1.00E-13	7.41E+05	7.41E+02	1.78E-02	1.32E-08	1.26E-18	7.42E+05	3.86E+10
2	1.00E-02	1.00E-12	7.41E+02	7.41E+00	1.78E-03	1.32E-08	1.26E-17	7.49E+02	3.89E+07
3	1.00E-03	1.00E-11	7.41E-01	7.41E-02	1.78E-04	1.32E-08	1.26E-16	8.16E-01	4.24E+04
4	1.00E-04	1.00E-10	7.41E-04	7.41E-04	1.78E-05	1.32E-08	1.26E-15	1.50E-03	7.80E+01
5	1.00E-05	1.00E-09	7.41E-07	7.41E-06	1.78E-06	1.32E-08	1.26E-14	9.95E-06	5.17E-01
6	1.00E-06	1.00E-08	7.41E-10	7.41E-08	1.78E-07	1.32E-08	1.26E-13	2.66E-07	1.38E-02
7	1.00E-07	1.00E-07	7.41E-13	7.41E-10	1.78E-08	1.32E-08	1.26E-12	3.17E-08	1.65E-03
8	1.00E-08	1.00E-06	7.41E-16	7.41E-12	1.78E-09	1.32E-08	1.26E-11	1.50E-08	7.79E-04
9	1.00E-09	1.00E-05	7.41E-19	7.41E-14	1.78E-10	1.32E-08	1.26E-10	1.35E-08	7.01E-04
10	1.00E-10	1.00E-04	7.41E-22	7.41E-16	1.78E-11	1.32E-08	1.26E-09	1.45E-08	7.52E-04
11	1.00E-11	1.00E-03	7.41E-25	7.41E-18	1.78E-12	1.32E-08	1.26E-08	2.58E-08	1.34E-03
12	1.00E-12	1.00E-02	7.41E-28	7.41E-20	1.78E-13	1.32E-08	1.26E-07	1.39E-07	7.23E-03
13	1.00E-13	1.00E-01	7.41E-31	7.41E-22	1.78E-14	1.32E-08	1.26E-06	1.27E-06	6.61E-02
14	1.00E-14	1.00E+00	7.41E-34	7.41E-24	1.78E-15	1.32E-08	1.26E-05	1.26E-05	6.55E-01

ตารางที่ ง-3 แสดงรูปต่างๆ ของ Zn-CN ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	[Zn <sup>2+</sup> ]	[ZnOH <sup>+</sup> ]	[Zn(OH) <sub>2</sub> ]	[Zn(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	[HCN]	[CN <sup>-</sup> ]	Zn(CN) <sub>2</sub>	Zn(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOT CN	TOT Zn	Zn (mg/l)
0	2.82E+12	3.09E+03	3.55E-05	1.12E-16	1.78E-29	9.12E-05	5.25E-14	9.13E-04	4.58E-12	1.12E-24	1.92E-03	2.82E+12	1.84E+17
1	2.82E+10	3.09E+02	3.55E-05	1.12E-15	1.78E-27	9.12E-05	5.25E-13	9.13E-04	4.58E-11	1.12E-22	1.92E-03	2.82E+10	1.84E+15
2	2.82E+08	3.09E+01	3.55E-05	1.12E-14	1.78E-25	9.12E-05	5.25E-12	9.13E-04	4.58E-10	1.12E-20	1.92E-03	2.82E+08	1.84E+13
3	2.82E+06	3.09E+00	3.55E-05	1.12E-13	1.78E-23	9.12E-05	5.25E-11	9.13E-04	4.58E-09	1.12E-18	1.92E-03	2.82E+06	1.84E+11
4	2.82E+04	3.09E-01	3.55E-05	1.12E-12	1.78E-21	9.12E-05	5.25E-10	9.13E-04	4.58E-08	1.12E-16	1.92E-03	2.82E+04	1.84E+09
5	2.82E+02	3.09E-02	3.55E-05	1.12E-11	1.78E-19	9.12E-05	5.25E-09	9.13E-04	4.58E-07	1.12E-14	1.92E-03	2.82E+02	1.84E+07
6	2.82E+00	3.09E-03	3.55E-05	1.12E-10	1.78E-17	9.11E-05	5.24E-08	9.09E-04	4.55E-06	1.12E-12	1.92E-03	2.82E+00	1.85E+05
7	2.82E-02	3.09E-04	3.55E-05	1.12E-09	1.78E-15	8.83E-05	5.08E-07	8.55E-04	4.15E-05	9.85E-11	1.92E-03	2.94E-02	1.92E+03
8	2.82E-04	3.09E-05	3.55E-05	1.12E-08	1.78E-13	7.25E-05	4.17E-06	5.76E-04	2.29E-04	4.47E-09	1.92E-03	1.15E-03	7.54E+01
9	2.82E-06	3.09E-06	3.55E-05	1.12E-07	1.78E-11	4.31E-05	2.48E-05	2.04E-04	4.82E-04	5.60E-08	1.92E-03	7.28E-04	4.76E+01
10	2.82E-08	3.09E-07	3.55E-05	1.12E-06	1.78E-09	2.10E-05	1.21E-04	4.85E-05	5.60E-04	3.17E-07	1.92E-03	6.46E-04	4.22E+01
11	2.82E-10	3.09E-08	3.55E-05	1.12E-05	1.78E-07	9.10E-06	5.24E-04	9.07E-06	4.54E-04	1.11E-06	1.92E-03	5.11E-04	3.34E+01
12	2.82E-12	3.09E-09	3.55E-05	1.12E-04	1.78E-05	2.70E-06	1.56E-03	8.01E-07	1.19E-04	8.65E-07	1.92E-03	2.86E-04	1.87E+01
13	2.82E-14	3.09E-10	3.55E-05	1.12E-03	1.78E-03	3.32E-07	1.91E-03	1.21E-08	2.20E-06	1.97E-08	1.92E-03	2.94E-03	1.92E+02
14	2.82E-16	3.09E-11	3.55E-05	1.12E-02	1.78E-01	3.34E-08	1.92E-03	1.22E-10	2.24E-08	2.01E-10	1.92E-03	1.89E-01	1.24E+04

ตารางที่ ง-4 แสดงรูปต่างๆ ของ Zn-CN ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	[Zn <sup>2+</sup> ]	[ZnOH <sup>+</sup> ]	[Zn(OH) <sub>2</sub> ]	[Zn(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	[HCN]	[CN <sup>-</sup> ]	Zn(CN) <sub>2</sub>	Zn(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOT CN	TOT Zn	Zn (mg/l)
0	2.82E+12	3.09E+03	3.55E-05	1.12E-16	1.78E-29	1.30E-04	7.49E-14	1.86E-03	1.33E-11	4.66E-24	3.85E-03	2.82E+12	1.84E+17
1	2.82E+10	3.09E+02	3.55E-05	1.12E-15	1.78E-27	1.30E-04	7.49E-13	1.86E-03	1.33E-10	4.66E-22	3.85E-03	2.82E+10	1.84E+15
2	2.82E+08	3.09E+01	3.55E-05	1.12E-14	1.78E-25	1.30E-04	7.49E-12	1.86E-03	1.33E-09	4.66E-20	3.85E-03	2.82E+08	1.84E+13
3	2.82E+06	3.09E+00	3.55E-05	1.12E-13	1.78E-23	1.30E-04	7.49E-11	1.86E-03	1.33E-08	4.66E-18	3.85E-03	2.82E+06	1.84E+11
4	2.82E+04	3.09E-01	3.55E-05	1.12E-12	1.78E-21	1.30E-04	7.49E-10	1.86E-03	1.33E-07	4.66E-16	3.85E-03	2.82E+04	1.84E+09
5	2.82E+02	3.09E-02	3.55E-05	1.12E-11	1.78E-19	1.30E-04	7.49E-09	1.86E-03	1.33E-06	4.66E-14	3.85E-03	2.82E+02	1.84E+07
6	2.82E+00	3.09E-03	3.55E-05	1.12E-10	1.78E-17	1.30E-04	7.46E-08	1.84E-03	1.31E-05	4.58E-12	3.85E-03	2.82E+00	1.85E+05
7	2.82E-02	3.09E-04	3.55E-05	1.12E-09	1.78E-15	1.24E-04	7.14E-07	1.69E-03	1.15E-04	3.84E-10	3.85E-03	3.03E-02	1.98E+03
8	2.82E-04	3.09E-05	3.55E-05	1.12E-08	1.78E-13	9.73E-05	5.60E-06	1.04E-03	5.55E-04	1.45E-08	3.85E-03	1.94E-03	1.27E+02
9	2.82E-06	3.09E-06	3.55E-05	1.12E-07	1.78E-11	5.55E-05	3.19E-05	3.38E-04	1.03E-03	1.54E-07	3.85E-03	1.41E-03	9.21E+01
10	2.82E-08	3.09E-07	3.55E-05	1.12E-06	1.78E-09	2.69E-05	1.55E-04	7.91E-05	1.17E-03	8.45E-07	3.85E-03	1.29E-03	8.41E+01
11	2.82E-10	3.09E-08	3.55E-05	1.12E-05	1.78E-07	1.20E-05	6.89E-04	1.57E-05	1.03E-03	3.33E-06	3.85E-03	1.10E-03	7.19E+01
12	2.82E-12	3.09E-09	3.55E-05	1.12E-04	1.78E-05	4.24E-06	2.44E-03	1.97E-06	4.59E-04	5.24E-06	3.85E-03	6.32E-04	4.13E+01
13	2.82E-14	3.09E-10	3.55E-05	1.12E-03	1.78E-03	6.60E-07	3.80E-03	4.78E-08	1.74E-05	3.08E-07	3.85E-03	2.95E-03	1.93E+02
14	2.82E-16	3.09E-11	3.55E-05	1.12E-02	1.78E-01	6.68E-08	3.85E-03	4.90E-10	1.80E-07	3.23E-09	3.85E-03	1.89E-01	1.24E+04

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-5 แสดงรูปต่างๆ ของ Zn-CN ที่พีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

pH	[Zn <sup>2+</sup> ]	[ZnOH <sup>+</sup> ]	[Zn(OH) <sub>2</sub> ]	[Zn(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	[HCN]	[CN <sup>-</sup> ]	Zn(CN) <sub>2</sub>	Zn(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOT CN	TOT Zn	Zn (mg/l)
0	2.82E+12	3.09E+03	3.55E-05	1.12E-16	1.78E-29	1.85E-04	1.06E-13	3.75E-03	3.81E-11	1.90E-23	7.69E-03	2.82E+12	1.84E+17
1	2.82E+10	3.09E+02	3.55E-05	1.12E-15	1.78E-27	1.85E-04	1.06E-12	3.75E-03	3.81E-10	1.90E-21	7.69E-03	2.82E+10	1.84E+15
2	2.82E+08	3.09E+01	3.55E-05	1.12E-14	1.78E-25	1.85E-04	1.06E-11	3.75E-03	3.81E-09	1.90E-19	7.69E-03	2.82E+08	1.84E+13
3	2.82E+06	3.09E+00	3.55E-05	1.12E-13	1.78E-23	1.85E-04	1.06E-10	3.75E-03	3.81E-08	1.90E-17	7.69E-03	2.82E+06	1.84E+11
4	2.82E+04	3.09E-01	3.55E-05	1.12E-12	1.78E-21	1.85E-04	1.06E-09	3.75E-03	3.81E-07	1.90E-15	7.69E-03	2.82E+04	1.84E+09
5	2.82E+02	3.09E-02	3.55E-05	1.12E-11	1.78E-19	1.85E-04	1.06E-08	3.75E-03	3.81E-06	1.90E-13	7.69E-03	2.82E+02	1.84E+07
6	2.82E+00	3.09E-03	3.55E-05	1.12E-10	1.78E-17	1.84E-04	1.06E-07	3.70E-03	3.73E-05	1.85E-11	7.69E-03	2.83E+00	1.85E+05
7	2.82E-02	3.09E-04	3.55E-05	1.12E-09	1.78E-15	1.73E-04	9.97E-07	3.29E-03	3.13E-04	1.46E-09	7.69E-03	3.21E-02	2.10E+03
8	2.82E-04	3.09E-05	3.55E-05	1.12E-08	1.78E-13	1.29E-04	7.43E-06	1.83E-03	1.30E-03	4.51E-08	7.69E-03	3.48E-03	2.27E+02
9	2.82E-06	3.09E-06	3.55E-05	1.12E-07	1.78E-11	7.10E-05	4.09E-05	5.53E-04	2.16E-03	4.12E-07	7.69E-03	2.75E-03	1.80E+02
10	2.82E-08	3.09E-07	3.55E-05	1.12E-06	1.78E-09	3.41E-05	1.97E-04	1.28E-04	2.40E-03	2.21E-06	7.69E-03	2.57E-03	1.68E+02
11	2.82E-10	3.09E-08	3.55E-05	1.12E-05	1.78E-07	1.55E-05	8.90E-04	2.62E-05	2.23E-03	9.29E-06	7.69E-03	2.31E-03	1.51E+02
12	2.82E-12	3.09E-09	3.55E-05	1.12E-04	1.78E-05	6.09E-06	3.51E-03	4.07E-06	1.36E-03	2.23E-05	7.69E-03	1.55E-03	1.02E+02
13	2.82E-14	3.09E-10	3.55E-05	1.12E-03	1.78E-03	1.27E-06	7.30E-03	1.76E-07	1.23E-04	4.20E-06	7.69E-03	3.06E-03	2.00E+02
14	2.82E-16	3.09E-11	3.55E-05	1.12E-02	1.78E-01	1.34E-07	7.69E-03	1.96E-09	1.44E-06	5.17E-08	7.69E-03	1.89E-01	1.24E+04

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาคย์ ชาตรี เกิดเมื่อวันที่ 27 เมษายน 2522 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย