

การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก



นาย วุฒิชัย ทิฐิพงษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

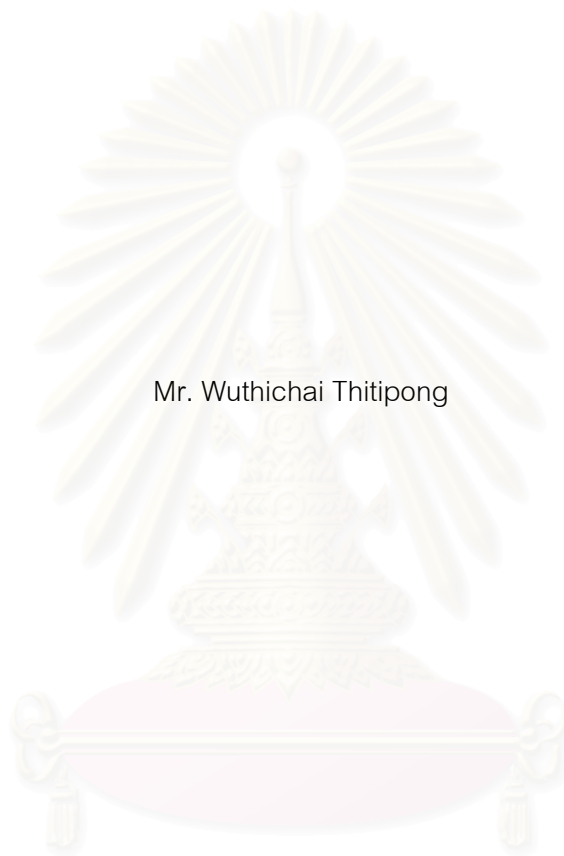
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1044-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM AND NICKEL IN SYNTHETIC WASTEWATER
USING IRON FILINGS



Mr. Wuthichai Thitipong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1044-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสีย

สังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก

โดย

นายวุฒิชัย ทิวังษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

คุณิษัย ทิฐิพงษ์ : การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก (Removal of Hexavalent Chromium and Nickel in Synthetic Wastewater Using Iron Filings) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.สุธา ขาวเอียร, 133 หน้า. ISBN 974-17-1044-5.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก โดยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบแบตช์ ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชที่ 4, 5, 6 และ 7 ผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่ 1, 1.5 และ 2 ก.เหล็ก/ล.น้ำเสีย และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ 10, 20 และ 30 มก./ล. ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลจากการทดลองพบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ ส่วนการดูดติดผิวของนิกเกิลบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของผงตะไบเหล็กเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชสูง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลคือ พีเอช 6 โดยสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. เมื่อใช้ผงตะไบเหล็ก 1 ก.เหล็ก/ล.น้ำเสียได้ 100% และ 49% ตามลำดับ ถ้าเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลสูงขึ้น ในขณะที่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลต่ำลง ภายหลังการทดลองผงตะไบเหล็กซึ่งเป็นเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จะเปลี่ยนรูปเป็น Magnetite (Fe_3O_4) ส่วนเฮกซะวาเลนทีโครเมียมถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนทีโครเมียมอยู่ในรูป Chromite ($FeCr_2O_4$) และ โครเมียม(III)ออกไซด์ (Cr_2O_3) ในขณะที่นิกเกิลตกผลึกเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนเหล็กออกไซด์ การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทรายที่ 8/8, 10/8 และ 12/8 (ก.เหล็ก/ก.ทราย) และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ 10, 20 และ 30 มก./ล. ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย 8/8, 10/8 และ 12/8 (ก./ก.) ที่ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล 30 มก./ล. ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลได้ลดลงคือ 14.6 9.5 และ 5.3 (มก.Ni/ก.ผงตะไบเหล็ก) 22.1 13.1 และ 7.9 (มก.Cr(VI)/ก.ผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล 10, 20 และ 30 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย 8/8 (ก./ก.) ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลได้เพิ่มขึ้นคือ 6.8 10.0 และ 14.6 (มก.Ni/ก.ผงตะไบเหล็ก) 10.5 17.5 และ 22.1 (มก.Cr(VI)/ก.ผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

4270551221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : HEXAVALENT CHROMIUM/ HEAVY METAL REMOVAL/ NICKEL/ IRON FILINGS

WUTHICHAJ THITIPONG: REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM AND NICKEL IN SYNTHETIC WASTEWATER USING IRON FILINGS

THESIS ADVISOR: ASSIST.PROF.SUTHA KHAODHIAR.Ph.D. 133 pp. ISBN 974-17-1044-5

This research investigated the Removal of Hexavalent Chromium and Nickel in Synthetic Wastewater using Iron filings. The experiments were divided into two parts. The batch experiments were used to study the effects of pH, quantity of iron filings, and initial concentration of Cr(VI) and Ni on the efficiency of the removal of Cr(VI) and Ni. The soluble pH were 4, 5, 6 and 7. The quantity of iron filings were 1, 1.5 and 2 g/L. The initial concentration of Cr(VI) and Ni were 10, 20 and 30 mg/L. The results showed that the reduction of Cr(VI) to Cr(III) increased with decreasing pH. On the other hand, the adsorption of Ni on iron oxide which occurred from corrosion of iron filings increased with increasing pH. The optimum pH value for removing both of Cr(VI) and Ni in this research was 6. At this pH, 1 g/L of iron filings could removed Cr(VI) and Ni, that had initial concentration of 30 mg/L, for 100% and 49% respectively. If the quantity of iron filings increased, the efficiency and rate of Cr(VI) and Ni removal would increase. While if the initial concentration of Cr(VI) and Ni increased, the efficiency and rate of Cr(VI) and Ni removal would declined. After iron filings, or zero oxidation state iron, exposed to wastewater, they had been transformed to magnetite (Fe_3O_4). While Cr(VI) had been reduced to Cr(III) formed as chromite (FeCr_2O_4) and Cr(III)Oxide (Cr_2O_3), and nickel had precipitated as nickel oxide (NiO) on iron oxide. The column experiments were used to study the effects of mass ratio of iron filings and sand and the initial concentration of Cr(VI) and Ni on the efficiency of the removal of Cr(VI) and Ni. The mass ratio were 8/8, 10/8 and 12/8 (g.iron filings/g.sand). The initial concentration of Cr(VI) and Ni were 10, 20 and 30 mg/L. When the initial concentration of Cr(VI) and Ni were 30 mg/L. The results shown that if the mass ratio of iron filings and sand increased from 8/8 to 10/8 and 12/8, the quantity of Ni removal would declined from 14.6 to 9.5 and 5.3 (mg.Ni/g.Iron Filings) respectively, and the quantity of Cr(VI) removal would declined from 22.1 to 13.1 and 7.9 (mg.Cr(VI)/g.Iron Filings) respectively. When the mass ratio of iron filings and sand was 8/8. The results shown that if the initial concentration of Cr(VI) and Ni increased from 10 to 20 and 30 mg/L, the quantity of Ni removal would increased from 6.8 to 10.0 and 14.6 (mg.Ni/g.Iron Filings) respectively, and the quantity of Cr(VI) removal would increased from 10.5 to 17.5 and 22.1 (mg.Cr(VI)/g.Iron Filings) respectively.

Department Environmental Engineering Student's signature

Field of study Environmental Engineering Teacher's signature

Academic Year2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ที่กรุณาให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ที่ช่วยตรวจสอบ และให้คำแนะนำที่ดีซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ต่างๆให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนสำหรับเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณหมู่ที่ช่วยให้คำแนะนำ เพื่อนๆ และพี่ๆ รวมทั้งครูปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ และน้องๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครเมียม (Chromium).....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties).....	5
2.1.2 ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium).....	5
2.1.3 เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium).....	6
2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและไตรวาเลนต์โครเมียม.....	7
2.2 นิกเกิล (Nickel).....	9
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	9
2.4 เหล็ก (Iron)	14
2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties).....	14
2.4.2 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Cell).....	15
2.5 การบำบัดโครเมียมด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์.....	16
(Chromium Remediation by Zero Oxidation State Iron)	
2.6 การดูดซับ (Adsorption).....	19
2.7 ทฤษฎีออกไซด์ของโลหะไฮดรอกไซด์.....	20

บทที่	หน้า
2.8 คุณสมบัติของไฮดรอสเฟริกออกไซด์.....	21
2.8.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ.....	21
2.9 การดูดติดผิวของอ็อกอนที่ผิวสัมผัสของโลหะไฮดรอสออกไซด์ในน้ำ.....	22
2.9.1 การดูดติดผิวของประจุบวก.....	22
2.10 Surface Complexation Model.....	25
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.12 สาเหตุที่เลือกนิกเกิลและเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในการทำวิจัย.....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม-นิกเกิล.....	34
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	36
การทดลองแบบแบตช์	
3.3.1 การศึกษาผลของค่าพีเอช.....	36
3.3.2 การศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก.....	36
3.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล.....	37
การทดลองแบบคอลัมน์	
3.3.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย.....	37
3.3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล.....	38
3.4 ตัวแปรในการทดลอง.....	41
3.5 วิธีวิเคราะห์.....	43
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	44
4.1 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบแบตช์.....	44
4.1.1 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช.....	44
4.1.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก.....	53
4.1.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	58
และนิกเกิล	

สารบัญ (ต่อ)

ณ

บทที่

หน้า

4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมี ของผงตะไบเหล็ก	63
4.1.5 ผลการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียมและนิกเกิล	73
4.2 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบคอลัมน์	75
4.2.1 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย	75
4.2.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และนิกเกิล	81
4.2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และนิกเกิลของผงตะไบเหล็กที่สภาวะต่างๆของการทดลองแบบคอลัมน์	87
4.3 ข้อดีและข้อจำกัดในการใช้ผงตะไบเหล็กกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และนิกเกิล	89
4.4 ทางเลือกในการนำผงตะไบเหล็กไปใช้บำบัดน้ำเสีย	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการวิจัย	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก กำหนดคุณสมบัติของโลหะหนักจากน้ำทิ้งที่ระบาย ออกจากโรงงานอุตสาหกรรม	96
ภาคผนวก ข ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ. 2537 – 2541)	98
ภาคผนวก ค ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบดซ์	105
ภาคผนวก ง ผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่มีต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และนิกเกิลด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบดซ์	114

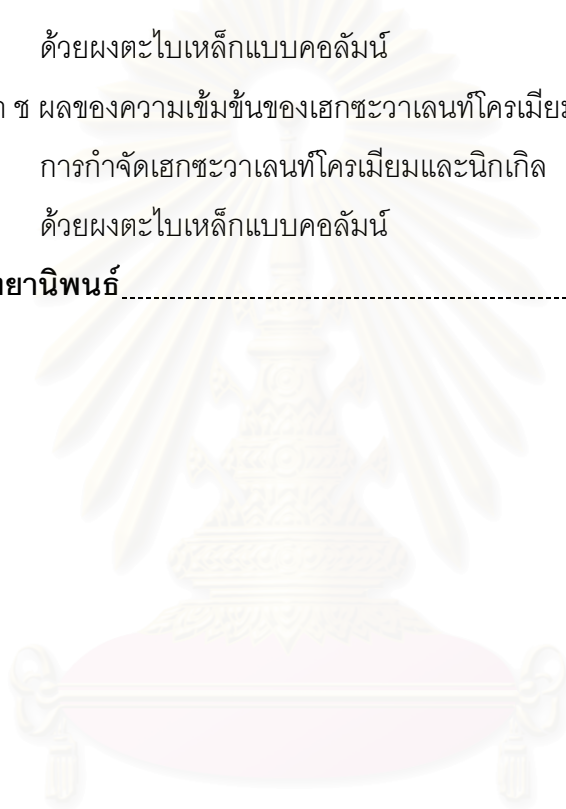
สารบัญ (ต่อ)

ญ

บทที่

หน้า

ภาคผนวก จ ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อ.....	119
การกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบตซ์	
ภาคผนวก ฉ ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายที่มีต่อ.....	124
การกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กแบบคอล์มันน์	
ภาคผนวก ช ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อ.....	130
การกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กแบบคอล์มันน์	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	136



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่	หน้า
1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัยแบบแบดซ์.....	3
1.2 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัยแบบคอลัมน์.....	3
2.1 Adsorption (surface complex formation equilibria).....	27
3.1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบแบดซ์.....	40
3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์.....	41
4.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของ Cr_2O_3 , Total Fe และ NiO ของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลอง.....	72
และหลังการทดลอง จากการวัดค่าด้วยเครื่อง WaveLength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer	
4.2 ข้อมูลค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ [Cr(III)] ของการศึกษาสมมูลมวล.....	73
4.3 ข้อมูลค่า [Ni] ของการศึกษาสมมูลมวล.....	73
4.4 ปริมาณแยกชะวาลนที่โครเมียมและนิกเกิลที่ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดได้.....	87
สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็ก และทรายต่างๆกัน	

บทที่	หน้า
2.1 การกำจัดไตรวาเลนท์โครเมียม (ประจุ +3) ด้วยไฮดรอกไซด์เทียบกับพีเอช.....	8
2.2 การกระจายของสารประกอบนิกเกิล.....	11
2.3 การตกตะกอนเกลือโลหะต่างๆที่ค่าพีเอชต่างๆกัน.....	12
2.4 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ.....	13
2.5 เซลล์กักร่อนไฟฟ้าเคมีของผงตะไบเหล็ก.....	18
2.6 รูปตัดพื้นผิวออกไซด์โลหะ.....	21
2.7 ผลของ pH ต่อการดูดติดผิวโลหะประจุบวกโดยวัสดุหลายชนิด.....	23
2.8 ผลของ pH และความเข้มข้นของ NaNO_3 (ionic strength).....	24
ที่มีต่อการดูดติดผิว Pb^{2+} และ Ba^{2+} โดย goethite	
2.9 รูปจินตนาการที่ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับ.....	25
ระยะทางที่ห่างจากพื้นผิวใน triple layer model	
2.10 Surface complex ของอ็อกไซด์พื้นผิวไฮดรอกไซด์และแบบจำลองพื้นผิว.....	26
ไฮดรอกไซด์แสดงรูปแบบการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ที่พื้นผิว	
inner-sphere complexes, outer-sphere complex, และ the diffuse layer	
3.1 แผนภาพแสดงแผนการทดลองและขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.2 หลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร.....	36
3.3 เครื่องเขย่า (Shaker) ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.4 คอลัมน์ที่มีทรายผสมกับผงตะไบเหล็กอยู่.....	39
3.5 แสดงการทดลองแบบคอลัมน์และอุปกรณ์.....	40
4.1 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ.....	45
เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น	
30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.2 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์.....	45
โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.3 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ.....	46
เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น	
30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	

บทที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงค่า ฟีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	46
4.5 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	47
4.6 กราฟแสดงค่า ฟีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	47
4.7 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	48
4.8 กราฟแสดงค่า ฟีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	48
4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ฟีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	50
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่ฟีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	51
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ฟีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	51
4.12 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร	53
4.13 กราฟแสดงค่า ฟีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์ โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าฟีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร	53

บทที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ54 เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร	
4.15 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร	54
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ปริมาณ ผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6	55
4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่ปริมาณ ผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6	56
4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ปริมาณ ผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/ลิตรที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6	56
4.19 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ58 เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.20 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	58
4.21 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ59 เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.22 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	59
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	60

บทที่	หน้า
4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่เวลาต่างๆ.....	61
เมื่อความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่เวลาต่างๆ.....	61
เมื่อความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	
4.26 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลอง.....	62
4.27 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM	63
กำลังขยาย 750 เท่า	
4.28 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM.....	63
กำลังขยาย 750 เท่า	
4.29 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM	64
กำลังขยาย 3,500 เท่า	
4.30 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM.....	64
กำลังขยาย 3,500 เท่า	
4.31 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM.....	65
กำลังขยาย 7,500 เท่า	
4.32 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM	65
กำลังขยาย 7,500 เท่า	
4.33 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	67
4.34 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	68
(ภาพขยาย)	
4.35 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	69
4.36 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	70
(ภาพขยาย)	
4.37 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์.....	75
ที่มีทราย 16 กรัมเพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	

บทที่	หน้า
4.38 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มี ผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	76
4.39 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มี ผงตะไบเหล็ก 10 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	76
4.40 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มี ผงตะไบเหล็ก 12 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	77
4.41 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด [Ni] ของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กผสม กับทรายอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g, 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6	78
4.42 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด [Cr(VI)] ของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กผสม กับทรายอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g, 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6	79
4.43 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด [Total Cr] ของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กผสม กับทรายอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g, 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6	79
4.44 กราฟเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กผสม กับทรายอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g, 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6	80
4.45 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มี ผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	81
4.46 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มี ผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	82

บทที่	หน้า
4.47 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นนิกเกิลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	83
4.48 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	84
4.49 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	84
4.50 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	85
4.51 กราฟเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่มากมายในปัจจุบันนี้ เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานฟอกหนังสัตว์ และโรงงานชุบโลหะ เป็นต้น แต่ละแห่งก่อให้เกิดน้ำเสียด้วยกันทั้งสิ้น โดยเฉพาะโรงงานชุบโลหะน้ำเสียที่เกิดขึ้นนั้นจะมีโครเมียมและนิกเกิลปนเปื้อนอยู่ด้วยเสมอ และส่วนมากปริมาณที่ปนเปื้อนนั้นจะมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นหากมีการปล่อยน้ำเสียเหล่านั้นลงสู่แหล่งต่างๆตามธรรมชาติโดยตรง เช่น ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ หรือปล่อยทิ้งลงบนพื้นดิน ย่อมก่อให้เกิดมลภาวะแวดล้อมเป็นพิษ

ปัจจุบันแม้ว่าตามโรงงานอุตสาหกรรมใหญ่ๆ จะมีระบบกำจัดโครเมียมและนิกเกิลก่อนจะปล่อยน้ำเสียทิ้งก็ตาม แต่กระบวนการในการกำจัดนั้นต้องใช้หน่วยกำจัดหลายขั้นตอน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างระบบกำจัดสูง รวมทั้งยังต้องมีพื้นที่สำหรับการวางระบบที่เพียงพอ นอกจากนั้นแล้ว ยังจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีอีกหลายชนิดด้วย ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กจำนวนมากไม่สามารถก่อสร้างระบบกำจัดที่มีประสิทธิภาพสูงเหมือนกับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ จึงมีการปล่อยทิ้งน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนอยู่ลงสู่แหล่งต่างๆตามธรรมชาติโดยที่ไม่มีการกำจัดก่อน การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิกเกิลโดยใช้ผงตะไบเหล็ก (Iron Filings) มีข้อดีตรงที่ไม่ต้องใช้หน่วยกำจัดหลายขั้นตอน ไม่ต้องใช้สารเคมีหลายชนิด ใช้พื้นที่ไม่มาก เป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้คือผงตะไบเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทั้งแบบแบตช์และคอลัมน์

2. เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบแบตช์ เช่น ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม, ความเข้มข้นของนิกเกิล, ค่าพีเอช และปริมาณเหล็ก

3. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, ความเข้มข้นของนิกเกิล และอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย ต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์แบบคอลัมน์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1. การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบแบตช์ แบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

การทดลองที่ 1.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

ส่วนที่ 2. การศึกษาโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ แบ่งออกเป็น 2 การทดลองคือ

การทดลองที่ 2.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทรายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

การทดลองที่ 2.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการศึกษาเป็นดังนี้

ตารางที่ 1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัยแบบแบตช์

ลำดับ	พารามิเตอร์ต่างๆ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1	ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	10, 20, 30 mg/l
2	ความเข้มข้นของนิกเกิล	10, 20, 30 mg/l
3	พีเอช	4, 5, 6, 7
4	ปริมาณผงตะไบเหล็ก	1, 1.5, 2 g/l

ตารางที่ 1.2 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัยแบบคอลัมน์

ลำดับ	พารามิเตอร์ต่างๆ	ช่วงที่ทำการศึกษา
1	ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	10, 20, 30 mg/l
2	ความเข้มข้นของนิกเกิล	10, 20, 30 mg/l
3	พีเอช	จากผลการทดลองแบบแบตช์ ลำดับที่ 3
4	ปริมาณผงตะไบเหล็ก	8, 10, 12 g
5	อัตราส่วนระหว่างเหล็กและทราย(กรัม/กรัม)	8:8, 10:8, 12:8

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูล que แสดงถึงสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดเฮกชะวาเลนที่โครเมียม และนิกเกิลด้วยผงตะไบเหล็ก
2. เป็นข้อมูล que แสดงถึงประสิทธิภาพ ในการกำจัดเฮกชะวาเลนที่โครเมียมและนิกเกิล ด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบตเตอรี่ และแบบคอลลัมน์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

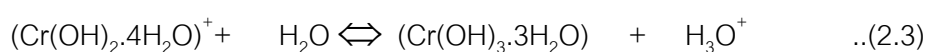
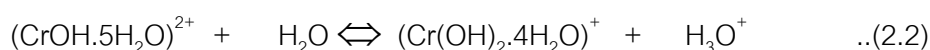
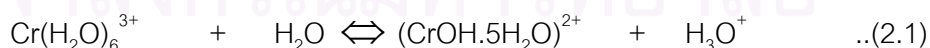
2.1 โครเมียม (Chromium)

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

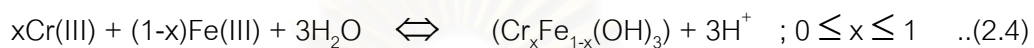
โครเมียมจัดเป็นธาตุทรานซิชันอยู่ในหมู่ 6B ในตารางธาตุมีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ตั้งแต่ -2 ถึง +6 มีเพียงโครเมียมสถานะออกซิเดชันศูนย์เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุ โดยปกติโครเมียมมักปรากฏในรูปที่มีสถานะออกซิเดชัน +2, +3 และ +6 คือ ไดวาเลนต์โครเมียม (Divalent Chromium), ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium) ตามลำดับ สารประกอบของไดวาเลนต์โครเมียมไม่เสถียร เพราะจะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย เกิดเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมซึ่งมีเสถียรภาพมากที่สุด ส่วนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมนั้นค่อนข้างมีเสถียรภาพ (Quagliano, 1963 อ้างถึงใน พิซิต, 2544) ดังนั้นสารประกอบของโครเมียมที่พบตามธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมภายใต้พื้นดินมักอยู่ในรูปสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม และสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะมีเสถียรภาพและคงอยู่ได้นาน แต่ในสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม (อิทธิชัย, 2539)

2.1.2 ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium)

ไตรวาเลนต์โครเมียมปรากฏอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (Aqueous Solution) ในรูปของไฮเดรตไอออน (Hydrated Ion) คือ $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ดังสมการ 2.1 – 2.3

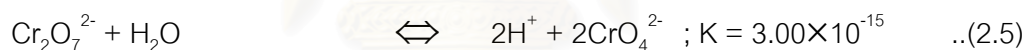


ดังนั้นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) จำนวน 3 โมลจะทำให้ Cr(H₂O)₆³⁺ กลายเป็น Cr(OH)₃·3H₂O หรือเขียนอย่างง่าย ๆ ว่า Cr(OH)₃ ซึ่งเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่มีความสามารถในการละลายต่ำ (Quagliano, 1963) ในสภาวะที่ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 6.5 พบว่าสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมอยู่ในรูป CrOH²⁺ แต่เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 10 สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมอยู่ในรูป Cr(OH)₃ (Rai และคณะ, 1986) สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมยังสามารถปรากฏในรูปผลึกของแข็ง (Solid Solution) โครเมียม(III)-เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์ (Cr_xFe_{1-x}(OH)₃) (Eary และคณะ, 1988) ดังสมการ 2.4

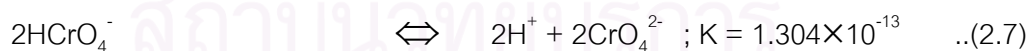
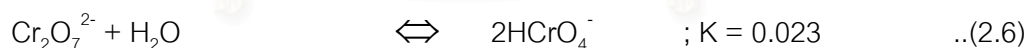


2.1.3 เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium)

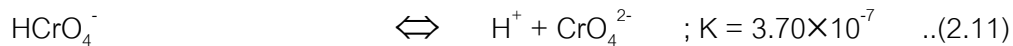
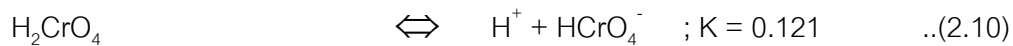
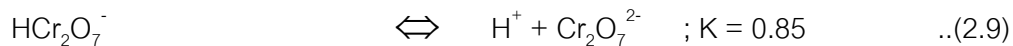
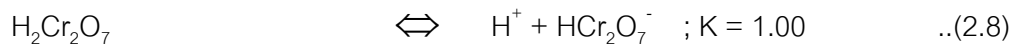
เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเกือบทั้งหมด มักเกิดเป็นสารประกอบร่วมกับออกซิเจน (Oxospecies) คือ โครเมตไอออน (CrO₄²⁻) และไดโครเมตไอออน (Cr₂O₇²⁻) โดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีแนวโน้มที่จะปรากฏเป็นไดโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกรด และเป็นโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือด่าง สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออนและโครเมตไอออนเป็นดังนี้



สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน, ไบโครเมตไอออน และโครเมตไอออนเป็นดังนี้ (Quagliano, 1963)



ภายใต้สภาวะที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะอยู่ในรูปไบโครเมตไอออน แต่เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมตไอออน สมการเคมีแสดงการแตกตัวให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมไอออนต่างๆ เมื่อสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมละลายน้ำเป็นดังนี้

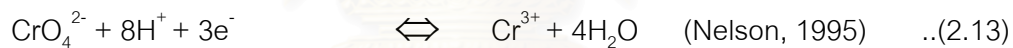


2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และไตรวาเลนต์โครเมียม

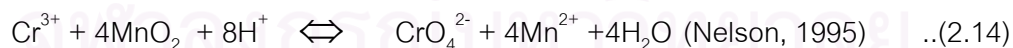
สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้ว จะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม โดยตัวให้อิเลคตรอนเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าพีเอช ปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นดังนี้



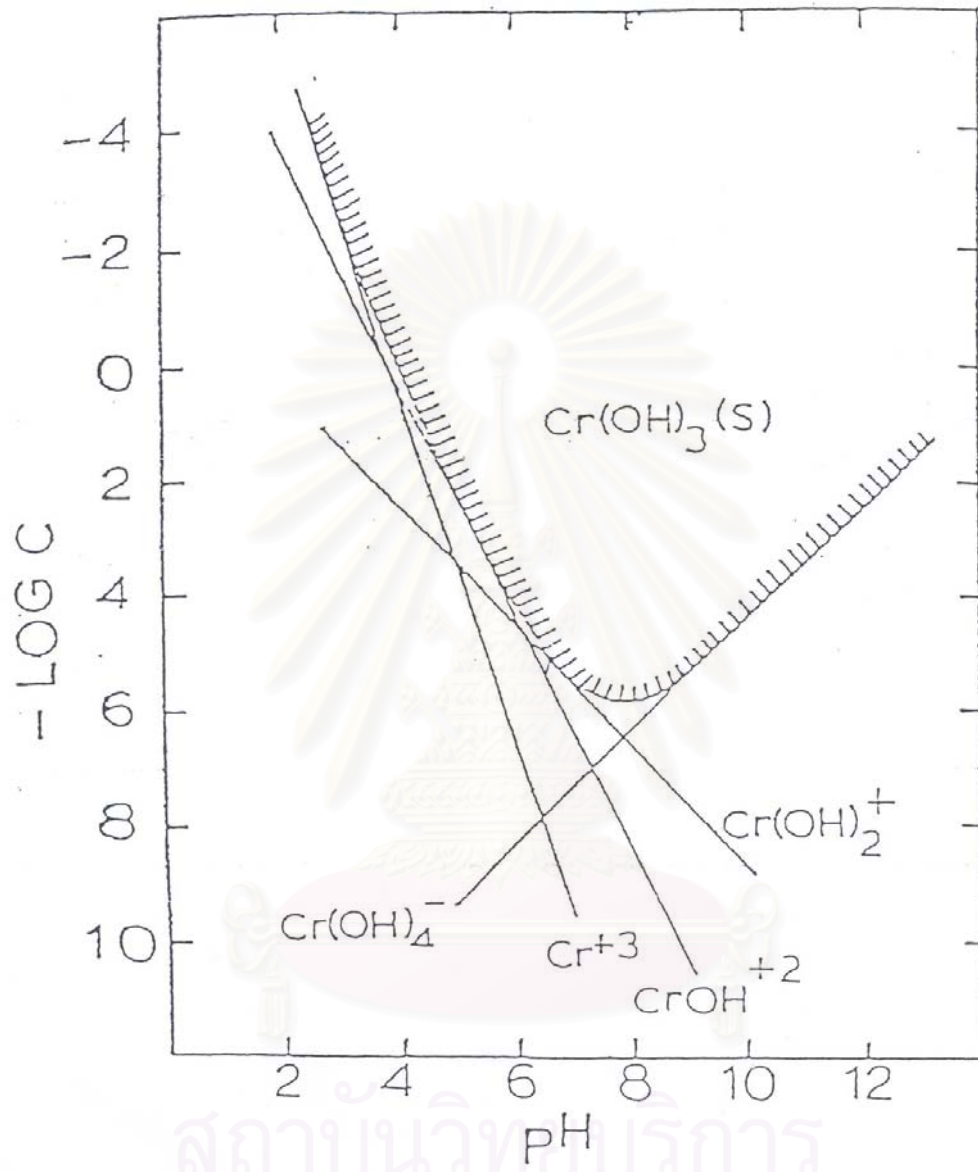
หรือ



สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Reoxidation Reaction) ได้ ตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญได้แก่สารประกอบออกไซด์ของแมงกานีส(III,IV) และสารประกอบไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส(III,IV) (Mn(III,IV)Hydroxide) ตัวอย่างเช่น สารประกอบแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ดังสมการ



มีการกำหนดระดับโครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานโดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.25 mg/l และไตรวาเลนต์โครเมียม ต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.75 mg/l (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2, 2539)



รูปที่ 2.1 การกำจัดไตรวาเลนต์โครเมียม (ประจุ +3) ด้วยไฮดรอกไซด์ เทียบกับพีเอช (อดิศักดิ์ ปิยสฤติย์, 2543)

2.2 นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ 8B ในตารางธาตุ มีเลขออกซิเดชันหลายค่าคือ 0, +1, +2, +3 และ +4 (Brugger, 1970) นิกเกิลที่พบทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูปของนิกเกิลที่มีประจุ +2 เป็นส่วนใหญ่ (Latimer, 1952 อ้างถึงใน Richter and Theis, 1980)

ไอออนนิกเกิลประจุ +2 เป็นออกตะฮีดรัล โดยเชื่อมต่ออยู่กับโมเลกุลของน้ำ 6 โมเลกุล $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับไอออนของธาตุอื่นๆในทรานซิชันที่ 1 ตามตารางธาตุ (V, Cr, Mn, Fe, Co) (Baes and Mesmer, 1976) ในกราฟรูป 2.2 แสดงการกระจายของสารประกอบนิกเกิลในรูปแบบต่างๆ ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันของพีเอช สำหรับสารละลายที่ไม่อิ่มตัว จะเห็นได้ว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติ (พีเอชประมาณ 5 ถึง 9) นิกเกิลอยู่ในรูป Ni^{2+} เป็นส่วนใหญ่

นิกเกิลส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมโลหะอื่นๆเป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์จะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมน้ำมันเบนซิน ใช้ในงานชุบโลหะ และใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิค

สำหรับความเป็นพิษของนิกเกิลจะเกิดเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอเนลซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง (พจนจิตร์, 2539)

กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมให้มีค่าความเข้มข้นของนิกเกิลไม่มากกว่า 1.0 มก./ล. (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2, 2539 อ้างถึงใน สมบูรณ์, 2543)

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนั้นสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้

1. การตกผลึก (Precipitation) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะเจือปน เป็นการเปลี่ยนรูปจากโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำโดยกระบวนการทางเคมี โลหะหนักที่พบในน้ำเสียและเป็นปัญหามักอยู่ในรูปของสารละลาย การกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกผลึกของแข็งเสียก่อน โลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเสียมักทำให้ตกผลึกได้โดยการเพิ่มพีเอช ดังนั้นการเติมปูนขาวให้กับน้ำเสียจนมีพีเอชเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสม

สมจะทำให้โลหะหนักตกผลึกได้ จากนั้นจึงทำให้ผลึกของแข็งรวมกันกลายเป็นฟล็อกด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) แล้วจึงแยก ฟล็อก ออกจากน้ำด้วยถังตกตะกอน

2. การรวมตะกอน (Flocculation) เป็นกระบวนการทำให้ตะกอนรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เร็ว

3. การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการที่ใช้แยกของแข็งออกจากน้ำ สารประกอบโลหะหนักมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำสามารถตกตะกอนได้เร็ว โดยกระบวนการนี้มักจะต่อจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการรวมตะกอน

4. การกรอง (Filtration) เป็นการแยกของแข็งออกจากน้ำ เนื่องจากตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยได้ไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation/Reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขประจุโดยการเติมสารเคมีซึ่งอาจเป็น Oxidant หรือ Reductant อย่างใดอย่างหนึ่งไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชันกับสารมลพิษ เพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลงและสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น เช่น ไซยาไนต์ และโครเมียมประจุบวกหก

6. กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้วิธีสร้างตะกอนแข็งกำจัดโลหะหนักต่างๆ อาจใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแทนได้ วิธีนี้ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) บรรจุอยู่ในถังและปล่อยให้ น้ำเสียที่มีโลหะหนักที่มีประจุบวกหรือสารประกอบที่มีประจุลบไหลผ่าน เมื่อผ่านเรซินโลหะหนักต่างๆในน้ำเสียในรูปไอออนที่มีประจุบวกก็จะถูกแลกเปลี่ยนกับ H^+ ของเรซินทำให้น้ำทิ้งปราศจากโลหะหนักและมีคุณภาพดีขึ้น และได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักหรือสารประกอบสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

7. การระเหย (Evaporation) เป็นการให้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไปทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้นหรือกลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อนหรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์

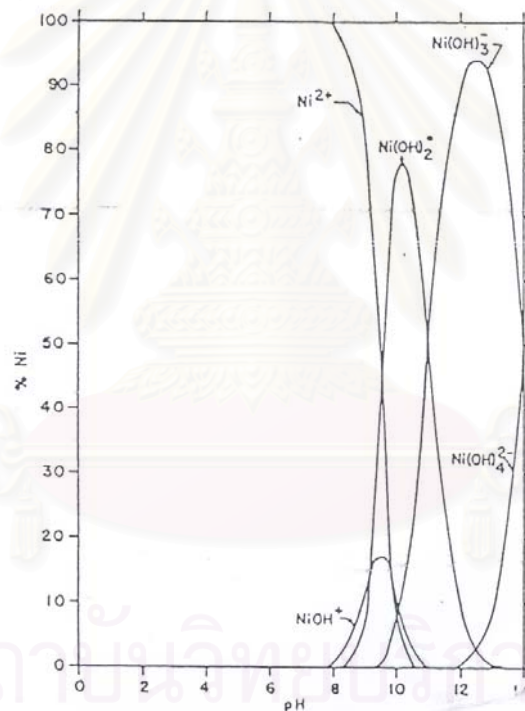
8. รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นการแยกน้ำออกจากน้ำเสียโดยใช้แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อ (Semipermeable Membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางตัวผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง

9. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุนทำให้น้ำทิ้งสะอาด

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นั้น น้ำทิ้งที่มีคุณลักษณะต่างกันจะถูกแยกให้ไหลลงบ่อเก็บที่แตกต่างกันเพื่อนำมาบำบัดในภายหลังอย่างง่าย ๆ

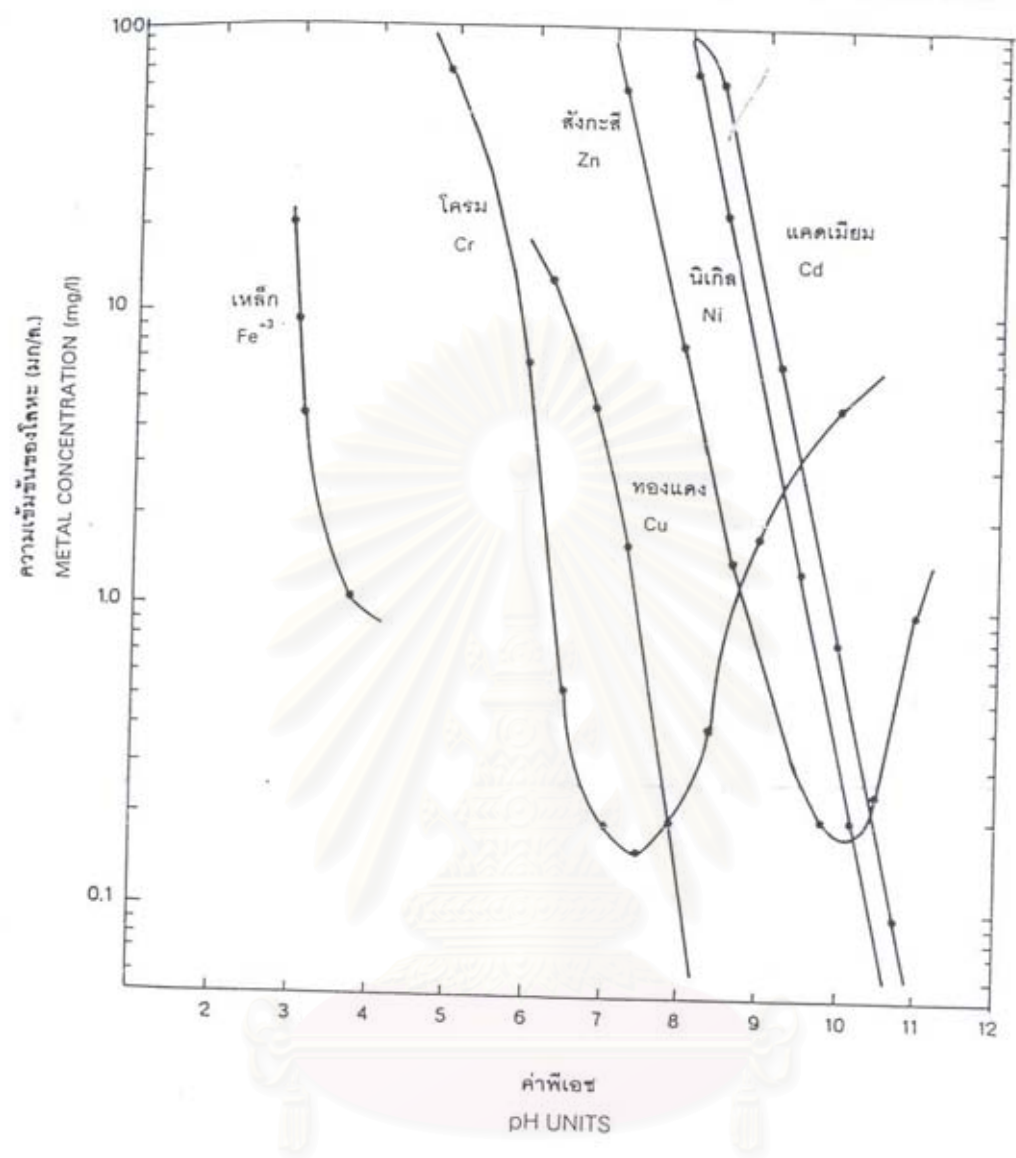
โดยปกติจะแยกสายน้ำทิ้งออกเป็น 3 สาย คือ

1. กรดและด่าง ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนัก
2. ไสยาไนต์ เป็นพิษ ได้จากน้ำยาชุบทองแดงต่าง น้ำยาชุบสังกะสีแบบไสยาไนต์ หรือน้ำยาชุบทอง ไสยาไนต์จะถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน
3. เฮกซะวาเลนทีโครเมียม ได้จากน้ำยาชุบโครเมียม หรือน้ำยาโครเมตในการชุบสังกะสี เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเป็นพิษและไม่ตกตะกอน การกำจัดต้องทำให้กลายเป็นไตรวาเลนทีโครเมียมก่อน จึงจะหมดพิษ และตกตะกอนได้

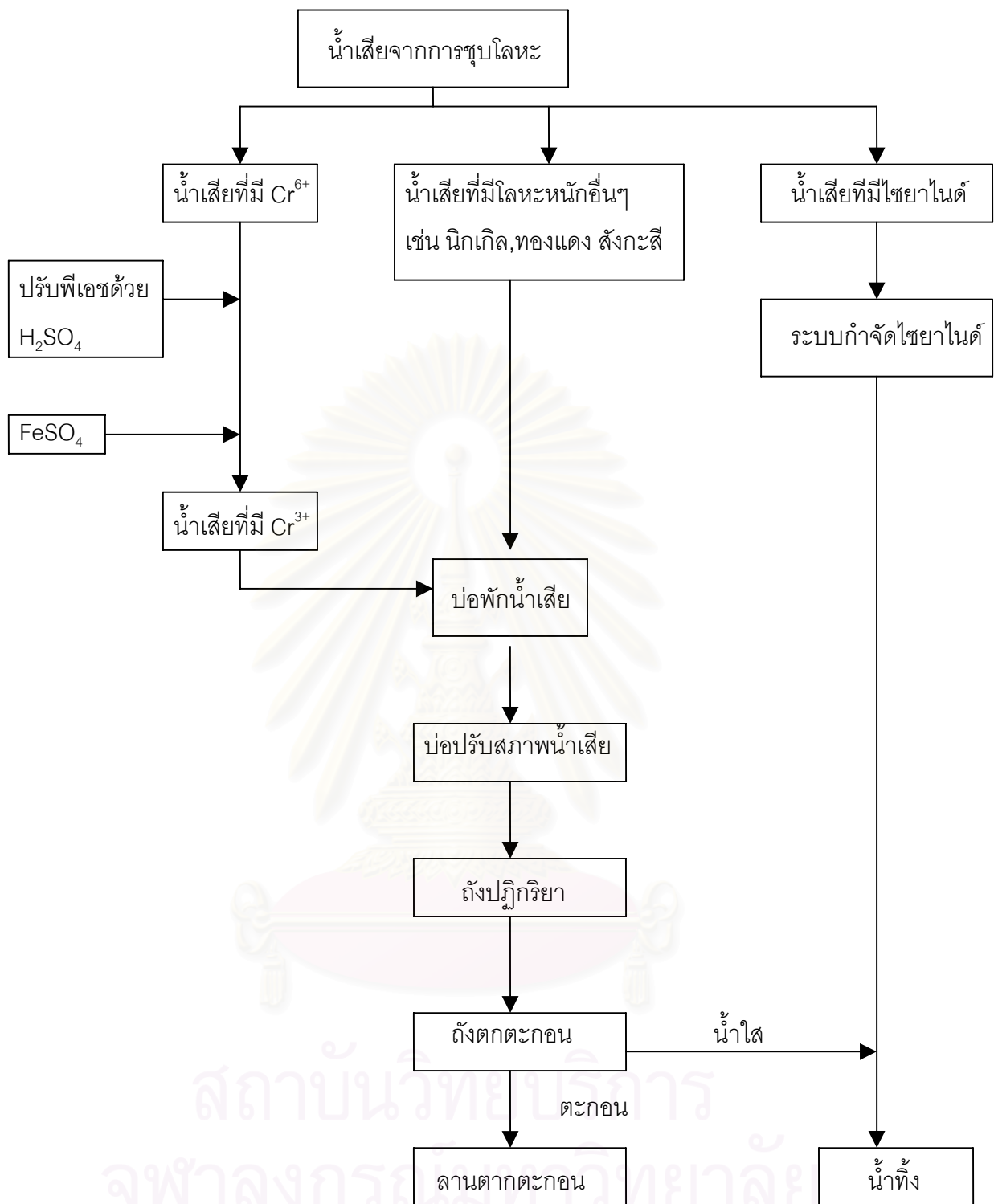


รูปที่ 2.2 การกระจายของสารประกอบนิกเกิล

(Bases and Mesmer, 1976 อ้างถึงใน Richter and Theis, 1980)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 2.3 การตกตะกอนเกลือโลหะต่างๆที่ค่าพีเอชต่างกัน
(อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์, 2543)



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

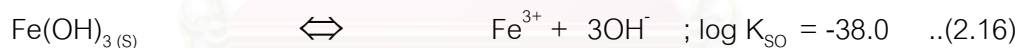
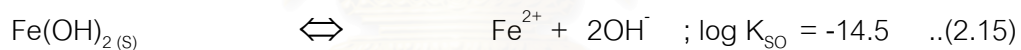
2. 4 เหล็ก (Iron)

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Valent Iron) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ไม่มีใช้เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติขึ้นหรือที่เรียกว่าเหล็กกล้า (Steel)

เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาก็คือเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542)

เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ตามลำดับซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility Constant) ดังนี้ (Snoeyink, 1980)



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังนี้



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการตั้งน้ำออกดั่งสมการต่อไปนี้



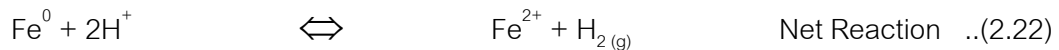
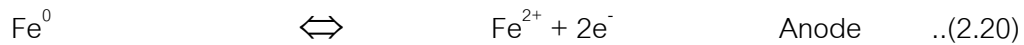
สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 นี้เอง จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic Region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษดินทรายต่างๆปะปนอยู่ด้วยเสมอ (มันลิน, 2527)

2.4.2 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Cell)

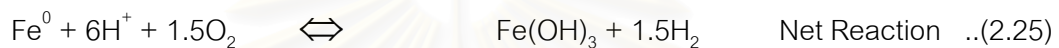
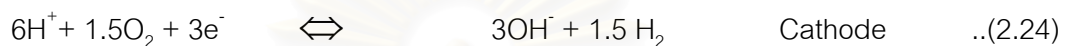
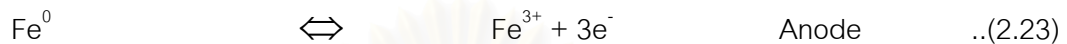
โลหะสถานะออกซิเดชันศูนย์มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically Stable Form) เช่นเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมาก เมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือกลไกการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ อิเล็กตรอน (e^-) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic Region) ได้ ไอออนบวกของโลหะ (Metal Cation) และอิเล็กตรอนจะถูกนำไปโดยตัวออกซิไดซ์ ที่อีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic Region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า (Powell และคณะ, 1995 อ้างถึงใน พิชิต, 2544)

เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมของมัน เช่นเหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปของหนึ่งแร่เหล็กเป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่โอกาสอำนวยให้ สาเหตุการกัดกร่อนโลหะได้แก่ น้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด (ไม่ว่าจะมีออกซิเจนละลายหรือไม่ก็ตาม) น้ำมีออกซิเจนละลาย (และค่าพีเอชสูงกว่า 7) โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า โลหะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (เนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ) ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอ ผิวโลหะมีรอยร้าวหรือชำรุดเฉพาะแห่ง และโลหะที่ได้รับความกดดัน เช่นโลหะที่ถูกทำให้ยึดเป็นต้น (มันลิน, 2527)

เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยสองส่วนคือ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน จะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ตัวอย่างของเซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วบวก มีดังนี้



และเมื่อมีออกซิเจน



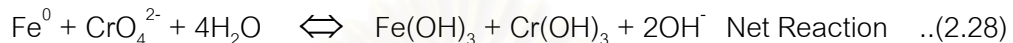
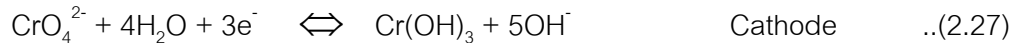
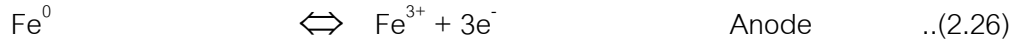
ปฏิกิริยากัดกร่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้ค่าพีเอชของระบบกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (Powell และคณะ, 1995)

2.5 การบำบัดโครเมียมด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Chromium Remediation by Zero Oxidation State Iron)

เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อม เพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ที่แข็งแรง ไม่เป็นพิษ และราคาถูกนอกจากนี้เหล็กยังมีศักย์รีดักชัน (Reduction Potential) สูง ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วยเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วแต่อย่างไรก็ตามเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้ ตัวอย่างของการปนเปื้อนของแหล่งน้ำที่สามารถใช้วิธีการบำบัดด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) (Balko และคณะ, 1998) DDT, DDD และDDE (Sayles และคณะ, 1997) สารประกอบไนโตรอะโรมาติก (Nitro Aromatic Compound) (Agrawal และคณะ, 1996) และโครเมียม (Powell และคณะ, 1995)

ในกระบวนการบำบัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน (Electron Donor) สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม เนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Instability) ของโลหะทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอก หากมีค่าพีเอชที่เหมาะสมสามารถป้องกันการเกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าได้

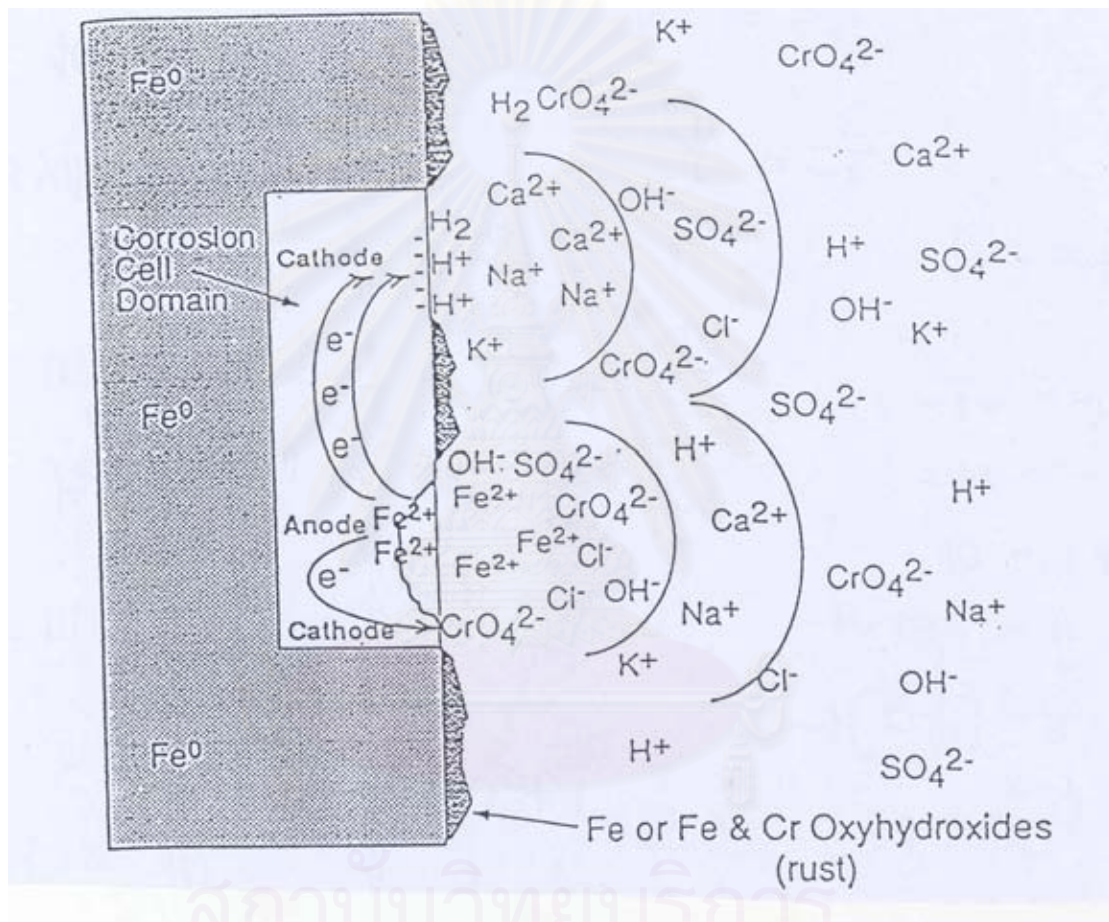
ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เหล็กจะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กเฟอร์ริก และเฮกซะวาเลนทโคโรเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนทโคโรเมียม ซึ่งกลไกของเซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีสามารถอธิบายปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังนี้



Powell และคณะ (1995) อ้างถึงใน พิซิต (2544) เสนอว่าบริเวณพื้นผิวของเหล็กที่เป็นขั้วบวก (Positively Charged Anodic Surface) เมื่อพิจารณาด้วย Electrical Double Layer Model จะคล้ายกับพื้นผิวของแร่ (Mineral Surface) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ ในขณะที่ค่าพีเอชน้อยกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนผิวแร่เป็นศูนย์ ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$) พื้นผิวของแร่และบริเวณใกล้พื้นผิวแร่จะเหมือนชั้น Stern Layer ซึ่งมีกลุ่มของไอออนลบ (Anion) รวมทั้งโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะถูกผลักดันไปยังพื้นผิวของแร่ พื้นผิวดังกล่าวจะปลดปล่อยเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์รัสไอออนจะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนได้เป็นสารประกอบเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) นอกจากนี้เฟอร์รัสไอออนยังเป็นผู้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับโครเมตไอออนด้วย ส่วนชั้นของ Gouy Layer จะประกอบด้วยกลุ่มของไอออนบวก (Cation) เป็นส่วนใหญ่ซึ่งตรงกันข้ามกับชั้น Stern Layer ในทางตรงกันข้ามพื้นผิวของเหล็กที่เป็นขั้วลบ (Negatively Charged Cathodic Surface) เมื่อพิจารณาด้วย Electrical Double Layer Model จะคล้ายกับพื้นผิวของแร่ (Mineral Surface) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ ในขณะที่ค่าพีเอชมากกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนผิวแร่เป็นศูนย์ ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$) ชั้น Stern Layer จะประกอบด้วยไอออนบวกรวมทั้งไฮโดรเจนไอออน (H^+) และตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีไอออนที่ไม่สามารถถูกรีดิวซ์ได้อยู่ด้วยได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น ส่วนชั้นของ Gouy Layer จะประกอบด้วยกลุ่มของไอออนลบเป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรเจนไอออนที่ผิวขั้วลบ (Cathodic Surface) จะไม่ถูกดูดติดผิว ดังนั้นเมื่อไฮโดรเจนไอออนรับอิเล็กตรอนไปแล้วจะเล็ดลอดออกจากพื้นผิวในรูปก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนสามารถเป็นผู้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับโครเมตไอออนได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนไอออนยังคงเป็นตัวสำคัญในการรักษาการดำเนินการของปฏิกิริยาการกัดกร่อน โดยทำหน้าที่ป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้าและส่งเสริมให้เกิดการละลายของเหล็ก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโปรตรอน

หรือไฮโดรเจนไอออนมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตไอออนโดยอาศัยกลไกดังกล่าวข้างต้น

อีกกลไกหนึ่งสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตไอออน คือการถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงที่พื้นผิวของเหล็ก การดูดติดโครเมตไอออนบนผิวของเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (FeOOH) ที่เกิดขึ้นใหม่ เป็นกลไกที่ช่วยให้โครเมตไอออนอยู่ใกล้ผิวเหล็กมากขึ้นและเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนมายังโครเมตไอออน



ภาพที่ 2.5 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีของผงตะไบเหล็ก

(Powell และคณะ, 1995)

ไตรวาเลนท์โครเมียมที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกในรูปผลึกโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) หรือผลึกของแข็งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการในกระบวนการบำบัด (Powell และคณะ, 1995) ความสามารถในการละลายของโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์เป็นตัวจำกัดความเข้มข้นของไตรวาเลนท์โครเมียม และพบว่าความเข้มข้นของ ไตรวาเลนท์โครเมียมที่ละลายในน้ำมีค่าน้อยกว่า 10^{-6} โมล/ลิตร ในช่วงค่าพีเอชระหว่าง 5 ถึง 11 (Eary และคณะ, 1988)

2.6 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปฏิกิริยาการนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ ทางเคมี และการแลกเปลี่ยนประจุ

การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล หรือที่เรียกกันว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ในที่นี้การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดในจุดหนึ่งบนผิวแต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลายชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพโดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นก็คือโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย

การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้นกำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน

การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion

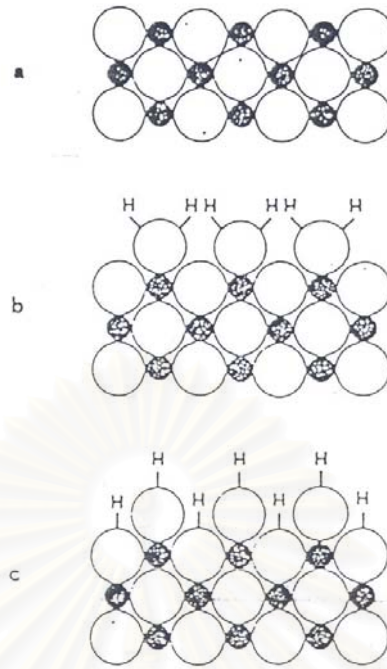
Exchange) ก็รวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนที่มีประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดยิ่งเล็ก ก็ยังมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้จะทราบว่า การดูดติดผิวมีรูปแบบที่สำคัญอยู่สามรูปแบบ แต่ก็เป็นการยากที่จะชี้เฉพาะเจาะจงลงไปว่า การดูดติดผิวของสสารเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งในสามรูปแบบนี้

สำหรับการดูดติดผิวของสารปนเปื้อนในน้ำด้วยแอคทีเวเต็ดคาร์บอนนั้น อัตราและปริมาณของการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของโมเลกุลสารปนเปื้อนและคาร์บอน การดูดติดผิวยังเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายน้ำได้ของสารปนเปื้อน โดยสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมักสามารถเกาะติดผิวได้ดีเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้น้อยกว่าสารที่ละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลและอัตราการกระจายตัว diffusion ผ่านชั้น boundary layer ก็เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณา สำหรับการดูดติดผิวแบบแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) พบว่าไอออนถูกดูดติดผิวน้อยกว่าโมเลกุลที่เป็นกลาง สารอินทรีย์หลายชนิดจะมีประจุลบที่มีพีเอชสูง มีประจุบวกที่พีเอชต่ำ และเป็นกลางที่พีเอชช่วงกลางๆ โดยทั่วไปการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นที่ช่วงพีเอชที่มีประจุเป็นกลาง

การใช้กระบวนการดูดติดผิวในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่สำคัญมากที่สุดประการหนึ่งก็เพื่อที่จะกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำหรือน้ำเสีย เช่น การกำจัดกลิ่นและสีที่เกิดจากสารอินทรีย์ โลหะหนักต่างๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ปนเปื้อนบางชนิด เช่น ไตรฮาโลมีเทน ยาฆ่าแมลง และสารประกอบอินทรีย์คลอรีนจากน้ำดื่ม การกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่เหลือในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำทิ้งชุมชน น้ำทิ้งขยะ น้ำเสียอุตสาหกรรม และของเสียอันตราย โดยการเติมแอคทีเวเต็ดคาร์บอนชนิดเกร็ดหรือชนิดผงลงไปผสมกับน้ำเสีย และแยกออกโดยการตกตะกอนหรือการกรอง หากต้องการกำจัดสารอินทรีย์ในปริมาณมาก และต้องการใช้คาร์บอนให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพสูงก็สามารถทำได้โดยให้น้ำไหลผ่านชั้นกรองคาร์บอนที่มีความสูงมาก

2.7 ทฤษฎีออกไซด์ของโลหะไฮดรอกไซด์

ออกไซด์ของธาตุหลายชนิด เช่น Si Al และ Fe เป็นสิ่งที่มีอยู่มากมายและพบได้ทั่วไปตามเปลือกโลก ออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ถ้าถูกล้อมรอบด้วยน้ำ โดยทั่วไปจะเกิดหมู่ hydroxyl ปกคลุมพื้นผิว (ดังรูป 2.6)



รูปที่ 2.6 รูปตัดพื้นผิวออกไซด์โลหะ : อีออนโลหะ ; อีออนออกไซด์

(Anderson and Rubin, 1981 อ้างถึงใน สมบูรณ์, 2543)

- อีออนที่ผิวอยู่ในลักษณะที่ไม่สมดุล
- ในสถานะที่มีน้ำอีออนที่ผิวจะจับคู่กับโมเลกุลของน้ำ
- การดูดติดผิวทางเคมีก่อให้เกิด hydroxyl group ปกคลุมพื้นผิว

2.8 คุณสมบัติของไฮดรอกไซด์เหล็ก

2.8.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

ไฮดรอกไซด์เหล็ก หรือที่เรียกว่า Amorphous Ferric Hydroxide และ Amorphous Iron Oxyhydroxide ภายใต้การไฮโดรไลซิสสารละลาย Fe(II) ที่อุณหภูมิ $20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว ไฮดรอกไซด์เหล็กที่ตกตะกอนใหม่ ๆ มีรูปร่างค่อนข้างกลม และเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 นาโนเมตร และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่เนื่องด้วยตะกอนที่เกิดมีรูพรุนมากจึงมีน้ำรวมในโครง

สร้างจำนวนมาก จึงมีลักษณะเหมือนเจลมากกว่าของแข็ง (Dzombak and Morel, 1990)

ของแข็งไฮดรอกไซด์เฟริกออกไซด์มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยทั่วไปจะเขียนสูตรทางเคมีเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Brown et al., 1978) กล่าวไว้ว่าส่วนประกอบของแข็งไฮดรอกไซด์เฟริกออกไซด์จะแปรค่าอยู่ระหว่าง $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ถึง $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$ จากการวัดค่าความหนาแน่นของไฮดรอกไซด์เฟริกออกไซด์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 4.0 g/cm^3 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.5 g/cm^3

ในกระบวนการ aging สารละลาย Fe(II) ที่อุณหภูมิ 20-30 $^{\circ}\text{C}$ ไฮดรอกไซด์เฟริกออกไซด์จะเปลี่ยนรูปเป็นผลึกของเหล็กออกไซด์ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูป Geothite ($\alpha\text{-FeOOH}$) อัตราการเกิดผลึกเหล็กออกไซด์จะเกิดเร็วขึ้นในสารละลายที่มี Fe(II) สูง และพีเอชสูง

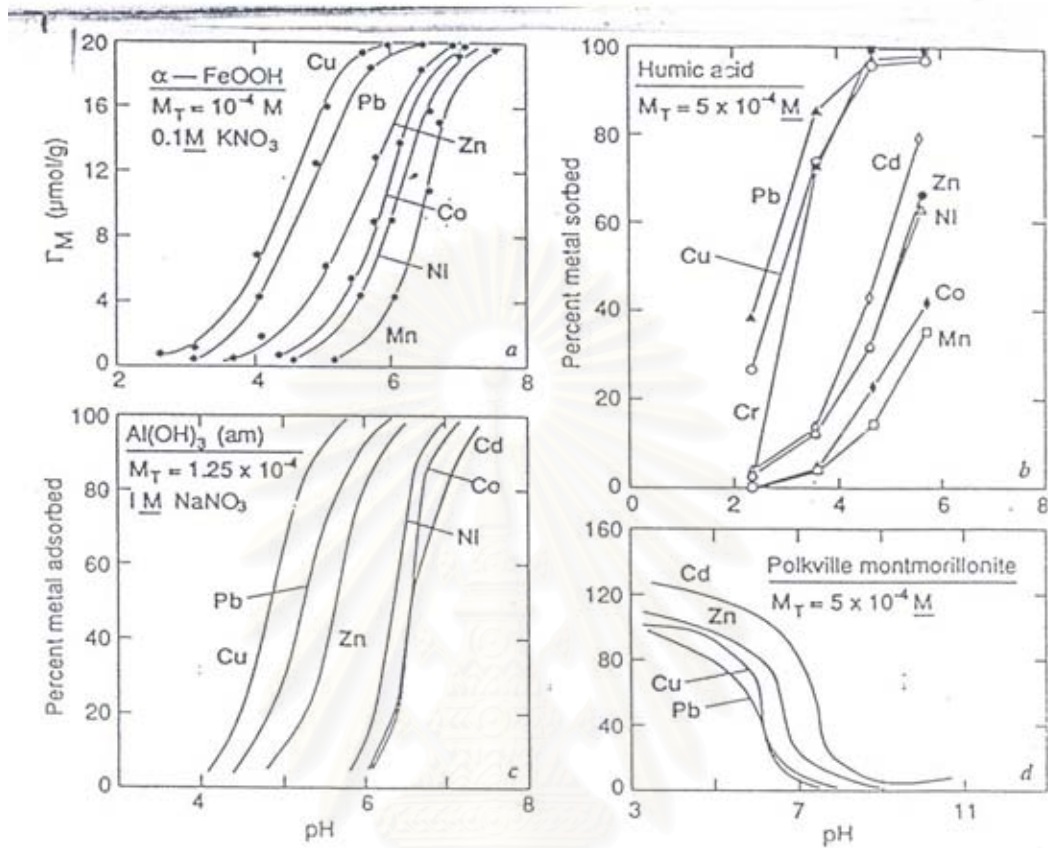
2.9 การดูดติดผิวของอิออนที่ผิวสัมผัสของโลหะไฮดรอกไซด์ในน้ำ

ออกไซด์ของธาตุหลายชนิด เช่น Si Al และ Fe มีคุณลักษณะที่สำคัญในการดูดติดผิวอิออนต่างๆที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในดิน ในน้ำ ในชั้นตะกอน และรูปแบบอื่นในทางธรณีวิทยา

2.9.1 การดูดติดผิวของประจุบวก

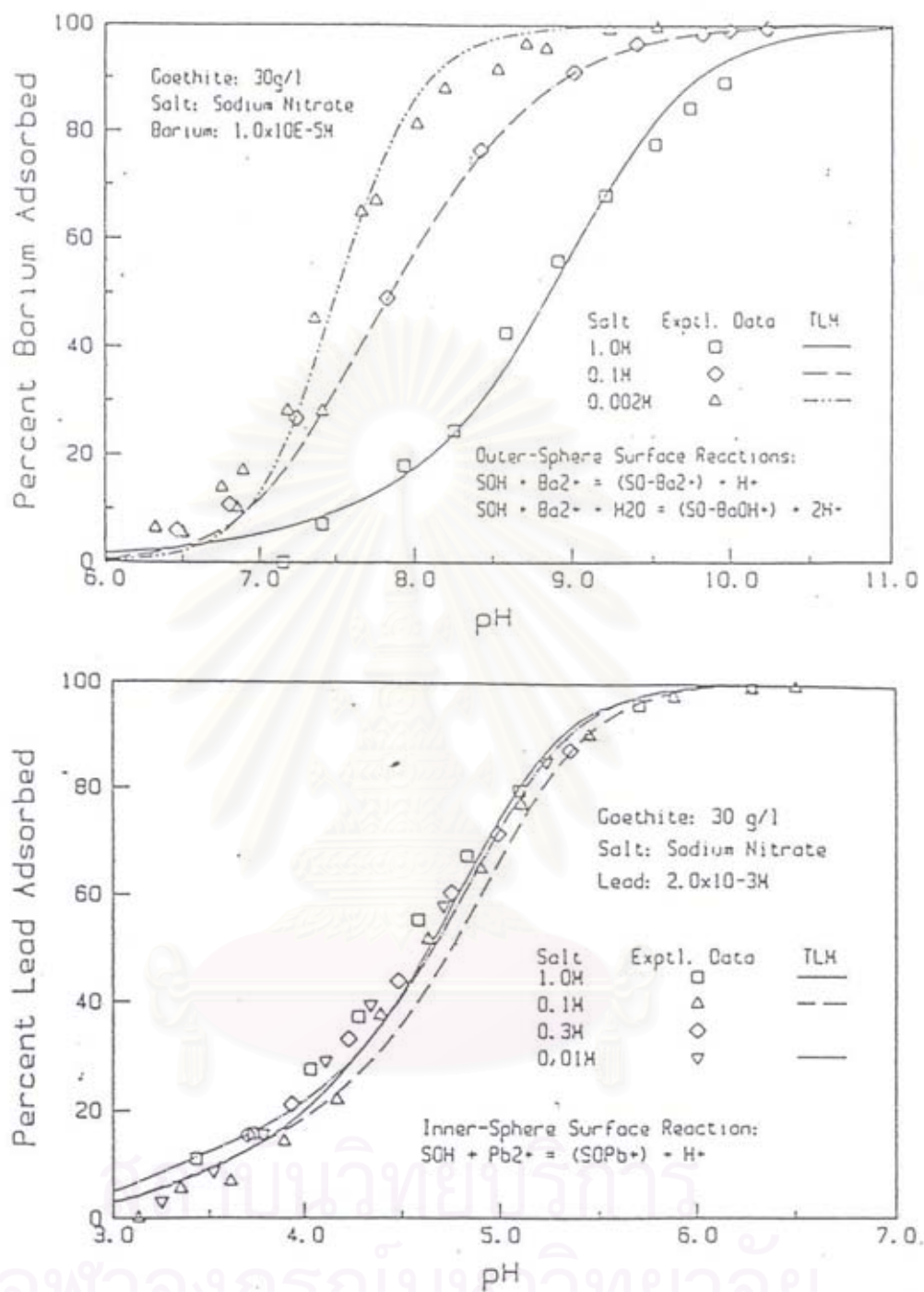
อิออนโลหะประจุบวกนอกจากจะรวมตัวกับหมู่ OH^- ที่อยู่ในน้ำแล้ว ยังสามารถจับยึดอย่างแข็งแรงกับพื้นผิวไฮดรอกไซด์ออกไซด์ได้ด้วย รูปที่ 2.7 ซึ่งให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพีเอชกับการดูดติดผิวประจุบวกบนวัสดุหลายชนิด สำหรับโลหะทรานสิชันส่วนใหญ่จะถูกดูดติดผิวเพิ่มจากศูนย์ไปถึงเกือบ 100% ในช่วงพีเอชแคบๆ เป็นที่ทราบกันว่า การดูดติดผิวของประจุบวกบนพื้นผิวไฮดรอกไซด์โดยทั่วไปจะคู่กับการปล่อย H^+ (หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การดูดติดผิวของ OH^-) แต่ net stoichiometry ของกระบวนการดูดติดผิวยังเป็นที่เข้าใจกันน้อย ประจุบวกและประจุลบที่ถูกดูดติดผิวบนผิวออกไซด์จะมีผลตอบสนองทั้งแรงของปฏิกิริยาเคมี และแรงไฟฟ้าสถิตย์ อย่างไรก็ตาม โลหะทรานสิชันประจุบวกสามารถดูดติดผิวอย่างแข็งแรง โดยต่อต้านแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโคออร์ดิเนตเคมีของอิออนโลหะที่ทำปฏิกิริยากับ OH^- ที่พื้นผิวมีความสำคัญอย่างมาก อิออนโลหะเหล่านี้เป็นกรดอ่อน และมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH^- ที่พื้นผิว การดูดติดผิวของประจุบวกโดยเหล็กไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 2.8 a) พบว่าเกือบจะไม่มีผลกับ ionic strength เลย ถึงแม้ว่าการดูดติดผิวของประจุบวกบนไฮดรอกไซด์อื่น เช่น quartz, titania และ clay minerals บางอย่างอาจจะมีผลกับ ionic strength บ้าง ส่วนประจุบวกที่มีการดูดติดผิวที่ไม่แข็งแรง (กรดแก่) เช่น อิออนของธาตุหมู่ IIA (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+}) โดยทั่วไปจะไม่เกิดแรงยึด

เหนียวแบบโคเวเลนต์ และการดูดติดผิวของอิออนเหล่านี้ (รูปที่ 2.8 b) จะมีผลกับแรงไฟฟ้าสถิตย และ ionic strength ด้วย



รูปที่ 2.7 ผลของ pH ต่อการดูดติดผิวโลหะประจุบวกโดยวัสดุหลายชนิด

- การดูดติดผิวบน goethite (McKenzie, 1980)
- การดูดติดผิวบน humic acid (Kerndorf and Schnitzer, 1980)
- การดูดติดผิวบน อะลูมินัมไฮดรอกไซด์ (Kinniburgh, 1975)
- การดูดติดผิวบน montmorillonite (Farrar and Pickering, 1977)



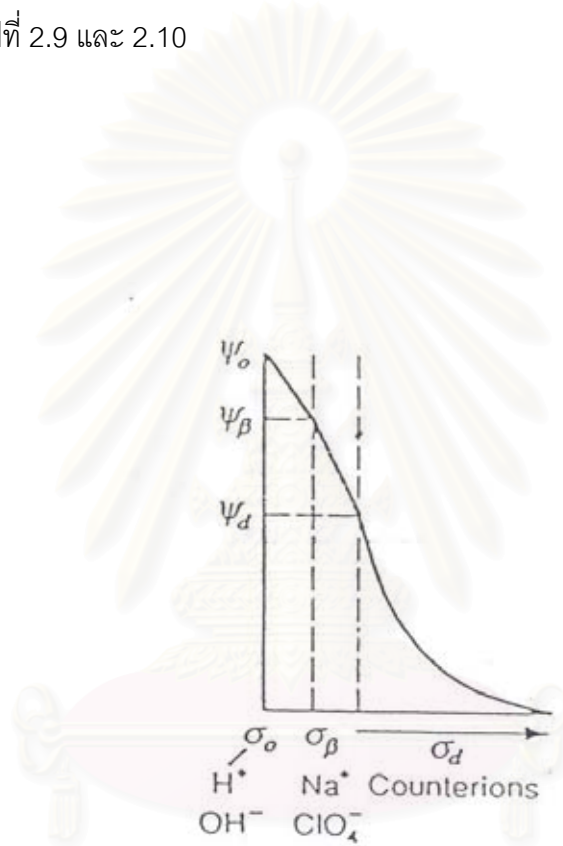
รูปที่ 2.8 ผลของ pH และความเข้มข้นของ $NaNO_3$ (ionic strength) ที่มีต่อการดูดติดผิว Pb^{2+} และ Ba^{2+} โดย goethite (Hayes, 1987)

- การดูดติดผิวของ Pb^{2+} เป็นแบบ inner-sphere complex
- การดูดติดผิวของ Ba^{2+} เป็นแบบ outer-sphere complex

2.10 Surface Complexation Model

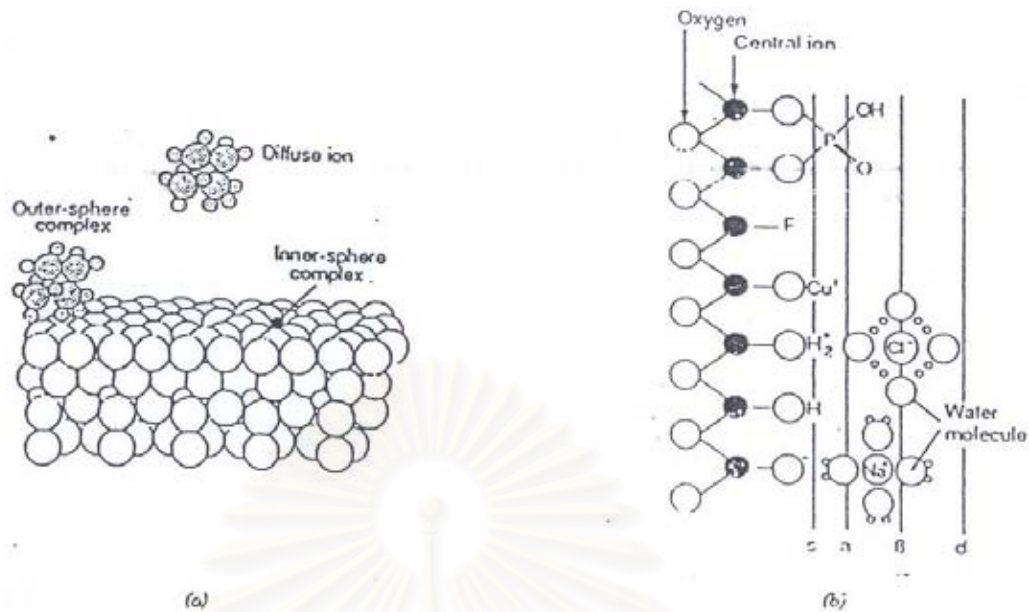
Davis และ Kent (1990) อ้างถึงใน สมบูรณ์ (2543) กล่าวว่า การดูดติดผิวของอิออนโลหะกับเหล็กออกไซด์สามารถอธิบายได้โดยใช้ Triple-Layer Model โดยมีรายละเอียดดังนี้

ชั้นที่ 1. a near-surface plane, เป็นพื้นผิวสำหรับการดูดติดผิวของ H^+ , OH^- และ Strongly-Adsorbed Ions, ชั้นที่ 2. the β -plane, ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ใกล้พื้นผิวสำหรับ weakly-adsorbed ions และชั้นที่ 3. a diffuse layer plane, เป็นชั้นที่แสดงถึงระยะทางที่ใกล้ที่สุดของ dissociated charge ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.9 รูปจินตนาการที่ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับระยะทางที่ห่างจากพื้นผิวใน triple layer model (Davis และ Kent, 1990)



รูปที่ 2.10 (a) Surface complex ของไอออนบนพื้นผิวไฮดรอกไซด์

(b) แบบจำลองพื้นผิวไฮดรอกไซด์แสดงรูปแบบการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ที่พื้นผิว inner-sphere complexes, outer-sphere complex, และ the diffuse layer (Stumm and Morgan, 1995)

สำหรับระบบที่ประกอบด้วยไอออนของโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด การแข่งขันการดูดติดผิวระหว่างโลหะเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญ (Benjamin and Bloom, 1981) ศึกษาผลของประจุลบที่มีต่อโลหะที่ดูดติดผิวอย่างแข็งแกร่งกับ amorphous iron oxyhydroxide พบว่าประจุลบไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของโลหะนั้นกล่าว ซึ่งให้เห็นว่าการแข่งขันของประจุลบที่ดูดติดผิวอย่างแข็งแกร่งและประจุลบที่พื้นผิวมีน้อยมาก เขาให้เหตุผลว่าเป็นเพราะพื้นที่ที่เกิดการดูดติดผิวของประจุลบเป็นพื้นที่ที่แยกต่างหากออกมาจากพื้นที่การดูดติดผิวของประจุบวก

ในตารางที่ 2.1 ได้สรุปสมดุลการดูดติดผิวที่สำคัญสำหรับโลหะและลิแกนด์บนพื้นผิวออกไซด์ (Stumm and Morgan, 1995) สมดุลของกรด-เบสไม่เพียงแต่มีผลเป็นพิเศษต่อโลหะในสารละลาย ยังมีผลถึงประจุที่พื้นผิวออกไซด์ด้วย การมีอยู่ของลิแกนด์สามารถเพิ่มหรือลดความสามารถการดูดติดผิว โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและลิแกนด์ ชนิดของสารที่ใช้ในการดูดติดผิวและพีเอช (Benjamin and Leckie, 1981)

ตารางที่ 2.1 Adsorption (surface complex formation equilibria)

(Stumm and Morgan, 1995)

Acid-Base Equilibria for Surface	
$S-OH + H^+$	$= S-OH_2^+$
$S-OH + OH^-$	$= S-O^- + H_2O$
Metal Binding (M^{z+} = metal)	
$S-OH + M^{z+}$	$= S-OM^{(z-1)+} + H^+$
$2S-OH + M^{z+}$	$= (S-O)_2M^{(z-2)+} + 2H^+$
$S-OH + M^{z+} + H_2O$	$= S-OMOH^{(z-2)+} + 2H^+$
Ligand Exchange (L^- = ligand)	
$S-OH + L^-$	$= S-L + OH^-$
$2S-OH + L^-$	$= S_2-L^+ + 2OH^-$
Ternary Surface Complex Formation	
$S-OH + L^- + M^{z+}$	$= S-L-M^{z+} + OH^-$
$S-OH + L^- + M^{z+}$	$= S-OM-L^{(z-2)+} + H^+$
$S-OH$ = oxide surfaces	

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gould (1982) ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงเหล็กโดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่าอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมมีความสัมพันธ์กับ ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน, และพื้นที่ผิวของเหล็ก ดังสมการ 2.29

$$d[\text{Cr(VI)}] / dt = -k[\text{Cr(VI)}]^{0.5}[\text{H}^+]^{0.5}(\text{Area}) \quad \dots(2.29)$$

k มีค่าเท่ากับ $5.45 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$

โดยค่า k จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการกวนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการกวนที่เพิ่มขึ้น

การเพิ่ม Ionic Strength ทำให้ค่า k ลดลงที่ Ionic Strength ต่ำกว่า 0.1M เมื่อเพิ่ม Ionic Strength มากกว่าค่านี้จะไม่มีผลต่อค่า k

Blowes และคณะ (1997) ศึกษาของแข็งที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ (Fe-Bearing Solid) 4 ชนิด คือ Siderite (FeCO_3), Pyrite (FeS_2), เหล็กเม็ดหยาบ (Coarse-Grained Fe^0), เหล็กเม็ดละเอียด (Fine-Grained Fe^0) เพื่อหาความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมออกจากสารละลาย ผลจากการศึกษาแบบแบตช์ (Batch Study) แสดงให้เห็นว่าอัตราของการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดมีค่ามากกว่า Pyrite และเหล็กเม็ดหยาบ กลไกของการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดและเหล็กเม็ดหยาบ คือการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเป็นไตรวาเลนทีโครเมียมควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กศูนย์เป็นเหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเฟอร์ริก ไตรวาเลนทีโครเมียมที่เกิดขึ้นจะตกผลึกในรูปของแข็งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ออกซีไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$) และผลจากการวิเคราะห์ทางแร่วิทยาพบว่าไตรวาเลนทีโครเมียมมักอยู่ร่วมกับ Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ไตรวาเลนทีโครเมียมสามารถกำจัดออกได้ทั้งในรูปสารละลายของแข็งและการดูดติดบนผิวของ Goethite

Pratt และคณะ (1997) ศึกษาความเป็นไปของไตรวาเลนทีโครเมียมจากกระบวนการโครเมตรีดักชันด้วยผงตะไบเหล็ก (Iron Filing) และทรายควอทซ์ (Quartz Grain) โดยให้สารละลายที่ประกอบด้วยเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 20 มิลลิกรัม โครเมียม/ลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ที่

บรรจุผงตะไบเหล็กผสมกับทรายควอทซ์ ผงตะไบเหล็กที่ถูกทำปฏิกิริยาจะสร้างชั้นเคลือบผิวที่ประกอบด้วย Goethite (α -FeOOH) ซึ่งจะดูดติดไตรวาเลนท์โครเมียมทำให้มีความเข้มข้นของไตรวาเลนท์โครเมียมสูงที่ผิวนอก ส่วนของ Goethite ที่มีความเข้มข้นของไตรวาเลนท์โครเมียมสูงนี้จะมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับ เพอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมไปเป็นไตรวาเลนท์โครเมียมสามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พร้อมทั้งได้สารประกอบของไตรวาเลนท์โครเมียมที่ละลายน้ำได้น้อยด้วย

Gu และคณะ (1998) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดยูเรเนียม (VI) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ ถ่านหิน, เหล็กออกไซด์ (FeOOH) และเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จากผลการทดลองพบว่าเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถกำจัดยูเรเนียมได้เกือบ 100 % ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรเนียมเท่ากับ 76 มิลลิโมลาร์. โดยได้เสนอกลไกในการกำจัดยูเรเนียม 2 กลไกด้วยกันดังนี้คือ

1. เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์จะรีดิวซ์ยูเรเนียม (VI) กลายเป็นยูเรเนียม (IV) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ และยูเรเนียม (IV) อาจจะสร้างพันธะอยู่ในโครงสร้างของเหล็กที่จัดเรียงตัวใหม่หลังจากถูกออกซิไดซ์โดยยูเรเนียม (VI)

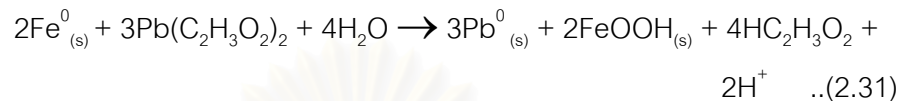
2. เพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (FeOOH) ที่เกิดขึ้นในขณะที่เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ถูกออกซิไดซ์ จะทำให้เกิดการดูดติดผิวของยูเรเนียม (VI) บนพื้นผิวของเพอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์

โดยกลไกที่ 1 นั้นน่าจะมีบทบาทสำคัญในการกำจัดยูเรเนียม

Sherman และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และไดวาเลนท์ตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์ (Fe^0) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-30 นาโนเมตร และผงเหล็กขนาด 40 mesh และ - 325 mesh โดยทำการทดลองแบบแบตช์ จากการทดลองพบว่าเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์และผงเหล็กสามารถกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และไดวาเลนท์ตะกั่ว ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยรีดิวซ์ เฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) กลายเป็นไดวาเลนท์โครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งจะสร้างพันธะอยู่ในโครงสร้างของเหล็กที่จัดเรียงตัวใหม่หลังจากถูกออกซิไดซ์ ทำให้เกิดเป็นผลึกของแชนจ์โครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) ดังสมการ 2.30



และรีดิวซ์ไดวาเลนต์ตะกั่ว (Pb^{2+}) กลายเป็นซีโรวาเลนต์ตะกั่ว (Pb^0) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ดังสมการ 2.31



โดยที่เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์ (Fe^0) มีอัตราการกำจัดแยกชะวาเลนทีโครเมียมและไดวาเลนต์ตะกั่วสูงกว่าผงเหล็กทั้งสองถึง 30 เท่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า

ทิพย์ ชัยวิริยกุล (2537) ศึกษาการนำโลหะนิกเกิลในน้ำเสียจากการชุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน จากการทดลองพบว่า เรซินชนิดพิเศษที่มีหมู่ฟังก์ชันนอลเป็นชนิดอิมิโนไดอะเซติกแอซิด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออนได้ดีกว่าเรซินชนิดธรรมดาที่มีหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปเป็นชนิดซัลโฟนิกแอซิด โดยที่ความเข้มข้นนิกเกิล 300 มก./ล. เรซินชนิดพิเศษสามารถแลกเปลี่ยนนิกเกิลได้ประมาณ 73,909 มก./ล.เรซิน เทียบเท่าความจุรวม 2.51 eq.Ni²⁺/l.resin และช่วงการฟื้นอำนาจเรซินสามารถนำโลหะนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ ที่อัตราการล้างกรด 4.5 BV/hr ความเข้มข้นกรด 3% โดยน้ำหนัก ได้นิกเกิล 72,772 มก./ล.เรซิน ส่วนเรซินชนิดธรรมดาที่สภาวะเดียวกันสามารถแลกเปลี่ยนนิกเกิลได้ประมาณ 66,553 มก./ล.เรซิน เทียบเท่าความจุรวม 1.16 eq.Ni²⁺/l.resin และนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ 52,274 มก./ล.เรซิน

พนจิตร ธนสิน (2539) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ จากการทดลองพบว่า ตัวกลางทั้งสองมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มก./ล. พีเอชเท่ากับ 6 โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและนิกเกิลเท่ากับ 68.92 % และ 69.52 % สำหรับทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และเท่ากับ 60.66 % และ 68.27 % สำหรับทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งปริมาณสังกะสีและนิกเกิลที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 1,978.02 มก./ล.เรซิน และ 2,136.33 มก./ล.เรซิน และสังกะสีและนิกเกิลที่ทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 2,982.64 มก./ล.เรซิน และ 3,057.52 มก./ล.เรซิน

สมบูรณ์ ประถมศรีเมฆ (2543) ศึกษาการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เหล็กออกไซด์ จากการทดลองพบว่าพีเอชมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยที่พีเอช 8 ถึง 10 สามารถกำจัดนิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ได้มากกว่า 90 % และจากการทดลองแบบใช้คอลัมน์พบว่าอัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความสูงของชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลที่ลดลง โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 %

2.12 สาเหตุที่เลือกนิกเกิลและเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในการทำวิจัย

1. เพื่อศึกษาว่าผงตะไบเหล็กจะสามารถกำจัดโลหะหนักที่มีวิธีการกำจัดต่างกันได้หรือไม่ โดย
 - เฮกซะวาเลนทีโครเมียมนั้นจะเป็นวิธีการรีดักชัน
 - นิกเกิลจะเป็นการดูดติดผิวของเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ผงตะไบเหล็กเกิดการกัดกร่อน
2. เฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเป็นโลหะหนักที่มักพบร่วมกันในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล โดยใช้ผงตะไบเหล็ก โดยมีแผนการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยดังนี้

แผนการวิจัย

- 3.1 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม-นิกเกิล
- 3.3 การดำเนินการทดลอง
- 3.4 วิธีการวิเคราะห์

ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองแบบแบตช์

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล
2. ศึกษาผลของค่าพีเอช
3. ศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแบบคอลัมน์

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1.1 เครื่องเขย่า (Shaking Machine)
- 3.1.1.2 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
- 3.1.1.3 เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

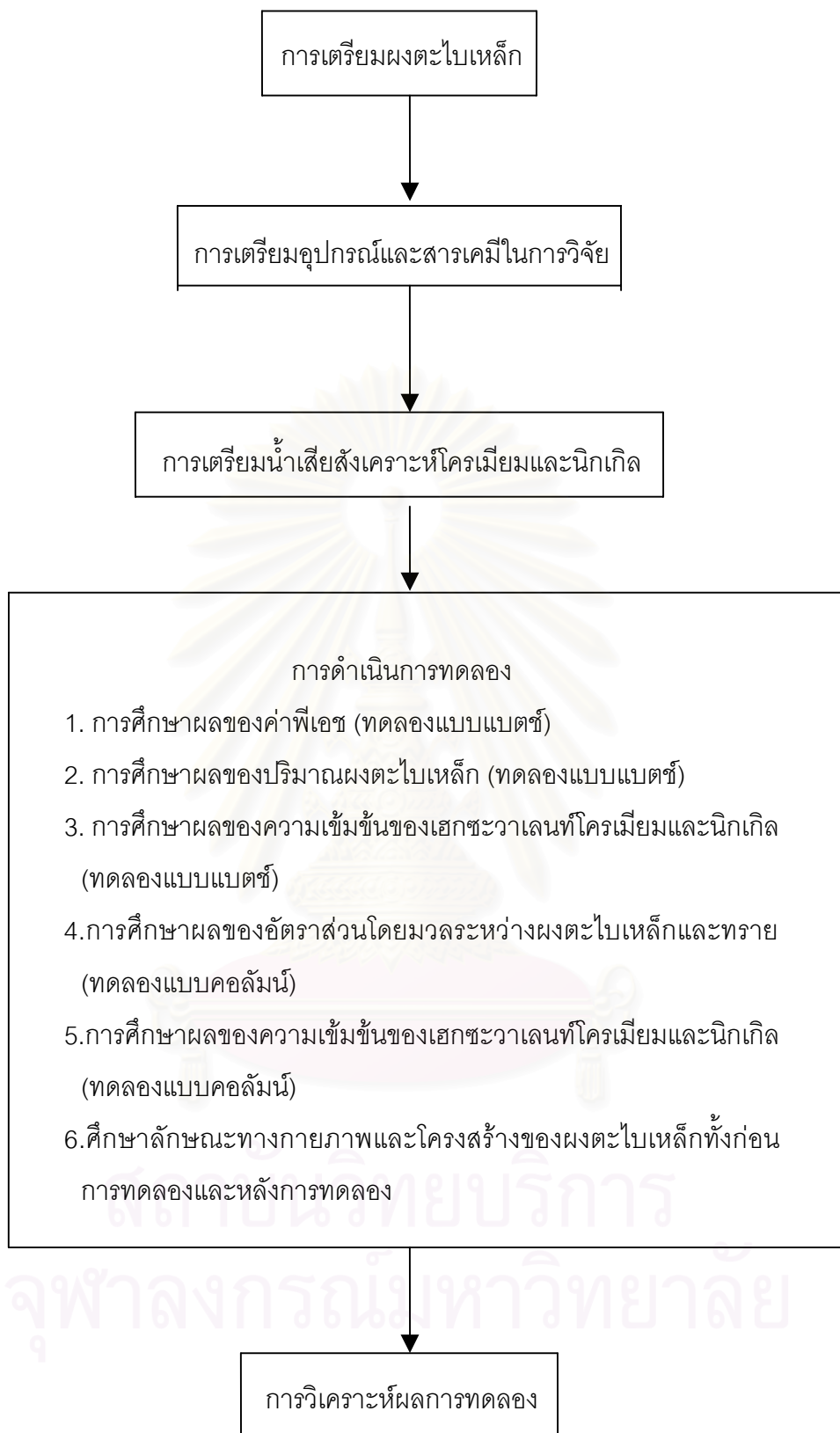
3.1.1.4 หลอดเขย่า (Conical Tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.1.1.5 คอลัมน์อะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร

3.1.1.6 อุปกรณ์สำน้ำเกลือครบชุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงแผนการทดลองและขั้นตอนการวิจัย

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

- โซเดียมโครเมต ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa)
- กรดไนตริก (HNO_3)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาโครเมียม

- ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1,5-diphenylcarbazide)
- อะซีโตน (CH_3COCH_3)
- โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)
- โซเดียมเอไซด์ (NaN_3)
- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- กรดไนตริก (HNO_3)

3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม-นิกเกิล

3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม-นิกเกิล เตรียมได้จากโซเดียมโครเมต ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และนิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะมีความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมของโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร โดยจะต้องใช้โซเดียมโครเมต 0.0450, 0.0900 และ 0.1350 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ตามลำดับ และเติมนิกเกิลซัลเฟต 0.0446, 0.0892 และ 0.1338 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ตามลำดับ แล้วเติมโซเดียมอะซิเตรต 13.608 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์

3.2.2 ปรับค่าพีเอช เป็น 4, 5, 6 และ 7 ด้วยกรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.2 หลอดเขย่าสารขนาด 50 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.3 เครื่องเขย่า (Shaker) ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การดำเนินการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองแบบแบดซ์

3.3.1 การศึกษาผลของค่าพีเอช

3.3.1.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร ค่าพีเอช 4 ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 22 หลอด

3.3.1.2 เติมผงตะไบเหล็ก 0.05 กรัม ลงในหลอดเขย่า 21 หลอด

3.3.1.3 นำหลอดทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที ด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 180 ชั่วโมง โดยเก็บขวดตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 20, 30 นาที, 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 120, 144 และ 180 ชั่วโมง หลังจากเริ่มเขย่าตามลำดับ

3.3.1.4 นำตัวอย่างไปวัดค่าพีเอชและค่าไออาร์พี จากนั้นกรองแยกส่วนน้ำใส

3.3.1.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และเหล็กทั้งหมด

3.3.1.6 ทดลองซ้ำ 3.4.1.1 ถึง 3.4.1.5 แต่เปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 5, 6, และ 7

3.3.2 การศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

3.3.2.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 22 หลอด

3.3.2.2 เติมผงตะไบเหล็ก 0.05 กรัม ลงในหลอดเขย่า 21 หลอด

3.3.2.3 นำหลอดทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที ด้วยเครื่องเขย่าจนเป็นเวลา 180 ชั่วโมง โดยเก็บขวดตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 20, 30 นาที, 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 120, 144 และ 180 ชั่วโมง หลังจากเริ่มเขย่าตามลำดับ

3.3.2.4 นำตัวอย่างไปวัดค่าพีเอชและค่าไออาร์พี จากนั้นกรองแยกส่วนน้ำใส

3.3.2.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และเหล็กทั้งหมด

3.3.2.6 ทดลองซ้ำ 3.3.2.1 ถึง 3.3.2.5 แต่เปลี่ยนปริมาณเหล็กเป็น 1.5 และ 2 กรัม

3.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและ นิกเกิล

3.3.3.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 22 หลอด

3.3.3.2 เติมผงตะไบเหล็ก 0.05 กรัม ลงในหลอดเขย่า 21 หลอด

3.3.3.3 นำหลอดทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที ด้วยเครื่องเขย่า เป็นเวลา 180 ชั่วโมง โดยเก็บขวดตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 20, 30 นาที, 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 120, 144 และ 180 ชั่วโมง หลังจากเริ่มเขย่าตามลำดับ

3.3.3.4 นำตัวอย่างไปวัดค่าพีเอชและค่าไออาร์พี จากนั้นกรองแยกส่วนน้ำใส

3.3.3.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และเหล็กทั้งหมด

3.3.3.6 ทดลองซ้ำ 3.3.3.1 ถึง 3.3.3.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 20 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแบบคอลัมน์

3.3.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ ทราย

3.3.4.1 นำผงตะไบเหล็กมวล 8 กรัม และทราย 8 กรัม มาผสมกันแล้วเทลงในคอลัมน์อะคริลิกใส

3.3.4.2 ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร ที่เตรียมไว้ผ่านคอลัมน์ ด้วยอัตราไหล 150 มิลลิลิตร/ชั่วโมง โดยใช้สายน้ำเกลือ

3.3.4.3 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์แล้วมาทำการวิเคราะห์ทุกๆ 100 มิลลิลิตร

3.3.4.4 ยุติเมื่อพบว่าเกิดการอุดตันในคอลัมน์

3.3.4.5 ทำการทดลองซ้ำ 3.3.4.1 ถึง 3.3.4.4 แต่เปลี่ยนมวลของผงตะไบเหล็ก เป็น 10 และ 12 กรัม ตามลำดับ โดยมวลของทรายไม่เปลี่ยนแปลง

3.3.4.6 ทำการทดลองซ้ำ 3.3.4.1 ถึง 3.3.4.4 แต่ไม่ใส่ทราย และใส่ผงตะไบเหล็ก มวล 8 กรัมเพียงอย่างเดียว

3.3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

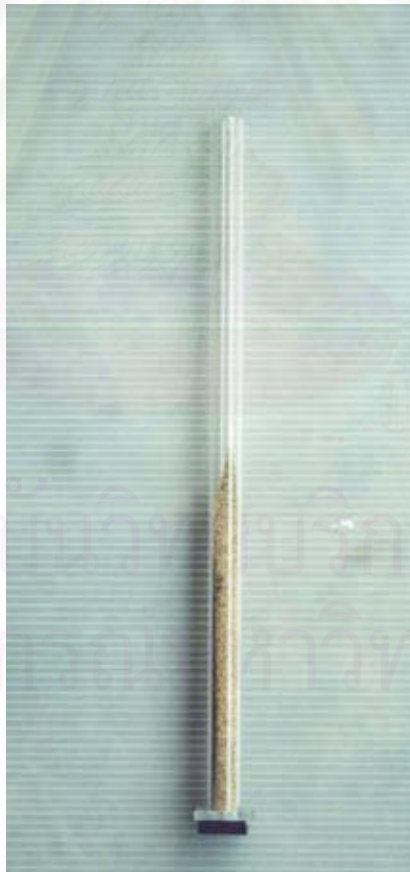
3.3.5.1 นำผงตะไบเหล็กมวล 8 กรัม และทราย 8 กรัม มาผสมกันแล้วเทลงในคอลัมน์อะคริลิกใส

3.3.5.2 ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร พีเอช6 ที่เตรียมไว้ผ่านคอลัมน์ ด้วยอัตราไหล 100 มิลลิลิตร/ชั่วโมง โดยใช้สายน้ำเกลือ

3.3.5.3 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์แล้วมาทำการวิเคราะห์ทุกๆ 100 มิลลิลิตร

3.3.5.4 ยึดเมื่อพบว่าเกิดการอุดตันในคอลัมน์

3.3.5.5 ทำการทดลองซ้ำ 3.4.5.1 ถึง 3.4.5.4 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 20 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียมและนิกเกิล/ลิตร ตามลำดับ โดยมวลของผงตะไบเหล็กและทรายไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.4 คอลัมน์ที่มีทรายผสมกับผงตะไบเหล็กอยู่



สถานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3.5 แสดงการทดลองแบบคอแลมน์และอุปกรณ์

3.4 ตัวแปรในการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2)

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบ
แบบตซ์

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. เฮกซะวาเลนทีโครเมียม	10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร
2. นิกเกิล	10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร
3. พีเอชของน้ำเสีย	4, 5, 6 และ 7
4. ปริมาณผงตะไบเหล็ก	1, 1.5 และ 2 กรัม/ลิตร
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ความเร็วรอบการเขย่า	300 รอบ/นาที
2. ขนาดของผงตะไบเหล็ก	212 ถึง 355 ไมโครเมตร
ตัวแปรตาม	
1. ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	
2. ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด	
3. ความเข้มข้นนิกเกิล	
4. ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมด	
5. พีเอช	
6. ไออาร์พี	

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบ
คอกลมน์

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. แยกชะวาลงที่โครเมียม	10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร
2. นิกเกิล	10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร
3. อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย	8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. พีเอชของน้ำเสีย	6
2. ขนาดของคอกลมน์	
ความสูงคอกลมน์	30 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลาง	1 เซนติเมตร
3. ขนาดของผงตะไบเหล็ก	212 ถึง 355 ไมโครเมตร
4. ขนาดของทราย	212 ถึง 355 ไมโครเมตร
ตัวแปรตาม	
1. ความเข้มข้นแยกชะวาลงที่โครเมียม	
2. ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด	
3. ความเข้มข้นนิกเกิล	
4. ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมด	
5. พีเอช	
6. ไออาร์พี	

3.5 วิธีการวิเคราะห์

3.5.1 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม วิเคราะห์ด้วยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิโนลคาร์บาริไซด์ (Photometric Diphenyl Carbarzide) (ASTM Standard, 1996) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นได้ในช่วง 0.01 ถึง 0.5 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังนั้นจะต้องเจือจางน้ำตัวอย่าง 50 เท่าก่อนวิเคราะห์

3.5.2 ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี โฟโตเมตริกไดฟิโนลคาร์บาริไซด์เช่นกัน แต่จะต้องนำตัวอย่างไปออกซิไดซ์ไตรวาเลนท์โครเมียมให้เป็นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ตามวิธี 3500-Cr B ของ Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, และ WEF, 1998)

3.5.3 ความเข้มข้นของนิกเกิล วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.5.4 วัดค่าพีเอชด้วยพีเอชมิเตอร์

3.5.5 วิเคราะห์ฝังตะไบ่เหล็กก่อนการทดลองและที่ได้ภายหลังการทดลองด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทโรโฟโตมิเตอร์ด้วยกล้องถ่ายภาพ Scanning Electron Microscopes (SEM), เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) และเครื่อง WaveLength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบแบดซ์

4.1.1 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช

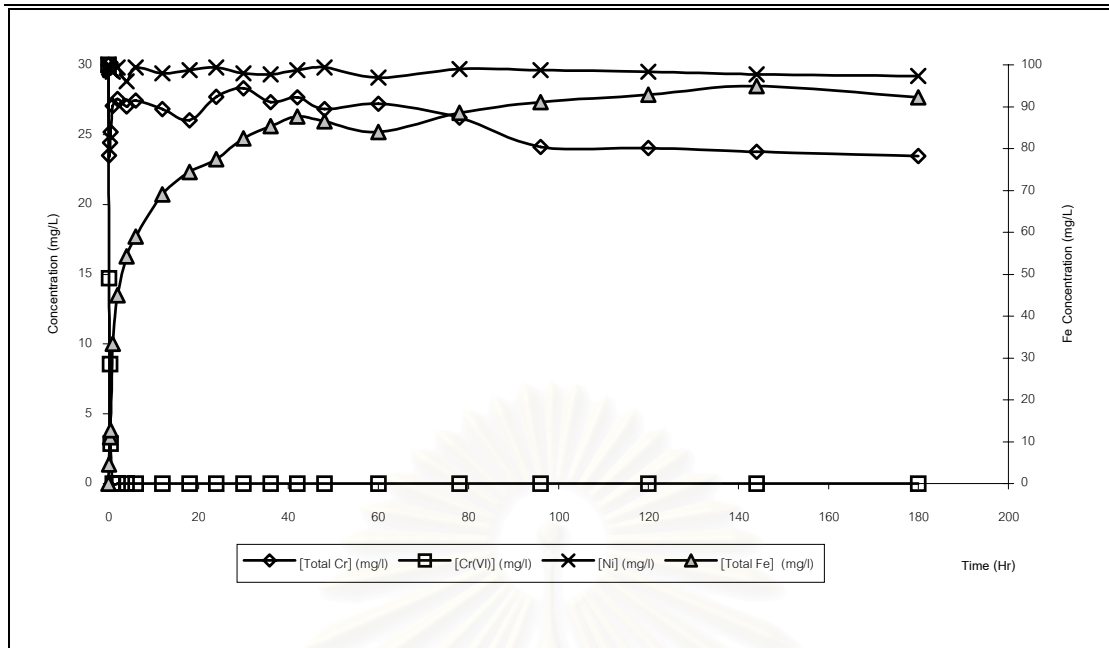
การศึกษาผลของค่าพีเอชที่พีเอช 4, 5, 6 และ 7 ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 30 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นนิกเกิล 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร เป็นดังนี้

ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 4 ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.2 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจาก 29.76 มิลลิกรัม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 1 ชั่วโมง แต่กำจัดโครเมียมทั้งหมดได้เพียงเล็กน้อย โดยที่เวลา 180 ชั่วโมง ยังคงมีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอยู่สูงถึง 23.45 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่นิกเกิลก็ถูกกำจัดได้ยากเช่นกัน ที่เวลา 180 ชั่วโมงก็ยังคงมีความเข้มข้นอยู่สูงถึง 29.2 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเวลาผ่านไปค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นจากที่เวลา 0.167 ชั่วโมงมีค่า 3.84 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 77.20 มิลลิกรัมเหล็ก/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 4.03 และมีค่าเป็น 4.65 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 189 มิลลิโวลต์ ต่อมาลดลงเป็น 10 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 2 ชั่วโมง และมีค่าเป็น -230 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

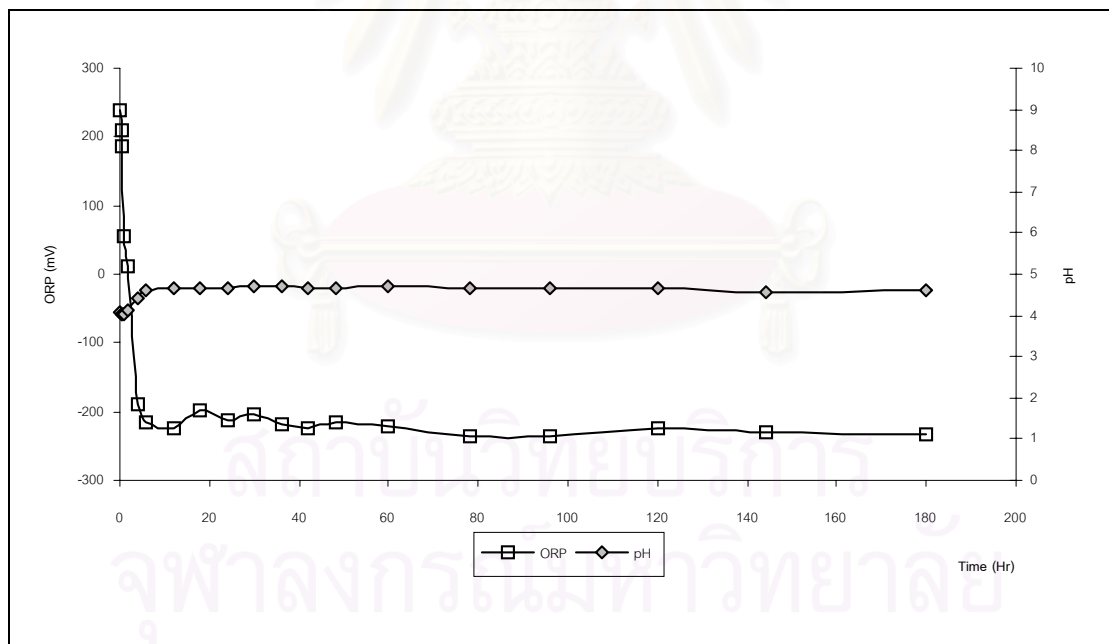
ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 5 ดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.4 พบว่าผงตะไบเหล็กมีอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมช้ากว่าที่พีเอช 4 โดยจะต้องใช้ถึงเวลา 6 ชั่วโมง จึงจะกำจัดได้หมด ในขณะที่โครเมียมทั้งหมดจะถูกกำจัดได้มากกว่าที่พีเอช 4 มาก แต่ก็ยังไม่สามารถถูกกำจัดได้หมด โดยที่เวลา 180 ชั่วโมงยังคงมีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ 1.37 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนการกำจัดนิกเกิลนั้นจะมากกว่าที่พีเอช 4 เพียงเล็กน้อย ที่เวลา 180 ชั่วโมงยังคงมีความเข้มข้นอยู่สูงถึง 27.08 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเวลาผ่านไปค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่า 77.20 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 5.01 ต่อมาเพิ่มขึ้นเป็น 5.47 ที่เวลา 6 ชั่วโมง และมีค่าเป็น 6.58 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 186 มิลลิโวลต์ ต่อมาลดลงเป็น 80 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง และมีค่าเป็น -221 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 6 ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.6 พบว่าผงตะไบเหล็กต้องใช้เวลาถึง 78 ชั่วโมงจึงจะสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้หมด ที่เวลาดังกล่าวโครเมียมทั้งหมดจะเหลืออยู่ 1.43 มิลลิกรัม/ลิตร และถ้าจะกำจัดโครเมียมทั้งหมดได้หมดต้องใช้เวลา 96 ชั่วโมง ความสามารถในการกำจัดนิกเกิลที่พีเอช 6 สูงกว่าที่พีเอช 4 และ 5 มาก จากรูปที่ 4.6 ภายหลังจากที่เฮกซะวาเลนทีโครเมียมถูกกำจัดหมดไปแล้วอัตราการกำจัดนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นสูงมากในช่วง 80 – 120 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัตราการกำจัดนิกเกิลก็จะลดลง และอัตราการเพิ่มค่าเหล็กจะละลายทั้งหมดจะเพิ่มสูงอย่างมากในช่วง 80 – 120 ชั่วโมงซึ่งเป็นช่วงหลังจากที่เฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่เพิ่งถูกกำจัดหมดไป หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าเหล็กจะละลายทั้งหมดก็จะลดลง ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 6.01 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเป็น 7.53 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์มีค่า 197 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น -291 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

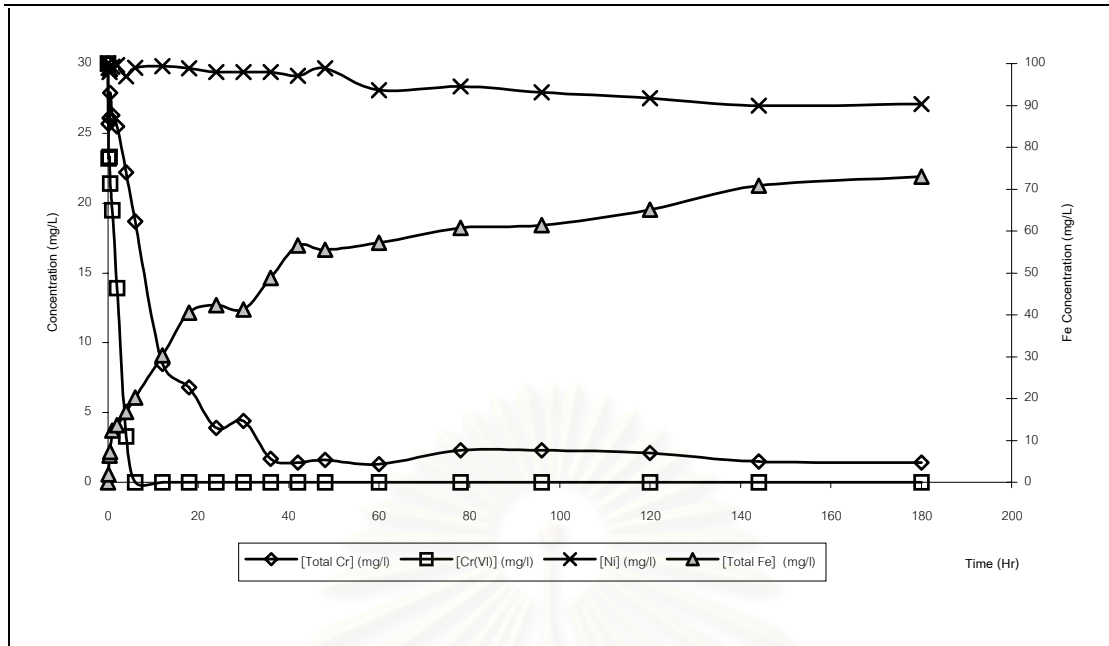
ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 7 ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.8 พบว่าผงตะไบเหล็กไม่สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดที่พีเอช 7 นี้ต่ำมากเมื่อเทียบกับ ที่พีเอช 4 ,5 ,6 และ 7 ที่เวลา 180 ชั่วโมงยังคงมีเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเหลืออยู่ 15.08 มิลลิกรัม/ลิตร, โครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ 16.84 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร และนิกเกิลเหลืออยู่ 23.88 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 7 นี้ค่าของเหล็กที่ละลายออกมาจะน้อยมากเมื่อเทียบกับพีเอชอื่นๆที่ศึกษามา ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่าเพียง 1.82 มิลลิกรัมเหล็ก/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 7.01 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าเป็น 7.42 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์มีค่า 185 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น 15 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่พีเอช 7 นี้เหล็กสามารถละลายออกมาได้น้อยทำให้ไม่สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้หมด ทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและไออาร์ที่น้อยกว่าพีเอช 4 ,5 และ 6 ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้หมด



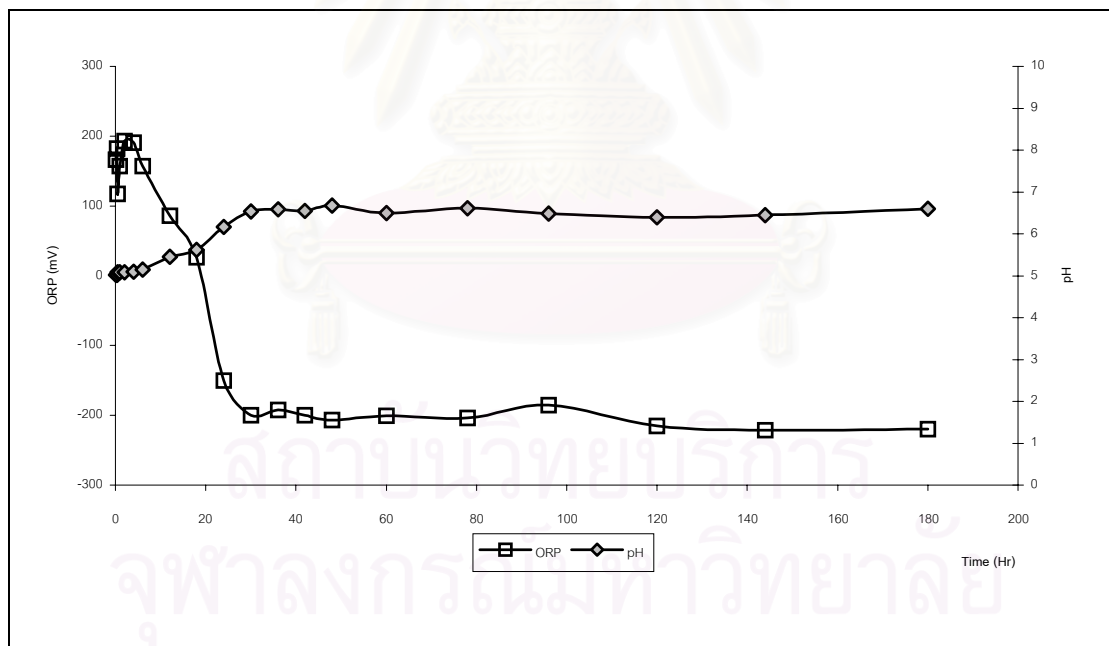
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



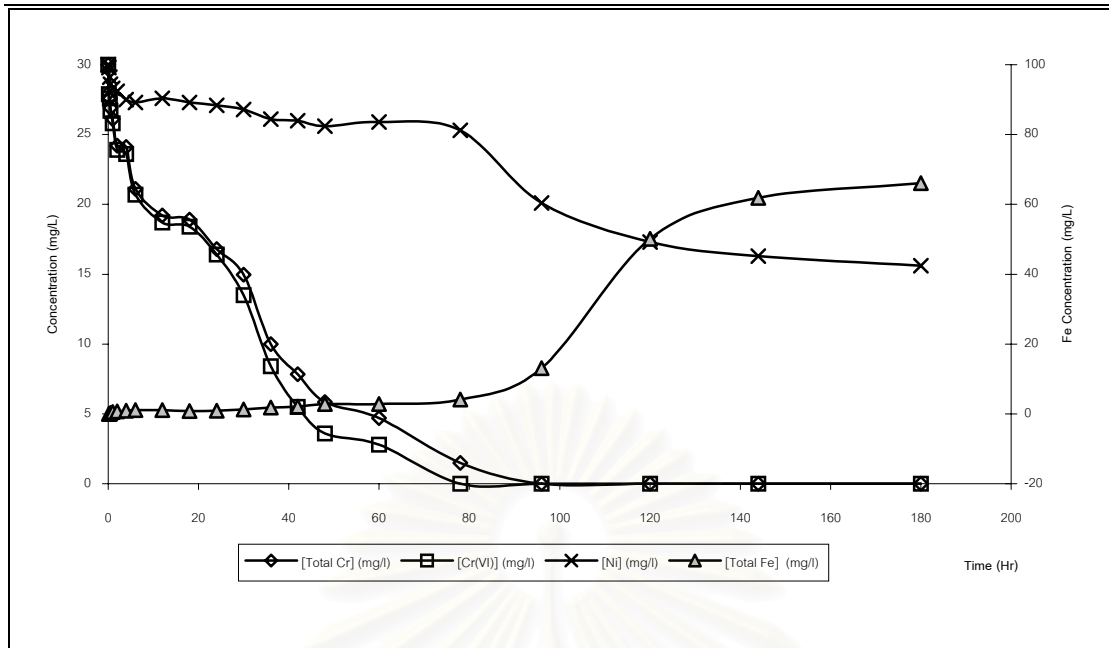
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



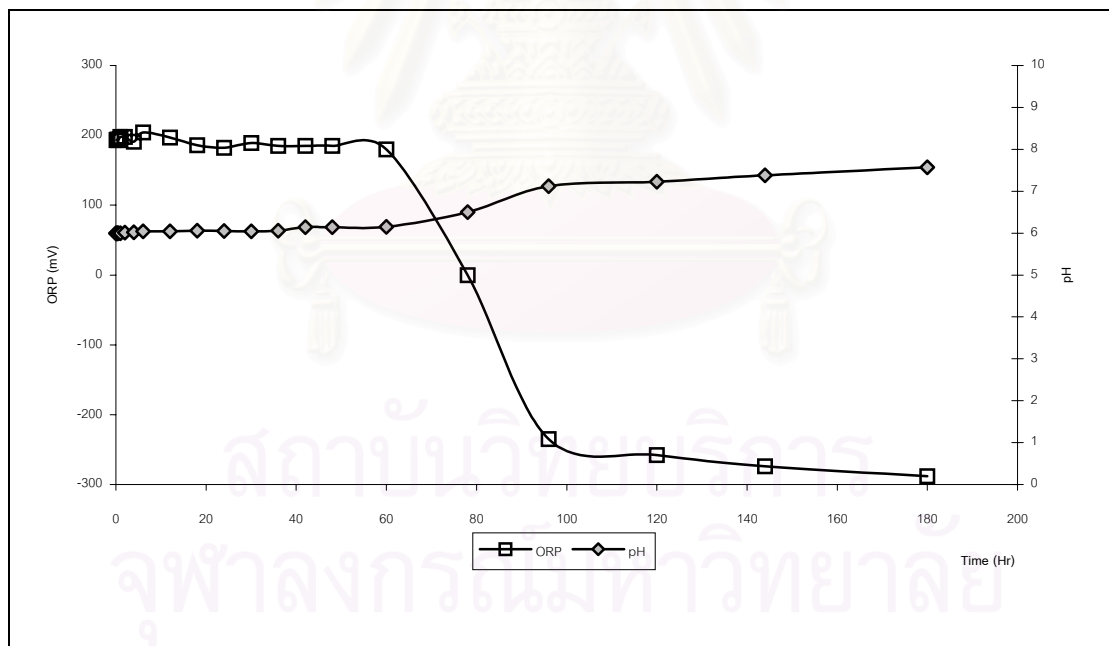
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



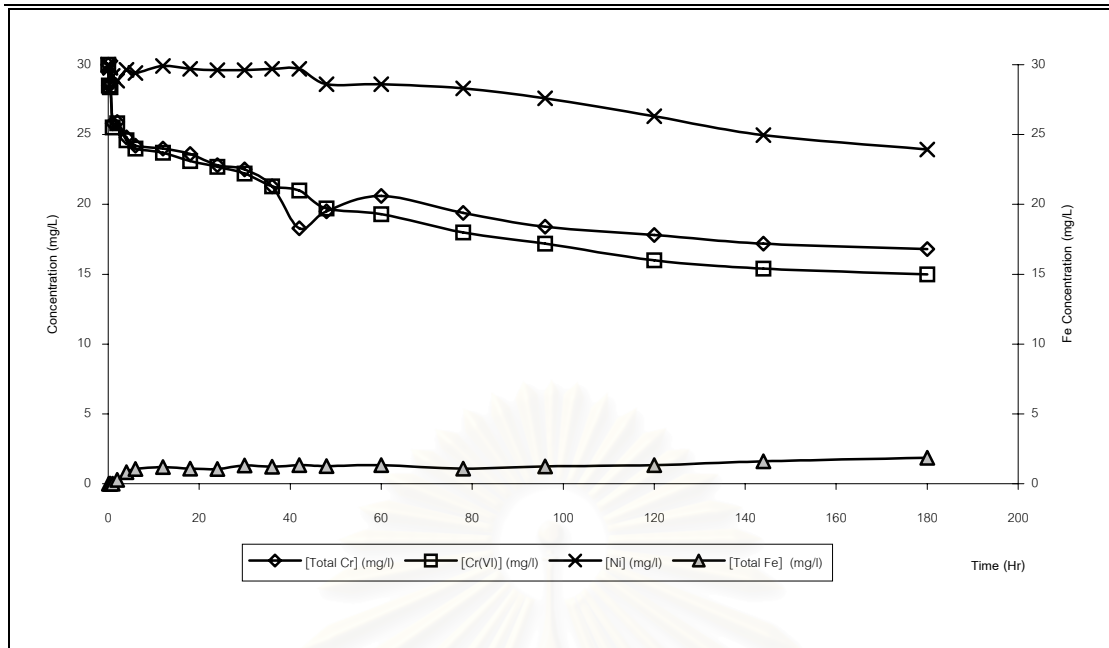
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



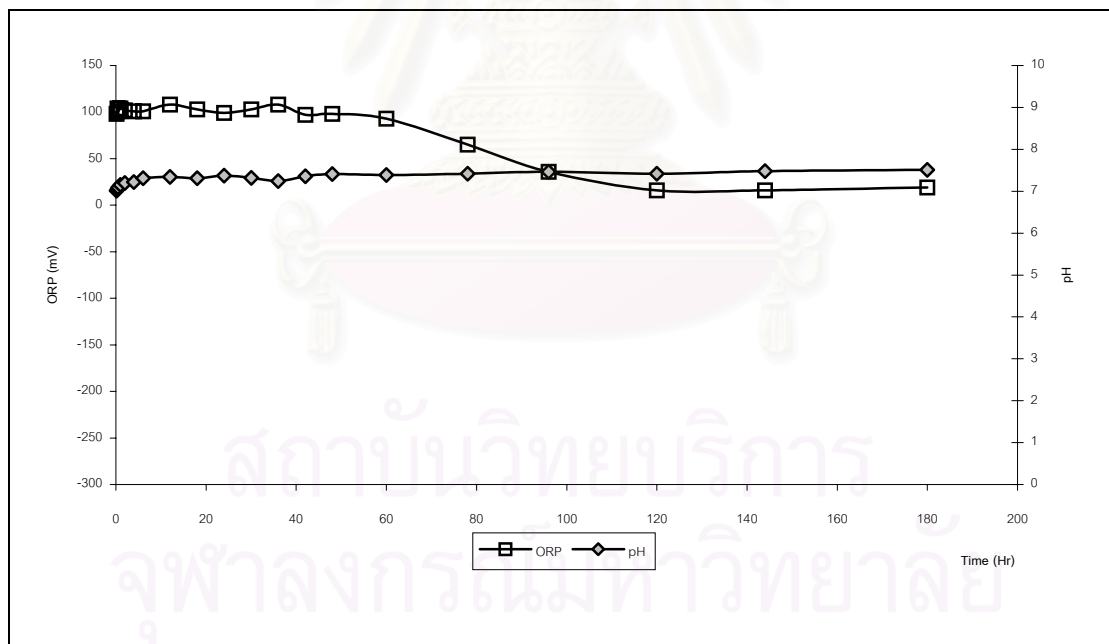
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

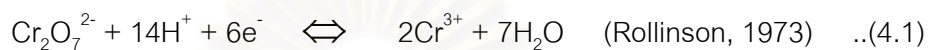


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

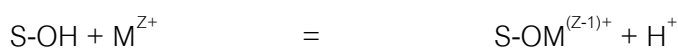
จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำๆ ที่พีเอช 4, 5 และ 6 สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ทั้งหมด ส่วนที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าถ้าพีเอชมีค่าลดลงซึ่งหมายถึงเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาของสมการทำให้เกิดการรีดักชันได้ดีขึ้น จึงสรุปได้ว่าพีเอชมีผลต่อการเกิดรีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมไปเป็นไตรวาเลนทีโครเมียม โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าลดลง



จากรูปที่ 4.10 ที่เวลา 180 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดได้น้อยที่สุดคือประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อพีเอชมีค่าลดลงจะให้ความสามารถในการละลายน้ำของไตรวาเลนทีโครเมียมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ทำให้โครเมียมทั้งหมดที่อยู่ในรูปไตรวาเลนทีโครเมียมถูกแยกออกจากน้ำเสียได้ยาก ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่พีเอช 6 มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าที่พีเอชต่ำมากๆ เช่น 4 ประสิทธิภาพการกำจัดไตรวาเลนทีโครเมียมจะต่ำ พีเอช 5 และ 6 มีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่พีเอช 7 ประสิทธิภาพไม่สูงเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ยาก

จากรูปที่ 4.11 ที่เวลา 180 ชั่วโมง พีเอช 6 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลสูงที่สุดประมาณ 49 เปอร์เซ็นต์ พีเอช 7, 5 และ 4 มีประสิทธิภาพ 20, 10 และ 3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าความสามารถในการละลายน้ำของนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้พีเอช 4 และ 5 มีประสิทธิภาพต่ำ เพราะทั้งสองเป็นสภาวะที่มีพีเอชของน้ำต่ำ ทำให้ในการแยกนิกเกิลออกจากน้ำเสียทำได้ยากกว่าที่พีเอชสูง อีกทั้งการดูดติดผิวของนิกเกิลบนเหล็กออกไซด์จะเกิดได้ดีที่พีเอชเป็นกลางหรือที่สูง (สมบุญ ปรระถมศรีเมฆ, 2543)

เมื่อพิจารณาสมการดูดติดผิวโลหะประจุบวกของเหล็กออกไซด์จากตารางที่ 2.1

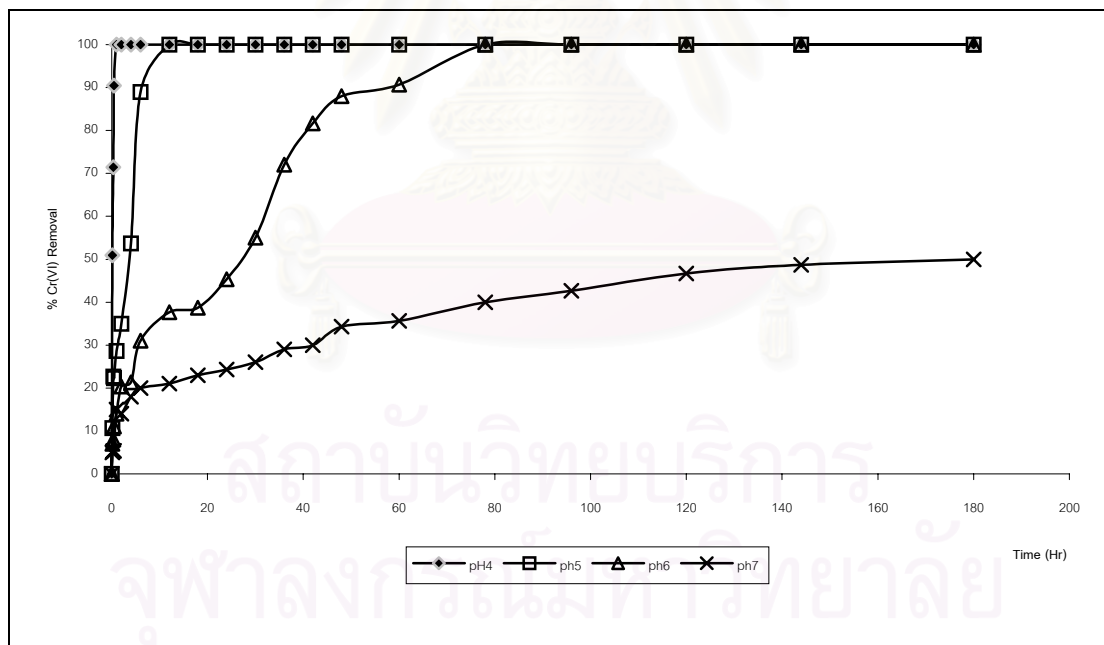


เมื่อ S คือ พื้นผิว (Surface) และ M^{Z+} คือ โลหะประจุบวกของ

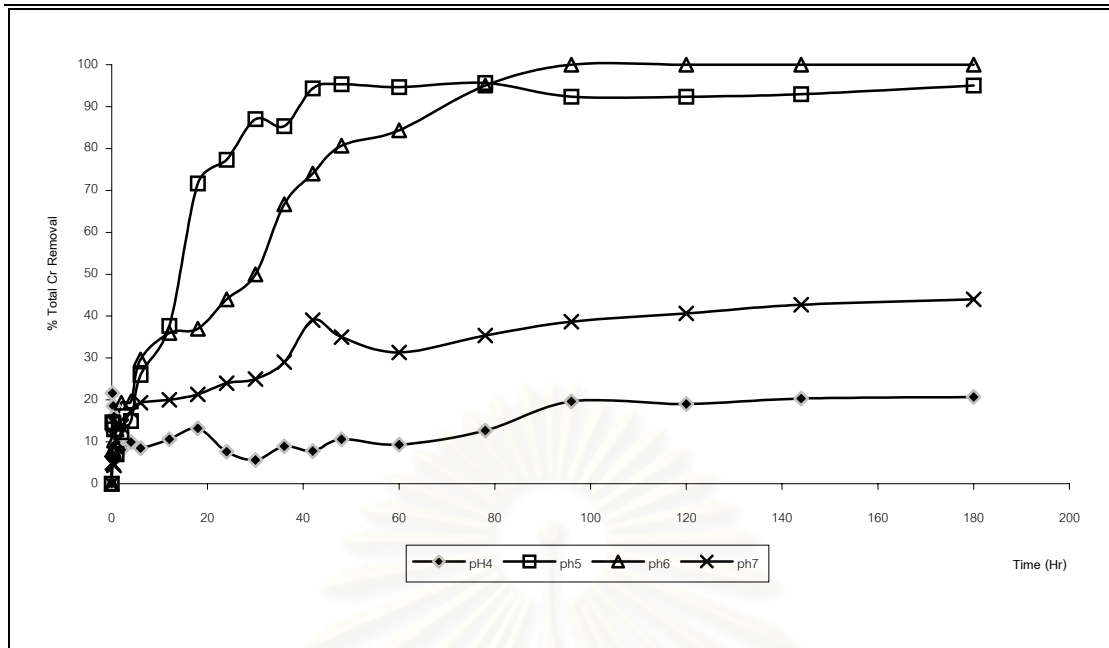
จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดติดผิว โดยประจุบวกสองจะเกิดการยึดติดกับอะตอมของออกซิเจน และควบคุมกับการปล่อยโปรตอน (H^+) ในกรณีที่พีเอชของสารละลายต่ำ จะมีผลทำให้สมดุลเลื่อนไปทางซ้ายของสมการทำให้เกิดการดูดติดผิวน้อย ถ้าในกรณีที่พีเอชของสารละลายสูง ก็เกิดผลในทางตรงกันข้ามนั่นก็คือจะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาของสมการ ทำให้เกิดการดูดติดผิวมาก

ส่วนที่พีเอช 7 นั้นแม้จะเป็นสถานะที่มีพีเอชสูงน่าจะมีการกำจัดนิกเกิลได้ดี แต่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กน้อยทำให้เกิดเป็นเหล็กออกไซด์ได้น้อยทำให้ประสิทธิภาพไม่สูง ที่พีเอช 6 นั้นเป็นสถานะที่สามารถเกิดการกัดกร่อนของเหล็กได้มาก และมีสถานะที่มีพีเอชสูงพอที่จะกำจัดนิกเกิล สรุปได้ว่าที่พีเอช 6 เหมาะสมที่สุดในการกำจัดนิกเกิล

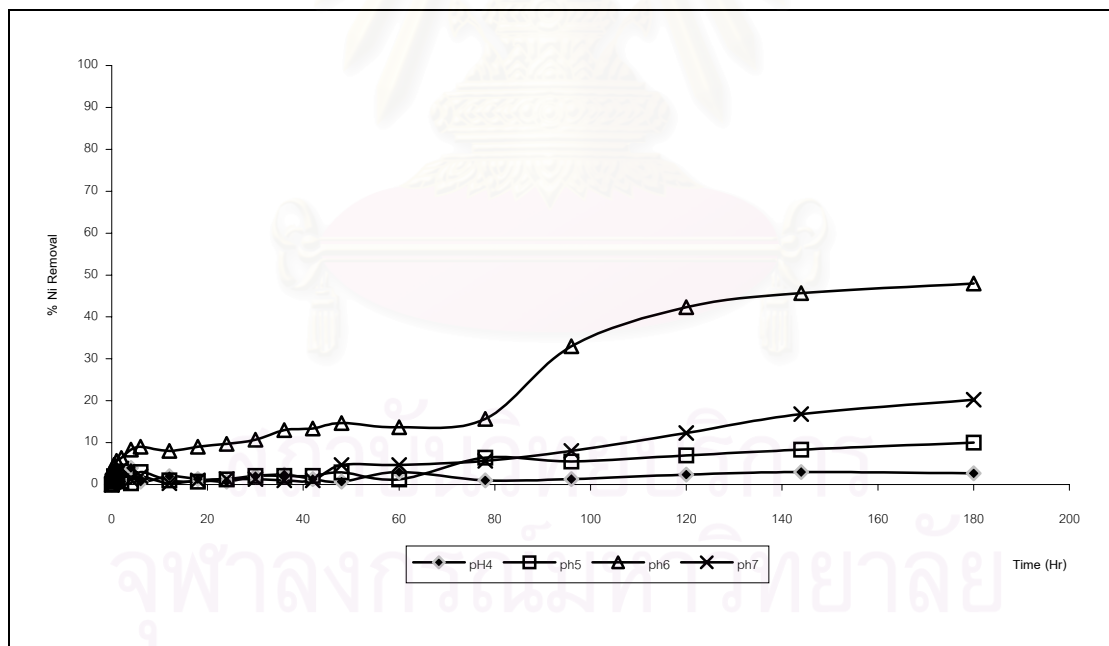
จากการศึกษาผลของค่าพีเอชสามารถสรุปได้ว่า พีเอช 6 เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดเพราะสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ไตรวาเลนท์โครเมียมได้หมด และมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลสูงที่สุด เมื่อเทียบกับพีเอช 4, 5 และ 7



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่พีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่พีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่พีเอช 4, 5, 6 และ 7 ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

4.1.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

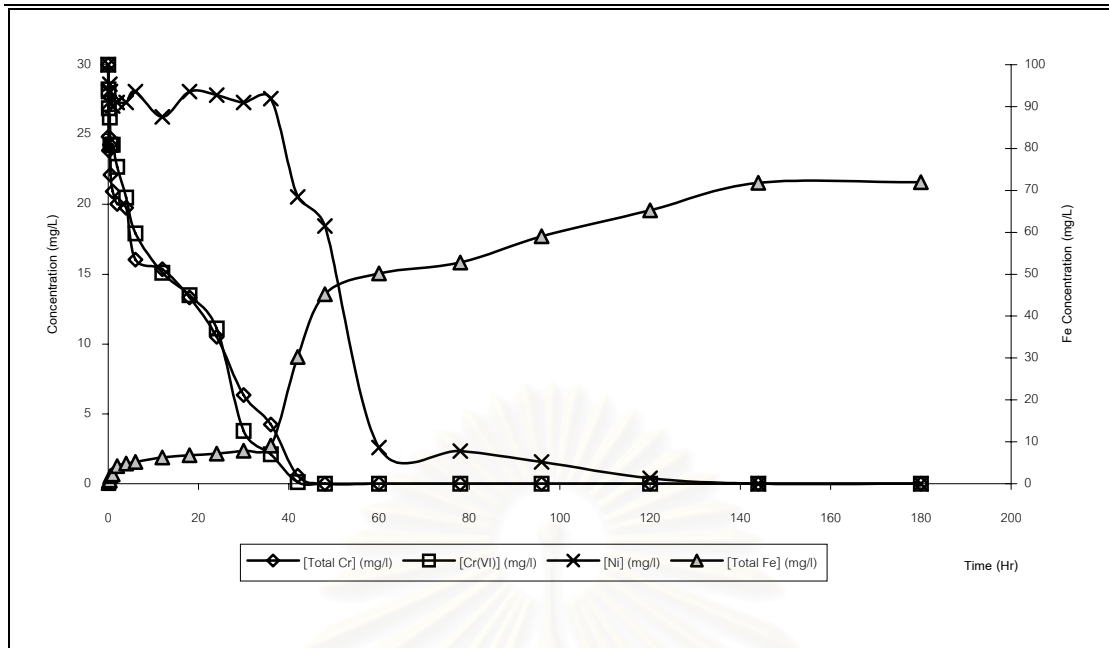
การศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 30 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นนิกเกิล 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6 เป็นดังนี้

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร เป็นสมภาวะการทดลองเดียวกับการศึกษาผลของค่าพีเอชที่ 6

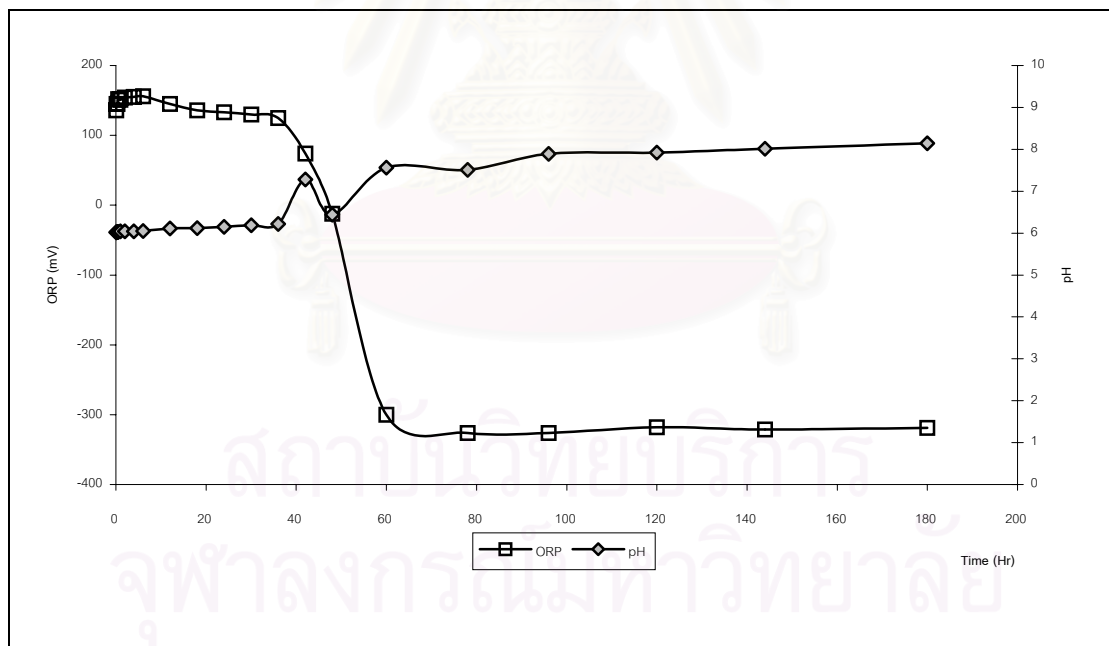
ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าผงตะไบเหล็กต้องใช้เวลา 42 ชั่วโมงจึงจะสามารถกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด และสามารถกำจัดนิกเกิลได้หมดที่เวลา 144 ชั่วโมง ค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่า 71.8 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 6.01 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าพีเอชเป็น 8.14 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 190 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น -311 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าผงตะไบเหล็กใช้เวลา 24 ชั่วโมงในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และใช้เวลา 30 ชั่วโมงจึงจะสามารถกำจัดโครเมียมทั้งหมดได้หมด และสามารถกำจัดนิกเกิลได้หมดที่เวลา 78 ชั่วโมง ค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่า 75.36 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 6.02 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจะมีค่าพีเอชเป็น 8.83 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 180 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น -314 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

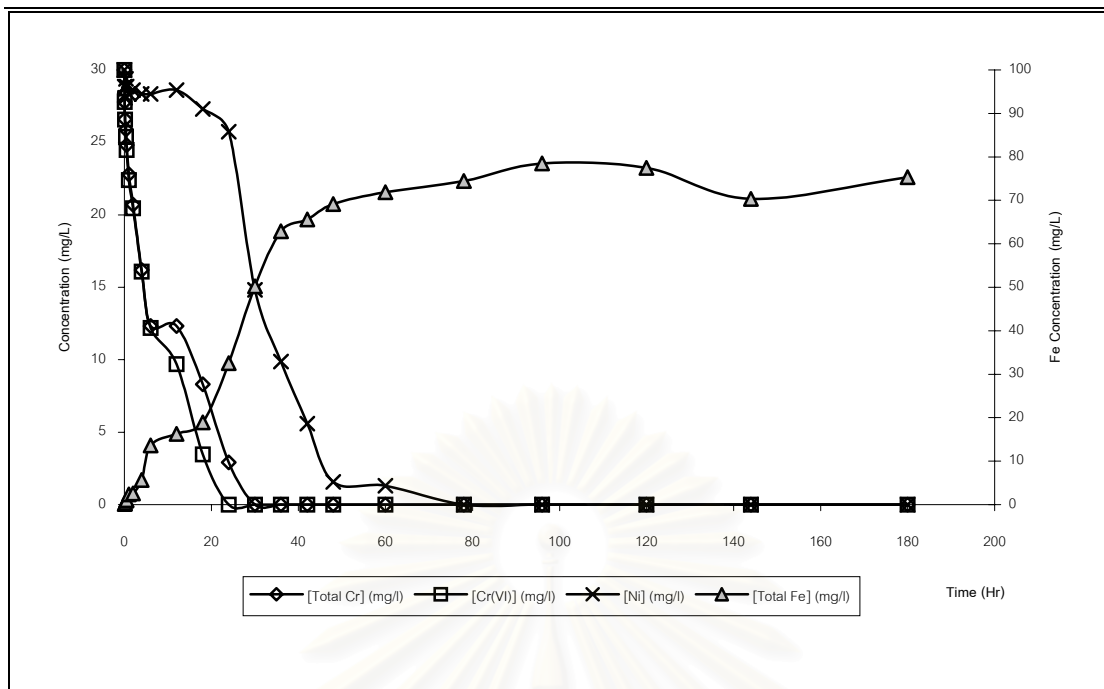
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



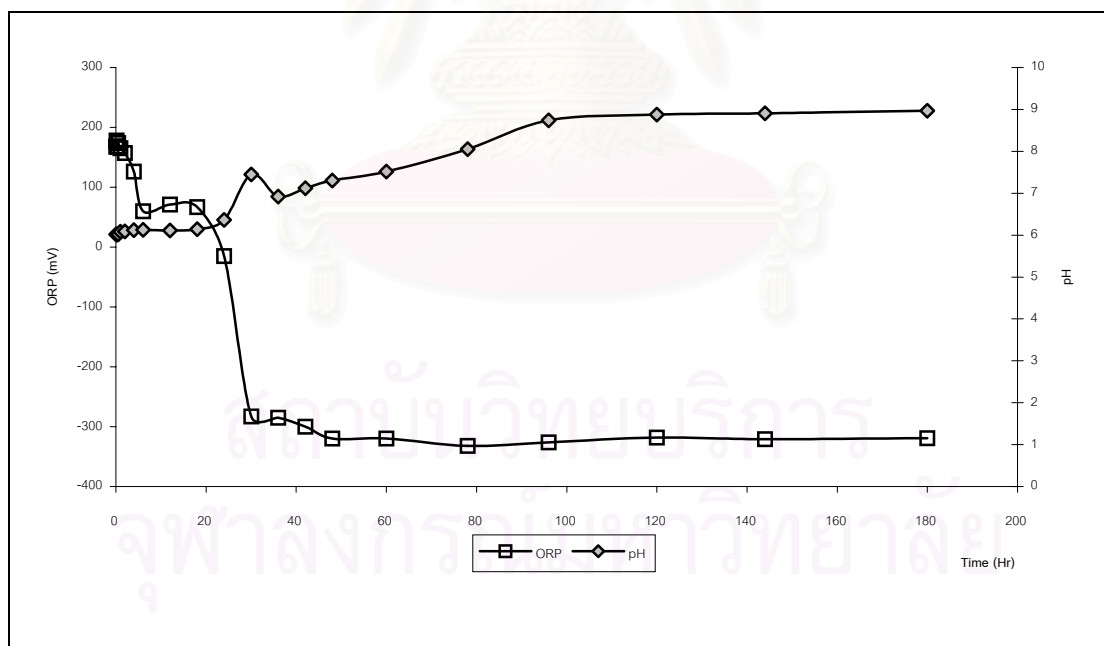
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร

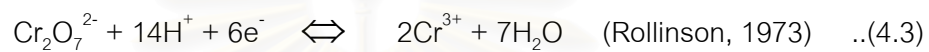
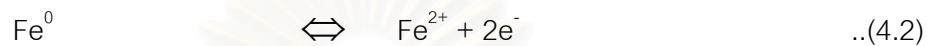


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร

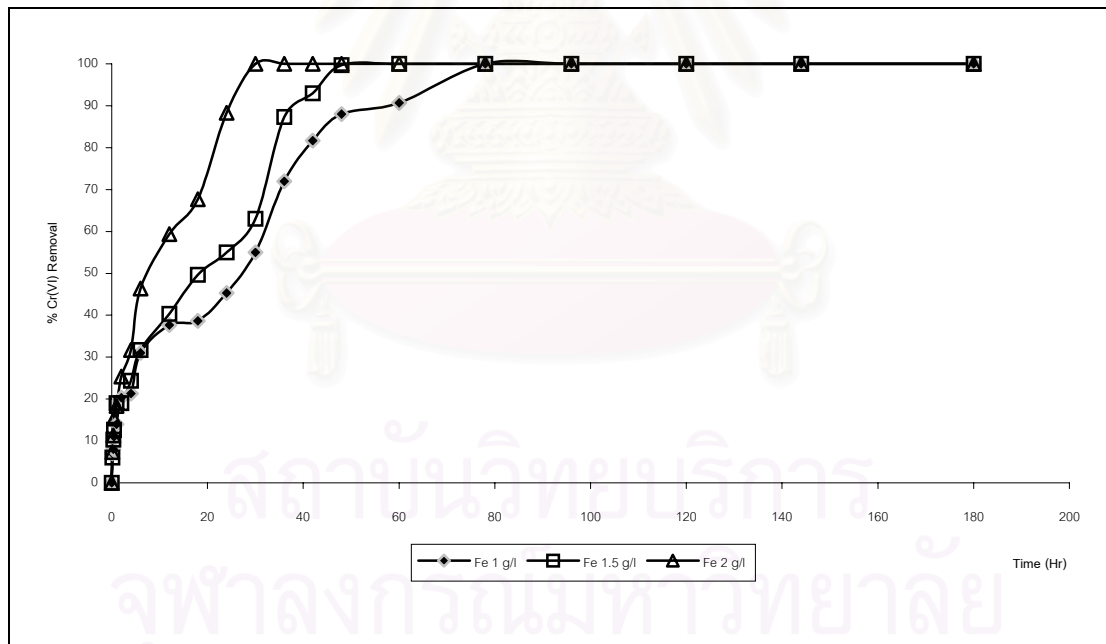


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร

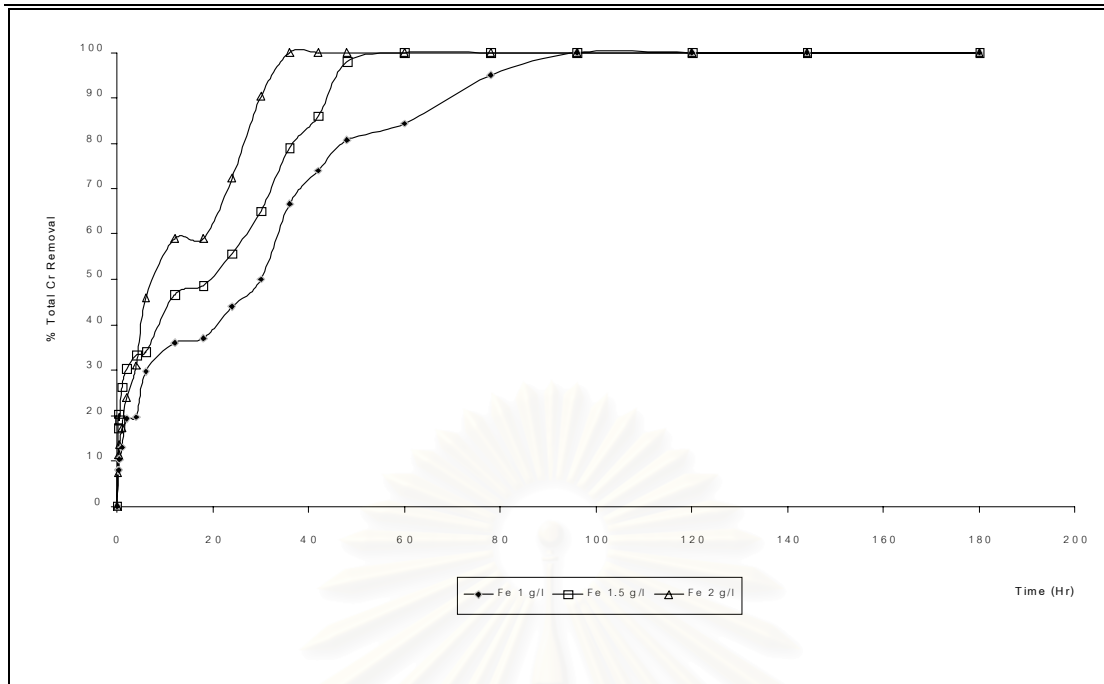
จากรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, โครเมียมทั้งหมดและนิกเกิลสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มผงตะไบเหล็กทำให้เกิดเหล็กละลายน้ำ (Fe^{2+}) และอิลเล็กตรอนเพิ่มขึ้นด้วยดังสมการที่ 4.2 ทำให้เกิดการรีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเพิ่มขึ้นดังสมการที่ 4.3 และกำจัดนิกเกิลได้ดีขึ้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่เหล็กออกไซด์ที่เกิดจากผงตะไบเหล็กเกิดการกัดกร่อนด้วย ที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร และ 2 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร สามารถกำจัดนิกเกิลได้จนหมด ในขณะที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร กำจัดนิกเกิลได้ 50 เปอร์เซ็นต์



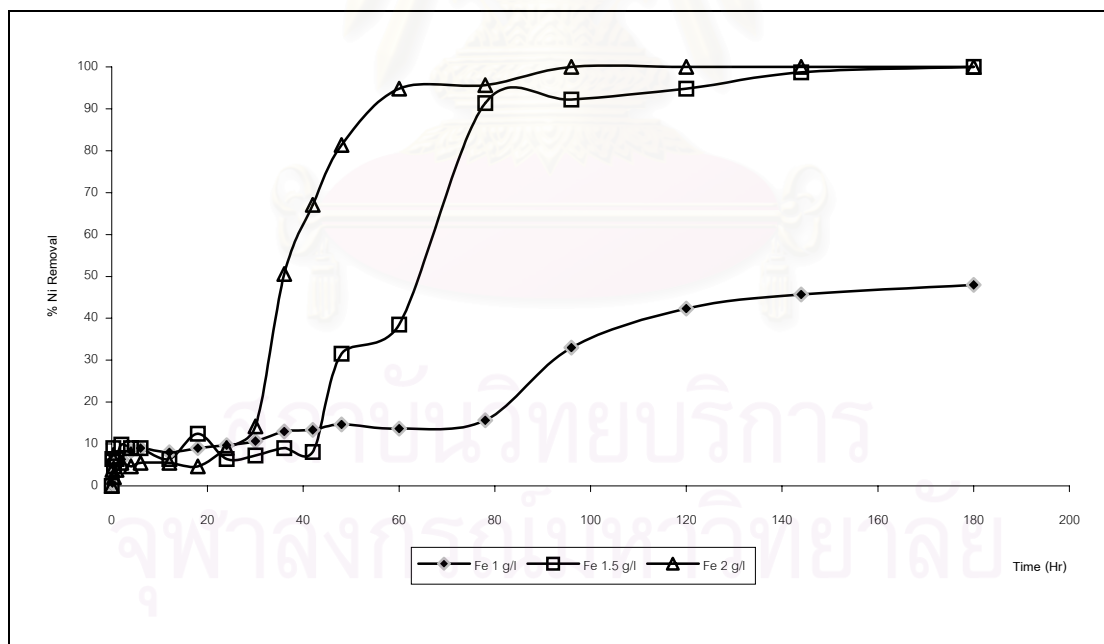
จากการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็กสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณผงตะไบเหล็กมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, โครเมียมทั้งหมดและนิกเกิลสูงขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตรที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตรที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1, 1.5 และ 2 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตรที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6

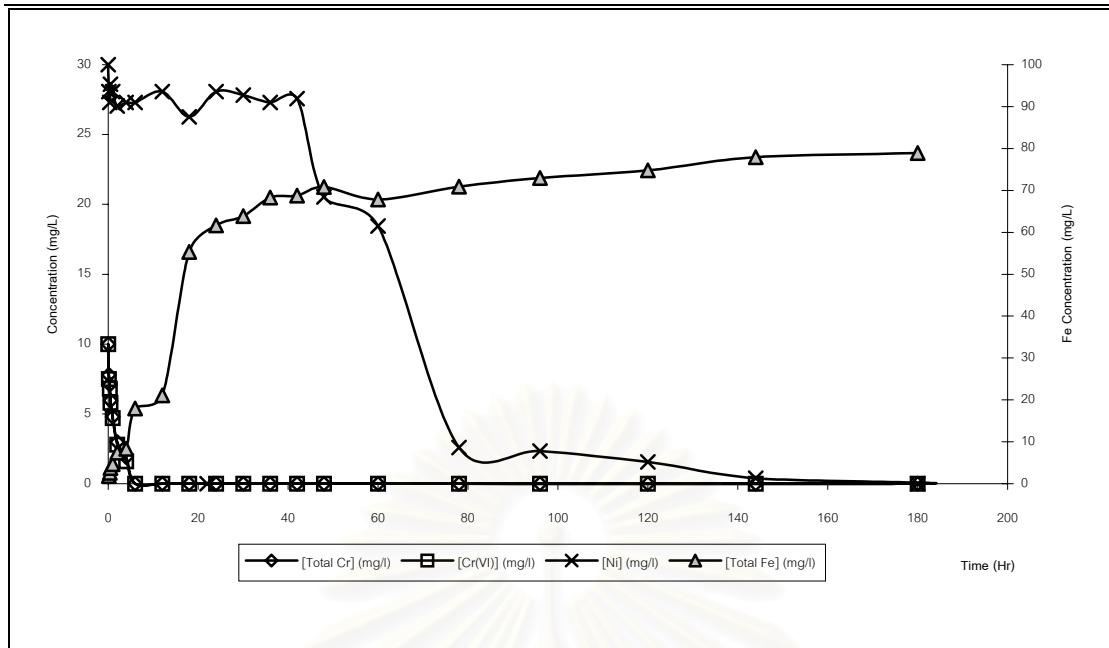
4.1.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล ต่างมีความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช6 ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร เป็นดังนี้

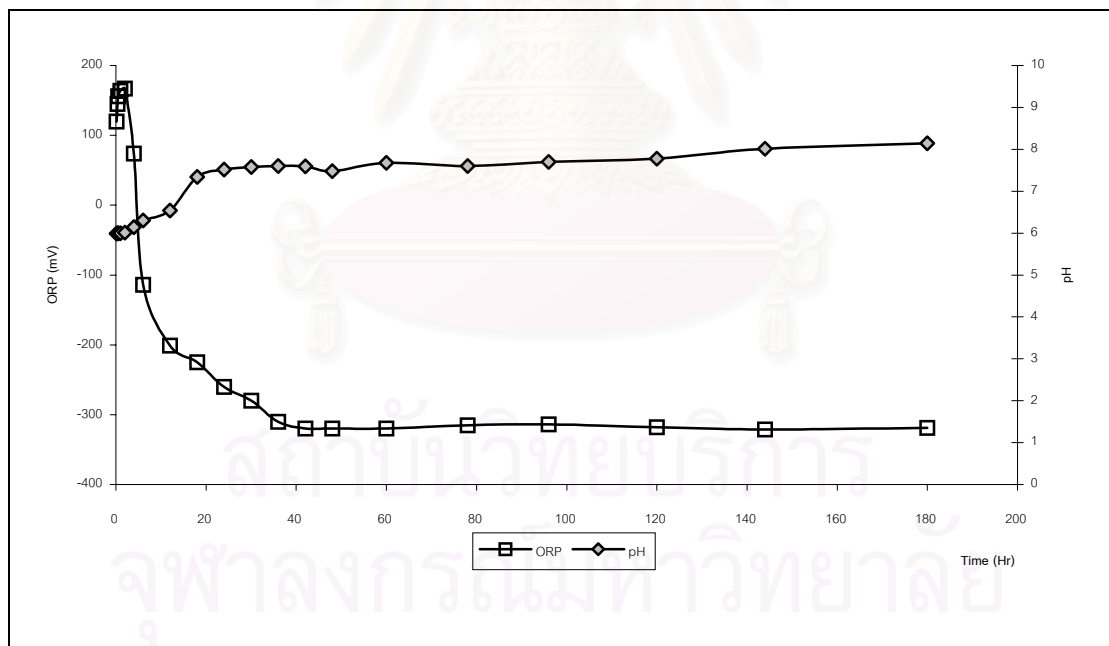
ผลการศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล 10 มิลลิกรัม/ลิตร จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าผงตะไบเหล็กต้องใช้เวลา 6 ชั่วโมงจึงจะสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด และสามารถกำจัดนิกเกิลได้หมดที่เวลา 144 ชั่วโมง ค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่า 78.94 มิลลิกรัมเหล็ก/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 6.02 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าพีเอชเป็น 7.85 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 186 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น -316 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

ผลการศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล 20 มิลลิกรัม/ลิตร จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าผงตะไบเหล็กต้องใช้เวลา 36 ชั่วโมงจึงจะสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด ที่เวลา 180 ชั่วโมงยังคงมีความเข้มข้นของนิกเกิลเหลือ 1.21 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ที่เวลา 180 ชั่วโมงจะมีค่า 78.70 มิลลิกรัมเหล็ก/ลิตร ที่เวลาเริ่มต้นพีเอชมีค่า 6.02 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าพีเอชเป็น 7.65 ที่เวลา 180 ชั่วโมง ที่เวลาเริ่มต้นไออาร์พีมีค่า 185 มิลลิโวลต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและมีค่าเป็น -316 มิลลิโวลต์ ที่เวลา 180 ชั่วโมง

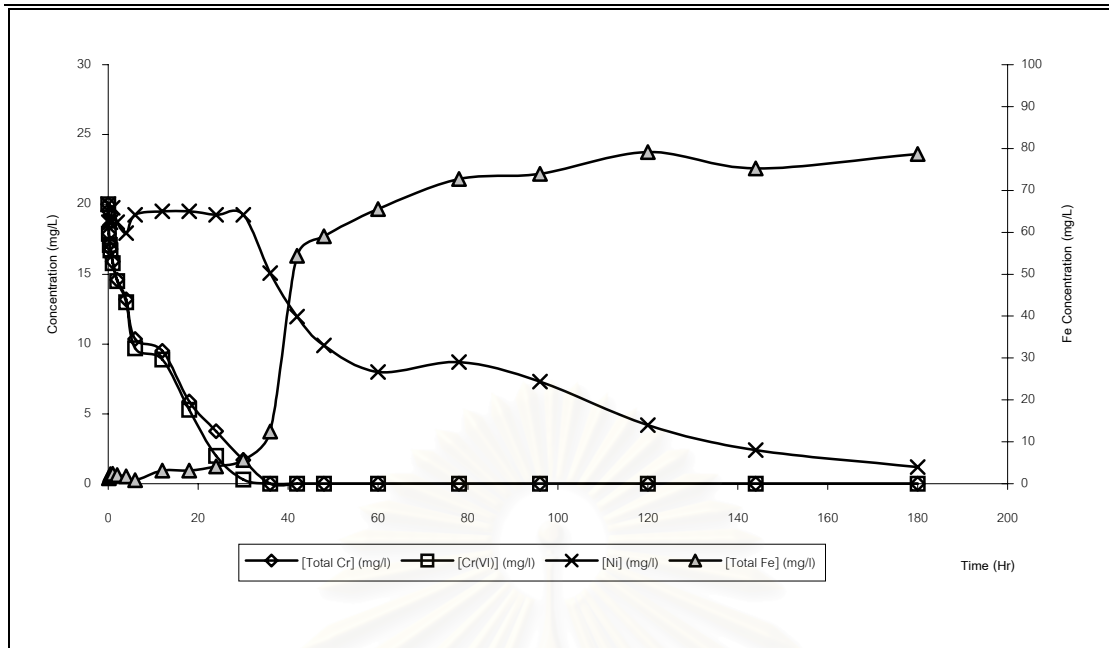
ผลการศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ 30 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสภาวะการทดลองเดียวกับการศึกษาผลของค่าพีเอช 6



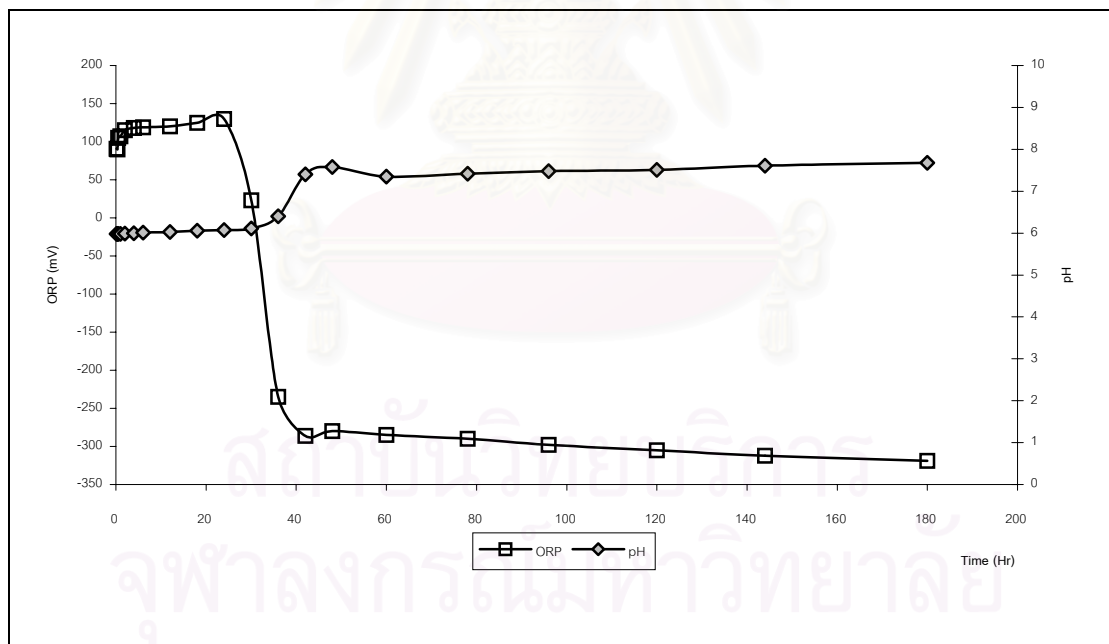
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



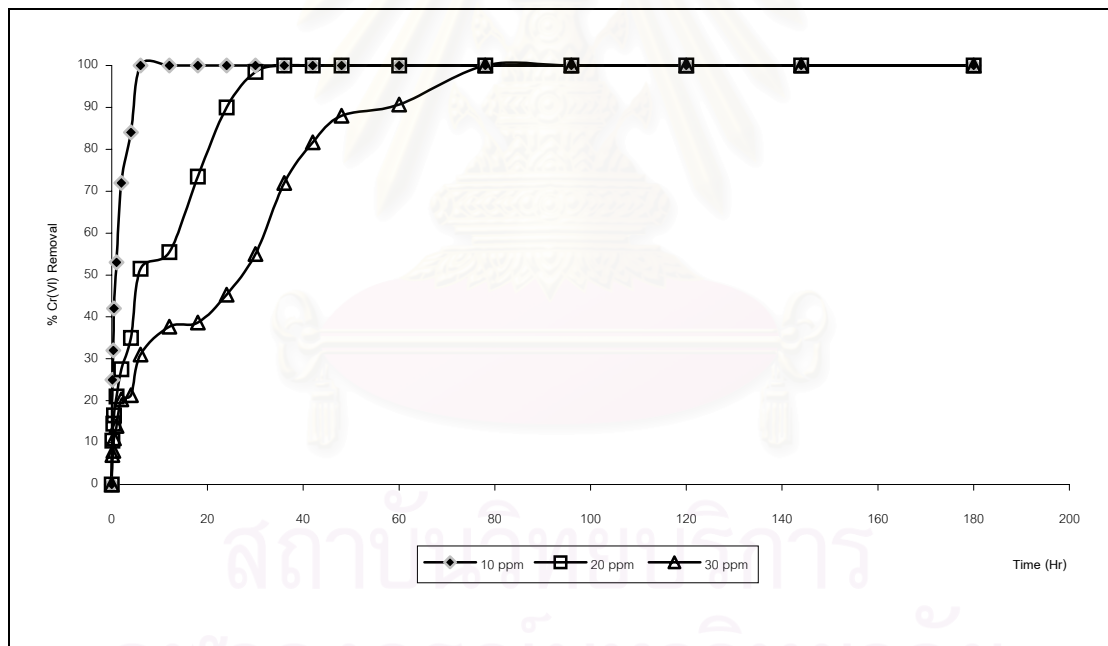
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



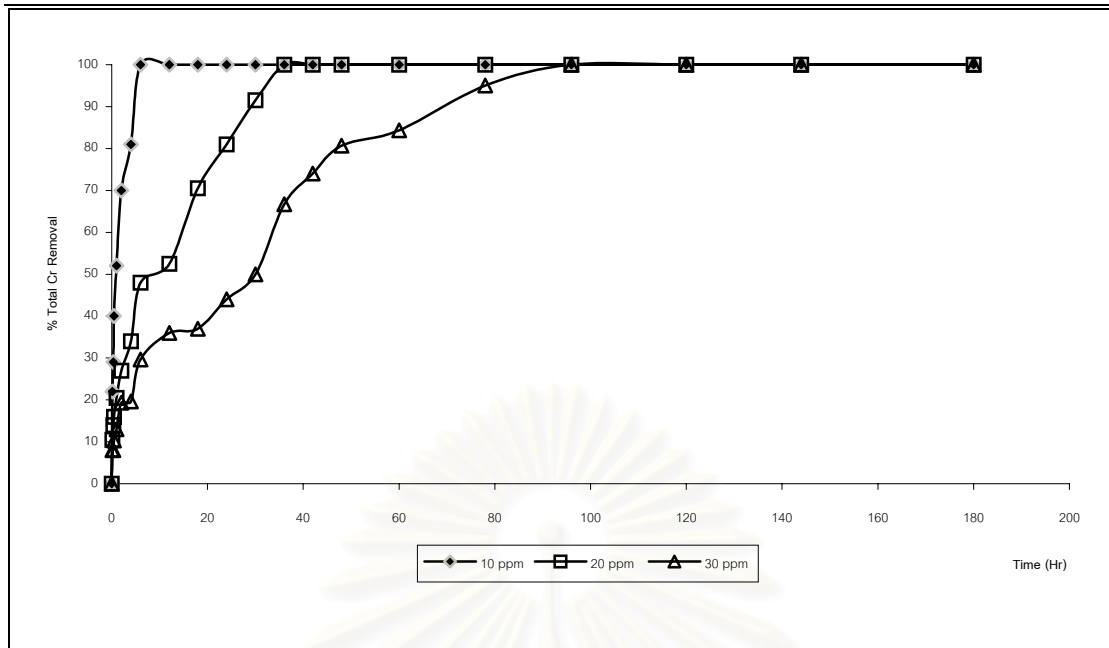
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่า พีเอช และ โออาร์พี ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

จากรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล จะทำให้อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม, โครเมียมทั้งหมดและนิกเกิลมีค่าลดลง ที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด แต่ที่ความเข้มข้น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ยังคงเหลือนิกเกิลอยู่ 1.21 และ 49 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

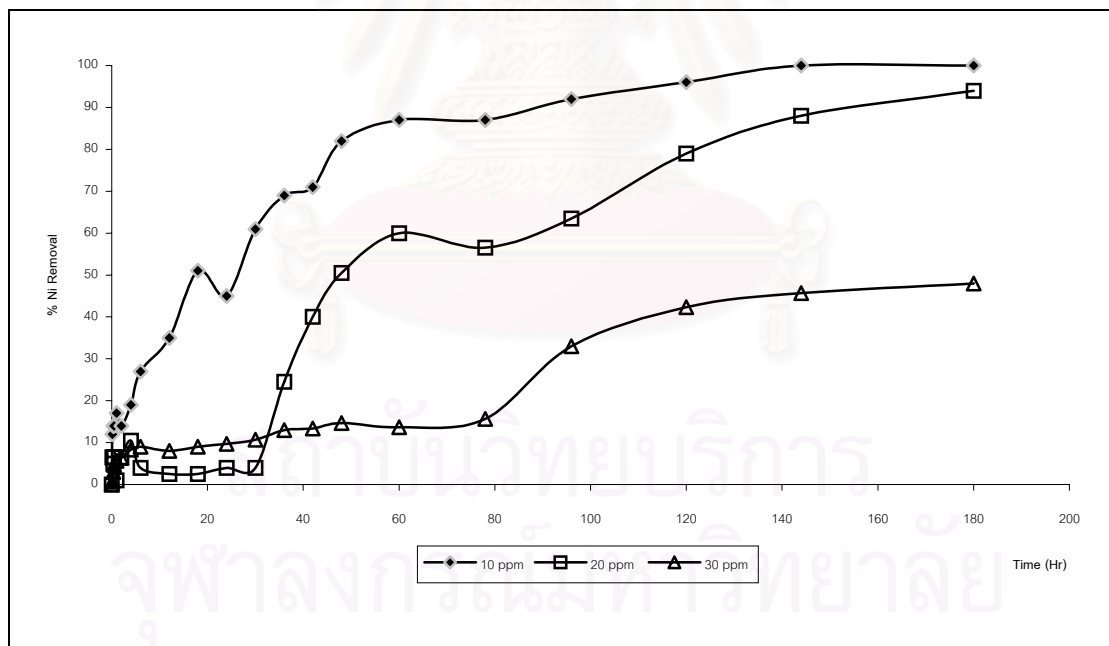
จากผลการศึกษาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม, โครเมียมทั้งหมดและนิกเกิลต่ำลง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร

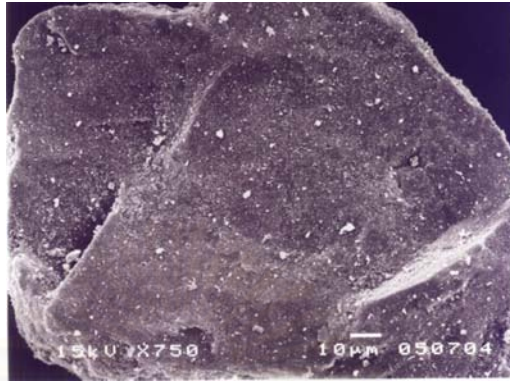
4.1.4 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของผงตะไบเหล็ก

ผงตะไบเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีดำ ขนาด 212 ถึง 355 ไมโครเมตร ภายหลังจากการทดลองเมื่อนำผงตะไบเหล็กมาทิ้งไว้ให้แห้งจะมีลักษณะเป็นผงมีสีน้ำตาลแดงเนื่องจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของเหล็ก ดังรูปที่ 4.26

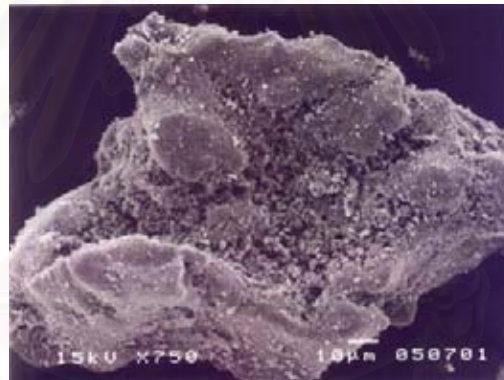
เมื่อวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กทั้งก่อนการทดลองและภายหลังจากการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM (Scanning Electron Microscopes) กำลังขยาย 750 เท่า ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลองมีลักษณะแตกต่างกันคือ ผิวของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่มีรอยขรุขระมาก แต่ภายหลังจากการทดลองผิวของผงตะไบเหล็กจะมีลักษณะขรุขระมากเนื่องจากการกัดกร่อน เมื่อวิเคราะห์จากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 และภาพถ่ายที่กำลังขยาย 7,500 เท่า ดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 จะเห็นได้ชัดเจนว่าผิวของผงตะไบเหล็กหลังการทดลองจะขรุขระมากกว่าก่อนการทดลองมาก และมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆจำนวนมาก



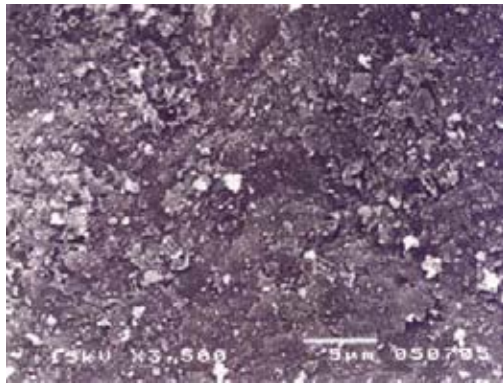
รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลอง (สีดำ) และหลังการทดลอง (สีน้ำตาลแดง)



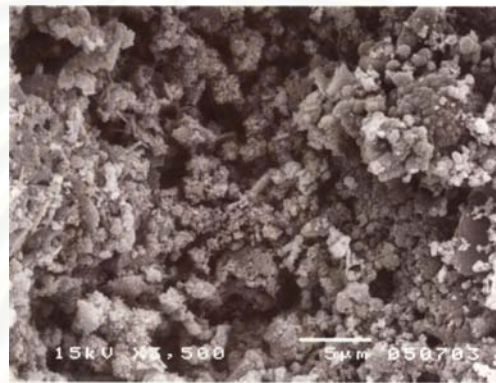
รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 750 เท่า

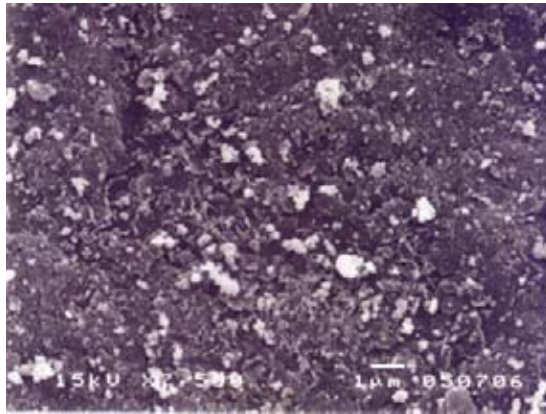


รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 3500 เท่า

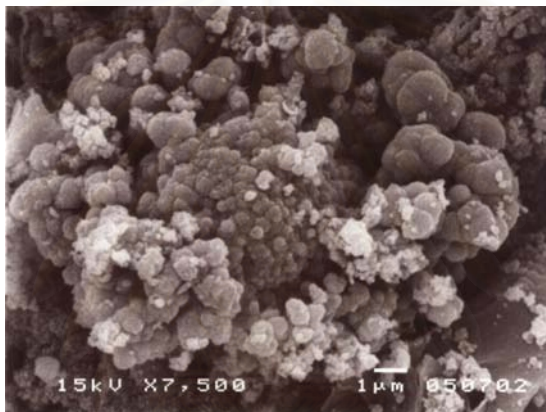


รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 3500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 7500 เท่า



รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพ SEM กำลังขยาย 7500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

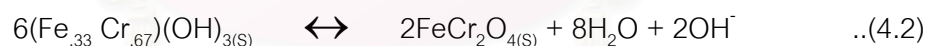
จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 พบว่า Peak ที่เด่นๆของกราฟของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองที่วัดได้นั้นเกิดขึ้นตรงกับ Peak ของ Iron (Fe^0) ซึ่งเป็นเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ที่ยังไม่ถูกกัดกร่อนเป็นเหล็กออกไซด์ อีกทั้งลักษณะทางกายภาพที่มีสีดำดังรูปที่ 4.26 และมีผิวเรียบไม่ถูกกัดกร่อน ดังรูปที่ 4.27 ,4.29 และ 4.31 จึงสรุปได้ว่าผงตะไบเหล็กที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Valent Iron)

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่า Peak ที่เด่นๆของกราฟของผงตะไบเหล็กหลังการทดลองมีอยู่เป็นจำนวนมาก และเกิดขึ้นตรงกันกับ Peak ของ Iron (Fe^0), Magnetite (Fe_3O_4) และ Chromite (FeCr_2O_4) จึงสรุปได้ว่าออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นหลังการทดลองนั้นประกอบด้วย Magnetite และ Chromite

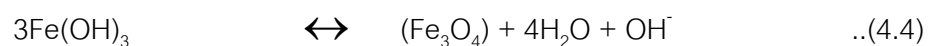
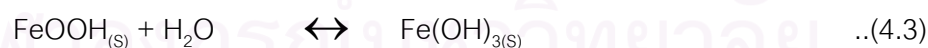
สมการทั่วไปที่แสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์และเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ดังสมการที่ 4.1 (Sherman และคณะ, 2000)

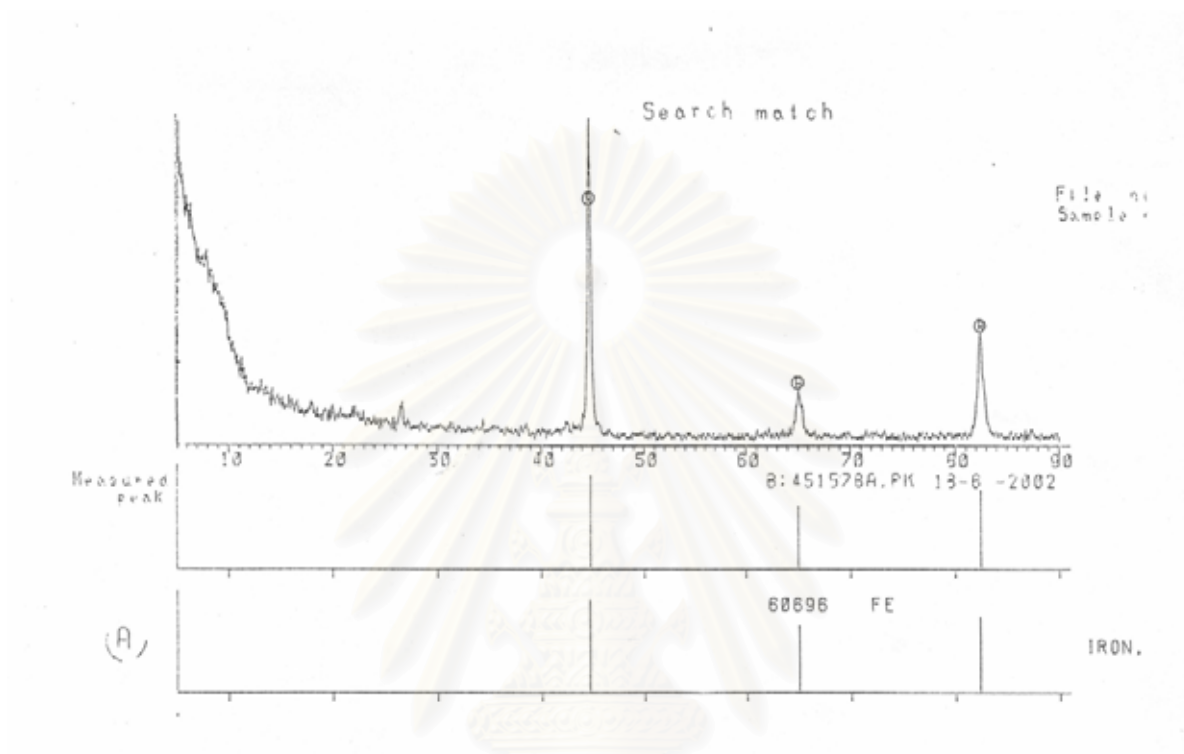


และผลึกของแข็งโครเมียม(III)-เฟอร์ริก(III)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) สามารถเปลี่ยนเป็น Chromite (FeCr_2O_4) ได้ด้วยการดื่งน้ำออกดังสมการ 4.2



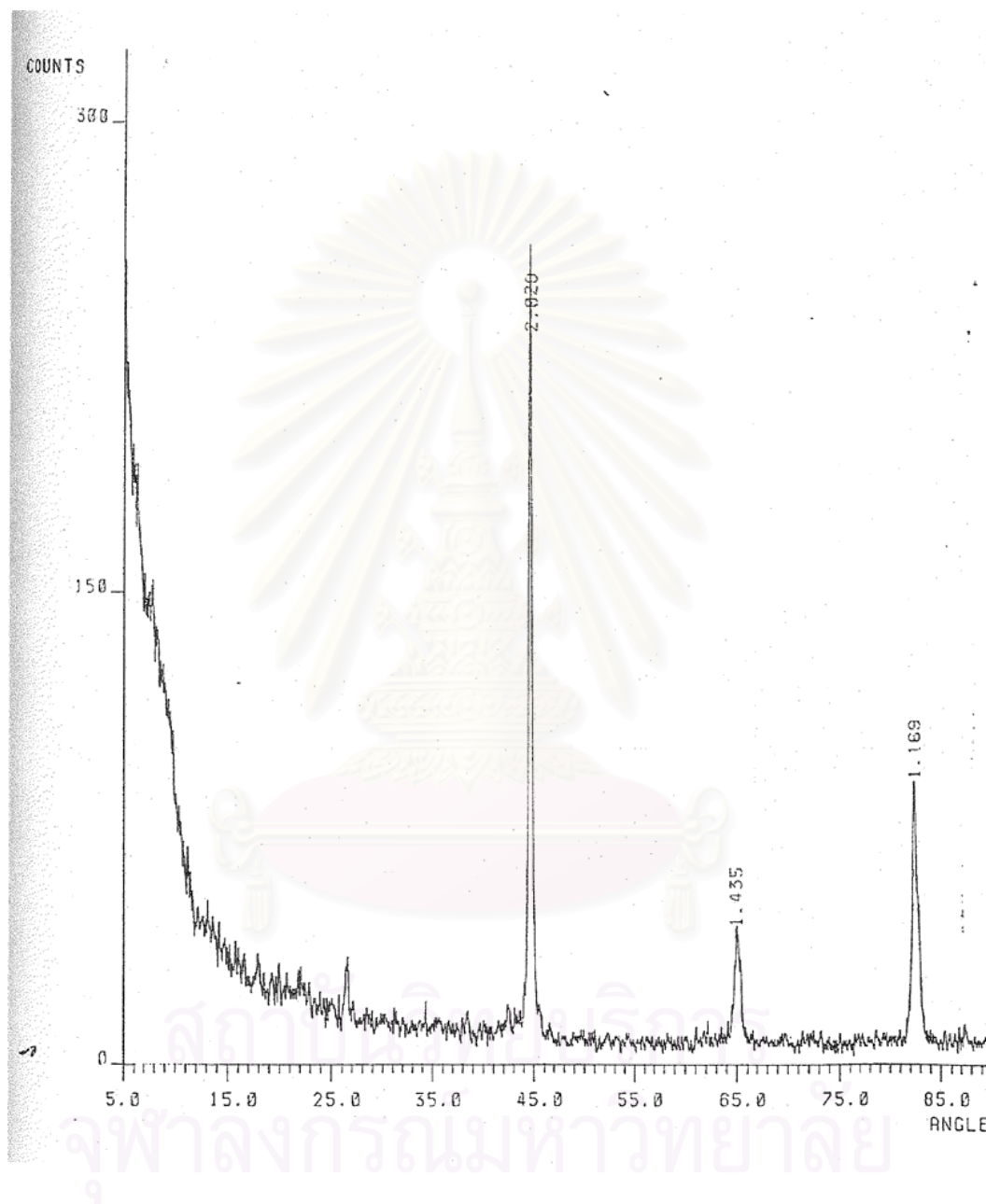
ผลึกของแข็งเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\text{FeOOH}_{(s)}$) สามารถเปลี่ยนเป็น Magnetite (Fe_3O_4) ได้ด้วยการดื่งน้ำออกดังสมการ 4.3 และ 4.4 (มันสิน และไพพรรณ, 2527)



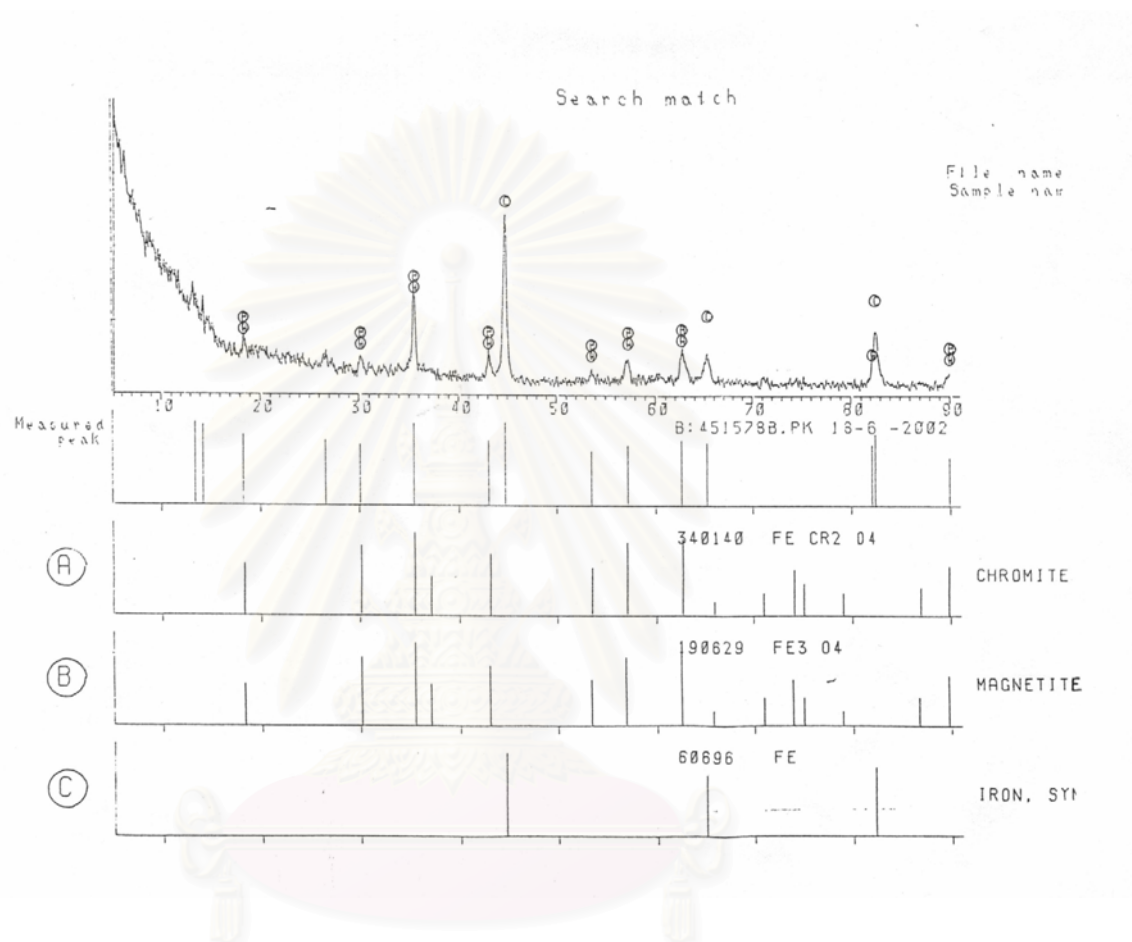


รูปที่ 4.33 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

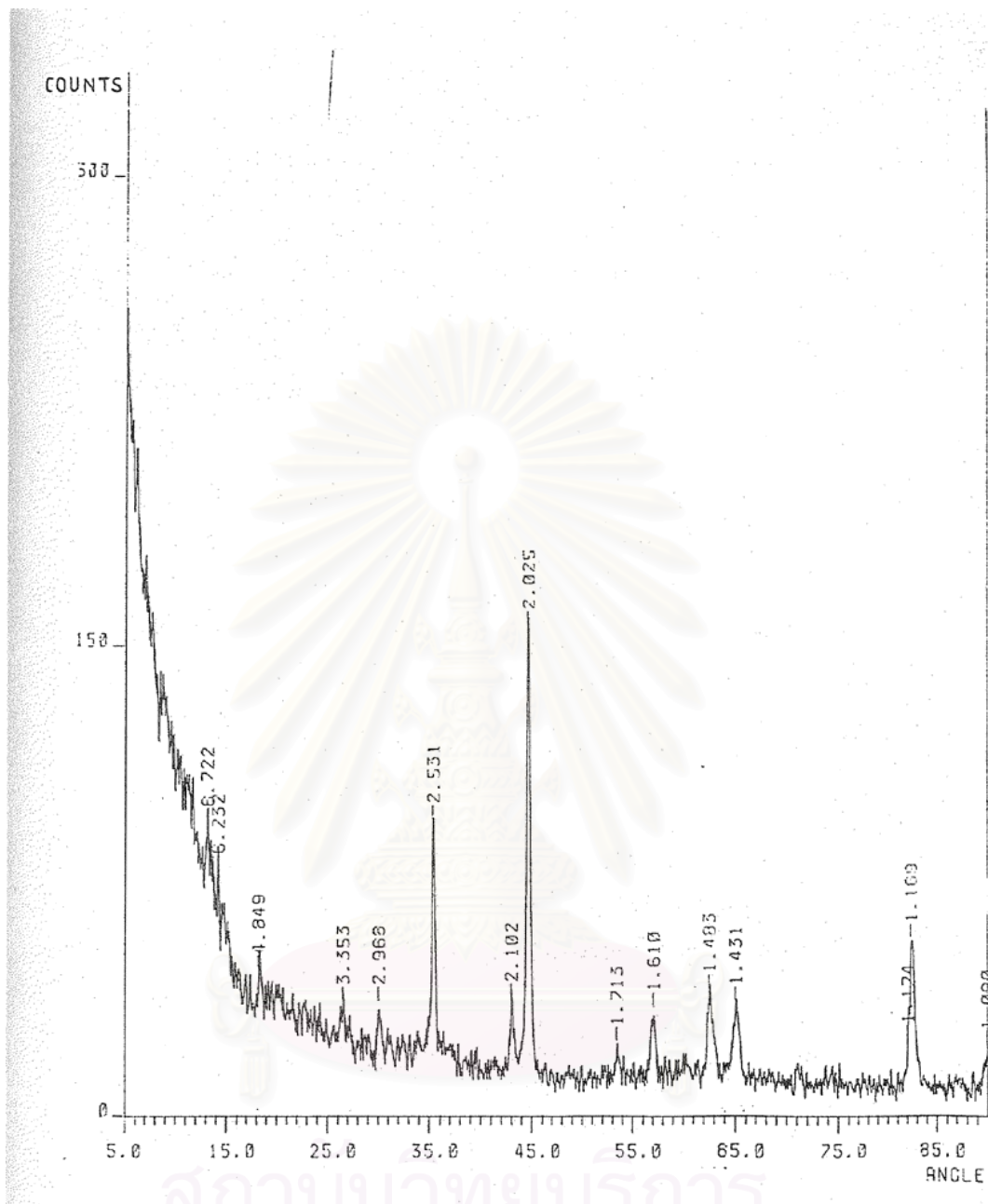


รูปที่ 4.34 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer



รูปที่ 4.35 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.36 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

เมื่อวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลองด้วยเครื่อง WaveLength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer จากตารางที่ 4.1 พบว่า

เปอร์เซ็นต์โดยมวลของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ของผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองเท่ากับ 1.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองที่มี 0.08 เปอร์เซ็นต์

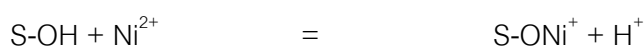
จึงสามารถสรุปได้ว่าไตรวาเลนท์โครเมียมที่เกิดขึ้นหลังจากถูกรีดิวซ์ด้วยผงตะไบเหล็กนั้น นอกจากจะปรากฏในรูป Chromite (FeCr_2O_4) แล้วยังปรากฏในรูปออกไซด์ของโครเมียม (Cr_2O_3) ด้วย

เปอร์เซ็นต์โดยมวลของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ของผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองเท่ากับ 0.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าเปอร์เซ็นต์โดยมวลของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองที่ตรวจไม่พบ สาเหตุที่เปอร์เซ็นต์โดยมวลของนิกเกิลออกไซด์น้อยกว่าเปอร์เซ็นต์โดยมวลของโครเมียมออกไซด์สำหรับผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองนั้น เนื่องจากว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ดีกว่ากำจัดนิกเกิลตามผลการทดลองแบบแบดซ์ข้างต้น

จึงสามารถสรุปได้ว่านิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้ เนื่องจากเกิดเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) แล้วถูกดูดติดผิวบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น

เปอร์เซ็นต์โดยมวลเหล็กทั้งหมดของผงตะไบเหล็กที่ได้ภายหลังการทดลองซึ่งเท่ากับ 78.97 เปอร์เซ็นต์นั้น น้อยกว่าของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองซึ่งเท่ากับ 83.38 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากหลังการทดลองเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะดูดติดผิวโครเมียมออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ ทำให้เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเหล็กทั้งหมดลดน้อยลง

จากตารางที่ 2.1 สามารถอธิบายการดูดติดผิวนิกเกิลของเหล็กออกไซด์ได้ดังนี้



เมื่อ S คือ พื้นผิว (Surface) ของเหล็กออกไซด์

จะเห็นว่านิกเกิลจะเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนอออน ทำให้เกิดเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) เกาะอยู่ที่พื้นผิวของเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของ Cr_2O_3 , Total Fe และ NiO ของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลอง (ตัวอย่าง 1) และของผงตะไบเหล็กหลังการทดลอง (ตัวอย่าง 2) จากการวัดค่าด้วยเครื่อง WaveLength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer

Samples	Contents (% by wt .)		
	Cr_2O_3	Fe	NiO
ตัวอย่างที่ 1	0.08	83.38	ND .
ตัวอย่างที่ 2	1.45	78.97	0.61

หมายเหตุ : ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้ คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ ยกเว้นธาตุเหล็ก ที่วิเคราะห์คำนวณค่าในรูปเหล็กทั้งหมด

: ND. = Not Detected.

4.1.5 ผลการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียมและนิกเกิล

ผลการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียมแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดในน้ำตัวอย่างเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่ได้จากการย่อยตะกอนที่เวลา 180 ชั่วโมง จึงกล่าวได้ว่าเป็นไปตามสมมูลมวล โดยโครเมียมในน้ำตัวอย่างเริ่มต้นอยู่ในรูปของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมส่วนโครเมียมในน้ำที่ได้จากการย่อยตะกอนอยู่ในรูปไตรวาเลนท์โครเมียม

สรุปได้ว่าเฮกซะวาเลนท์โครเมียมถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปไตรวาเลนท์โครเมียมโดยผงตะไบเหล็ก โดยไตรวาเลนท์โครเมียมจะตกผลึกในรูปของ Chromite (FeCr_2O_4) หรือในรูปออกไซด์ของโครเมียม (Cr_2O_3) อยู่บนผิวของเหล็กออกไซด์

ผลการศึกษาสมมูลมวลของนิกเกิลแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำตัวอย่างเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำที่ได้จากการย่อยตะกอนที่เวลา 180 ชั่วโมง จึงกล่าวได้ว่าเป็นไปตามสมมูลมวล

สรุปได้ว่านิกเกิลถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ซึ่งถูกดูดติดบนผิวของเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ[Cr(III)] ของการศึกษาสมมูลมวลเมื่อ ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Sample	[Cr(VI)] (mg/L)	[Total Cr] (mg/L)	[Cr(III)] (mg/L)
Blank	9.96	9.93	-
Sample _{180 Hr}	0	0	-
Digested Sample _{180 Hr}	0	9.87	9.87

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลค่า [Ni] ของการศึกษาสมมูลมวลเมื่อ ความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Sample	[Ni] (mg/L)
Blank	9.89
Sample _{180 Hr}	0
Digested Sample _{180 Hr}	9.73

4.2 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบคอลัมน์

4.2.1 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายที่ค่า 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g ที่ผสมกันแล้วเติมลงในคอลัมน์ นอกจากนี้ยังได้ทดลองเติมผงตะไบเหล็กมวล 8 กรัม และทราย 16 กรัมเพียงอย่างเดียว ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 30 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นนิกเกิล 30 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นดังนี้

การศึกษาที่การเติมทราย 16 กรัมเพียงอย่างเดียว ผลปรากฏว่าสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, โครเมียมทั้งหมด และนิกเกิลได้น้อยมากเนื่องจากทรายเป็นตัวดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพต่ำมาก ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดและนิกเกิลที่ต่ำที่สุดในระหว่างการทดลองคือ 28.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ไม่มีปัญหาของการอุดตันของคอลัมน์

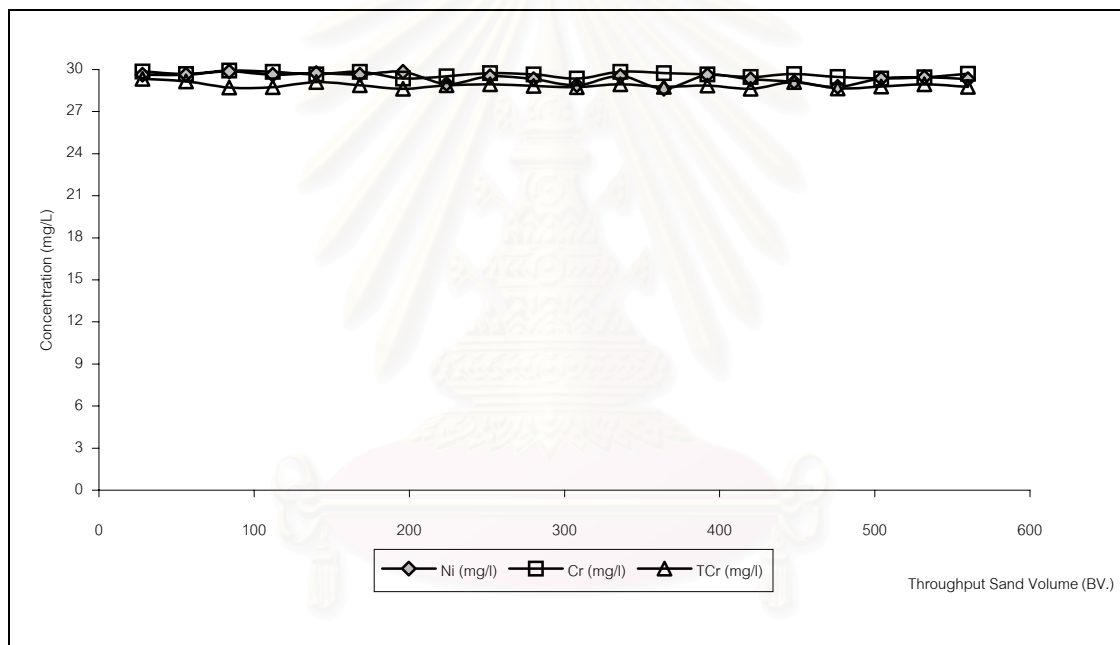
การศึกษาที่การเติมผงตะไบเหล็ก 8 กรัมเพียงอย่างเดียวนั้น ผลปรากฏว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนให้คอลัมน์ด้วยอัตราไหลประมาณ 150 มิลลิลิตร/วัน ปรากฏว่าทดลองไปได้ประมาณ 2 ชั่วโมงก็เกิดการอุดตันในคอลัมน์ ถึงแม้จะปรับอัตราไหลให้ลดลงก็ยังคงเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็วในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ดังนั้นการเติมผงตะไบเหล็กเพียงอย่างเดียวจะประสบปัญหาเกิดการอุดตันได้ง่าย จึงไม่เหมาะที่จะนำมาศึกษา

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g เมื่อเติมทรายผสมกับผงตะไบเหล็กแล้วก็ทำให้สามารถแก้ปัญหาการอุดตันเร็วของคอลัมน์ได้ โดยผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกเมื่อน้ำเสียผ่านคอลัมน์ที่ปริมาณ 14 BV. จะมีนิกเกิลเหลือ 19 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนิกเกิลจะมีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ปริมาณ 784 BV. ซึ่งมีนิกเกิลเหลือ 6.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็กทั้งหมดที่ละลายออกมากับน้ำทิ้งก็จะลดลงตามน้ำทิ้งที่ไหลผ่านคอลัมน์ด้วย ดังรูปที่ 4.38

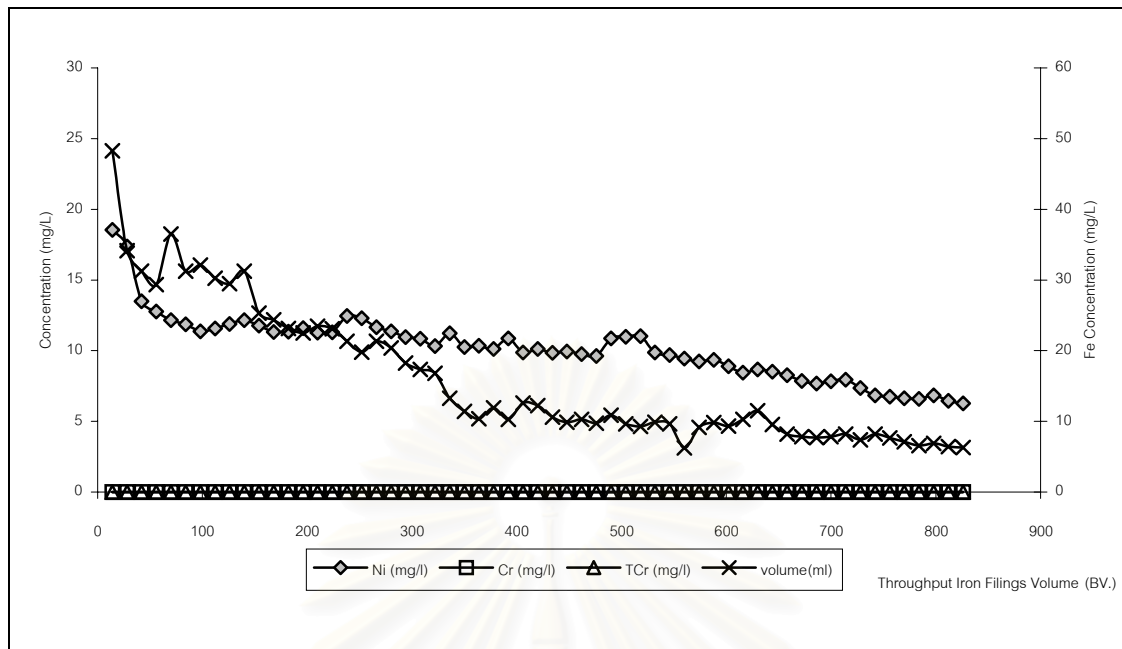
การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 10g/8g ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกเมื่อน้ำเสียผ่านคอลัมน์ที่ปริมาณ 14 BV. จะมี

นิกเกิลเหลือ 17 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนิกเกิลจะมีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ปริมาณ 448 BV. จะมีนิกเกิลเหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.39

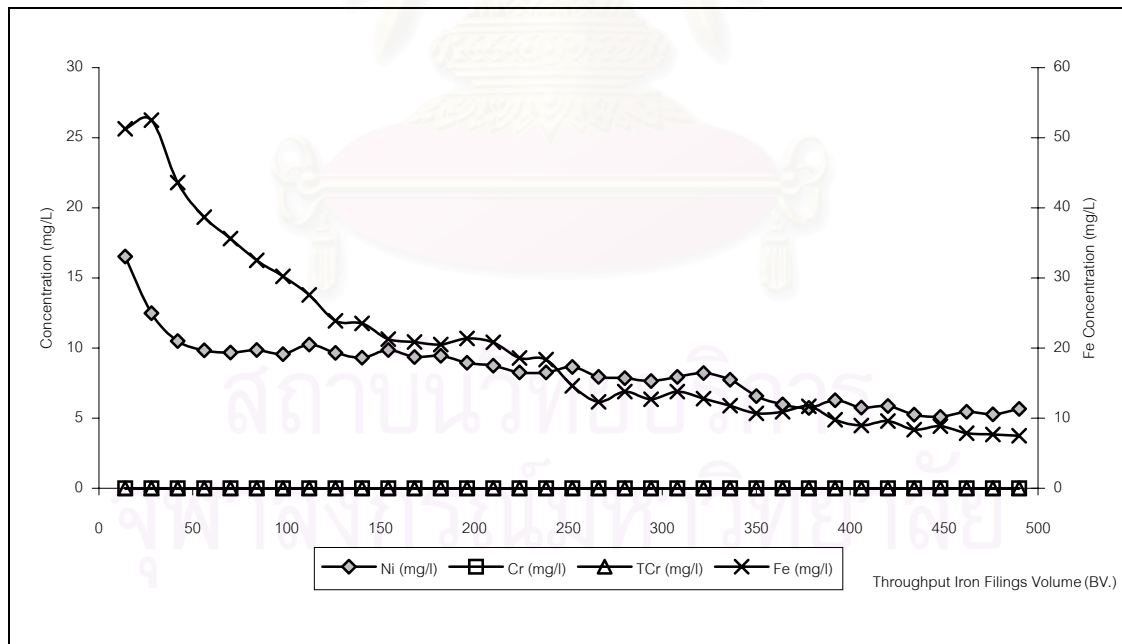
การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 12g/8g ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมดได้หมดเช่นกัน แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกเมื่อน้ำเสียผ่านคอลัมน์ที่ปริมาณ 14 BV. จะมีนิกเกิลเหลือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนิกเกิลจะมีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ปริมาณ 280 BV. จะมีนิกเกิลเหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.40



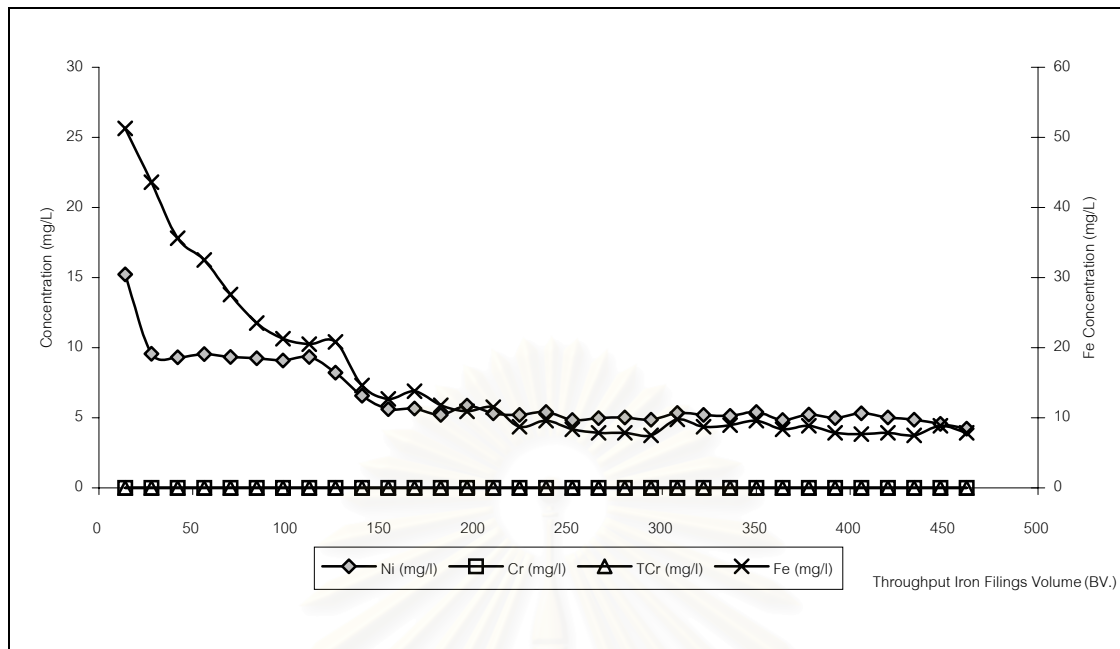
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีทราย 16 กรัมเพียงอย่างเดียว เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 10 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 12 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6

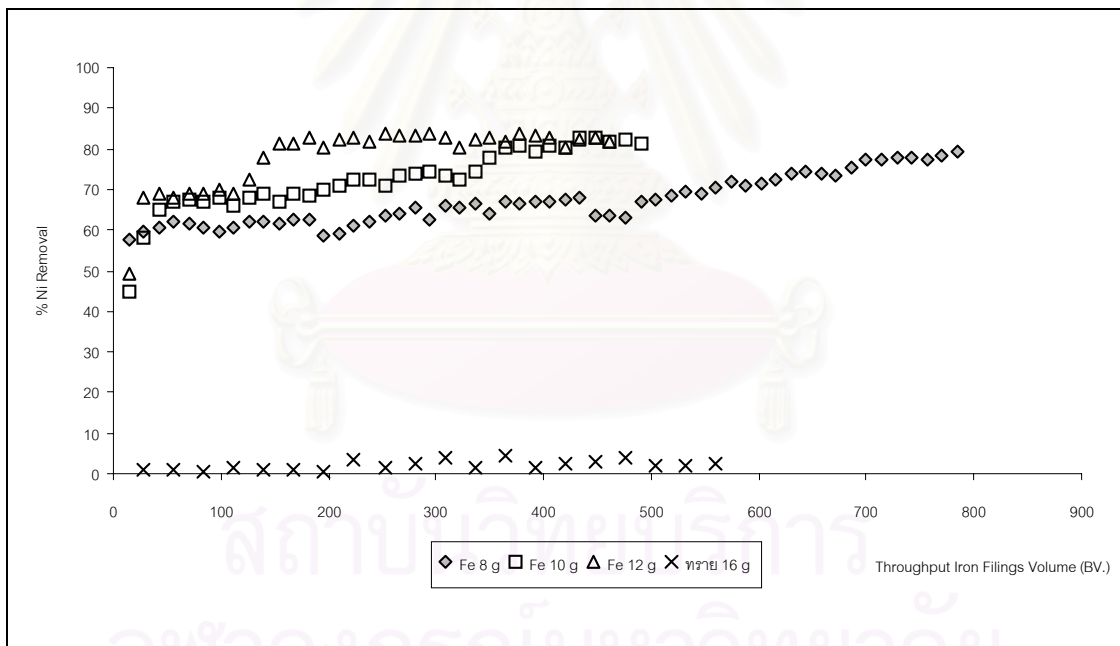
จากรูปที่ 4.41 จะเห็นว่าคอลัมน์ที่มีทรายเพียงอย่างเดียวกำจัดนิกเกิลได้น้อยมาก เมื่อมีการเติมผงตะไบเหล็กจะทำให้สามารถกำจัดนิกเกิลได้ โดยที่ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์เท่ากันนั้น คอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กมากกว่าจะมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลได้ดีกว่า ภายหลังจาก 200 Bed Volume (BV) น้ำที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม จะมีประสิทธิภาพ 59 – 79 เปอร์เซ็นต์ คอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 10 กรัม จะมีประสิทธิภาพ 67 – 81 เปอร์เซ็นต์ คอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 12 กรัม จะมีประสิทธิภาพ 81 – 84 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.42 และ 4.43 คอลัมน์ที่มีทรายเพียงอย่างเดียวกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้น้อยมาก แต่ว่าคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8, 10 และ 12 กรัมสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมดตั้งแต่เริ่มการทดลองไปจนถึงที่สุดการทดลอง

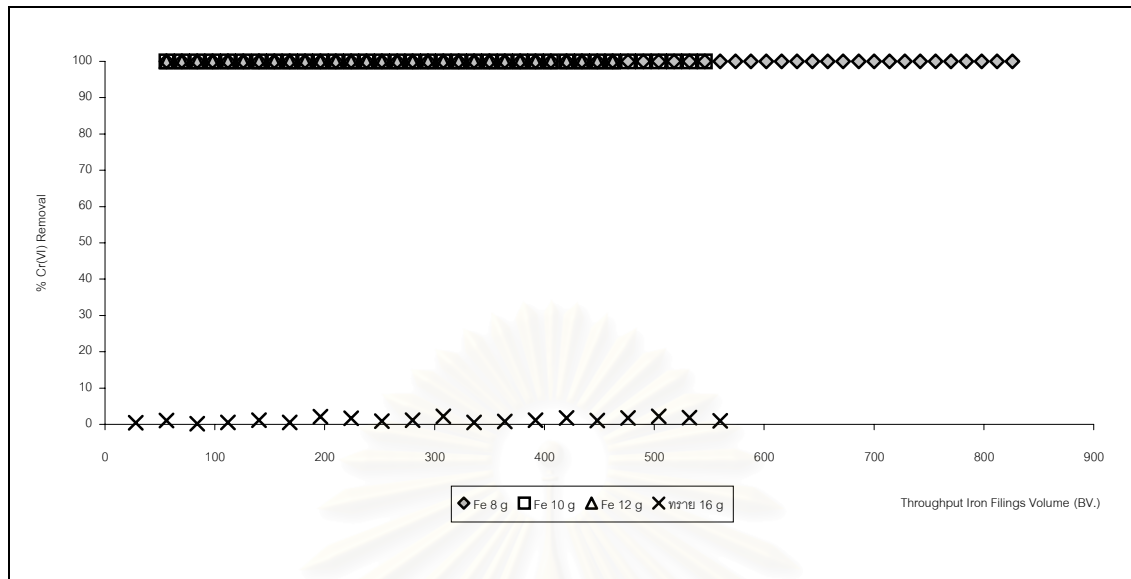
จากรูปที่ 4.44 เป็นการเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำที่ผ่านคอลัมน์ คอลัมน์ที่มีทรายเพียงอย่างเดียวจะไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตัน โดยอัตราการไหลของน้ำที่มีค่าลดลงน้อยมาก ในขณะที่คอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กเมื่อเวลาผ่านไปก็จะมีอัตราการไหลของน้ำที่ลดลง สาเหตุเนื่องมาจากมีเหล็กละลายออกมาจากผงตะไบเหล็ก และเกิดเป็นเหล็กออกไซด์สะสมอยู่ใน

คอลัมน์ทำให้เกิดการอุดตันขึ้น โดยคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กมากกว่าก็จะมีอัตราการไหลของน้ำที่น้อยกว่าและทำให้เกิดการอุดตันได้เร็วกว่าคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กน้อยกว่า

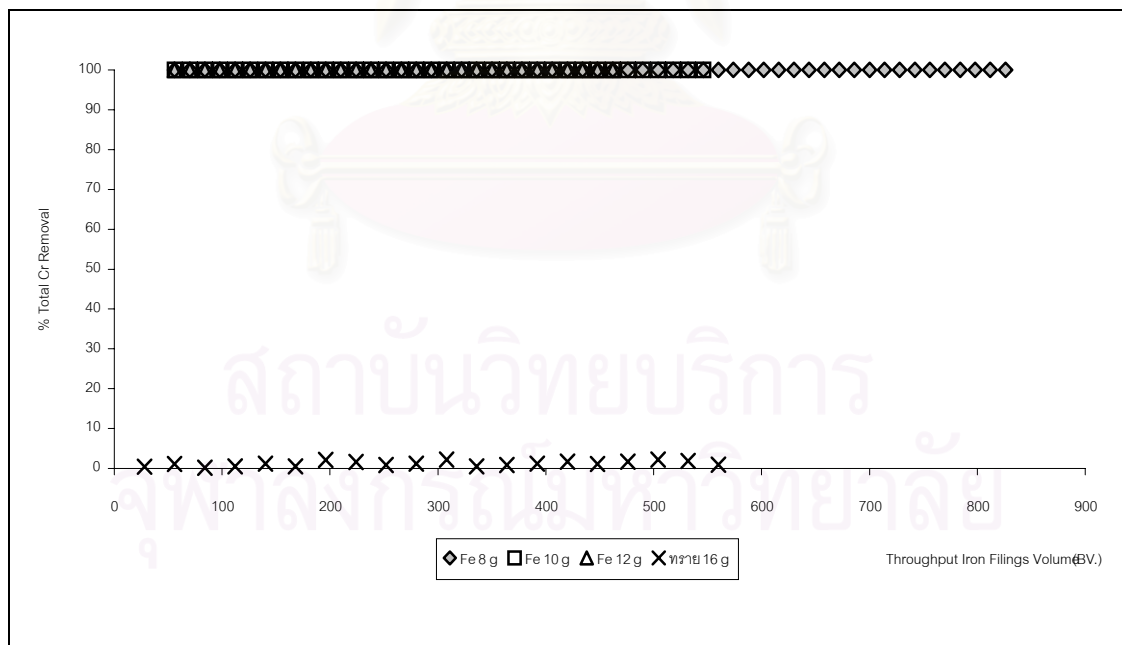
จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายสามารถสรุปได้ว่าคอลัมน์ที่มีทรายเพียงอย่างเดียวแทบจะไม่สามารถกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียม, ไตรวาเลนทีโครเมียม และนิกเกิลได้ เมื่อมีการเติมผงตะไบเหล็กจะทำให้สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีและโครเมียมทั้งหมดได้จนหมด แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งคือที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตรได้ การเติมผงตะไบเหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้กำจัดนิกเกิลได้ดีขึ้น แต่ก็ทำให้อัตราการไหลของน้ำที่ต่ำลงและเกิดปัญหาการอุดตันของคอลัมน์เร็วขึ้น และการเติมผงตะไบเหล็กเพียงอย่างเดียวก็จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันจึงต้องใส่ทรายผสมเพื่อแก้ปัญหาการอุดตัน



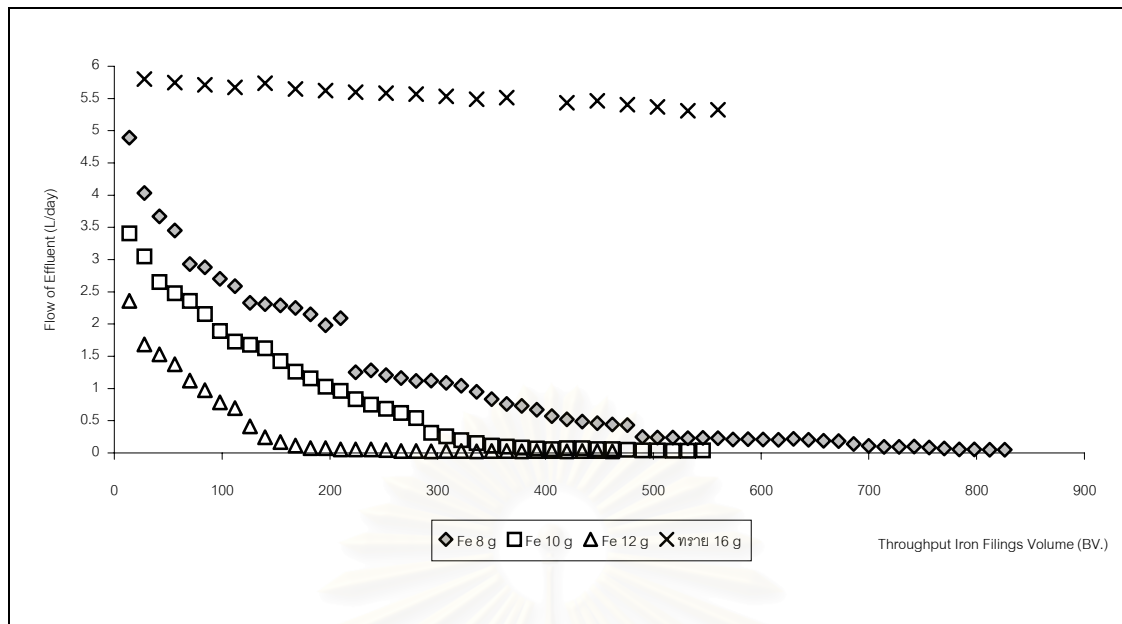
รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลของน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ ที่มีผงตะไบเหล็กผสมกับทรายซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ ที่มีผงตะไบเหล็กผสมกับทรายซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดของน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ ที่มีผงตะไบเหล็กผสมกับทรายซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ ที่มีผงตะไบเหล็กผสมกับทรายซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวล 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g และที่มีทราย 16g เพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6

4.2.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล

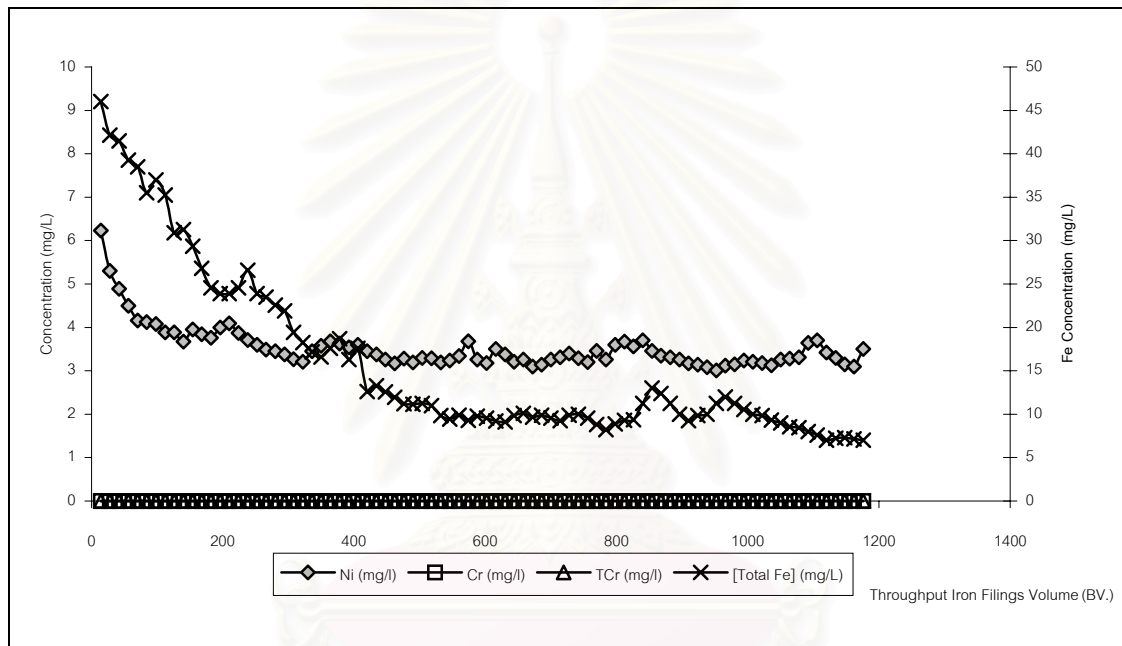
การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 6 อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g เป็นดังนี้

การศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด ภายหลังจาก 200 BV. น้ำทิ้งจะมีความเข้มข้นนิกเกิลอยู่ในช่วง 3 – 4 มิลลิกรัม/ลิตร และความเข้มข้นของเหล็กที่ละลายน้ำออกมาในช่วงแรกมีความเข้มข้นประมาณ 41 มิลลิกรัม/ลิตร ก็จะลดลงมาเรื่อยๆจนเหลือ 6.2 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.45

การศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และโครเมียมทั้งหมดได้หมดเช่นกัน แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้หมด ภายหลังจาก 200 BV. น้ำทิ้งจะมีความเข้มข้น

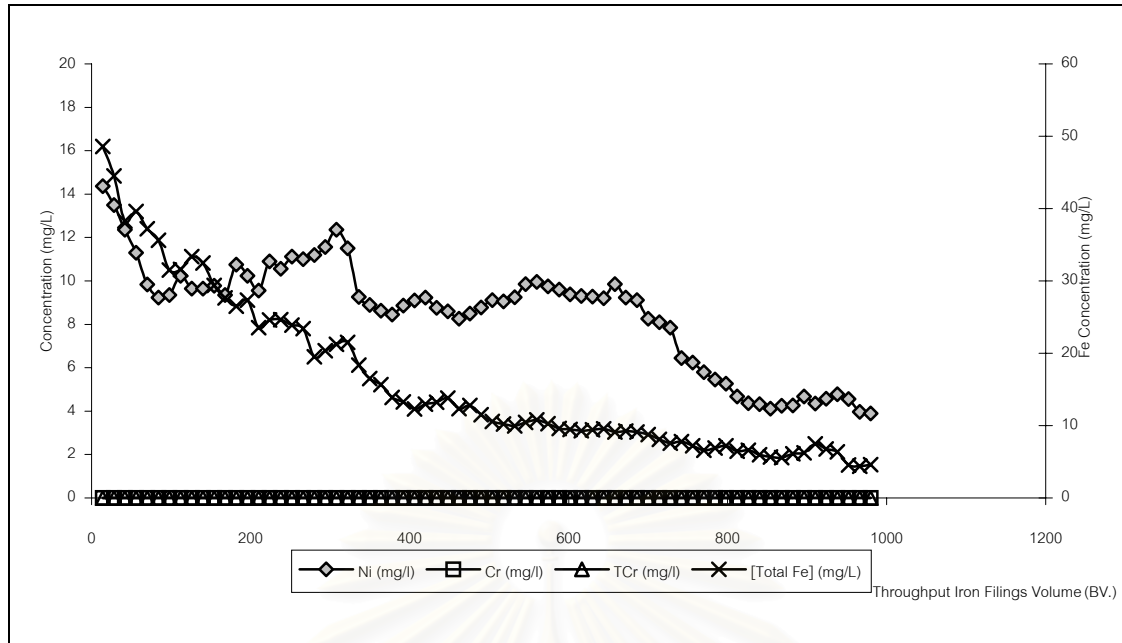
นิกเกิลลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะอยู่ในช่วง 4 - 11.5 มิลลิกรัม/ลิตร และความเข้มข้นของเหล็กที่ละลายน้ำออกมาในช่วงแรกมีความเข้มข้นประมาณ 44.5 มิลลิกรัม/ลิตร ก็จะลดลงมาเรื่อยๆจนเหลือ 4.6 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.46

การศึกษาที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสภาวะการทดลองเดียวกับการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

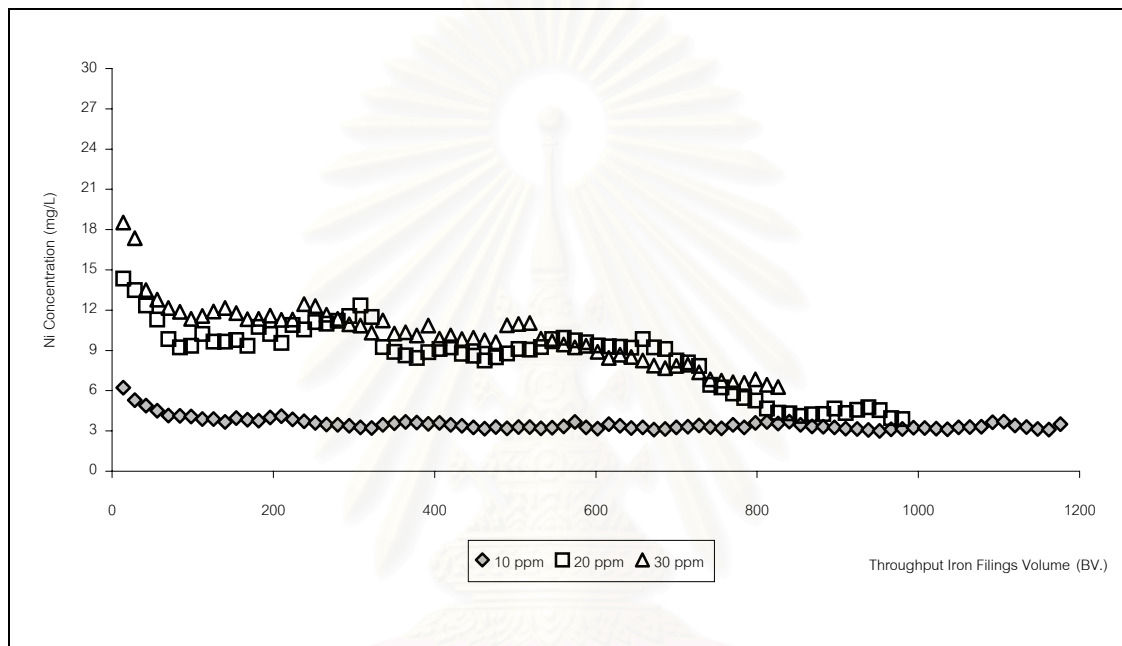


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] [Total Fe] และ [Ni] ที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม เมื่อความเข้มข้นของทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้นต่างเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6

จากรูปที่ 4.47, 4.48, 4.49 และ 4.50 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลขึ้นจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร คอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8 กรัม ก็ยังสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลมีค่าลดลง ภายหลังจาก 150 BV. ที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถกำจัดนิกเกิลให้เหลืออยู่ในช่วง 3 - 4 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ที่ความเข้มข้น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ยังคงเหลือนิกเกิลอยู่ 4 - 10 และ 6 - 12 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

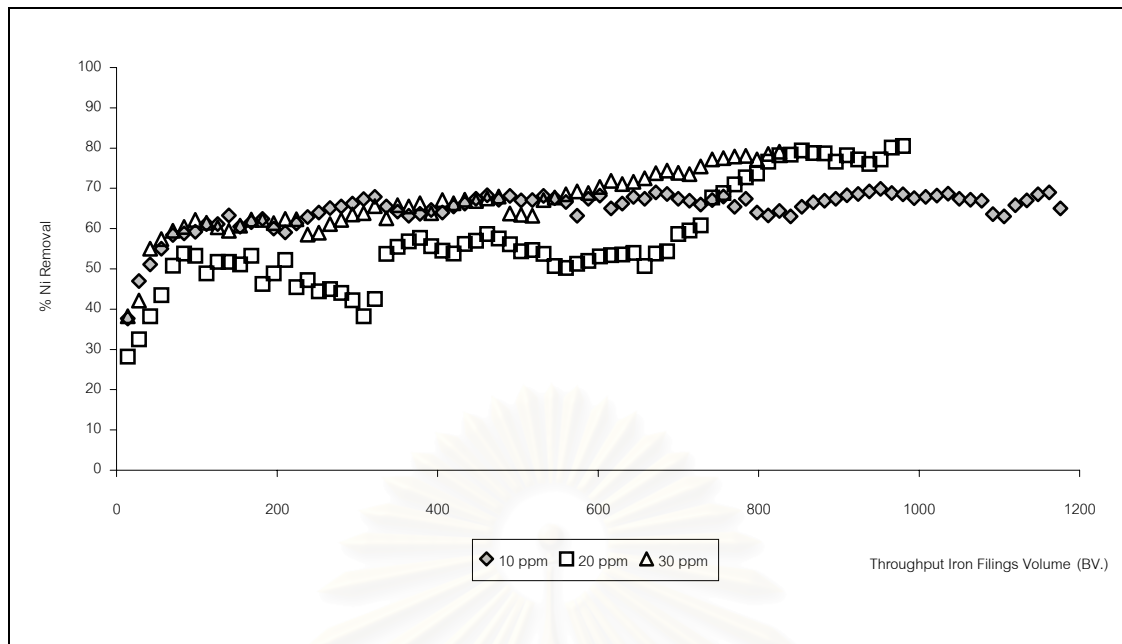
จากรูปที่ 4.51 เป็นการเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลขึ้นจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้อัตราการไหลของน้ำทิ้งลดลงและทำให้เกิดการอุดตันในคอลัมน์ได้เร็วขึ้น จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล สามารถสรุปผลได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร คอลัมน์ที่มีทรายผสมกับผงตะไบเหล็กอย่างละ 8 กรัม ก็ยังสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลสามารถสรุปผลได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร คอลัมน์ที่มีทรายผสมกับผงตะไบเหล็กอย่างละ 8 กรัม ก็ยังสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมด แต่ก็ทำให้ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น อีกทั้งทำให้อัตราไหลของน้ำทิ้งลดลงและเกิดการอุดตันได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.47 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นนิกเกิลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6

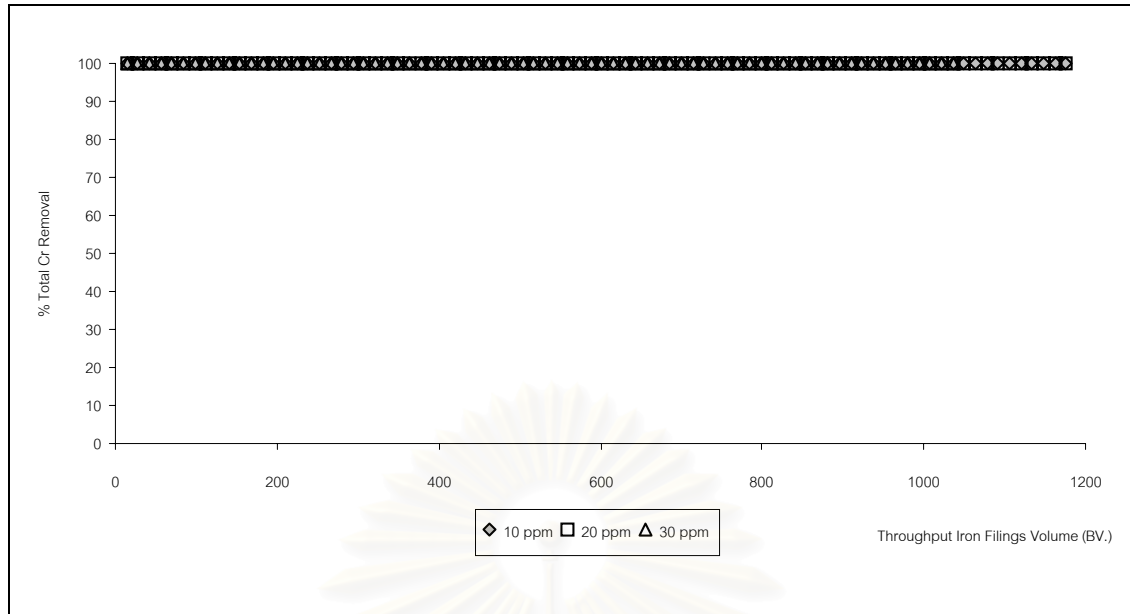
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดของคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6



รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบอัตราไหลของน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็ก 8 กรัม ผสมกับทราย 8g ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเริ่มต้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าพีเอช 6

4.2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลของผงตะไบเหล็กที่สภาวะต่างๆของการทดลองแบบคอลัมน์

จาก 4.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย และ 4.2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล สามารถนำมาสรุปผลเป็นความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลได้ดังตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้น

- ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ (Bed Volume) จะมีจำนวนลดน้อยลง คือ 1,176, 980 และ 826 Bed Volume สำหรับความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10, 20 และ 30 มก./ล. ตามลำดับ

- ปริมาณ Cr(VI) ที่กำจัดได้ (มก./ก.ผงตะไบเหล็ก) จะมีจำนวนเพิ่มขึ้น คือ 10.5, 17.5 และ 22.1 มก./ก. สำหรับความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10, 20 และ 30 มก./ล. ตามลำดับ

- ปริมาณ Ni ที่กำจัดได้ (มก./ก.ผงตะไบเหล็ก) จะมีจำนวนเพิ่มขึ้น คือ 6.8, 10.0 และ 14.6 มก./ก. สำหรับความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล 10, 20 และ 30 มก./ล. ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณนิกเกิลและเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่กำจัดได้จะเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายเพิ่มขึ้น

- ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ (Bed Volume) จะมีจำนวนลดน้อยลง คือ 826, 546 และ 462 Bed Volume สำหรับอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g ตามลำดับ

- ปริมาณ Cr(VI) ที่กำจัดได้ (มก./ก.ผงตะไบเหล็ก) จะมีจำนวนลดลง คือ 22.1, 13.1 และ 7.9 มก./ก. สำหรับอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g ตามลำดับ

- ปริมาณ Ni ที่กำจัดได้ (มก./ก.ผงตะไบเหล็ก) จะมีจำนวนลดลง คือ 14.6, 9.5 และ 5.3 มก./ก. สำหรับอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย 8g/8g, 10g/8g และ 12g/8g ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณนิกเกิลและเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่กำจัดได้และปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทราย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดได้สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายต่างๆกัน

[Ni] (mg/L)	[Cr(VI)] (mg/L)	พีเอช	Bed Volume	มวลผงตะไบเหล็ก (กรัม) :มวลทราย (กรัม)	ปริมาณ Ni ที่กำจัด ได้ (มก./ก.ผงตะไบ เหล็ก)	ปริมาณ Cr(VI) ที่ กำจัดได้ (มก./ก. ผงตะไบเหล็ก)
10	10	6	1,176	8 กรัม/ 8 กรัม	6.8	10.5
20	20	6	980	8 กรัม/ 8 กรัม	10.0	17.5
30	30	6	826	8 กรัม/ 8 กรัม	14.6	22.1
30	30	6	546	10 กรัม/ 8 กรัม	9.5	13.1
30	30	6	462	12 กรัม/ 8 กรัม	5.3	7.9

4.3 ข้อดีและข้อจำกัดในการใช้ผงตะไบเหล็กกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิเกิล

ข้อดี

1. ต้นทุนต่ำ เนื่องเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้เป็นประโยชน์ และไม่ต้องใช้สารเคมีหลายชนิด
2. ไม่ต้องใช้หน่วยกำจัดหลายขั้นตอน และกระบวนการไม่ซับซ้อน
3. สามารถกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการรีดักชัน และแอดซอร์ปชัน

ข้อจำกัด

1. ไม่สามารถใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราไหลสูงได้
2. ต้องจัดการกากของเสียอันตรายที่ได้ภายหลังการทดลอง

4.4 ทางเลือกในการนำผงตะไบเหล็กไปใช้บำบัดน้ำเสีย

1. อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิลเตอร์เบด (Filter Bed) กับโรงงานชุบโลหะขนาดเล็กที่มีน้ำเสียปริมาณไม่มาก หรือโรงงานที่มีน้ำเสียเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเพียงอย่างเดียว
2. อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิลเตอร์เบด (Filter Bed) ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่ปนมากับโลหะหนักชนิดอื่นๆได้ก่อนโดยไม่ต้องทำการแยกสายน้ำทิ้ง จากนั้นโลหะหนักชนิดอื่นๆที่เหลือก็นำไปกำจัดโดยการปรับพีเอช และทำให้ตกตะกอนได้
3. การนำผงตะไบเหล็กไปใช้กำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน น่าจะเป็นทางเลือกที่คุ้มค่า เนื่องจากการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในปัจจุบันส่วนใหญ่อาศัยวิธีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาเพื่อบำบัด (Pump and Treat) ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและต้องจัดการกับกากของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นด้วย การนำผงตะไบเหล็กไปใช้เป็นเพอมีเอเบิลรีแอคทีฟแบรียเออร์ (Permeable Reactive Barrier) ติดตั้งในทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินมีข้อดีดังนี้คือ
 - น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ได้ช้า ทำให้เหมาะที่จะใช้ผงตะไบเหล็กเป็นเพอมีเอเบิลรีแอคทีฟแบรียเออร์
 - การอุดตันไม่เป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ได้ช้า
 - ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ เนื่องจากค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะเป็นการขุดเจาะและติดตั้งแบรียเออร์กันขวางทางไหลของน้ำใต้ดิน
 - ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดโลหะหนักและสารพิษชนิดอื่นๆได้หลายชนิด

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยผงตะไบเหล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

การทดลองแบบแบตช์

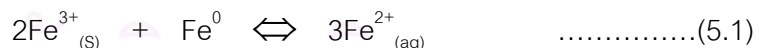
1. ก่อนการทดลองผงตะไบเหล็กที่ใช้เป็นเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีดำ ภายหลังจากการทดลองพบว่าผงตะไบเหล็กจะเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กออกไซด์ที่มีสีน้ำตาลแดงคือ Magnetite (Fe_3O_4) และ Chromite ($FeCr_2O_4$)
2. ผงตะไบเหล็กจะรีดิวซ์เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ($Cr(VI)$) ให้เปลี่ยนรูปเป็นไตรวาเลนต์โครเมียม ($Cr(III)$) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Chromite ($FeCr_2O_4$) และออกไซด์ของโครเมียม (Cr_2O_3) ด้วย ในขณะที่นิกเกิลจะตกผลึกเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) แล้วถูกดูดติดผิวบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น
3. ค่าพีเอชมีผลต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลคือ ปฏิกริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำ ในขณะที่การดูดติดผิวของนิกเกิลออกไซด์บนเหล็กออกไซด์จะเกิดได้ดีที่พีเอชเป็นกลางหรือสูง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลคือ ที่พีเอช 6 เนื่องจากที่พีเอช 4 และ 5 กำจัดนิกเกิลได้ไม่ดี ในขณะที่พีเอช 7 กำจัดทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลได้ไม่ดีเช่นกัน
4. ปริมาณผงตะไบเหล็กมีผลต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลคือ เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ทั้งประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และนิกเกิลสูงขึ้น
5. ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลมีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของทั้งสองจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลต่ำลง

การทดลองแบบคอลัมน์

6. เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของผงตะไบเหล็กและทรายเป็น 8/8, 10/8 และ 12/8 (g.ผงตะไบเหล็ก/g.ทราย) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลคือ 30 มก./ล. จะสามารถกำจัดนิกเกิลได้ดีขึ้นคือ กำจัดได้ประมาณ 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราส่วนทั้งสามค่า แต่ว่าปริมาณนิกเกิลและเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่กำจัดได้ต่อปริมาตรผงตะไบเหล็กจะลดลงคือ 14.6, 9.5 และ 5.3 (มก.Ni/g.ผงตะไบเหล็ก) 22.1, 13.1 และ 7.9 (มก.Cr(VI)/g.ผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการดูดซับเร็วขึ้นทำให้กำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลได้น้อยลง

7. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้น 10, 20 และ 30 มก./ล. สำหรับคอลัมน์ที่มีผงตะไบเหล็กและทรายผสมกันอย่างละ 8 กรัม จะทำให้ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำทิ้งสูงขึ้น แต่ยังสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้หมดทั้งสามค่าความเข้มข้น โดยปริมาณนิกเกิลและเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่กำจัดได้ต่อปริมาตรผงตะไบเหล็กจะเพิ่มขึ้น 6.8, 10.0 และ 14.6 (มก.Ni/g.ผงตะไบเหล็ก) 10.5, 17.5 และ 22.1 (มก.Cr(VI)/g.ผงตะไบเหล็ก) ตามลำดับ แต่การเพิ่มความเข้มข้นก็ทำให้เกิดการดูดซับของคอลัมน์ได้เร็วขึ้น

8. การดูดซับของคอลัมน์เกิดจากการที่เหล็กละลายออกมาแล้ว ตกตะกอนเป็นเหล็กออกไซด์ในช่องว่างภายในคอลัมน์ วิธีแก้ปัญหการดูดซับที่เป็นไปได้คือการป้อนสารละลายที่ไม่มี Reactive Compound ซึ่งจะทำให้เหล็กออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยผงตะไบเหล็กกลายเป็นเหล็กละลายน้ำ (Fe^{2+}) ละลายออกไปกับน้ำทิ้งดังสมการ 5.1 ทำให้แก้ปัญหการดูดซับได้



5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานชุบโลหะ ด้วยผงตะไบเหล็กแบบคอลัมน์
2. ควรทดลองหาวิธีการแก้ปัญหการดูดซับของผงตะไบเหล็กแบบคอลัมน์ เช่น อาจใช้ผงตะไบเหล็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือทำการล้างย้อนคอลัมน์
3. ควรทำการทดลองกำจัดโลหะหนักหรือสารพิษอื่นๆ ในสภาวะน้ำใต้ดิน โดยใช้ผงตะไบเหล็กเป็นเพอมีเอเบิลรีแอกทีฟแบรริเออร์ (Permeable Reactive Barrier)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ทิพย์ ชัยวิริยกุล. การนำโลหะหนักเกิดในน้ำเสียจากการชุบโลหะกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537
- พณจิตร ธนสิน. การกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- พิชิต จริยธรรมานุกูล. การบำบัดแยกชะวาลนที่โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เคมีทั่วไป เล่ม 2, 2542
- มนัสสิน ตันตุลเวสสม์ และ ไพพรรณ พรประภา. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อน้ำระบบหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527
- สมบุรณ์ ประถมศรีเมฆ. การกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- อดิศักดิ์ ปิยสฤติย์. การกำจัดโครเมียม (ประจุ+6) ในน้ำเสียโดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบแมงनीไทต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- อริชัย นพแก้ว. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- อุตสาหกรรม, กระทรวง, “กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม” ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2, 2539

ภาษาอังกฤษ

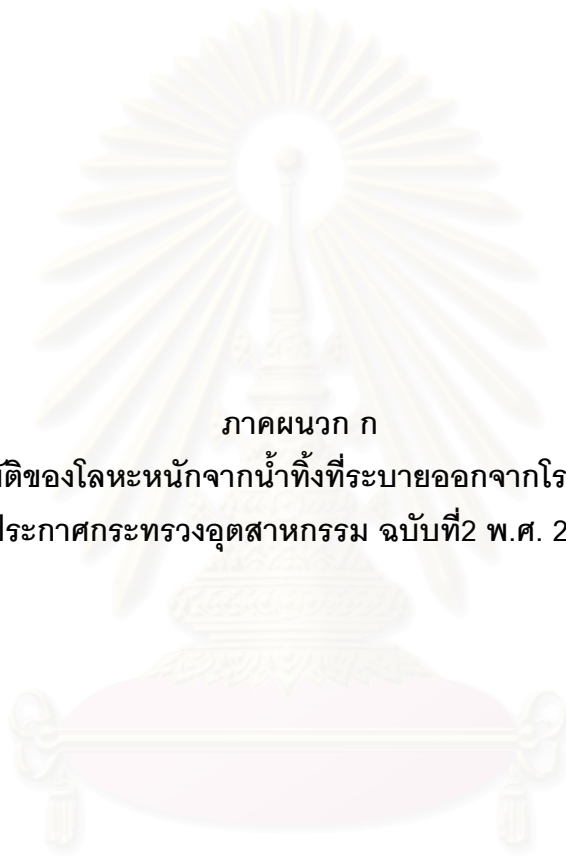
- Agrawal, A. and Trantyeck, P.G., Reduction of Nitro Aromatic Compounds by Zero Valent Iron, Environmental Science & Technology, Vol.30(1), 1996: 153 – 160.
- Anderson, M.A. and Rubin, A.J., Adsorption of Inorganics at Solids – Liquid Interfaces, Ann Arbor Science, 1981.
- Balko, B.A. and Trantyeck, P.G., Photoeffects on the Reduction of Carbon Tetrachloride by Zero - Valent Iron, The Journal of Physical chemistry B, Vol.102(8), 1998: 1459 –1465.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J. and Jambor, J.L., In – Situ Remediation of Cr(VI)– Contaminated Groundwater Using Permeable Reactive Walls: Laboratory Studies, Environmental Science & Technology, Vol 31(12), 1997: 3348 – 3357.
- Brugger, R., Nickel Plating, Robert Draper, 1970.
- Davis, J.A. and Kent, D.B., Surface Complexation Modeling in Aqueous Geochemistry, Mineral – Water Interface Geochemistry, Vol. 23, 177 – 260, 1990.
- Dzombak, D.A., and Morel, F.M.M., Surface Complexation Modeling, John Wiley & Sons Inc., 1990.
- Eary, L.E. and Rai, D., Chromate Removal from Aqueous Wastes by Reduction with Ferrous, Environmental Science & Technology, Vol.22(8), 1988: 972 – 977.
- Gu, B., Liang, L., Dickey, M.J., Yin, X. and Dai, S., Reductive Precipitation of Uranium (VI) by Zero – Valent Iron, Environmental Science & Technology, Vol.32 (21), 1988: 3366 - 3373.
- Gould, J.P., The Kinetics of Hexavalent Chromium Reduction by Metallic Iron, Water Resources, Vol.16, 1982: 871 – 877.
- Khaodhiar, S., Removal of Chromium, Copper, and Arsenic from Contaminated Groundwater Using Iron - Oxide Composite Adsorbents, The Thesis for the Degree of Doctor Philosophy in Civil Engineering, Oregon State University, 1997.

- Nelson, P.O., Adsorption and Fate of Metals in Wastewater and Soils, A Short Course Presented for Chula Unisearch, Chulalongkorn University, 1995.
- Ponder, S.M., Darab, J.G. and Mallouk, T.E., Remediation of Cr(VI) and Pb(II) Aqueous Solutions Using Supported, Nanoscale Zero – Valent Iron, Environmental Science & Technology, Vol.34(12), 2000: 2564 - 2569.
- Powell, R.M., Puls, R.W., Hightower, S.K., and Sabatini, D.A., Couple Iron Corrosion and Chromate Reduction: Mechanism for Subsurface Remediation, Environmental Science & Technology, Vol.29(8), 1995: 1913 – 1922.
- Pratt, A.R., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J., Products of Chromate Reduction on Proposed Subsurface Remediation Material, Environmental Science & Technology, Vol 31, (9), 1997: 2492 – 2498.
- Quagliano, J.V., Chemistry, Prentice-Hall, 1963.
- Rai, D. and Zachara, J.M., Geochemical Behavior of Chromium Species, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1986.
- Richter, R.O., and Theis, T.L., Nickel Speciation in a Soil/Water System, Nickel in the Environment, 1980.
- Rollinson, C.L., The Chemistry of Chromium, Molybdenum and Tungsten, Pergamon Press, 1973.
- Sayles, G.D., You, G., Wang, M. and Kupferle, M.J., DDT, DDD and DDE Dechlorination by Zero - Valent Iron, Environmental Science & Technology, Vol.31(12), 1997: 3448 – 3454.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., Water Chemistry, John Wiley & Sons, 1980.
- Stumm W., and Morgan, J.J., Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Water, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 1995.
- Zachara, J.M., Girvin, D.C., Schmidt, R.L. and Resch, C.T., Chromate Adsorption on Amorphous Iron Oxyhydroxide in the Presence of Major Groundwater Ions, Environmental Science & Technology, Vol.21(6), 1987: 589 – 594.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

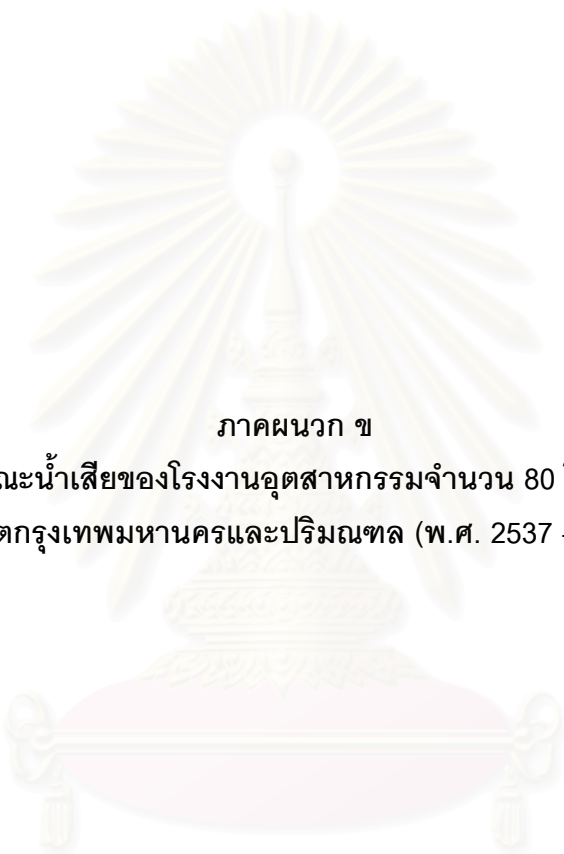
กำหนดคุณสมบัติของโลหะหนักจากน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม
(ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 กำหนดคุณสมบัติของโลหะหนักจากน้ำทิ้งที่ระบายออกจาก
โรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539)

ชนิดของโลหะหนัก	คุณสมบัติ
ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (Chromium)	
Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
บาเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน
ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ. 2537 – 2541)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงานในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ.2537-2541)
(ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
1	โรงงานชุบโครเมียม	10 มค.2537	1.8	11	6	-	-	-
2	โรงงานชุบสังกะสี	18 มค.2537	9.2	-	-	-	8	-
3	โรงงานทำไฟแช็ค	27 มค.2537	4.6	0.2	300	-	-	-
4	โรงงานผลิตล้อจักรยาน	10 มีค.2537	6.1	60	140	-	-	-
5	โรงงานทำโลหะแปรรูป	11 มีค.2537	3.3	32	44	-	-	-
6	โรงงานผลิตอะไหล่รถจักรยาน	17 มีค.2537	6.2	184	208	-	-	-
7	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	19 มีค.2537	7	0.1	3.8	-	-	-
8	โรงงานชุบโลหะ	27 เมย.2537	12.5	1.5	-	-	-	-
9	โรงงานประกอบพัดลม	3 พค.2537	4.3	-	60	-	400	-
10	โรงงานชุบโลหะ	25 มค.2537	9.1	-	-	-	60	-
11	โรงงานชุบโลหะ	26 มค.2537	7.8	0.1	20	1.28	22	-
12	โรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้ารถยนต์	2 กพ.2537	7.3	0.1	1.6	-	-	-
13	โรงงานผลิตซีบ	2 กพ.2537	7.7	-	0.1	-	0.1	-
14	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	3 กพ.2537	8.7	2.7	19	-	-	-
15	โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า	8 กย.2537	8.1	0.8	0.3	-	-	-

ตารางที่ ก (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
16	โรงงานชุบโลหะ	3 พค.2537	5.5	41.3	33.3	-	-	-
17	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	6 พค.2537	7.5	-	-	-	7.3	1.1
18	โรงงานผลิตเนื้อต.ดอกสำลี	10 พค.2537	8.4	39.6	0.18	-	29.7	-
19	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	18 พค.2537	2.2	51.5	46.6	-	-	-
20	โรงงานผลิตเนื้อต.ดอกสำลี	7 มิย.2537	5.1	6.27	-	-	346.5	-
21	โรงงานชุบโลหะ	7 กย.2537	6	-	0.05	-	-	-
22	โรงงานชุบโลหะ	21 กพ.2538	4.4	20.2	300	-	-	-
23	โรงงานชุบสังกะสี	1 พค.2538	2	-	-	-	34	-
24	โรงงานผลิตอุปกรณ์รถยนต์	20 มิย.2538	7	0.02	0.12	-	-	-
25	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	19 กค.2538	5.6	39.4	73.8	-	-	-
26	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	19 กค.2538	4	105	274	-	-	-
27	โรงงานผลิตซีบ	3 สค.2538	7.6	-	0.05	-	0.08	-
28	โรงงานชุบโลหะ	11 สค.2538	2.7	0.06	-	0.19	16.3	-
29	โรงงานผลิตหัตถกรรม	18 สค.2538	8.1	-	4.72	0.02	48	0.01
30	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	19 สค.2538	7.9	0.48	54.4	-	0.07	-

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
31	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยาน	25 ตค.2538	6.7	-	0.04	-	-	-
32	โรงงานชุบโลหะ	6 กย.2538	7.4	-	0.03	-	-	-
33	โรงงานผลิตน็อต, ตะปู	20 ตค.2538	6.1	-	-	-	61	-
34	โรงงานผลิตกลอนประตูและบานพับชุบโครเมียม	28 ตค.2538	2.7	0.04	1.81	-	0.16	-
35	โรงงานชุบโลหะ	5 กพ.2539	7.8	0.11	0.14	-	0.04	-
36	โรงงานชุบโลหะ	2 กพ.2539	5.8	0.87	61.2	-	-	-
37	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	9 กพ.2539	6.1	0.25	3.28	-	0.13	-
38	โรงงานผลิตซีบ	18 มีค.2539	2.2	-	2.53	1.43	0.32	-
39	โรงงานผลิตน็อต, สกรู	19 มีค.2539	6.5	-	4.16	-	38	-
40	โรงงานผลิตเครื่องประดับชุบ	10 เมย.2539	12	1.17	1.69	9.5	-	-
41	โรงงานชุบโลหะ	28 เมย.2539	7.2	0.05	2.64	-	0.52	-
42	โรงงานชุบโครเมียม	24 พค.2539	11.8	0.95	0.23	0.08	-	-
43	โรงงานชุบโลหะ	13 พค.2539	11.2	0.02	4.2	-	0.04	-
44	โรงงานชุบโลหะ	4 มิย.2539	5.9	9.8	9.1	-	4.36	-
45	โรงงานผลิตเครื่องเรือนจากโลหะ	19 มิย.2539	8.5	4.8	11.4	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
46	โรงงานผลิตน็อต, สกรู และ หมุด ย้า	27 มิ.ย. 2539	5.3	-	0.06	-	3	-
47	โรงงานผลิตรถจักรยาน	4 กค. 2539	7.6	0.02	3.94	-	-	-
48	โรงงานท่อเหล็กอบสังกะสี	4 กค. 2539	6.6	-	0.16	-	0.68	-
49	โรงงานชุบโครเมียม	8 กค. 2539	7.3	0.26	0.82	-	-	-
50	โรงงานชุบโลหะ	19 กค. 2539	7.1	-	0.24	0.44	0.59	-
51	โรงงานชุบโครเมียม	21 ตค. 2539	2.4	556	324	-	-	-
52	โรงงานชุบโลหะ	21 ตค. 2539	5.9	128.8	90.8	-	-	-
53	โรงงานผลิตโลหะแปรรูป	20 ตค. 2539	6.5	21.8	1.08	-	0.18	-
54	โรงงานชุบโลหะ	27 ตค. 2539	6.9	1.68	1.51	0.28	-	-
55	โรงงานหลอมรีดและชุบอลูมิเนียม	30 ตค. 2539	6.7	0.04	18	-	-	-
56	โรงงานชุบโครเมียม	30 ตค. 2539	8.4	26.4	28.8	-	-	-
57	โรงงานชุบโลหะ	25 ธค. 2539	10.2	-	17.4	36.8	-	-
58	โรงงานชุบโลหะ	18 ธค. 2539	8.2	0.12	1.66	0.24	-	-
59	โรงงานผลิตสังกะสีลูกฟูกและแผ่นเรียบ	16 มค. 2540	4.5	-	-	-	188	-
60	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	19 มค. 2540	10	23.4	1.4	0.16	0.02	0.44

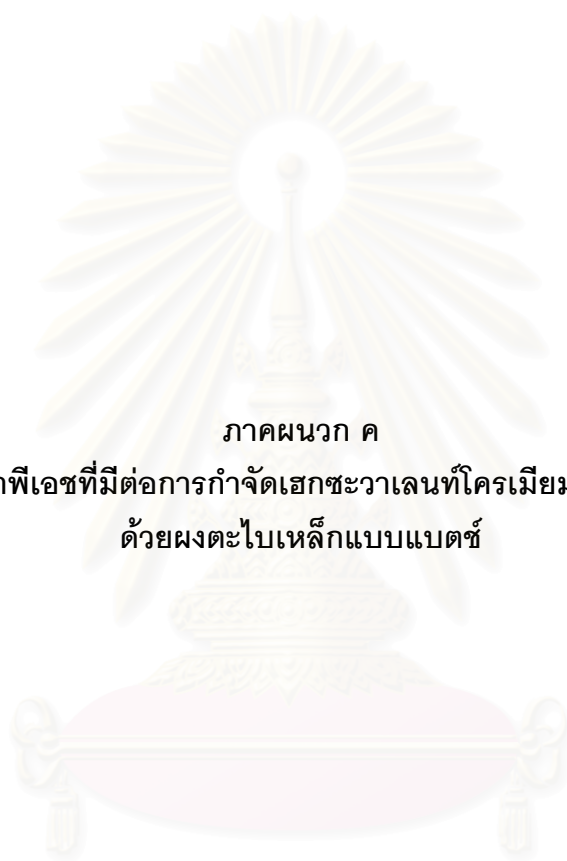
ตารางที่ ก (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
61	โรงงานชุบโลหะ	10 มีค.2540	6	0.88	4.05	0.79	-	-
62	โรงงานชุบโลหะ	21 มีค.2540	8.6	0.09	0.96	-	1.16	-
63	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	30 เมย.2540	8.6	1.11	0.26	0.04	-	1.39
64	โรงงานชุบสังกะสี	13 พค.2540	8.6	-	-	-	23.5	-
65	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	30 พค.2540	8.8	0.21	-	-	0.05	-
66	โรงงานผลิตน็อต, สกรู และ สลัก	17 มิย.2540	10.6	-	0.11	-	0.18	-
67	โรงงานชุบโลหะ	16 กย.2540	11.1	3.4	2.2	3.08	-	-
68	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	25 กย.2540	7.2	-	0.05	-	7	-
69	โรงงานชุบทอง, นาค, เงิน	1 ตค.2540	6.8	-	144	0.04	-	-
70	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	10 ตค.2540	2.8	6.4	18.1	4.8	-	-
71	โรงงานชุบทอง, นาค, เงิน	21 ตค.2540	6.8	-	0.32	0.01	-	-
72	โรงงานชุบโลหะ	24 พย.2540	6.4	2.8	-	-	-	-
73	โรงงานชุบโลหะ	3 ธค.2540	2.3	3.9	3.7	2.1	-	-
74	โรงงานผลิตรถจักรยานยนต์	16 ธค.2540	8	0.19	0.14	0.1	-	-
75	โรงงานชุบโลหะ	23 มค.2541	6.2	0.06	132	5.2	-	-

ตารางที่ ก (ต่อ)

ลำดับที่	ลักษณะกิจการ	วันที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มก./ล.)				
				Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
76	โรงงานชุบโลหะ	10 มีค.2541	2.2	1.1	55	63	-	-
77	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	23 มีค.2541	8.5	0.19	0.14	0.1	-	-
78	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	2 กค.2541	7	0.75	0.68	0.12	-	-
79	โรงงานชุบโลหะ	4 สค.2541	7	50	280	-	-	-
80	โรงงานทำเครื่องประดับ	14 ตค.2541	8	-	0.32	0.12	-	-
ค่าเฉลี่ย			6.76	26.25	41.53	5.41	39.42	0.74
ช่วงของความเข้มข้น			1.8- 12.5	0.02- 556	0.03- 324	0.01- 63	0.02- 400	0.01- 1.39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและนิกเกิล
ด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบตเตอรี่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Each Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 4 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	4.02	186	29.76		29.84		29.77		
0	4.03	192	29.82		29.91		29.87		
0.167	4.06	240	14.71	50.97	23.51	21.63	29.84	0.53	3.84
0.167	4.05	221	14.67	51.10	23.43	21.90	29.80	0.67	5.23
0.33	4.04	210	8.43	71.90	24.43	18.57	29.67	1.10	9.84
0.33	4.07	207	8.57	71.43	24.51	18.30	29.70	1.00	12.35
0.5	4.04	185	2.79	90.70	25.08	16.40	29.64	1.20	12.34
0.5	4.08	193	2.87	90.43	25.18	16.07	29.60	1.33	13.14
1	4.05	56	0.00	100.00	27.16	9.47	29.48	1.73	32.54
1	4.07	43	0.00	100.00	27.06	9.80	29.50	1.67	34.26
2	4.15	12	0.00	100.00	27.56	8.13	29.76	0.80	45.67
2	4.13	7	0.00	100.00	27.64	7.87	29.80	0.67	44.23
4	4.43	-189	0.00	100.00	27.02	9.93	28.73	4.23	52.31
4	4.41	-176	0.00	100.00	26.95	10.17	28.80	4.00	56.35
6	4.63	-215	0.00	100.00	27.34	8.87	29.74	0.87	58.62
6	4.56	-223	0.00	100.00	27.45	8.50	29.80	0.67	59.34
12	4.67	-225	0.00	100.00	26.74	10.87	29.36	2.13	69.35
12	4.61	-214	0.00	100.00	26.81	10.63	29.40	2.00	68.79
18	4.65	-198	0.00	100.00	25.93	13.57	29.57	1.43	73.24
18	4.6	-192	0.00	100.00	26.03	13.23	29.60	1.33	75.67
24	4.67	-214	0.00	100.00	27.63	7.90	29.76	0.80	78.64
24	4.69	-207	0.00	100.00	27.70	7.67	29.80	0.67	76.35
30	4.7	-205	0.00	100.00	28.30	5.67	29.51	1.63	82.34
30	4.62	-201	0.00	100.00	28.23	5.90	29.40	2.00	82.42

Initial Each Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 4 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	4.7	-217	0.00	100.00	27.31	8.97	29.16	2.80	85.34
36	4.63	-211	0.00	100.00	27.28	9.07	29.30	2.33	85.39
42	4.66	-223	0.00	100.00	27.66	7.80	29.51	1.63	87.66
42	4.61	-216	0.00	100.00	27.54	8.20	29.60	1.33	87.73
48	4.66	-215	0.00	100.00	26.76	10.80	29.67	1.10	85.63
48	4.73	-208	0.00	100.00	26.81	10.63	29.80	0.67	87.32
60	4.73	-221	0.00	100.00	27.28	9.07	29.01	3.30	83.65
60	4.65	-216	0.00	100.00	27.20	9.33	29.10	3.00	84.25
78	4.68	-235	0.00	100.00	26.20	12.67	29.62	1.27	89.36
78	4.57	-224	0.00	100.00	26.15	12.83	29.70	1.00	87.68
96	4.65	-235	0.00	100.00	24.12	19.60	29.51	1.63	91.23
96	4.62	-227	0.00	100.00	24.08	19.73	29.60	1.33	91.05
120	4.68	-225	0.00	100.00	24.02	19.93	2.62	91.27	93.25
120	4.73	-218	0.00	100.00	23.12	22.93	29.50	1.67	92.58
144	4.58	-231	0.00	100.00	23.78	20.73	29.24	2.53	95.42
144	4.65	-226	0.00	100.00	23.64	21.20	29.32	2.27	94.36
180	4.62	-234	0.00	100.00	23.38	22.07	29.27	2.43	91.25
180	4.67	-227	0.00	100.00	23.45	21.83	29.20	2.67	93.26

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 5 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0.00	5.01	187	29.67		29.87		29.76		
0.00	5.02	184	29.74		29.77		29.82		
0.17	5.02	182	23.14	22.87	25.70	14.33	29.71	0.97	6.31
0.17	5.03	173	23.24	22.53	25.73	14.23	29.63	1.23	6.34
0.33	5.08	117	23.42	21.93	25.97	13.43	29.34	2.20	7.18
0.33	5.09	124	23.31	22.30	26.10	13.00	29.38	2.07	7.23
0.50	5.08	157	21.34	28.87	27.83	7.23	29.67	1.10	12.34
0.50	5.09	163	21.42	28.60	27.90	7.00	29.62	1.27	12.43
1.00	5.08	193	19.52	34.93	26.30	12.33	29.73	0.90	13.52
1.00	5.10	198	19.45	35.17	26.38	12.07	29.76	0.80	13.64
2.00	5.10	191	13.92	53.60	25.59	14.70	29.93	0.23	16.72
2.00	5.12	193	13.84	53.87	25.50	15.00	29.84	0.53	16.84
4.00	5.15	157	3.18	89.40	22.14	26.20	29.21	2.63	20.31
4.00	5.16	143	3.24	89.20	22.20	26.00	29.12	2.93	20.24
6.00	5.45	86	0.00	100.00	18.70	37.67	29.62	1.27	30.28
6.00	5.49	73	0.00	100.00	18.79	37.37	29.71	0.97	30.34
12.00	5.62	26	0.00	100.00	8.50	71.67	29.74	0.87	40.56
12.00	5.66	18	0.00	100.00	8.41	71.97	29.82	0.60	40.41
18.00	6.16	-150	0.00	100.00	6.87	77.10	29.67	1.10	42.36
18.00	6.08	-142	0.00	100.00	6.80	77.33	29.64	1.20	42.31
24.00	6.53	-200	0.00	100.00	3.90	87.00	29.31	2.30	41.21
24.00	6.42	-212	0.00	100.00	3.98	86.73	29.38	2.07	41.36
30.00	6.58	-192	0.00	100.00	4.40	85.33	29.15	2.83	48.75
30.00	6.45	-186	0.00	100.00	4.32	85.60	29.38	2.07	48.95

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 5 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36.00	6.55	-200	0.00	100.00	1.70	94.33	29.20	2.67	56.84
36.00	6.52	-208	0.00	100.00	1.65	94.50	29.38	2.07	56.21
42.00	6.67	-207	0.00	100.00	1.40	95.33	28.64	4.53	55.43
42.00	6.69	-213	0.00	100.00	1.32	95.60	29.12	2.93	55.57
48.00	6.50	-201	0.00	100.00	1.60	94.67	29.54	1.53	57.32
48.00	6.42	-209	0.00	100.00	1.52	94.93	29.64	1.20	56.98
60.00	6.61	-204	0.00	100.00	1.30	95.67	28.23	5.90	61.32
60.00	6.58	-207	0.00	100.00	1.22	95.93	28.08	6.40	60.24
78.00	6.48	-185	0.00	100.00	2.30	92.33	28.24	5.87	61.32
78.00	6.42	-193	0.00	100.00	2.24	92.53	28.34	5.53	61.45
96.00	6.40	-215	0.00	100.00	2.30	92.33	27.73	7.57	64.87
96.00	6.48	-208	0.00	100.00	2.34	92.20	27.92	6.93	65.32
120.00	6.45	-221	0.00	100.00	2.10	93.00	27.34	8.87	70.23
120.00	6.53	-213	0.00	100.00	2.08	93.07	27.50	8.33	71.35
144.00	6.60	-220	0.00	100.00	1.56	94.80	27.12	9.60	73.24
144.00	6.52	-227	0.00	100.00	1.50	95.00	27.00	10.00	72.65
180.00	6.62	-213	0.00	100.00	1.34	95.53	27.06	9.80	76.35
180.00	6.53	-221	0.00	100.00	1.40	95.33	27.10	9.67	78.25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	6.00	198	29.78		29.67		29.65		
0	6.00	196	29.83		29.84		29.76		
0.167	5.99	193	27.90	7.00	27.30	9.00	29.75	0.83	0.00
0.167	5.98	203	27.40	8.67	27.60	8.00	29.83	0.57	0.00
0.33	6.00	194	27.30	9.00	27.60	8.00	29.13	2.90	0.00
0.33	6.01	199	27.60	8.00	27.20	9.33	29.12	2.93	0.00
0.5	6.00	193	26.30	12.33	26.90	10.33	28.64	4.53	0.28
0.5	6.02	197	26.70	11.00	26.40	12.00	28.56	4.80	0.21
1	6.00	198	25.80	14.00	26.10	13.00	28.32	5.60	0.54
1	6.01	206	26.30	12.33	25.70	14.33	28.39	5.37	0.48
2	6.01	198	23.90	20.33	24.10	19.67	28.10	6.33	0.67
2	6.02	209	24.50	18.33	24.20	19.33	27.62	7.93	0.78
4	6.02	191	23.90	20.33	23.70	21.00	27.46	8.47	0.87
4	6.03	187	23.60	21.33	24.10	19.67	27.53	8.23	0.97
6	6.04	204	20.13	32.90	20.50	31.67	27.24	9.20	1.04
6	6.04	193	20.70	31.00	21.10	29.67	27.32	8.93	1.12
12	6.04	197	18.70	37.67	19.20	36.00	27.64	7.87	1.04
12	6.04	206	18.63	37.90	19.00	36.67	27.55	8.17	1.09
18	6.06	186	18.40	38.67	18.90	37.00	27.21	9.30	0.78
18	6.04	196	18.32	38.93	18.50	38.33	27.36	8.80	0.83
24	6.05	182	16.40	45.33	16.40	45.33	27.13	9.57	0.89
24	6.07	188	16.34	45.53	16.80	44.00	27.10	9.67	0.93
30	6.04	189	13.64	54.53	15.20	49.33	26.78	10.73	1.32
30	6.06	196	13.50	55.00	15.00	50.00	26.83	10.57	1.27

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	6.06	185	8.46	71.80	9.75	67.50	26.07	13.10	1.83
36	6.04	192	8.40	72.00	9.97	66.77	26.13	12.90	1.74
42	6.14	185	5.46	81.80	7.80	74.00	26.12	12.93	2.13
42	6.12	188	5.50	81.67	7.45	75.17	26.05	13.17	2.13
48	6.14	185	3.60	88.00	5.80	80.67	25.60	14.67	2.86
48	6.13	193	3.45	88.50	5.76	80.80	25.64	14.53	2.75
60	6.15	180	2.80	90.67	4.70	84.33	26.03	13.23	2.86
60	6.12	186	2.46	91.80	4.56	84.80	25.90	13.67	2.74
78	6.50	0	0.00	100.00	1.50	95.00	25.30	15.67	4.16
78	6.60	12	0.00	100.00	1.37	95.43	25.36	15.47	4.09
96	7.12	-235	0.00	100.00	0.00	100.00	20.18	32.73	13.12
96	7.08	-225	0.00	100.00	0.00	100.00	20.10	33.00	13.02
120	7.23	-258	0.00	100.00	0.00	100.00	17.30	42.33	50.12
120	7.19	-256	0.00	100.00	0.00	100.00	17.38	42.07	50.23
144	7.38	-274	0.00	100.00	0.00	100.00	16.34	45.53	61.50
144	7.34	-269	0.00	100.00	0.00	100.00	16.27	45.77	62.31
180	7.57	-288	0.00	100.00	0.00	100.00	15.57	48.10	65.32
180	7.50	-293	0.00	100.00	0.00	100.00	15.64	47.87	66.87

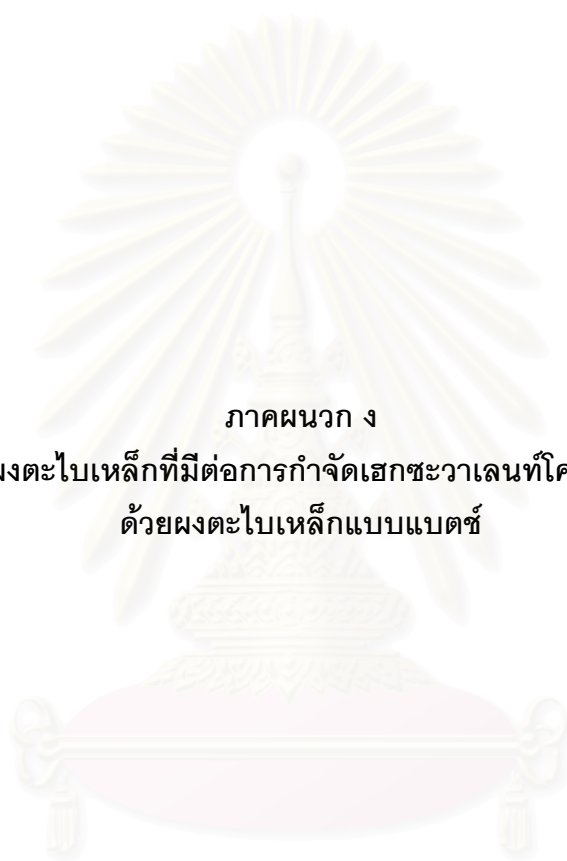
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 7 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	7.01	186	29.72	29.72	29.78	29.72	29.78	29.72	
0	7.02	184	29.64	29.64	29.64	29.64	29.68	29.64	
0.167	7.01	98	28.45	28.45	28.98	28.45	29.94	28.45	0.00
0.167	7.02	121	28.46	28.46	28.78	28.46	29.93	28.46	0.00
0.33	7.05	104	28.32	28.32	28.64	28.32	29.65	28.32	0.00
0.33	7.06	113	28.36	28.36	28.57	28.36	29.78	28.36	0.00
0.5	7.09	101	28.39	28.39	28.64	28.39	29.84	28.39	0.00
0.5	7.09	107	28.45	28.45	28.72	28.45	29.81	28.45	0.00
1	7.15	104	25.54	25.54	25.71	25.54	29.21	25.54	0.00
1	7.12	101	25.46	25.46	25.76	25.46	29.13	25.46	0.00
2	7.20	102	25.75	25.75	25.92	25.75	29.86	25.75	0.00
2	7.23	93	25.84	25.84	25.83	25.84	29.81	25.84	0.56
4	7.22	101	24.52	24.52	24.86	24.52	29.64	24.52	0.78
4	7.26	107	24.53	24.53	24.33	24.53	29.53	24.53	0.88
6	7.31	101	24.13	24.13	24.20	24.13	29.36	24.13	1.04
6	7.24	95	23.64	23.64	24.23	23.64	29.43	23.64	1.06
12	7.34	108	23.78	23.78	24.03	23.78	29.87	23.78	1.13
12	7.39	113	23.73	23.73	24.06	23.73	29.78	23.73	1.24
18	7.31	103	23.13	23.13	23.62	23.13	29.79	23.13	1.09
18	7.24	110	23.10	23.10	23.51	23.10	29.73	23.10	1.05
24	7.37	99	22.63	22.63	22.83	22.63	29.53	22.63	1.03
24	7.31	102	22.78	22.78	22.76	22.78	29.64	22.78	1.08
30	7.32	103	22.26	22.26	22.43	22.26	29.51	22.26	1.32
30	7.24	93	22.31	22.31	22.56	22.31	29.63	22.31	1.28

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 7 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	7.24	108	21.34	21.34	21.38	21.34	29.73	21.34	1.19
36	7.31	97	21.27	21.27	21.30	21.27	29.64	21.27	1.23
42	7.36	97	21.09	21.09	18.27	21.09	29.64	21.09	1.37
42	7.31	102	21.03	21.03	18.32	21.03	29.76	21.03	1.29
48	7.32	98	19.62	19.62	19.46	19.62	28.64	19.62	1.25
48	7.39	103	19.73	19.73	19.52	19.73	28.61	19.73	1.28
60	7.34	93	19.37	19.37	20.57	19.37	28.61	19.37	1.32
60	7.32	98	19.32	19.32	20.62	19.32	28.53	19.32	1.34
78	7.33	65	18.09	18.09	19.36	18.09	28.31	18.09	1.09
78	7.31	72	18.01	18.01	19.38	18.01	28.36	18.01	1.05
96	7.31	36	17.20	17.20	18.40	17.20	27.45	17.20	1.27
96	7.34	43	17.26	17.26	18.35	17.26	27.56	17.26	1.20
120	7.33	16	16.02	16.02	17.65	16.02	26.31	16.02	1.30
120	7.36	21	16.13	16.13	17.83	16.13	26.38	16.13	1.37
144	7.35	16	15.42	15.42	17.26	15.42	24.96	15.42	1.64
144	7.31	13	15.52	15.52	17.23	15.52	24.98	15.52	1.58
180	7.41	19	15.12	15.12	16.81	15.12	23.92	15.12	1.87
180	7.42	12	15.03	15.03	16.87	15.03	23.84	15.03	1.82

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

ผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่มีต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิล
ด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบดซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1.5 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 1.5 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	6.01	187	29.45		29.87		29.47		
0	6.00	193	29.64		29.86		29.68		
0.167	6.02	145	26.89	10.37	23.86	20.48	27.26	9.13	0.12
0.167	6.02	137	26.74	10.87	23.47	21.77	27.34	8.87	0.11
0.33	6.03	145	26.21	12.63	24.28	19.07	28.47	5.10	0.65
0.33	6.04	136	26.13	12.90	24.15	19.50	28.61	4.63	0.57
0.5	6.03	152	24.28	19.06	22.11	26.29	28.13	6.23	0.78
0.5	6.03	148	24.25	19.17	21.87	27.10	28.09	6.37	0.68
1	6.04	151	24.28	19.06	20.92	30.26	27.13	9.57	1.89
1	6.04	146	24.13	19.57	20.76	30.80	27.02	9.93	1.79
2	6.04	154	22.68	24.39	20.04	33.21	27.31	8.97	2.23
2	6.05	148	22.45	25.17	20.01	33.30	27.31	8.97	2.18
4	6.05	155	20.49	31.69	19.75	34.16	27.38	8.73	4.25
4	6.04	146	20.13	32.90	19.45	35.17	27.24	9.20	4.16
6	6.05	156	17.92	40.26	16.04	46.55	28.12	6.27	4.80
6	6.05	151	17.84	40.53	16.02	46.60	28.08	6.40	4.75
12	6.11	145	15.10	49.65	15.36	48.78	26.38	12.07	5.21
12	6.13	149	15.03	49.90	15.26	49.13	26.31	12.30	5.11
18	6.12	136	13.51	54.98	13.35	55.50	28.13	6.23	6.32
18	6.11	139	13.41	55.30	13.27	55.77	28.08	6.40	6.21
24	6.15	133	11.11	62.98	10.53	64.90	27.86	7.13	6.85
24	6.17	137	11.02	63.27	10.46	65.13	27.84	7.20	6.68
30	6.19	130	3.79	87.37	6.35	78.84	27.24	9.20	7.25
30	6.17	138	3.64	87.87	6.14	79.53	27.31	8.97	7.14

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 1.5 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	6.22	125	2.10	92.99	4.23	85.89	27.69	7.70	7.85
36	6.21	115	2.06	93.13	4.15	86.17	27.56	8.13	7.82
42	6.34	74	0.12	99.59	0.58	98.07	20.53	31.57	9.10
42	6.31	64	0.13	99.55	0.53	98.23	20.46	31.80	9.03
48	6.47	-12	0.00	100.00	0.00	100.00	18.43	38.57	30.20
48	6.44	-16	0.00	100.00	0.00	100.00	18.53	38.23	30.28
60	7.56	-300	0.00	100.00	0.00	100.00	2.54	91.53	45.30
60	7.52	-312	0.00	100.00	0.00	100.00	2.61	91.30	45.21
78	7.51	-326	0.00	100.00	0.00	100.00	2.31	92.30	50.20
78	7.52	-326	0.00	100.00	0.00	100.00	2.22	92.60	50.13
96	7.89	-326	0.00	100.00	0.00	100.00	1.62	94.60	52.36
96	7.93	-314	0.00	100.00	0.00	100.00	1.53	94.90	53.26
120	7.92	-318	0.00	100.00	0.00	100.00	0.46	98.47	59.42
120	7.87	-312	0.00	100.00	0.00	100.00	0.42	98.60	58.76
144	8.04	-321	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	65.31
144	8.01	-327	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	65.13
180	8.12	-319	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	72.31
180	8.14	-311	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	71.34

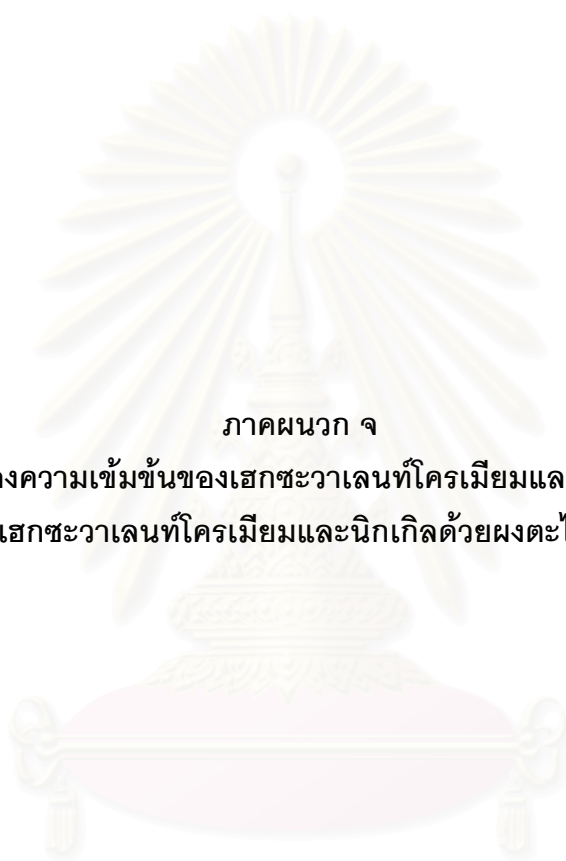
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 2 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	6.02	178	29.78		29.87		29.45		
0	6.02	183	29.65		29.68		29.35		
0.167	6.01	178	26.57	11.43	26.61	11.30	28.01	6.63	0.28
0.167	6.03	179	26.51	11.63	26.54	11.53	28.08	6.40	0.29
0.33	6.02	168	25.38	15.41	25.90	13.67	29.26	2.47	0.81
0.33	6.01	166	25.31	15.63	25.84	13.87	29.38	2.07	0.89
0.5	6.04	174	24.48	18.40	24.74	17.53	28.74	4.20	0.98
0.5	6.02	175	24.38	18.73	24.83	17.23	28.86	3.80	1.06
1	6.08	165	22.41	25.30	22.76	24.13	28.23	5.90	2.35
1	6.12	163	22.32	25.60	22.82	23.93	28.34	5.53	2.29
2	6.09	157	20.46	31.80	20.63	31.23	28.54	4.87	2.68
2	6.08	152	20.47	31.77	20.71	30.97	28.62	4.60	2.54
4	6.12	126	16.08	46.41	16.18	46.05	28.34	5.53	5.68
4	6.07	119	16.01	46.63	16.19	46.03	28.31	5.63	5.61
6	6.13	60	12.20	59.33	12.38	58.73	28.27	5.77	13.64
6	6.11	54	12.13	59.57	12.32	58.94	28.34	5.53	13.54
12	6.13	71	9.71	67.64	12.25	59.17	28.54	4.87	16.31
12	6.11	63	9.64	67.87	12.33	58.91	28.61	4.63	16.27
18	6.16	67	3.46	88.46	8.34	72.20	27.31	8.97	18.91
18	6.14	54	3.35	88.83	8.31	72.31	27.26	9.13	18.94
24	6.32	-15	0.00	100.00	2.91	90.31	25.71	14.30	32.51
24	6.36	-11	0.00	100.00	2.84	90.53	25.74	14.20	32.59
30	6.64	-283	0.00	100.00	0.00	100.00	14.76	50.80	50.23
30	6.58	-268	0.00	100.00	0.00	100.00	14.82	50.60	50.18

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 2 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	6.92	-285	0.00	100.00	0.00	100.00	9.81	67.30	62.81
36	6.95	-274	0.00	100.00	0.00	100.00	9.88	67.07	62.89
42	7.12	-300	0.00	100.00	0.00	100.00	5.61	81.30	65.28
42	7.14	-294	0.00	100.00	0.00	100.00	5.62	81.27	65.97
48	7.30	-320	0.00	100.00	0.00	100.00	1.56	94.80	69.31
48	7.25	-312	0.00	100.00	0.00	100.00	1.53	94.90	68.97
60	7.52	-320	0.00	100.00	0.00	100.00	1.39	95.37	72.34
60	7.46	-326	0.00	100.00	0.00	100.00	1.31	95.63	71.35
78	8.05	-332	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	74.52
78	8.12	-321	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	74.36
96	8.74	-326	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	78.31
96	8.65	-316	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	78.64
120	8.88	-318	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	79.31
120	8.73	-319	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	75.68
144	8.91	-321	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	69.34
144	8.84	-328	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	71.35
180	8.97	-319	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	76.32
180	8.83	-308	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	74.38

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล
ที่มีต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลด้วยผงตะไบเหล็กแบบแบตช์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Each Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 10 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	6.03	187	9.91		9.83		9.87		
0	6.01	184	9.87		9.84		9.83		
0.167	5.99	120	7.48	25.20	7.87	21.30	8.72	12.80	1.82
0.167	5.98	113	7.62	23.80	7.83	21.70	8.83	11.70	1.78
0.33	6.02	145	6.78	32.20	7.08	29.20	8.62	13.80	2.60
0.33	6.01	158	6.72	32.80	7.18	28.20	8.64	13.60	2.63
0.5	6.08	156	5.76	42.40	6.21	37.90	8.54	14.60	3.90
0.5	6.07	162	5.84	41.60	6.13	38.70	8.64	13.60	3.57
1	6.03	164	4.76	52.40	4.72	52.80	8.30	17.00	4.68
1	6.03	153	4.72	52.80	4.78	52.20	8.26	17.40	4.57
2	6.01	167	1.32	86.80	2.76	72.40	8.62	13.80	7.54
2	6.08	174	1.28	87.20	2.78	72.20	8.61	13.90	7.23
4	6.14	74	0.75	92.50	1.64	83.60	8.06	19.40	8.90
4	6.21	63	0.62	93.80	1.53	84.70	8.09	19.10	7.68
6	6.30	-114	0.00	100.00	0.00	100.00	7.30	27.00	18.20
6	6.32	-105	0.00	100.00	0.00	100.00	7.34	26.60	17.68
12	6.54	-201	0.00	100.00	0.00	100.00	6.42	35.80	20.54
12	6.49	-213	0.00	100.00	0.00	100.00	6.54	34.60	21.57
18	7.34	-225	0.00	100.00	0.00	100.00	4.83	51.70	54.34
18	7.28	-226	0.00	100.00	0.00	100.00	4.88	51.20	56.32
24	7.52	-260	0.00	100.00	0.00	100.00	5.52	44.80	61.23
24	7.48	-275	0.00	100.00	0.00	100.00	5.46	45.40	62.13
30	7.58	-280	0.00	100.00	0.00	100.00	3.84	61.60	63.21
30	7.59	-283	0.00	100.00	0.00	100.00	3.87	61.30	64.53

Initial Each Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 10 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	7.60	-310	0.00	100.00	0.00	100.00	3.12	68.80	69.23
36	7.63	-299	0.00	100.00	0.00	100.00	3.16	68.40	67.32
42	7.59	-320	0.00	100.00	0.00	100.00	2.84	71.60	68.23
42	7.63	-315	0.00	100.00	0.00	100.00	2.93	70.70	69.32
48	7.48	-320	0.00	100.00	0.00	100.00	1.78	82.20	71.24
48	7.54	-314	0.00	100.00	0.00	100.00	1.76	82.40	70.32
60	7.68	-320	0.00	100.00	0.00	100.00	1.34	86.60	68.32
60	7.72	-325	0.00	100.00	0.00	100.00	1.32	86.80	67.38
78	7.60	-315	0.00	100.00	0.00	100.00	1.28	87.20	70.54
78	7.54	-309	0.00	100.00	0.00	100.00	1.23	87.70	71.23
96	7.70	-314	0.00	100.00	0.00	100.00	0.84	91.60	73.21
96	7.63	-312	0.00	100.00	0.00	100.00	0.76	92.40	72.65
120	7.68	-318	0.00	100.00	0.00	100.00	0.38	96.20	74.26
120	7.73	-322	0.00	100.00	0.00	100.00	0.39	96.10	75.36
144	7.66	-321	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	79.34
144	7.79	-318	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	76.58
180	7.86	-319	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	78.54
180	7.83	-316	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	79.35

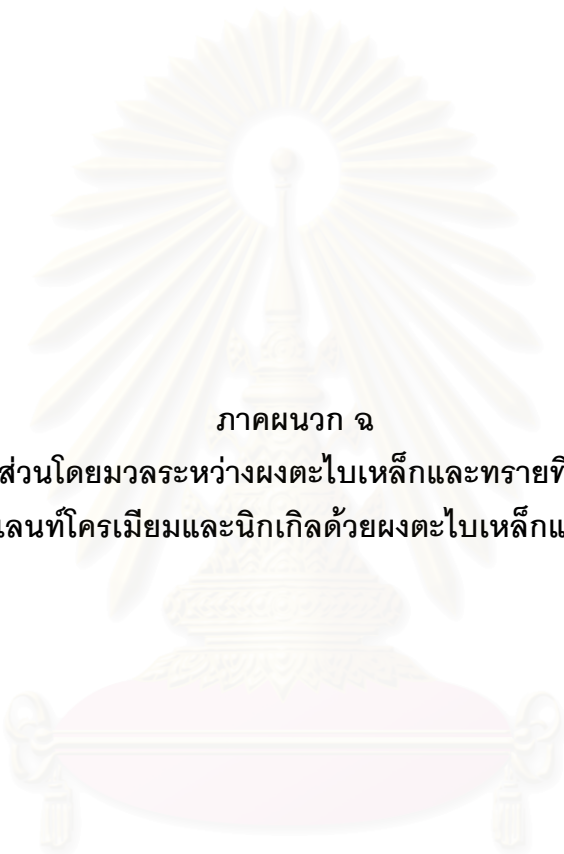
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.๒ แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก./ล. ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 20 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
0	6.02	158	19.87		19.72		19.87		
0	6.04	167	19.94		19.81		19.75		
0.167	5.98	91	17.70	11.50	17.92	10.40	18.62	6.90	1.30
0.167	6.02	92	17.80	11.00	17.84	10.80	18.72	6.40	1.26
0.33	5.98	90	17.13	14.35	17.23	13.85	19.12	4.40	1.82
0.33	5.99	94	17.08	14.60	17.16	14.20	19.02	4.90	1.75
0.5	5.98	105	16.70	16.50	16.72	16.40	18.76	6.20	2.34
0.5	5.97	110	16.62	16.90	16.84	15.80	18.69	6.55	2.24
1	5.98	107	15.73	21.35	15.93	20.35	19.83	0.85	2.34
1	6.02	106	15.80	21.00	15.88	20.60	19.81	0.95	2.38
2	5.99	115	14.50	27.50	14.61	26.95	18.65	6.75	2.08
2	6.01	109	14.43	27.85	14.62	26.90	18.72	6.40	2.12
4	6.00	118	13.05	34.75	13.24	33.80	17.85	10.75	1.82
4	6.00	123	12.87	35.65	13.12	34.40	17.92	10.40	1.72
6	6.01	119	9.63	51.85	10.41	47.95	19.23	3.85	0.78
6	6.02	124	9.72	51.40	10.40	48.00	19.20	4.00	0.91
12	6.03	120	8.91	55.45	9.53	52.35	19.48	2.60	3.12
12	6.03	116	8.84	55.80	9.44	52.80	19.54	2.30	3.11
18	6.06	125	5.32	73.40	5.88	70.60	19.53	2.35	3.12
18	6.07	129	5.24	73.80	5.93	70.35	19.48	2.60	3.20
24	6.07	130	2.11	89.45	3.74	81.30	19.23	3.85	4.16
24	6.09	133	2.06	89.70	3.82	80.90	19.20	4.00	4.06
30	6.11	23	0.31	98.45	1.66	91.70	19.26	3.70	5.72
30	6.13	28	0.34	98.30	1.73	91.35	19.28	3.60	5.66

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 20 mg/L, pH 6 and 1 g Iron Filings/L									
Time (Hr)	pH	ORP	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[TotalCr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% TotalNi Removal	[Total Fe] (mg/L)
36	6.40	-235	0.00	100.00	0.00	100.00	15.12	24.40	12.50
36	6.35	-245	0.00	100.00	0.00	100.00	15.03	24.85	12.43
42	7.40	-286	0.00	100.00	0.00	100.00	11.95	40.25	54.34
42	7.38	-278	0.00	100.00	0.00	100.00	12.09	39.55	54.37
48	7.58	-280	0.00	100.00	0.00	100.00	9.92	50.40	59.02
48	7.43	-286	0.00	100.00	0.00	100.00	9.85	50.75	59.12
60	7.35	-285	0.00	100.00	0.00	100.00	8.12	59.40	65.80
60	7.45	-297	0.00	100.00	0.00	100.00	8.04	59.80	65.32
78	7.42	-290	0.00	100.00	0.00	100.00	8.69	56.55	72.80
78	7.43	-278	0.00	100.00	0.00	100.00	8.73	56.35	72.68
96	7.48	-298	0.00	100.00	0.00	100.00	7.26	63.70	73.65
96	7.52	-297	0.00	100.00	0.00	100.00	7.32	63.40	74.23
120	7.51	-304	0.00	100.00	0.00	100.00	4.21	78.95	79.35
120	7.49	-308	0.00	100.00	0.00	100.00	4.12	79.40	78.96
144	7.61	-308	0.00	100.00	0.00	100.00	2.38	88.10	74.32
144	7.64	-315	0.00	100.00	0.00	100.00	2.41	87.95	76.23
180	7.68	-319	0.00	100.00	0.00	100.00	1.19	94.05	78.14
180	7.63	-316	0.00	100.00	0.00	100.00	1.23	93.85	79.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและทรายที่มีต่อการกำจัด
เฮกซะวาเลนต์โครเมียมและนิกเกิลด้วยผงตะไบเหล็กแบบคอลัมน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและ
 นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ
 ททราย 8 กรัม/ 8 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
1	-126	6.42	14	4.89	0.00	100.00	0.00	100.00	18.54	38.20	48.26
2	-113	6.49	28	4.03	0.00	100.00	0.00	100.00	17.36	42.13	34.15
3	-124	6.47	42	3.67	0.00	100.00	0.00	100.00	13.50	55.00	31.26
4	-125	6.48	56	3.45	0.00	100.00	0.00	100.00	12.78	57.40	29.35
5	-134	6.50	70	2.93	0.00	100.00	0.00	100.00	12.16	59.47	36.50
6	-132	6.52	84	2.88	0.00	100.00	0.00	100.00	11.87	60.43	31.26
7	-126	6.38	98	2.70	0.00	100.00	0.00	100.00	11.36	62.13	32.10
8	112	6.46	112	2.59	0.00	100.00	0.00	100.00	11.57	61.43	30.26
9	-103	6.46	126	2.33	0.00	100.00	0.00	100.00	11.89	60.37	29.50
10	-112	6.35	140	2.31	0.00	100.00	0.00	100.00	12.16	59.47	31.23
11	-124	6.54	154	2.29	0.00	100.00	0.00	100.00	11.78	60.73	25.30
12	-112	6.60	168	2.25	0.00	100.00	0.00	100.00	11.32	62.27	24.36
13	-98	6.49	182	2.15	0.00	100.00	0.00	100.00	11.34	62.20	23.15
14	-97	6.48	196	1.98	0.00	100.00	0.00	100.00	11.60	61.33	22.50
15	-89	6.45	210	2.09	0.00	100.00	0.00	100.00	11.28	62.40	23.46
16	-96	6.52	224	1.25	0.00	100.00	0.00	100.00	11.30	62.33	23.10
17	-106	6.38	238	1.28	0.00	100.00	0.00	100.00	12.45	58.50	21.32
18	-103	6.46	252	1.21	0.00	100.00	0.00	100.00	12.30	59.00	19.80
19	-98	6.49	266	1.16	0.00	100.00	0.00	100.00	11.65	61.17	21.32
20	-96	6.48	280	1.12	0.00	100.00	0.00	100.00	11.36	62.13	20.40
21	-94	6.45	294	1.12	0.00	100.00	0.00	100.00	10.95	63.50	18.26
22	-87	6.51	308	1.09	0.00	100.00	0.00	100.00	10.84	63.87	17.36
23	-92	6.47	322	1.04	0.00	100.00	0.00	100.00	10.32	65.60	16.80
24	-86	6.44	336	0.95	0.00	100.00	0.00	100.00	11.23	62.57	13.25
25	-93	6.51	350	0.83	0.00	100.00	0.00	100.00	10.25	65.83	11.39
26	-89	6.39	364	0.76	0.00	100.00	0.00	100.00	10.35	65.50	10.35
27	-73	6.43	378	0.73	0.00	100.00	0.00	100.00	10.12	66.27	11.89
28	-84	6.48	392	0.67	0.00	100.00	0.00	100.00	10.86	63.80	10.26
29	-94	6.49	406	0.57	0.00	100.00	0.00	100.00	9.87	67.10	12.60
30	-89	6.58	420	0.52	0.00	100.00	0.00	100.00	10.12	66.27	12.23

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr(VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
31	-83	6.53	434	0.49	0.00	100.00	0.00	100.00	9.84	67.20	10.60
32	-72	6.78	448	0.46	0.00	100.00	0.00	100.00	9.94	66.87	9.87
33	-86	6.45	462	0.44	0.00	100.00	0.00	100.00	9.75	67.50	10.26
34	-73	6.35	476	0.43	0.00	100.00	0.00	100.00	9.62	67.93	9.74
35	-76	6.48	490	0.25	0.00	100.00	0.00	100.00	10.87	63.77	10.87
36	-53	6.59	504	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	10.97	63.43	9.65
37	-46	6.23	518	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	11.03	63.23	9.30
38	-39	6.69	532	0.23	0.00	100.00	0.00	100.00	9.87	67.10	9.87
39	-36	6.57	546	0.23	0.00	100.00	0.00	100.00	9.68	67.73	9.64
40	-12	6.28	560	0.23	0.00	100.00	0.00	100.00	9.45	68.50	6.23
41	-9	6.89	574	0.21	0.00	100.00	0.00	100.00	9.23	69.23	9.14
42	23	6.59	588	0.22	0.00	100.00	0.00	100.00	9.34	68.87	9.84
43	29	6.38	602	0.21	0.00	100.00	0.00	100.00	8.89	70.37	9.32
44	20	6.47	616	0.21	0.00	100.00	0.00	100.00	8.45	71.83	10.30
45	56	6.69	630	0.22	0.00	100.00	0.00	100.00	8.67	71.10	11.50
46	97	6.58	644	0.20	0.00	100.00	0.00	100.00	8.52	71.60	9.56
47	112	6.36	658	0.19	0.00	100.00	0.00	100.00	8.26	72.47	8.21
48	98	6.72	672	0.18	0.00	100.00	0.00	100.00	7.86	73.80	7.84
49	103	6.52	686	0.14	0.00	100.00	0.00	100.00	7.67	74.43	7.68
50	96	6.48	700	0.11	0.00	100.00	0.00	100.00	7.84	73.87	7.84
51	89	6.67	714	0.95	0.00	100.00	0.00	100.00	7.95	73.50	8.21
52	87	6.35	728	0.09	0.00	100.00	0.00	100.00	7.36	75.47	7.38
53	93	6.58	742	0.10	0.00	100.00	0.00	100.00	6.84	77.20	8.20
54	106	6.69	756	0.09	0.00	100.00	0.00	100.00	6.75	77.50	7.65
55	103	6.47	770	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	6.63	77.90	7.10
56	108	6.53	784	0.06	0.00	100.00	0.00	100.00	6.58	78.07	6.58
57	96	6.48	798	0.05	0.00	100.00	0.00	100.00	6.84	77.20	6.89
58	97	6.36	812	0.05	0.00	100.00	0.00	100.00	6.45	78.50	6.45
59	103	6.28	826	0.05	0.00	100.00	0.00	100.00	6.28	79.07	6.28

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
 นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ
 ทราย 10 กรัม/ 8 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 10 g Iron Filings mixed with 6 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
1	-129	6.51	14	3.41	0.00	100.00	0.00	100.00	16.54	44.87	51.30
2	-115	6.48	28	3.05	0.00	100.00	0.00	100.00	12.50	58.33	52.50
3	-98	6.43	42	2.65	0.00	100.00	0.00	100.00	10.50	65.00	43.60
4	-103	6.45	56	2.48	0.00	100.00	0.00	100.00	9.85	67.17	38.69
5	-103	6.47	70	2.36	0.00	100.00	0.00	100.00	9.68	67.73	35.60
6	-93	6.45	84	2.15	0.00	100.00	0.00	100.00	9.87	67.10	32.50
7	-86	6.39	98	1.89	0.00	100.00	0.00	100.00	9.56	68.13	30.25
8	-86	6.47	112	1.73	0.00	100.00	0.00	100.00	10.25	65.83	27.60
9	-94	6.58	126	1.68	0.00	100.00	0.00	100.00	9.65	67.83	23.89
10	-89	6.44	140	1.62	0.00	100.00	0.00	100.00	9.32	68.93	23.50
11	-76	6.41	154	1.43	0.00	100.00	0.00	100.00	9.87	67.10	21.30
12	-82	6.43	168	1.26	0.00	100.00	0.00	100.00	9.35	68.83	20.89
13	-86	6.47	182	1.16	0.00	100.00	0.00	100.00	9.45	68.50	20.50
14	-75	6.38	196	1.03	0.00	100.00	0.00	100.00	8.96	70.13	21.36
15	-62	6.43	210	0.97	0.00	100.00	0.00	100.00	8.74	70.87	20.80
16	-65	6.46	224	0.84	0.00	100.00	0.00	100.00	8.26	72.47	18.60
17	-75	6.35	238	0.75	0.00	100.00	0.00	100.00	8.26	72.47	18.36
18	-76	6.38	252	0.68	0.00	100.00	0.00	100.00	8.65	71.17	14.60
19	-68	6.59	266	0.62	0.00	100.00	0.00	100.00	7.95	73.50	12.35
20	-51	6.42	280	0.54	0.00	100.00	0.00	100.00	7.85	73.83	13.80
21	-23	6.43	294	0.31	0.00	100.00	0.00	100.00	7.65	74.50	12.70
22	12	6.47	308	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	7.95	73.50	13.80
23	63	6.38	322	0.20	0.00	100.00	0.00	100.00	8.21	72.63	12.80
24	72	6.45	336	0.15	0.00	100.00	0.00	100.00	7.74	74.20	11.80
25	78	6.48	350	0.12	0.00	100.00	0.00	100.00	6.58	78.07	10.70
26	82	6.46	364	0.10	0.00	100.00	0.00	100.00	5.98	80.07	10.90
27	86	6.43	378	0.08	0.00	100.00	0.00	100.00	5.74	80.87	11.70
28	93	6.42	392	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	6.27	79.10	9.75
29	84	6.45	406	0.06	0.00	100.00	0.00	100.00	5.75	80.83	8.97
30	96	6.47	420	0.08	0.00	100.00	0.00	100.00	5.86	80.47	9.57
31	93	6.43	434	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	5.24	82.53	8.36
32	91	6.45	448	0.062	0.00	100.00	0.00	100.00	5.1	83.00	8.86
33	85	6.47	462	0.059	0.00	100.00	0.00	100.00	5.454	81.82	7.85
34	83	6.48	476	0.048	0.00	100.00	0.00	100.00	5.28	82.40	7.65

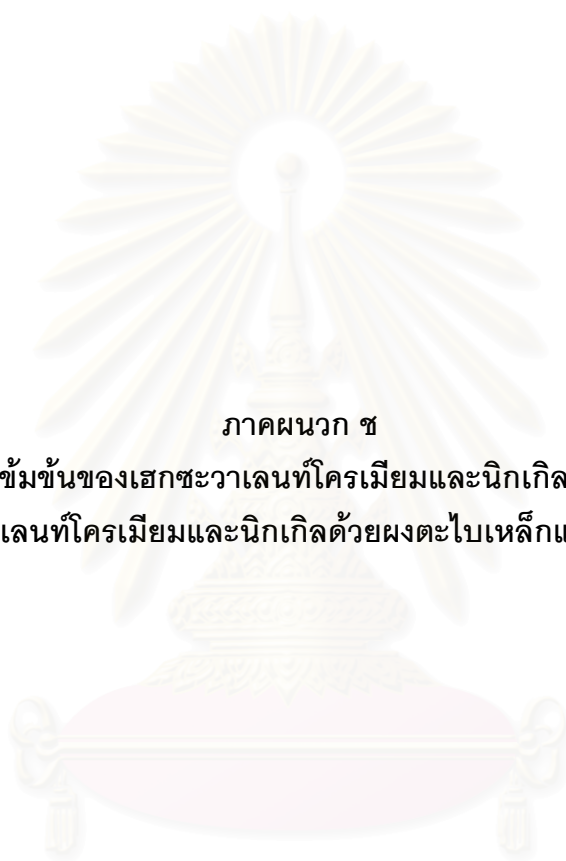
ตารางที่ ๓.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
 นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ
 ททราย 12 กรัม/ 8 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 20 mg/L, pH 6 and 12 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
1	-96	6.61	14	2.36	0.00	100.00	0.00	100.00	15.23	49.23	51.30
2	-89	6.51	28	1.68	0.00	100.00	0.00	100.00	9.56	68.13	43.60
3	-93	6.48	42	1.53	0.00	100.00	0.00	100.00	9.31	68.97	35.60
4	-86	6.47	56	1.38	0.00	100.00	0.00	100.00	9.54	68.20	32.50
5	-94	6.49	70	1.13	0.00	100.00	0.00	100.00	9.34	68.87	27.60
6	-88	6.51	84	0.98	0.00	100.00	0.00	100.00	9.25	69.17	23.50
7	-76	6.53	98	0.79	0.00	100.00	0.00	100.00	9.08	69.73	21.30
8	-83	6.48	112	0.69	0.00	100.00	0.00	100.00	9.34	68.87	20.50
9	-53	6.47	126	0.41	0.00	100.00	0.00	100.00	8.23	72.57	20.80
10	-28	6.49	140	0.25	0.00	100.00	0.00	100.00	6.58	78.07	14.60
11	36	6.52	154	0.17	0.00	100.00	0.00	100.00	5.61	81.30	12.70
12	78	6.48	168	0.11	0.00	100.00	0.00	100.00	5.67	81.10	13.80
13	63	6.47	182	0.08	0.00	100.00	0.00	100.00	5.21	82.63	11.80
14	83	6.45	196	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	5.87	80.43	10.90
15	93	6.45	210	0.06	0.00	100.00	0.00	100.00	5.32	82.27	11.50
16	96	6.47	224	0.06	0.00	100.00	0.00	100.00	5.21	82.63	8.74
17	89	6.45	238	0.05	0.00	100.00	0.00	100.00	5.42	81.93	9.57
18	93	6.47	252	0.05	0.00	100.00	0.00	100.00	4.84	83.87	8.36
19	87	6.48	266	0.03	0.00	100.00	0.00	100.00	4.98	83.40	7.85
20	86	6.47	280	0.03	0.00	100.00	0.00	100.00	5.02	83.27	7.84
21	83	6.43	294	0.03	0.00	100.00	0.00	100.00	4.87	83.77	7.48

ตารางที่ ๑.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มก./ล. ทราเย 16 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 30 mg/L, pH 6 and 16 g sand									
Sample No.	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal
1	6.02	28	5.80	29.87	0.43	29.34	2.20	29.64	1.20
2	6.01	56	5.75	29.68	1.07	29.15	2.83	29.64	1.20
3	6.03	84	5.71	29.94	0.20	28.72	4.27	29.87	0.43
4	6.04	112	5.67	29.84	0.53	28.74	4.20	29.63	1.23
5	6.04	140	5.74	29.65	1.17	29.12	2.93	29.74	0.87
6	6.03	168	5.65	29.84	0.53	28.87	3.77	29.64	1.20
7	6.02	196	5.62	29.36	2.13	28.64	4.53	29.84	0.53
8	6.05	224	5.60	29.51	1.63	28.88	3.73	28.97	3.43
9	6.04	252	5.58	29.74	0.87	28.94	3.53	29.51	1.63
10	6.03	280	5.57	29.65	1.17	28.84	3.87	29.32	2.27
11	6.05	308	5.53	29.35	2.17	28.75	4.17	28.87	3.77
12	6.07	336	5.49	29.84	0.53	28.95	3.50	29.54	1.53
13	6.03	364	5.51	29.75	0.83	28.76	4.13	28.64	4.53
14	6.02	392	5.46	29.65	1.17	28.86	3.80	29.61	1.30
15	6.05	420	5.44	29.48	1.73	28.64	4.53	29.32	2.27
16	6.04	448	5.41	29.67	1.10	29.12	2.93	29.12	2.93
17	6.03	476	5.41	29.48	1.73	28.65	4.50	28.76	4.13
18	6.05	504	5.37	29.35	2.17	28.78	4.07	29.35	2.17
19	6.04	532	5.31	29.45	1.83	28.95	3.50	29.45	1.83
20	6.03	560	5.32	29.71	0.97	28.76	4.13	29.32	2.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช

ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่มีต่อการกำจัด
เฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลด้วยผงตะไบเหล็กแบบคอลัมน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและ
 นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ
 ททราย 8 กรัม/ 8 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 10 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
1	-115	6.45	14	5.12	0.00	100.00	0.00	100.00	6.23	37.70	42.15
2	-124	6.48	28	4.61	0.00	100.00	0.00	100.00	5.30	47.00	41.50
3	-124	6.59	42	4.45	0.00	100.00	0.00	100.00	4.89	51.10	39.26
4	-123	6.50	56	4.32	0.00	100.00	0.00	100.00	4.50	55.00	38.50
5	-113	6.30	70	3.60	0.00	100.00	0.00	100.00	4.16	58.40	35.50
6	-110	6.78	84	3.59	0.00	100.00	0.00	100.00	4.12	58.80	37.00
7	-109	6.45	98	3.57	0.00	100.00	0.00	100.00	4.08	59.20	35.26
8	-108	6.23	112	3.54	0.00	100.00	0.00	100.00	3.89	61.10	30.90
9	-111	6.45	126	3.34	0.00	100.00	0.00	100.00	3.89	61.10	31.26
10	-121	6.45	140	3.26	0.00	100.00	0.00	100.00	3.67	63.30	29.35
11	-113	6.31	154	3.22	0.00	100.00	0.00	100.00	3.95	60.50	26.80
12	-112	6.53	168	3.15	0.00	100.00	0.00	100.00	3.84	61.60	24.56
13	-116	6.24	182	2.79	0.00	100.00	0.00	100.00	3.76	62.40	23.89
14	-111	6.34	196	2.76	0.00	100.00	0.00	100.00	4.00	60.00	23.90
15	-108	6.89	210	2.68	0.00	100.00	0.00	100.00	4.09	59.10	24.56
16	-109	6.23	224	2.61	0.00	100.00	0.00	100.00	3.87	61.30	26.59
17	-114	6.53	238	2.56	0.00	100.00	0.00	100.00	3.71	62.90	23.89
18	-106	6.40	252	2.50	0.00	100.00	0.00	100.00	3.60	64.00	23.50
19	-108	6.45	266	1.86	0.00	100.00	0.00	100.00	3.49	65.10	22.58
20	-107	6.45	280	1.67	0.00	100.00	0.00	100.00	3.45	65.50	21.90
21	-89	6.57	294	1.59	0.00	100.00	0.00	100.00	3.38	66.20	19.45
22	-97	6.34	308	1.53	0.00	100.00	0.00	100.00	3.27	67.30	18.26
23	-98	6.52	322	1.48	0.00	100.00	0.00	100.00	3.21	67.90	17.20
24	-99	6.51	336	1.46	0.00	100.00	0.00	100.00	3.45	65.50	16.59
25	-102	6.48	350	1.47	0.00	100.00	0.00	100.00	3.58	64.20	17.59
26	-103	6.40	364	1.43	0.00	100.00	0.00	100.00	3.68	63.20	18.70

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 10 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
27	-102	6.42	378	1.39	0.00	100.00	0.00	100.00	3.63	63.70	16.28
28	-112	6.46	392	1.35	0.00	100.00	0.00	100.00	3.54	64.60	17.59
29	-107	6.42	406	1.32	0.00	100.00	0.00	100.00	3.60	64.00	12.60
30	-98	6.31	420	1.29	0.00	100.00	0.00	100.00	3.45	65.50	13.26
31	-102	6.58	434	1.27	0.00	100.00	0.00	100.00	3.38	66.20	12.59
32	-86	6.36	448	1.24	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	11.94
33	-94	6.42	462	1.208	0.00	100.00	0.00	100.00	3.17	68.30	11.20
34	-87	6.21	476	1.16	0.00	100.00	0.00	100.00	3.28	67.20	11.12
35	-96	6.35	490	0.98	0.00	100.00	0.00	100.00	3.19	68.10	11.26
36	-92	6.45	504	0.909	0.00	100.00	0.00	100.00	3.3	67.00	11.00
37	-94	6.36	518	0.83	0.00	100.00	0.00	100.00	3.29	67.10	9.86
38	-83	6.24	532	0.76	0.00	100.00	0.00	100.00	3.19	68.10	9.45
39	-92	6.36	546	0.75	0.00	100.00	0.00	100.00	3.24	67.60	9.87
40	-86	6.45	560	0.658	0.00	100.00	0.00	100.00	3.34	66.60	9.30
41	-96	6.47	574	0.68	0.00	100.00	0.00	100.00	3.68	63.20	9.78
42	-84	6.36	588	0.59	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	9.56
43	-92	6.45	602	0.58	0.00	100.00	0.00	100.00	3.18	68.20	9.23
44	-93	6.46	616	0.583	0.00	100.00	0.00	100.00	3.5	65.00	9.10
45	-75	6.39	630	0.46	0.00	100.00	0.00	100.00	3.38	66.20	9.84
46	-62	6.45	644	0.332	0.00	100.00	0.00	100.00	3.21	67.90	10.10
47	-45	6.48	658	0.32	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	9.65
48	-32	6.44	672	0.326	0.00	100.00	0.00	100.00	3.1	69.00	9.90
49	-26	6.54	686	0.33	0.00	100.00	0.00	100.00	3.14	68.60	9.56
50	-38	6.43	700	0.34	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	9.26
51	-12	6.36	714	0.32	0.00	100.00	0.00	100.00	3.31	66.90	9.87
52	-26	6.48	728	0.312	0.00	100.00	0.00	100.00	3.4	66.00	10.00
53	-18	6.36	742	0.29	0.00	100.00	0.00	100.00	3.29	67.10	9.56
54	-13	6.45	756	0.298	0.00	100.00	0.00	100.00	3.2	68.00	8.80
55	-26	6.36	770	0.29	0.00	100.00	0.00	100.00	3.46	65.40	8.23
56	-23	6.42	784	0.28	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	8.87

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 10 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
57	-29	6.47	798	0.281	0.00	100.00	0.00	100.00	3.6	64.00	9.30
58	12	6.34	812	0.3	0.00	100.00	0.00	100.00	3.67	63.30	9.36
59	26	6.52	826	0.029	0.00	100.00	0.00	100.00	3.56	64.40	11.23
60	34	6.33	840	0.294	0.00	100.00	0.00	100.00	3.7	63.00	13.00
61	36	6.45	854	0.28	0.00	100.00	0.00	100.00	3.46	65.40	12.38
62	49	6.38	868	0.29	0.00	100.00	0.00	100.00	3.35	66.50	11.25
63	89	6.25	882	0.276	0.00	100.00	0.00	100.00	3.31	66.90	10.00
64	96	6.36	896	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	9.26
65	102	6.53	910	0.27	0.00	100.00	0.00	100.00	3.17	68.30	9.84
66	112	6.42	924	0.246	0.00	100.00	0.00	100.00	3.14	68.60	10.00
67	89	6.47	938	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	3.08	69.20	11.23
68	98	6.36	952	0.221	0.00	100.00	0.00	100.00	3.01	69.90	12.00
69	87	6.39	966	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	3.12	68.80	11.25
70	101	6.45	980	0.19	0.00	100.00	0.00	100.00	3.15	68.50	10.56
71	93	6.39	994	0.168	0.00	100.00	0.00	100.00	3.24	67.60	10.00
72	98	6.48	1008	0.16	0.00	100.00	0.00	100.00	3.21	67.90	9.85
73	99	6.47	1022	0.15	0.00	100.00	0.00	100.00	3.18	68.20	9.32
74	102	6.41	1036	0.153	0.00	100.00	0.00	100.00	3.13	68.70	9.00
75	112	6.39	1050	0.14	0.00	100.00	0.00	100.00	3.26	67.40	8.56
76	109	6.21	1064	0.15	0.00	100.00	0.00	100.00	3.28	67.20	8.45
77	113	6.38	1078	0.1335	0.00	100.00	0.00	100.00	3.31	66.90	8.00
78	102	6.39	1092	0.13	0.00	100.00	0.00	100.00	3.64	63.60	7.59
79	103	6.53	1106	0.117	0.00	100.00	0.00	100.00	3.7	63.00	7.00
80	103	6.48	1120	0.11	0.00	100.00	0.00	100.00	3.42	65.80	7.24
81	94	6.51	1134	0.0985	0.00	100.00	0.00	100.00	3.3	67.00	7.30
82	98	6.43	1148	0.09	0.00	100.00	0.00	100.00	3.15	68.50	7.14
83	93	6.36	1162	0.09	0.00	100.00	0.00	100.00	3.1	69.00	7.00
84	103	6.47	1176	0.075	0.00	100.00	0.00	100.00	3.5	65.00	6.20

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและ
 นิกเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กและ
 ททราย 8 กรัม/ 8 กรัม พีเอช 6

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 20 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
1	-116	6.52	14	4.97	0.00	100.00	0.00	100.00	14.36	28.20	48.59
2	-113	6.45	28	4.42	0.00	100.00	0.00	100.00	13.50	32.50	44.50
3	-119	6.35	42	4.36	0.00	100.00	0.00	100.00	12.36	38.20	38.26
4	-126	6.30	56	4.03	0.00	100.00	0.00	100.00	11.30	43.50	39.60
5	-117	6.30	70	3.17	0.00	100.00	0.00	100.00	9.84	50.80	37.20
6	-105	6.25	84	3.08	0.00	100.00	0.00	100.00	9.23	53.85	35.64
7	-97	6.40	98	3.01	0.00	100.00	0.00	100.00	9.35	53.25	31.50
8	-93	6.38	112	2.89	0.00	100.00	0.00	100.00	10.23	48.85	31.59
9	-97	6.25	126	2.94	0.00	100.00	0.00	100.00	9.65	51.75	33.36
10	-108	6.31	140	2.74	0.00	100.00	0.00	100.00	9.65	51.75	32.50
11	-98	6.39	154	2.65	0.00	100.00	0.00	100.00	9.78	51.10	29.36
12	-102	6.67	168	2.53	0.00	100.00	0.00	100.00	9.35	53.25	27.65
13	-103	6.26	182	2.42	0.00	100.00	0.00	100.00	10.75	46.25	26.50
14	-112	6.32	196	2.37	0.00	100.00	0.00	100.00	10.23	48.85	27.36
15	-98	6.48	210	2.23	0.00	100.00	0.00	100.00	9.56	52.20	23.56
16	-101	6.46	224	2.19	0.00	100.00	0.00	100.00	10.90	45.50	24.60
17	-108	6.38	238	2.09	0.00	100.00	0.00	100.00	10.56	47.20	24.65
18	-98	6.49	252	1.65	0.00	100.00	0.00	100.00	11.12	44.40	23.89
19	-93	6.47	266	1.43	0.00	100.00	0.00	100.00	11.00	45.00	23.40
20	-92	6.36	280	1.34	0.00	100.00	0.00	100.00	11.20	44.00	19.50
21	-89	6.23	294	1.31	0.00	100.00	0.00	100.00	11.56	42.20	20.36
22	-103	6.78	308	1.30	0.00	100.00	0.00	100.00	12.36	38.20	21.25
23	-97	6.42	322	1.29	0.00	100.00	0.00	100.00	11.50	42.50	21.50
24	-78	6.42	336	1.18	0.00	100.00	0.00	100.00	9.26	53.70	18.35
25	-89	6.44	350	1.12	0.00	100.00	0.00	100.00	8.90	55.50	16.50
26	-86	6.43	364	1.08	0.00	100.00	0.00	100.00	8.63	56.85	15.68
27	-97	6.57	378	1.03	0.00	100.00	0.00	100.00	8.45	57.75	13.89
28	-93	6.34	392	0.97	0.00	100.00	0.00	100.00	8.87	55.65	13.26
29	-92	6.30	406	0.97	0.00	100.00	0.00	100.00	9.10	54.50	12.30
30	-86	6.25	420	0.84	0.00	100.00	0.00	100.00	9.23	53.85	12.98
31	-89	6.38	434	0.81	0.00	100.00	0.00	100.00	8.76	56.20	13.25
32	-84	6.32	448	0.74	0.00	100.00	0.00	100.00	8.60	57.00	13.80
33	-86	6.23	462	0.68	0.00	100.00	0.00	100.00	8.26	58.70	12.36
34	-76	6.48	476	0.59	0.00	100.00	0.00	100.00	8.49	57.55	12.78

Each Initial Hexavalent Chromium and Nickel Concentration 20 mg/L, pH 6 and 8 g Iron Filings mixed with 8 g sands											
Sample No.	ORP	pH	Bed Volume (BV)	Flow (Litre/Day)	[Cr(VI)] (mg/L)	% Cr (VI) Removal	[Total Cr] (mg/L)	%TotalCr Removal	[Ni] (mg/L)	% Ni Removal	[Total Fe] (mg/L)
35	-87	6.35	490	0.54	0.00	100.00	0.00	100.00	8.78	56.10	11.50
36	-83	6.39	504	0.53	0.00	100.00	0.00	100.00	9.12	54.40	10.56
37	-72	6.37	518	0.51	0.00	100.00	0.00	100.00	9.06	54.70	10.23
38	-83	6.38	532	0.49	0.00	100.00	0.00	100.00	9.25	53.75	9.95
39	-76	6.29	546	0.36	0.00	100.00	0.00	100.00	9.85	50.75	10.45
40	-63	6.31	560	0.30	0.00	100.00	0.00	100.00	9.95	50.25	10.80
41	-59	6.43	574	0.27	0.00	100.00	0.00	100.00	9.75	51.25	10.26
42	-52	6.34	588	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	9.60	52.00	9.60
43	-23	6.47	602	0.29	0.00	100.00	0.00	100.00	9.38	53.10	9.45
44	13	6.31	616	0.27	0.00	100.00	0.00	100.00	9.31	53.45	9.31
45	19	6.35	630	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	9.28	53.60	9.43
46	28	6.28	644	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	9.20	54.00	9.56
47	28	6.14	658	0.26	0.00	100.00	0.00	100.00	9.85	50.75	9.12
48	24	6.38	672	0.25	0.00	100.00	0.00	100.00	9.23	53.85	9.26
49	32	6.30	686	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	9.12	54.40	9.12
50	59	6.34	700	0.25	0.00	100.00	0.00	100.00	8.26	58.70	8.75
51	93	6.36	714	0.25	0.00	100.00	0.00	100.00	8.10	59.50	8.10
52	97	6.41	728	0.24	0.00	100.00	0.00	100.00	7.84	60.80	7.56
53	102	6.45	742	0.23	0.00	100.00	0.00	100.00	6.45	67.75	7.80
54	95	6.39	756	0.21	0.00	100.00	0.00	100.00	6.24	68.80	7.23
55	93	6.54	770	0.19	0.00	100.00	0.00	100.00	5.80	71.00	6.58
56	96	6.34	784	0.19	0.00	100.00	0.00	100.00	5.45	72.75	6.89
57	97	6.48	798	0.18	0.00	100.00	0.00	100.00	5.26	73.70	7.21
58	96	6.45	812	0.14	0.00	100.00	0.00	100.00	4.67	76.65	6.45
59	106	6.44	826	0.12	0.00	100.00	0.00	100.00	4.36	78.20	6.58
61	103	6.54	840	0.12	0.00	100.00	0.00	100.00	4.32	78.40	5.98
62	95	6.23	854	0.11	0.00	100.00	0.00	100.00	4.12	79.40	5.67
63	102	6.51	868	0.10	0.00	100.00	0.00	100.00	4.25	78.75	5.58
64	108	6.58	882	0.11	0.00	100.00	0.00	100.00	4.26	78.70	6.12
65	113	6.38	896	0.10	0.00	100.00	0.00	100.00	4.67	76.65	6.25
66	98	6.46	910	0.09	0.00	100.00	0.00	100.00	4.35	78.25	7.50
67	86	6.34	924	0.10	0.00	100.00	0.00	100.00	4.57	77.15	6.78
68	93	6.57	938	0.08	0.00	100.00	0.00	100.00	4.78	76.10	6.35
69	96	6.44	952	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	4.56	77.20	4.56
70	103	6.49	966	0.08	0.00	100.00	0.00	100.00	3.97	80.15	4.39
71	106	6.54	980	0.07	0.00	100.00	0.00	100.00	3.89	80.55	4.60

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒิชัย ทิวพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย