

การกำจัดเสกชะวาเลนทีโครเมียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์
ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์

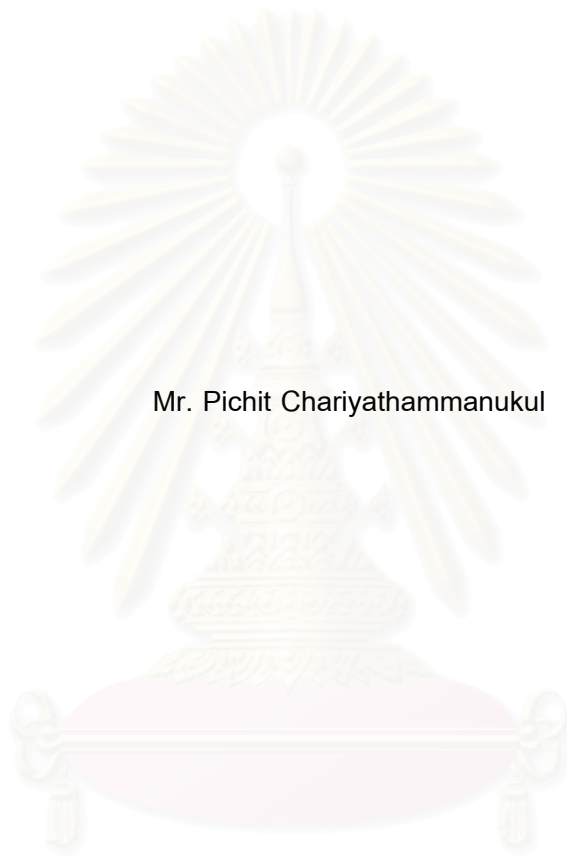


นายพิชิต จริยธรรมานุกูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-030-426-5
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM IN SYNTHETIC GROUNDWATER
USING ZERO OXIDATION STATE IRON



Mr. Pichit Chariyathammanukul

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

Acedemic Year 2001

ISBN 974-030-426-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโคโรเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสภาวะ
ออกซิเดชันศูนย์
โดย นายพิชิต จริยธรรมานุกูล
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เชาวกิจเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

พิชิต จริยธรรมานุกูล : การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็ก
 สภาวะออกซิเดชันศูนย์ (REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM IN SYNTHETIC
 GROUNDWATER USING ZERO OXIDATION STATE IRON) อาจารย์ที่ปรึกษา:
 อาจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร, 150 หน้า. ISBN 974-030-426-5.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ค่าพีเอช และปริมาณผง
 ตะไบเหล็ก ต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะศูนย์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ ซึ่ง
 แปรค่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4,
 5, 6, 7 และปริมาณของผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5, และ 10 กรัม/ลิตร

ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้นแล้ว อัตราการกำจัดเริ่มต้น
 และเวลาในการกำจัดจะเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะลดลง ถ้าลดค่าพีเอชแล้ว อัตราการ
 กำจัดเริ่มต้นและความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น เวลาในการกำจัดจะลดลง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ
 ผงตะไบเหล็กแล้วอัตราการกำจัดเริ่มต้นและความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น เวลาในการกำจัด
 จะลดลง ประสิทธิภาพกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ในขอบเขตที่
 ศึกษา ยกเว้นประสิทธิภาพกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ค่าพีเอช 7 เป็น 31.48 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพ
 กำจัดโครเมียมทั้งหมดที่พีเอช 4 เป็น 45.12 เปอร์เซ็นต์ และที่ค่าพีเอช 7 เป็น 28.94 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากที่ค่า
 พีเอชต่ำปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ดี ความสามารถในการละลายของไตรวาเลนที
 โครเมียมสูง ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจึงลดลงเนื่องจากไตรวาเลนทีโครเมียมส่วนที่ไม่ถูกกำจัด สภาวะที่
 เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ในขอบเขตของการวิจัยนี้คือ
 ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม ค่าพีเอช 6 และปริมาณผงตะไบเหล็ก 1
 กรัม/ลิตร

สมการคินเนติกของปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ที่ได้
 เป็นดังนี้

$$-d[Cr(VI)] / dt = k[Cr(VI)]^{1.11}[H^+]^{0.35}\{Fe^0\}^{0.81}; k = 1.55 (mgCr/L)^{-0.11} M^{-0.35} (g/L)^{-0.81}$$

สมการนี้เหมาะสำหรับการหาอัตราการกำจัดเริ่มต้น เพื่อดูว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2544.....

4270457021: MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD: Hexavalent Chromium/ Chromate/ Zero Oxidation State Iron/ Zero Valent Iron

PICHIT CHARİYATHAMMANUKUL: REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM IN SYNTHETIC
GROUNDWATER USING ZERO OXIDATION STATE IRON

THESIS ADVISOR: SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 150 pp. ISBN 974-030-426-5

The objective of this research was to investigate the effects of Hexavalent Chromium concentration, pH, and Iron Filing quantity on the efficiency of Zero Oxidation State Iron in the remediation of Hexavalent Chromium. The concentration varies at 10, 15, 20, 25 and 30 mgCr/L. The value of pH varies at 4, 5, 6 and 7. The quantity of Iron Filing varies at 1, 2, 5 and 10 g/L

The results show that when the initial concentration of Hexavalent Chromium increases, the initial removal rate and removal period increase, while Total Dissolved Iron concentration decreases. When the value of pH decreases, the initial removal rate and Total Dissolved Iron concentration increase, while the removal period decreases. When the quantity of Iron Filing increases, the initial removal rate and Total Dissolved Iron concentration increase, while the removal period decreases. The efficiency of Hexavalent Chromium removal and Total Chromium removal are 100 % at the extent of the study except that the Hexavalent Chromium removal efficiency at pH 7 is 31.48 %, the Total Chromium removal efficiency at pH 4 is 45.12 %, and at pH 7 is 28.94 %. At lower pH, the reduction rate of Hexavalent Chromium was increase and the solubility of Trivalent Chromium was also higher. This means that Total Chromium removal was decrease due to soluble Trivalent Chromium. The optimal condition in this research is 30 mg Cr/L pH 6 and 1 g Iron Filing/L.

Kinetic Equation of Hexavalent Chromium reduction using Zero Oxidation State Iron is

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = k[\text{Cr(VI)}]^{1.11} [\text{H}^+]^{0.35} \{\text{Fe}^{0}\}^{0.81}; k = 1.55 (\text{mgCr/L})^{-0.11} \text{M}^{-0.35} (\text{g/L})^{-0.81}.$$

This equation is suitable for initial removal rate calculating that used to verify the reaction.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Engineering

Student's signature

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature

Acedemic Year 2001

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอดเวลา และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล และอาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนสำหรับเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ รวมทั้งครูปฏิบัติกรและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และอาจารย์ทุกท่าน ซึ่งสนับสนุนและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โครเมียม	3
2.1.1 ไตรวาเลนต์โครเมียม	3
2.1.2 เฮกซะวาเลนต์โครเมียม	5
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมกับไตรวาเลนต์โครเมียม	6
2.1.4 สารละลายของแข็งโครเมียม(III) – เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์	6
2.2 กรรมวิธีการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม	7
2.3 เหล็ก	7
2.3.1 คุณสมบัติทางเคมี	7
2.4 เซลล์กักต่อน้ำไฟฟ้าเคมี	8
2.5 การบำบัดโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์	13
2.6 น้ำใต้ดิน	16
2.7 เอกสารอ้างอิงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 การเตรียมผงตะไบเหล็ก	22
3.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	22
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	24
3.3 การเตรียมน้ำเลี้ยงสังเคราะห์โครเมียม	24
3.4 การดำเนินการทดลอง	26
3.4.1 การศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจน และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	26
3.4.2 การศึกษาสมมูลมวลของโครเมียม	26
3.4.3 การศึกษาของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	27
3.4.4 ศึกษาผลของค่าพีเอช	27
3.4.5 ศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก	28
3.5 วิธีการวิเคราะห์	28
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	32
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของ ผงตะไบเหล็ก	32
4.2 ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจน และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	38
4.3 ผลการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียม	38
4.4 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	43
4.5 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช	51
4.6 ผลของการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก	57
4.7 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์	63
4.8 ผลการศึกษาสมการคิเนติก (Kinetic Equation) ของปฏิกิริยาการ กำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	82
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. กราฟมาตรฐานของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. รูปแบบการแสดงผลข้อมูลผลการทดลอง	94
ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาระหว่างผลการทดลองที่เติมกำมะถันในโตรเจน และไม่เติมกำมะถันในโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	97
ภาคผนวก ง. ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	102
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช	123
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก	130
ภาคผนวก ช. ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD	146
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	150



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย 2
ตารางที่ 2.1	ผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพของน้ำใต้ดินบริเวณสถานฝังกลบ ขยะ (Landfill) ลาดกระบัง ในเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2539 17
ตารางที่ 2.2	ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ย ของคุณภาพน้ำบ่อต้นและน้ำบาดาลใน พื้นที่ศึกษาบริเวณที่อยู่เหนือกองขยะและใต้กองขยะในทิศทางการไหล ของน้ำใต้ดิน 18
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และโครเมียม ทั้งหมดของสภาวะที่เติมก๊าซไนโตรเจน และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำ ใต้ดินสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร 40
ตารางที่ 4.2	ข้อมูลค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ[Cr(III)] ของการศึกษาสมมูลมวล เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม โครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร 42
ตารางที่ 4.3	ข้อมูลอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความ เข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร 65
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความ เข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร 67
ตารางที่ 4.5	ข้อมูลอัตราการกำจัด เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความ เข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร 69
ตารางที่ 4.6	ข้อมูลค่า k ที่สภาวะต่างๆในขอบเขตของการวิจัย 72
ตารางที่ 4.7	อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น จากการคำนวณ ด้วยสมการคิเนติก 79
ตารางที่ 4.8	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม เริ่มต้นเมื่อลดค่าพีเอชจาก 6 เป็น 5 79

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.9	
เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	
เริ่มต้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมขึ้น 1 เท่า	79
ตารางที่ 4.10	
เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม	
เริ่มต้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กขึ้น 1 เท่า	80



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนท์โครเมียม	4
รูปที่ 2.2	การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางช่องว่างของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็ก	11
รูปที่ 2.3	การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางสารประกอบของเหล็ก.....	11
รูปที่ 2.4	การถ่ายเทอิเล็กตรอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์บนผิวเหล็ก.....	12
รูปที่ 2.5	เซลล์กัลดกร่อนไฟฟ้าเคมีของผงตะไบเหล็ก	15
รูปที่ 2.6	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM	21
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงแผนการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย	23
รูปที่ 3.2	หลอดเขย่าขนาด 50 มิลลิลิตร	25
รูปที่ 3.3	แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม	30
รูปที่ 3.4	แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาค่าพีเอช	30
รูปที่ 3.5	แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาค่าผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก	31
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะทางกายภาพของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลอง.....	33
รูปที่ 4.2	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 750 เท่า	34
รูปที่ 4.3	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 750 เท่า	34
รูปที่ 4.4	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 3500 เท่า	35
รูปที่ 4.5	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 3500 เท่า	35
รูปที่ 4.6	แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 7500 เท่า	36

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กภายใต้การทดลองด้วยเครื่อง XRD เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร.....	37
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	39
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์	39
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดของสภาวะที่เติมก๊าซไนโตรเจน และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	41
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	44
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	44
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร.....	45
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	45

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	46
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	46
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	48
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	48
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	49
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	49
รูปที่ 4.21	กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	50
รูปที่ 4.22	กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	50
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	52

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	52
รูปที่ 4.25	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้น ของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	54
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	54
รูปที่ 4.27	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้น ของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	55
รูปที่ 4.28	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	55
รูปที่ 4.29	กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม โครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	56
รูปที่ 4.30	กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	56
รูปที่ 4.31	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้น ของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร	58
รูปที่ 4.32	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของ เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร	58

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร	60
รูปที่ 4.34	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร	60
รูปที่ 4.35	กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร	61
รูปที่ 4.36	กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร	61
รูปที่ 4.37	กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัด เฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร	62
รูปที่ 4.38	กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร	62
รูปที่ 4.39	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([Cr(VI)]_{initial})$ กับ $\log(-r_{initial})$ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่า พีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	66
รูปที่ 4.40	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([H^+]_{initial})$ กับ $\log(-r_{initial})$ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร	68
รูปที่ 4.41	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([Fe^0]_{initial})$ กับ $\log(-r_{initial})$ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร	70

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร 77
- รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร78



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครเมียมเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมการชุบโลหะ อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น การกำจัดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสมและการรั่วไหลของโครเมียมเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของโครเมียมในดินและแหล่งน้ำใต้ดิน เทคโนโลยีสำหรับการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในปัจจุบันส่วนใหญ่อาศัยวิธีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาเพื่อบำบัด (Pump and Treat) เนื่องจากเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ปนเปื้อนในธรรมชาติบางส่วนจะถูกดูดติดอยู่ที่แร่ดิน (Soil Mineral) จึงเป็นสาเหตุสำคัญของการลดประสิทธิภาพของวิธีการนี้ทำให้ไม่สามารถบรรลุเป้าหมายของการบำบัดได้ นอกจากนี้การบำบัดด้วยวิธีการดังกล่าวจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและจะต้องจัดการกับกากของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นด้วยทางเลือกหนึ่งสำหรับการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนเฮกซะวาเลนต์โครเมียมแทนวิธีการบำบัดด้วยการเติมสารเคมีคือ ใช้เพอมีเอเบิลรีแอคทีฟแบร์ริเออร์ (Permeable Reactive Barrier) ติดตั้งในทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน

เฮกซะวาเลนต์โครเมียมถูกกำจัดออกจากน้ำเสียโดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันและตามด้วยกระบวนการตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) หรือสารละลายของแ่งโครเมียม (III)-เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) เมื่อระบบมีไอออนของเหล็ก สารละลายของแ่งที่ได้นี้เป็นตะกอนที่มีเสถียรภาพสูงและมีผลให้ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือน้อยกว่า 10^{-6} โมล/ลิตร ดังนั้นเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Oxidation State Iron) จึงเป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อมเพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ที่แข็งแรงไม่เป็นพิษ ราคาถูก และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถเกิดเป็นสารละลายของแ่งร่วมกับโครเมียมไฮดรอกไซด์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์

2.ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ค่าพีเอช และปริมาณเหล็ก ต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ค่าพีเอช และปริมาณผงตะไบเหล็ก (Iron Filing) ต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะออกซิเดชันสูงในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันสูง โดยในการทดลองใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 75 ถึง 150 ไมโครเมตร และใช้โซเดียมโครเมต (Na_2CrO_4) เตรียมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และใช้โซเดียมอะซิเตรท (CH_3COONa) 0.1 โมล/ลิตร เป็นบัฟเฟอร์ และอุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการศึกษาเป็นดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย

พารามิเตอร์	ขอบเขตของการศึกษา
ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร)	10, 15, 20, 25, 30
ผงตะไบเหล็ก (กรัม/ลิตร)	1, 2, 5, 10
พีเอช	4, 5, 6, 7

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.สามารถที่จะนำเศษเหล็กมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียแทนวิธีการบำบัดด้วยการเติมสารเคมี

2.สามารถที่จะนำผลการศึกษาไปเป็นแนวทางในการใช้เหล็กสภาวะออกซิเดชันสูงบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียในรูปแบบต่างๆ เช่น คอลัมน์ ฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 โครเมียม (Chromium)

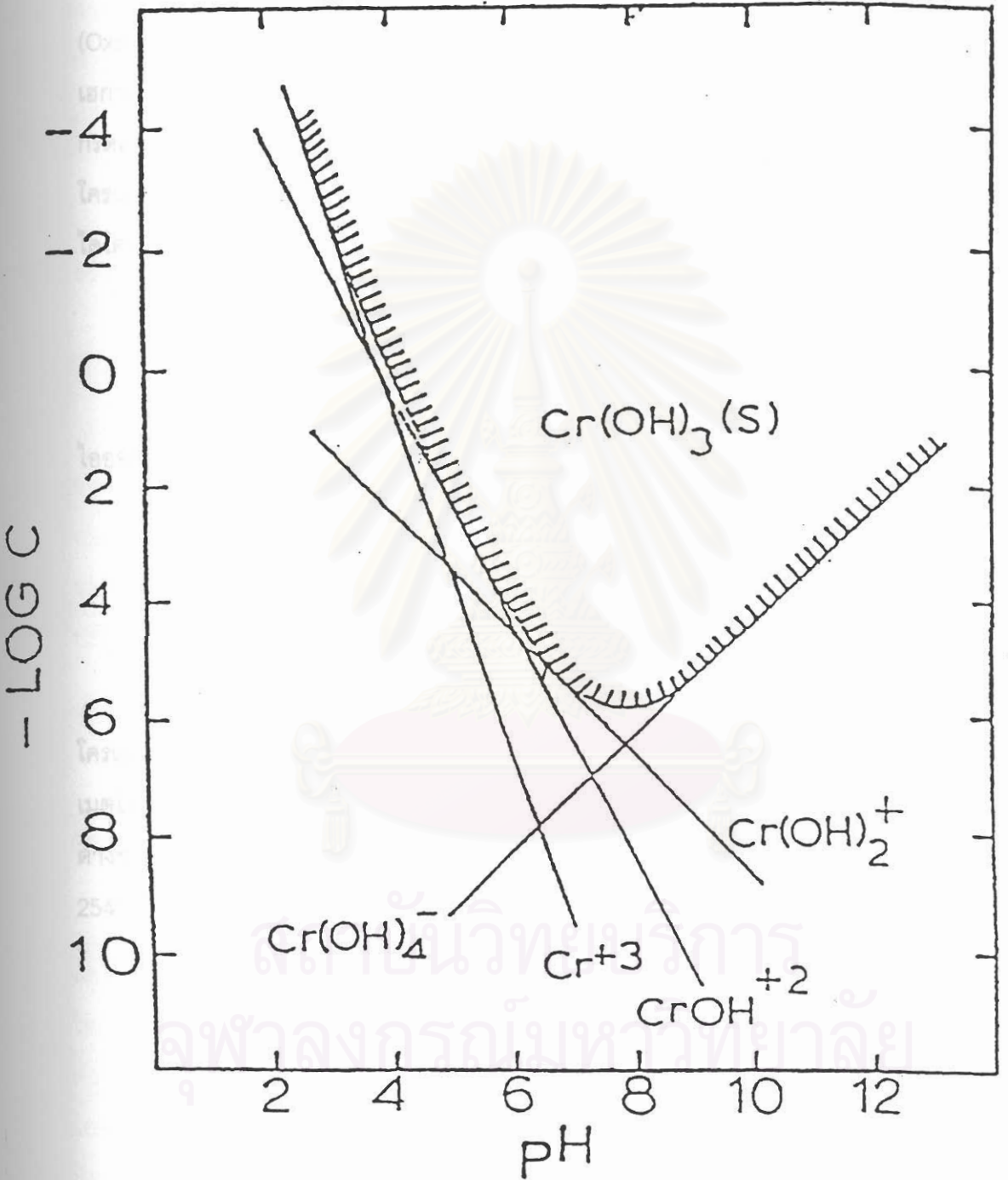
โครเมียมมีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ตั้งแต่ 0 ถึง +6 มีเพียงโครเมียมสถานะออกซิเดชันศูนย์เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุ สารประกอบของโครเมียมที่พบในธรรมชาติมักปรากฏในรูปที่มีสถานะเลขออกซิเดชัน +3 และ +6 คือ ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium) ตามลำดับ (Charoensrisomchit, 1998) โดยภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะมีเสถียรภาพและคงอยู่ได้นาน แต่ในสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมซึ่งมีเสถียรภาพมากที่สุด (อริชัย, 2539)

2.1.1 ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent Chromium)

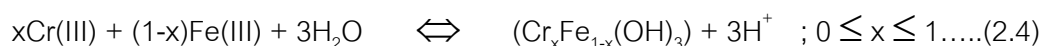
ไตรวาเลนต์โครเมียมปรากฏอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (Aqueous Solution) ในรูปของไฮเดรตไอออน (Hydrated Ion) คือ $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.2



ดังนั้นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จำนวน 3 ไอออนจะทำให้ $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ กลายเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่มีความสามารถในการละลายต่ำ (Quagliano, 1963) และเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 10.5 (Rai และ Zachara, 1986) ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียมขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรวาเลนต์โครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Kim, 1976) นอกจากนี้สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมยังสามารถปรากฏในรูปสารละลายของแข็ง (Solid Solution) โครเมียม(III)-เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) (Eary และ Rai, 1988) ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.1 ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียม (Kim, 1976)



2.1.2 เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium)

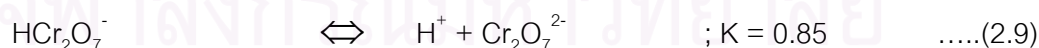
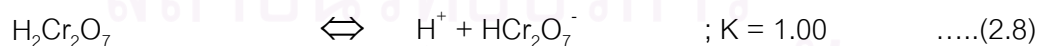
เฮกซะวาเลนต์โครเมียมส่วนใหญ่เกือบทั้งหมดเกิดเป็นสารประกอบร่วมกับออกซิเจน (Oxospecies) คือ โครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) และไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (Reger, 1997) โดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีแนวโน้มที่จะปรากฏเป็นไดโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกรด และความเข้มข้นของโครเมียมมากกว่า 10 มิลลิโมล/ลิตร (Khaodhjar, 1997) และปรากฏเป็นโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือด่าง สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออนและโครเมตไอออนเป็นดังสมการที่ 2.5



สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน ไบโครเมตไอออน และโครเมตไอออนเป็นดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7 (Quagliano, 1963)



ภายใต้สภาวะที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม จะอยู่ในรูปไบโครเมตไอออน แต่เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมตไอออน (Khaodhjar, 1997) สมการเคมีแสดงการแตกตัวให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมไอออนต่างๆ เมื่อสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมละลายน้ำดังสมการที่ 2.8 ถึง 2.11 (จินตนา, 2541)

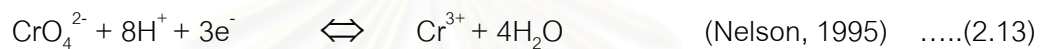


2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและไตรวาเลนต์โครเมียม

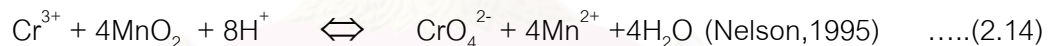
สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมโดยตัวให้อิเลคตรอนเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าพีเอช ปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นดังสมการที่ 2.12 ถึง 2.13



หรือ



สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Reoxidation Reaction) ได้ ตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญได้แก่สารประกอบออกไซด์ของแมงกานีส(III,IV)และสารประกอบไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส(III,IV) (Mn(III,IV)(Hydr)oxide) (Buerge และ Hug, 1999) ตัวอย่างเช่น สารประกอบแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ดังสมการที่ 2.14



2.1.4 สารละลายของแข็งโครเมียม(III) - เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์ (Chromium(III) - Iron(III) Hydroxide Solid Solution)

เนื่องจากไตรวาเลนต์โครเมียมไอออน (Cr^{3+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) มีประจุที่เหมือนกัน และมีรัศมีไอออนิก (Ionic Radii) ใกล้เคียงกันคือ 0.63 \AA และ 0.64 \AA ตามลำดับ สารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียมไอออนและเฟอร์ริกไอออนสามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิห้องด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียมไอออนและเฟอร์ริกไอออนสามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) ได้ที่อุณหภูมิห้อง และมีความสามารถในการละลายน้อยกว่าโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) จึงทำให้สารละลายของแข็งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ มีบทบาทสำคัญในการควบคุมความเข้มข้นของ ไตรวาเลนต์โครเมียมในน้ำใต้ดิน

2.2 กรรมวิธีกำจัดเฮกซะวาเลนทโครเมียม (Hexavalent Chromium Removal Method)

กรรมวิธีกำจัดเฮกซะวาเลนทโครเมียม ได้แก่ กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) (Aoki และ Munemori, 1982; Zachara และคณะ, 1987; วิโรจน์, 2538; จิราพร, 2542), กระบวนการรีดักชัน (Reduction) (Eary และ Rai, 1988; Patterson และ Fendorf, 1997; สุรพล, 2524; อนุชิต, 2541), กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) (พุทธิสาร, 2538) และ กระบวนการตกผลึก (Crystallization) (อัญชลี, 2535) เป็นต้น

2.3 เหล็ก (Iron)

2.3.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

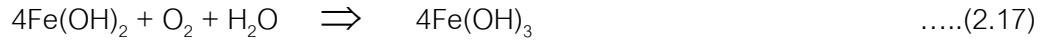
เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Valent Iron) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไปเพื่อทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้นหรือที่เรียกว่าเหล็กกล้า (Steel)

เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจาง เมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542)

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

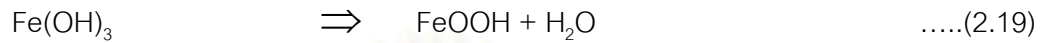
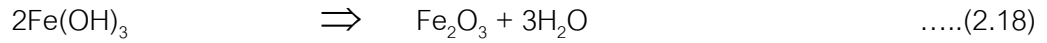


เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็ว และเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังสมการที่ 2.17



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออกดังสมการที่

2.18 ถึง 2.19



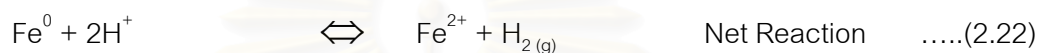
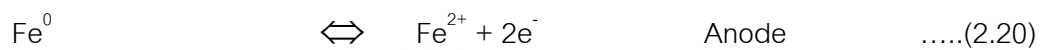
สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Maghemite (Fe_2O_3) นี้เอง จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic Region) ไอออนอื่นๆก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วยดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษดินทรายต่างๆปะปนอยู่ด้วยเสมอ (มันสิน และไพพรรณ, 2527)

2.4 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Cell)

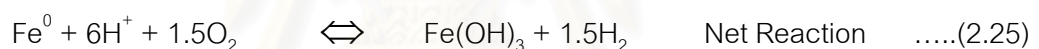
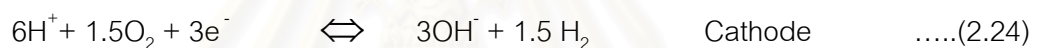
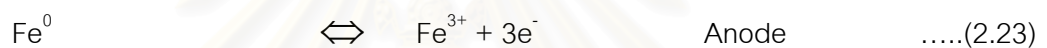
โลหะสภาวะออกซิเดชันศูนย์มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สภาวะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically Stable Form) เช่นเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมาก เมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือกลไกการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ อิเล็กตรอน (e^-) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic Region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (Metal Cation) และอิเล็กตรอนจะถูกรับไปโดยตัวออกซิไดซ์ ที่อีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic Region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า (Powell และคณะ, 1995)

เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมของมัน เช่นเหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปของหนึ่งแร่เหล็กเป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่โอกาสอำนวยให้ สาเหตุการกัดกร่อนโลหะได้แก่น้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด (ไม่ว่าจะมีออกซิเจนละลายหรือไม่ก็ตาม) น้ำมีออกซิเจนละลาย (และมีค่าพีเอชสูงกว่า 7) โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า โลหะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (เนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ) ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอผิวโลหะมีรอยร้าวหรือขรุขระเฉพาะแห่ง และโลหะที่ได้รับความกดดัน เช่นโลหะที่ถูกทำให้ยืด เป็นต้น (มันสิน และไพพรรณ, 2527)

เซลล์กัทกร่อนไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยสองส่วนคือ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน จะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ตัวอย่างของเซลล์กัทกร่อนไฟฟ้าเคมีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วบวก เป็นดังสมการที่ 2.20 ถึง 2.22



และเมื่อมีออกซิเจน เป็นดังสมการที่ 2.23 ถึง 2.25



ปฏิกิริยากัทกร่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ที่ทำให้ค่าพีเอชของระบบกัทกร่อนเพิ่มขึ้น (Powell และคณะ, 1995)

ถึงแม้ว่าหลังจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์แล้วจะมีสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กมาเกาะบนผิวเหล็ก แต่การถ่ายเทอิเล็กตรอนก็ยังสามารถดำเนินต่อไปได้ด้วย 3 กลไก (Sparks และ Grundl, 1998) คือ

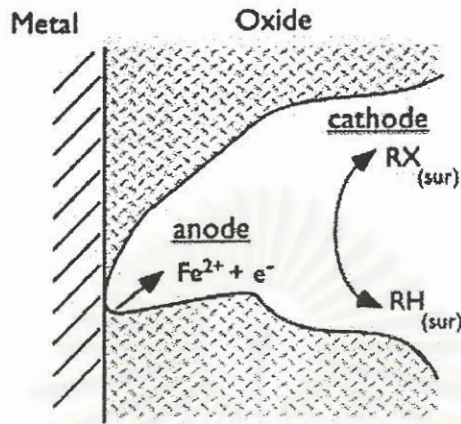
1. การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางช่องว่างของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.2

2. การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็ก โดยอาศัยคุณสมบัติในการเป็น Semiconductor ของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.3

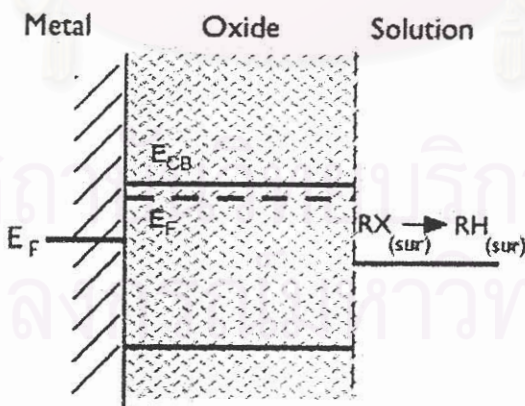
3. การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์บนผิวเหล็กโดยอาศัยคุณสมบัติในการเป็น Coordinating Surface ของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.4



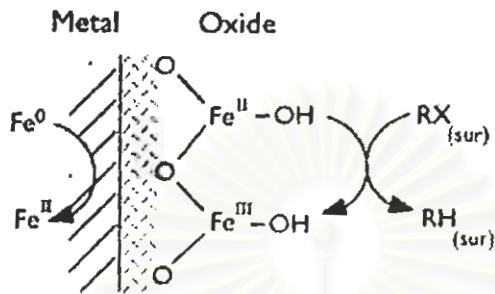
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางช่องว่างของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Sparks และ Grandl, 1998)



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงจากเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์โดยผ่านทางสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Sparks และ Grandl, 1998)



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์บนผิวเหล็ก (Sparks และ Grandl, 1998)

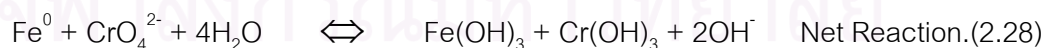
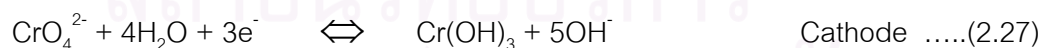
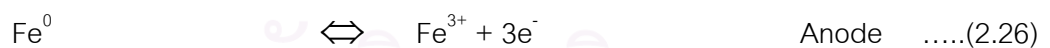
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การบำบัดโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ (Chromium Remediation by Zero Oxidation State Iron)

เหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อม เพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ที่แข็งแรง ไม่เป็นพิษ และราคาถูกนอกจากนี้เหล็กยังมีศักย์รีดักชัน (Reduction Potential) สูงและอัตราการทำปฏิกิริยาถูกจำกัดโดยการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transport) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วยเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วแต่อย่างไรก็ตามเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้ ตัวอย่างของการปนเปื้อนของแหล่งน้ำที่สามารถใช้วิธีการบำบัดด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) (Balko และ Trantyeck, 1998) DDT DDD และDDE (Sayles และคณะ, 1997) สารประกอบไนโตรอะโรมาติก (Nitro Aromatic Compound) (Agrawal และ Trantyeck, 1996) และโครเมียม (Powell และคณะ, 1995)

ในกระบวนการบำบัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน (Electron Donor) สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Instability) ของโลหะทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอกหากมีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสามารถป้องกันการเกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าได้

ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เหล็กจะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กเฟอร์ริก และเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียมซึ่งกลไกของเซลล์กัลวานิกไฟฟ้าเคมีสามารถอธิบายปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 2.26 ถึง 2.28

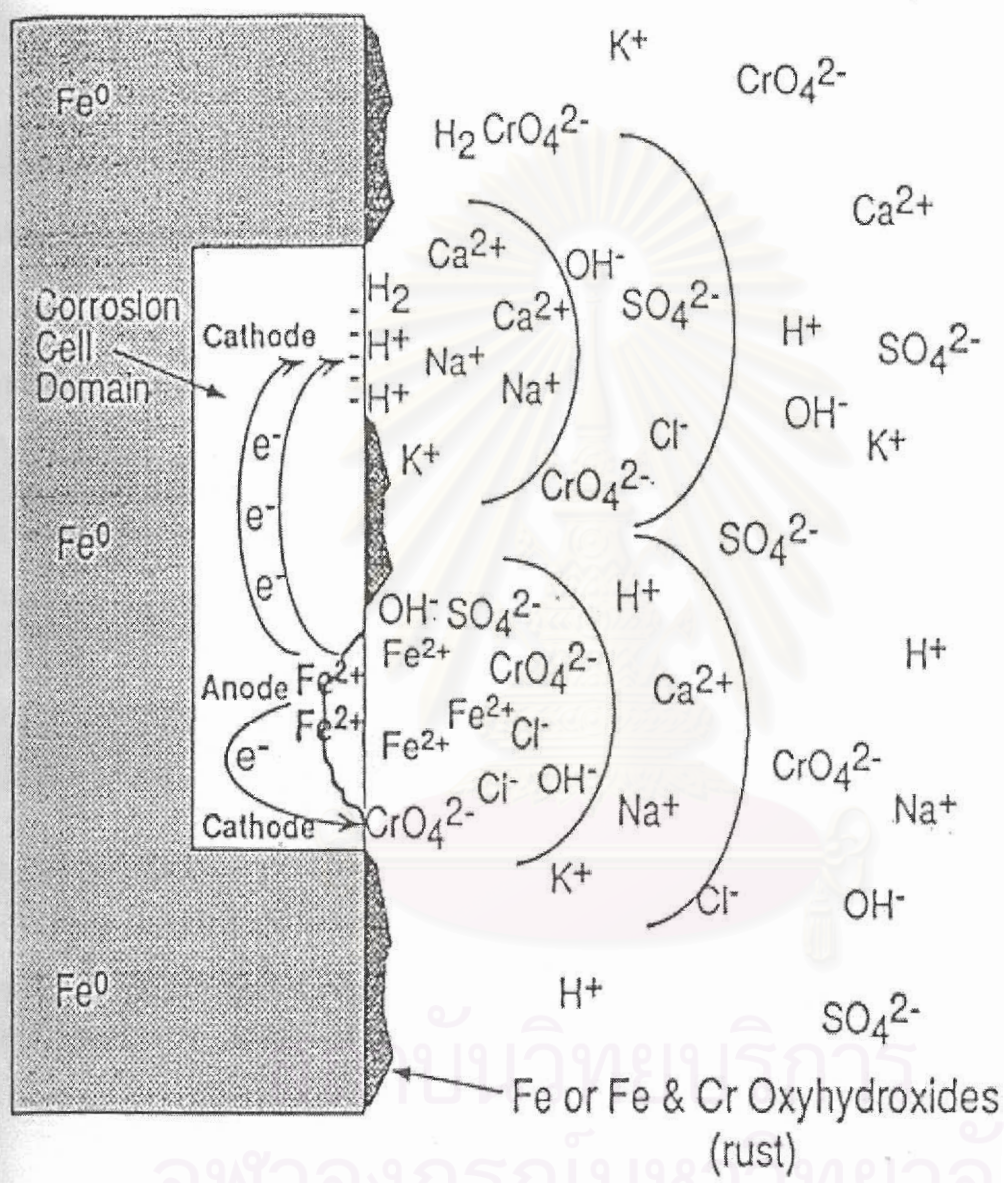


Powell และคณะ (1995) เสนอว่าบริเวณพื้นผิวของเหล็กที่เป็นขั้วบวก (Positively Charged Anodic Surface) เมื่อพิจารณาด้วย Electrical Double Layer Model จะคล้ายกับพื้นผิวของแร่ (Mineral Surface) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ ในขณะที่ค่าพีเอชน้อยกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนผิวแร่เป็นศูนย์ ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$) พื้นผิวของแร่และบริเวณใกล้พื้นผิวแร่จะเหมือนชั้น Stern Layer ซึ่งมีกลุ่มของไอออนลบ (Anion) รวมทั้งโครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) และซัลเฟต

ไอออน (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 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโปรตรอนหรือไฮโดรเจนไอออนมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตไอออนโดยอาศัยกลไกดังกล่าวข้างต้น

อีกกลไกหนึ่งสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตไอออน คือการถ่ายเทอิเล็กตรอนโดยตรงที่พื้นผิวของเหล็ก การดูดติดโครเมตไอออนบนผิวของเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (FeOOH) ที่เกิดขึ้นใหม่ เป็นกลไกที่ช่วยให้โครเมตไอออนอยู่ใกล้ผิวเหล็กมากขึ้นและเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนมายังโครเมตไอออน กลไกเซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีของผงตะไบเหล็กแสดงดังรูปที่ 2.2

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



รูปที่ 2.5 เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมีของผงตะไบเหล็ก (Powell และคณะ, 1995)

Sass และ Rai (1987) พบว่าความสามารถในการละลายของสารละลายของแชนจ์โครเมียม (III) – เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโมล (Mole Fraction) ของโครเมียมบนสารละลายของแชนจ์ (x) เมื่อค่าสัดส่วนโมลเพิ่มในช่วงค่าพีเอช 2 ถึง 6 ความสามารถในการละลายของสารละลายของแชนจ์โครเมียม(III) – เหล็ก(III) ไฮดรอกไซด์จะลดลง

2.6 น้ำใต้ดิน (Groundwater)

เนื่องจากน้ำใต้ดินในแต่ละพื้นที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน ประกอบกับลักษณะกิจกรรมและการป้องกันการปนเปื้อนในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน จึงทำให้ลักษณะการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินในแต่ละพื้นที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างของการติดตามตรวจสอบคุณภาพของน้ำใต้ดินมีดังนี้

อำเภอเทพิน และสาวิตรี (2539) ติดตามตรวจสอบคุณภาพของน้ำใต้ดินบริเวณสถานฝังกลบขยะ (Landfill) ลาดกระบัง ในเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2539 มีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศิริรัตน์ (2536) ศึกษาผลกระทบของน้ำชะขยะต่อคุณภาพน้ำใต้ดินในอำเภอหาดใหญ่ ในระยะห่าง 12 กิโลเมตรรอบบริเวณสถานที่ทิ้งขยะของเทศบาล ผลการศึกษาแสดงค่าต่ำสุดค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำบ่อตื้นและน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา บริเวณที่อยู่เหนือกองขยะและใต้กองขยะในทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน แสดงในตารางที่ 2.2

จากการศึกษาคุณภาพน้ำใต้ดินของทั้งบริเวณสถานฝังกลบขยะลาดกระบัง และสถานที่ทิ้งขยะของเทศบาลอำเภอหาดใหญ่ พบว่าการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำใต้ดินในลักษณะดังกล่าวมีปริมาณน้อยเนื่องจากการป้องกันการปนเปื้อน แต่ในกรณีของพื้นที่ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนและไม่มีมาตรการป้องกันการปนเปื้อนที่ดีพออาจทำให้มีการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำใต้ดินมีปริมาณที่สูงกว่านี้ได้

ตารางที่ 2.1 ผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพของน้ำใต้ดินบริเวณสถานฝังกลบขยะ (Landfill) ลาดกระบัง ในเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2539 (อำเภอเทพิน และสาวิตรี, 2539)

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	น้ำบาดาล		
				ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
1	อุณหภูมิ	°C	ธ	32.00	31.00	30.00
2	pH	-	7.0-8.5	7.91	7.84	7.93
3	สี (color)	Unit	5.00	0.00	0.00	0.00
4	ความขุ่น	FTU.	5.00	0.00	0.00	0.00
5	ความกระด้าง	-	-	37.00	45.00	49.00
6	DO	mg/L	-	7.90	8.10	8.00
7	BOD	mg/L	-	0.70	0.40	0.90
8	COD	mg/L	-	87.00	98.00	95.00
9	แมงกานีส (Mn)	mg/L	ไม่เกิน 0.3	0.02	0.10	0.17
10	โครเมียม (Cr)	mg/L	-	0.07	0.02	0.03
11	เหล็ก (Fe)	mg/L	ไม่เกิน 0.5	0.12	0.06	0.18
12	ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	mg/L	ไม่เกิน 200	150.00	180.00	190.00
13	แอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₃ -N)	mg/L	-	0.12	0.11	0.05
14	ไนเตรตไนโตรเจน (NO ₃ -N)	mg/L	-	0.07	0.08	0.06

หมายเหตุ : ธ = ค่าธรรมชาติ

ตารางที่ 2.2 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ย ของคุณภาพน้ำบ่อต้นและน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาบริเวณที่อยู่เหนือกองขยะและใต้กองขยะในทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน (ศิริรัตน์, 2536)

ข้อมูลที่ตรวจวิเคราะห์	น้ำบ่อต้น						น้ำบาดาล					
	ก่อนผ่านกองขยะ			หลังผ่านกองขยะ			ก่อนผ่านกองขยะ			หลังผ่านกองขยะ		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
เหล็ก (mg/L)	0.05	1.75	0.29	0.03	2.30	0.36	0.07	1.80	0.69	0.06	1.87	0.46
แมงกานีส (mg/L)	0.01	0.14	0.04	0.00	0.58	0.07	0.01	0.08	0.05	0.00	0.06	0.02
ทองแดง (mg/L)	0.00	0.02	0.01	0.00	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01
สังกะสี (mg/L)	0.08	0.36	0.17	0.07	0.39	0.20	0.05	0.51	0.18	0.09	0.36	0.21
ตะกั่ว (mg/L)	0.02	0.05	0.04	0.02	0.13	0.05	0.02	0.05	0.03	0.02	0.10	0.04
โครเมียม (mg/L)	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01
แคดเมียม (mg/L)	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
แบคทีเรีย (เอ็มพีเอ็น/100มล.)	0.00	300.00	27.00	0.00	249.00	41.00	0.00	190.00	28.00	0.00	376.00	41.00

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Khaothiar (1997) ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำเสียด้วย แมกเนไทต์เคลือบบนทราย (Magnetite – Coated Sand; MCS) พบว่ากระบวนการกำจัดส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันและพบว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ค่าพีเอชของน้ำเสีย และความเข้มข้นของ MCS มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ดังสมการที่ 2.29

$$d[Cr(VI)] / dt = -k[Cr(VI)][H]^0.2\{MCS\}^{1.8} \quad \dots(2.29)$$

Eary และ Rai (1988) กำจัดโครเมตออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการรีดักชันด้วยเฟอร์รัสไอออน พบว่าเฟอร์รัสไอออนสามารถรีดิวซ์โครเมตได้ในช่วงระหว่างค่าพีเอช 2 ถึง 10 แม้แต่ในสถานะที่มีออกซิเจนละลายในน้ำเสียโครเมต แต่พบว่าเมื่อมีฟอสเฟตทั้งหมดในน้ำเสียมากกว่า 10^{-4} โมล/ลิตร ประสิทธิภาพของการรีดิวซ์โครเมตจะลดลงเนื่องจากเฟอร์รัสไอออนจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่ละลายในน้ำเสีย ปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตด้วยเฟอร์รัสไอออนจะกำจัดโครเมียมออกในรูปสารละลายของแั่งค์โครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ ($Cr_xFe_{1-x}(OH)_3$) โดยสัดส่วนโมล (Mole Fraction) ของไตรวาเลนท์โครเมียม (X) เท่ากับ 0.25

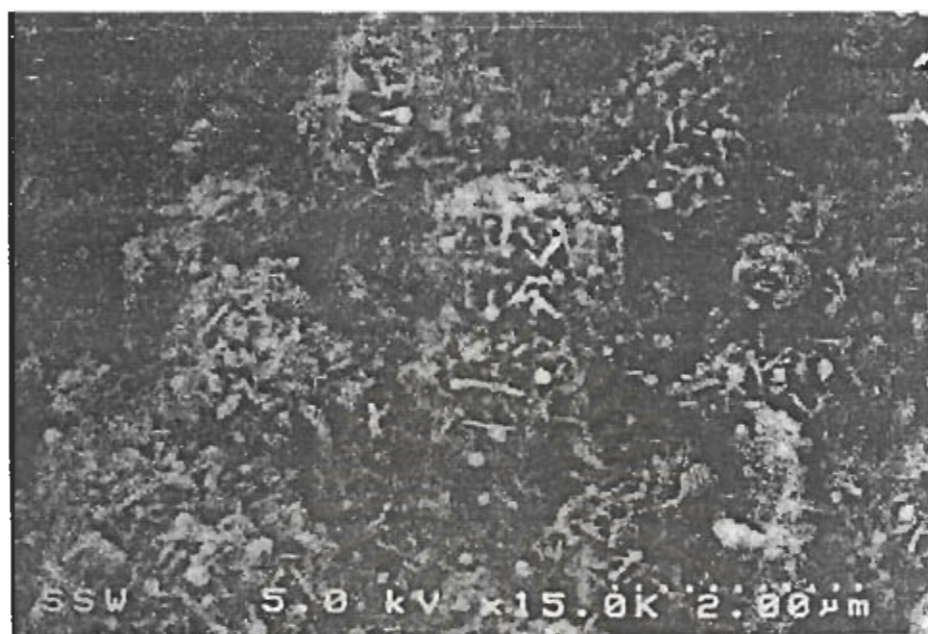
Powell และคณะ (1995) ศึกษาการใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (Zero Valent Iron) ในการกำจัดโครเมต (CrO_4^{2-}) ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน พบว่าความเข้มข้นของโครเมตที่ลดลงเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชัน มิได้เกิดจากการดูดติดผิวของ Aquifer Material และเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ โดยในระบบที่ไม่มี Elizabeth City Aquifer Material ความเข้มข้นของโครเมตถูกลดลงจาก 140 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร จนเหลืออย่างต่ำที่สุด 26 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ส่วนในระบบที่มี Elizabeth City Aquifer Material สามารถควบคุมค่าพีเอชของระบบให้มีค่าประมาณ 7.5 ได้ทำให้กระบวนการโครเมตรีดักชัน เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์คือเหลืออยู่ต่ำกว่า 0.0024 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ภายใน 60 ชั่วโมงหลังจากเติมโพแทสเซียมโครเมต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มมวลของเหล็กปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสามารถเกิดได้เร็วขึ้น

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) เพื่อหาความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมออกจากสารละลาย ผลจากการศึกษาแบบแบตช์ (Batch Study) แสดงให้เห็นว่าอัตราของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดมีค่ามากกว่า Pyrite และเหล็กเม็ดหยาบ กลไกของ

การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดและเหล็กเม็ดหยาบ คือการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเป็นไตรวาเลนทีโครเมียมควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กศูนย์เป็นเหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเฟอร์ริก ไตรวาเลนทีโครเมียมที่เกิดขึ้นจะตกผลึกในรูปสารละลายของแฉิ่งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ออกซีไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$) และผลจากการวิเคราะห์ทางแร่พบว่าไตรวาเลนทีโครเมียมมักอยู่ร่วมกับ Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไตรวาเลนทีโครเมียมสามารถกำจัดออกได้ทั้งในรูปสารละลายของแฉิ่งและการดูดติดบนผิวของ Goethite นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างการทดลองที่ใช้ผงตะไบเหล็กในการทดลองที่อุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส และ 4 องศาเซลเซียส

Pratt และคณะ (1997) ศึกษาความเป็นไปของไตรวาเลนทีโครเมียมจากกระบวนการโครเมตรีดักชันด้วยผงตะไบเหล็ก (Iron Filing) และทรายควอทซ์ (Quartz Grain) โดยให้สารละลายที่ประกอบด้วยเฮกซะวาเลนทีโครเมียม 20 มิลลิกรัม โครเมียม/ลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุผงตะไบเหล็กผสมกับทรายควอทซ์ ผงตะไบเหล็กที่ถูกทำปฏิกิริยาจะสร้างชั้นเคลือบผิวที่ประกอบด้วย Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) ซึ่งจะดูดติดไตรวาเลนทีโครเมียมทำให้มีความเข้มข้นของไตรวาเลนทีโครเมียมสูงที่ผิวนอกดังรูปที่ 2.3 ส่วนของ Goethite ที่มีความเข้มข้นของไตรวาเลนทีโครเมียมสูงนี้จะมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมไปเป็นไตรวาเลนทีโครเมียมสามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พร้อมทั้งได้สารประกอบของไตรวาเลนทีโครเมียมที่ละลายน้ำได้น้อยด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แสดงภาพถ่ายผงตะไประสีภายหลังจากการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 1500 เท่า(Pratt และคณะ, 1997)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

แผนการวิจัย (แสดงดังรูปที่ 3.1)

- 3.1 การเตรียมผงตะไบเหล็ก (เหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์)
- 3.2 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (น้ำใต้ดินสังเคราะห์)
- 3.4 การดำเนินการทดลอง
- 3.5 วิธีการวิเคราะห์

ขั้นตอนการวิจัย (แสดงดังรูปที่ 3.1)

สามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน คือ

- ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาเบื้องต้น เป็นการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ และการศึกษาสมดุลมวล
- ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม
- ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาผลของค่าพีเอช
- ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

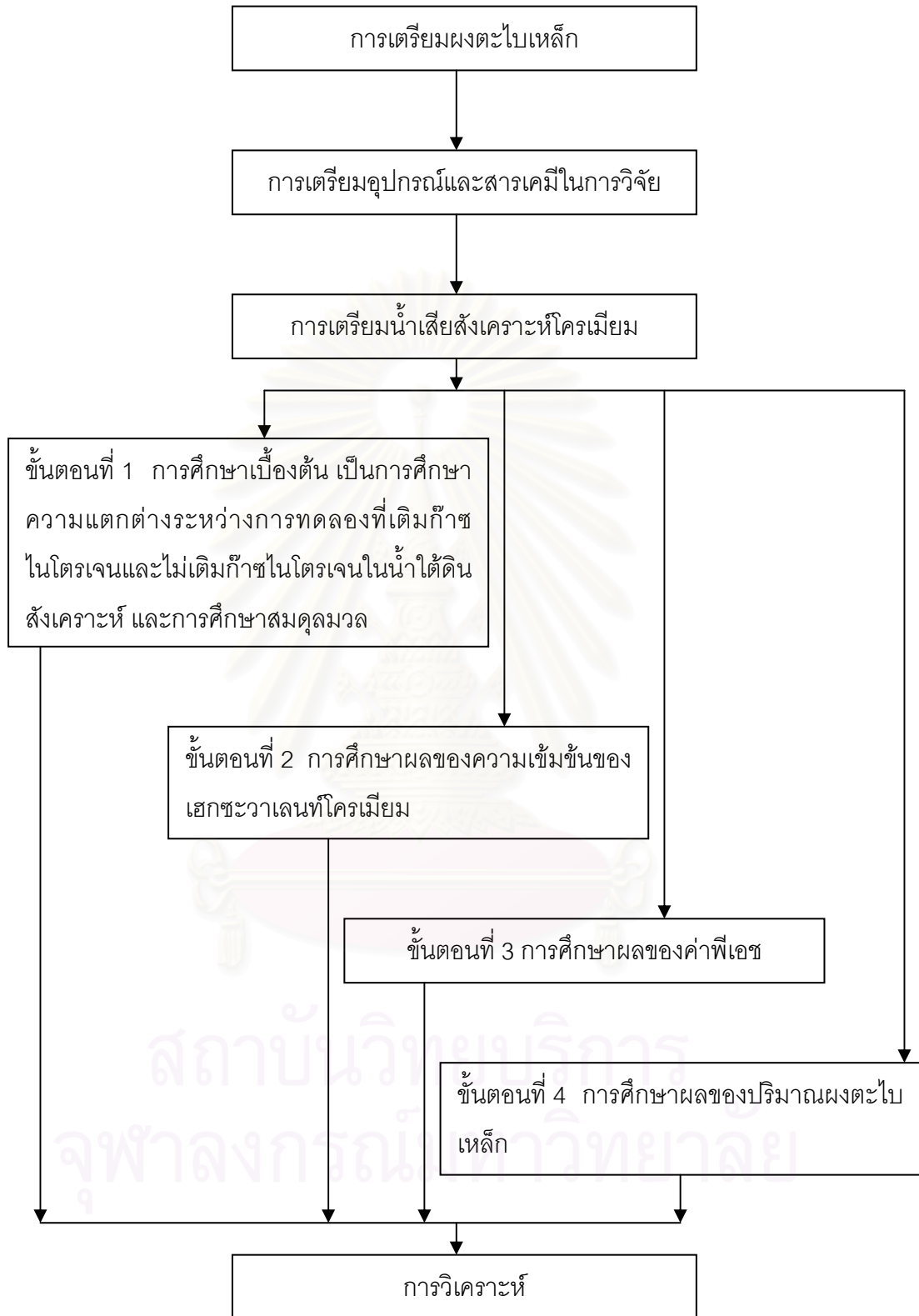
3.1 การเตรียมผงตะไบเหล็ก

- 3.1.1 ล้างผงตะไบเหล็กด้วยไซเดียมคลอไรด์ 7 มิลลิโมล/ลิตร (Powell และคณะ, 1995)
- 3.1.2 อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1.1 เครื่องเขย่า (Shaking Machine)
- 3.2.1.2 เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter)
- 3.2.1.3 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
- 3.2.1.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- 3.2.1.5 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorbtion Spectrometer)
- 3.2.1.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงแผนการวิจัยและขั้นตอนการวิจัย

3.2.1.7 หลอดเขย่า (Conical Tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.2

3.2.1.8 0.45 ไมโครเมตร เมมเบรนฟิลเตอร์ (0.45 μm Membrane Filter)

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผงตะไบเหล็ก

- ผงตะไบเหล็ก
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.2.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

- โซเดียมโครเมต ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- โซเดียมอะซิเตรท (CH_3COONa)
- กรดไนตริก (HNO_3)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3.2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาโครเมียม

- ไดฟีนิลคาร์บาริไซด์ (1,5-Diphenylcarbazide)
- อะซิโตน (CH_3COCH_3)
- โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)
- โซเดียมเอไซด์ (NaN_3)
- กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- กรดไนตริก (HNO_3)

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

3.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเตรียมได้จากโซเดียมโครเมต ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีมวลโมเลกุล 234 กรัม และโครเมียมมีมวลโมเลกุล 52 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะมีความเข้มข้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร โดยจะต้องใช้โซเดียมโครเมต 0.0450, 0.0675, 0.0900, 0.1125 และ 0.1350 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ตามลำดับ แล้วเติมโซเดียมอะซิเตรท 13.608 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์

3.3.2 ปรับค่าพีเอช เป็น 4,5,6, และ 7 ด้วยกรดไนตริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.2 หลอดเขย่าขนาด 50 มิลลิลิตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 การศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

3.4.1.1 เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำเสียความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดออกซิเจนละลาย (Khaodhjar, 1997)

3.4.1.2 ตวงน้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่หลอดเขย่าจำนวน 19 หลอด

3.4.1.3 เติมผงตะไบเหล็ก 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในหลอดเขย่า 18 หลอด

3.4.1.4 นำหลอดทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที (Powell และคณะ, 1995) ด้วยเครื่องเขย่า เป็นเวลา 96 ชั่วโมง โดยเก็บขวดตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 20, 30 นาที 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72 และ 96 ชั่วโมง หลังจากเริ่มเขย่าตามลำดับ

3.4.1.5 กรองแยกส่วนน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.4.1.6 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โครเมียมทั้งหมด เหล็กทั้งหมด และวัดค่าพีเอช

3.4.1.7 ทดลองซ้ำ 3.4.1.1 ถึง 3.4.1.6 แต่ไม่ต้องเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำเสีย

3.4.2 การศึกษาสมมูลมวลของโครเมียม

3.4.2.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 2 หลอด

3.4.2.2 เติมผงตะไบเหล็ก 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในหลอดเขย่า 1 หลอด

3.4.2.3 นำหลอดทั้งหมดไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที เก็บหลอดตัวอย่างที่เวลาที่คาดว่าโครเมียมถูกกำจัดจนหมดแล้ว โดยสามารถทราบได้จากการทดลองที่ 3.4.1

3.4.2.4 กรองแยกส่วนน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.4.2.5 ย่อยของแข็งด้วยกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ตามวิธี 3030 G Nitric Acid – Sulfuric Digestion ของ Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, และ WEF, 1998)

3.4.2.6 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม และโครเมียมทั้งหมด

3.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

3.4.3.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 19 หลอด

3.4.3.2 เติมผงตะไบเหล็ก 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในหลอดเขย่า 18 หลอด

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

3.4.3.4 กรองแยกส่วนน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.4.1.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โครเมียมทั้งหมด เหล็กทั้งหมด และวัดค่าพีเอช

3.4.3.6 ทดลองซ้ำ 3.4.3.1 ถึง 3.4.3.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.4.4 ศึกษาผลของค่าพีเอช

3.4.4.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 19 หลอด

3.4.4.2 เติมผงตะไบเหล็ก 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในหลอดเขย่า 18 หลอด

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

3.4.4.4 กรองแยกส่วนน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.4.1.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โครเมียมทั้งหมด เหล็กทั้งหมด และวัดค่าพีเอช

3.4.4.6 ทดลองซ้ำ 3.4.4.1 ถึง 3.4.4.5 แต่เปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 5, 6, และ 7 ดังแสดงในภาพที่ 3.4

3.4.5 ศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

3.4.5.1 ตวงน้ำเสียความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเขย่า จำนวน 19 หลอด

3.4.5.2 เติมผงตะไบเหล็ก 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในหลอดเขย่า 18 หลอด

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

3.4.5.4 กรองแยกส่วนน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.4.1.5 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด เหล็กทั้งหมด และวัดค่าพีเอช

3.4.5.6 ทดลองซ้ำ 3.4.5.1 ถึง 3.4.5.5 แต่เปลี่ยนปริมาณเหล็กเป็น 2, 5 และ 10 กรัมต่อลิตรน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.5

3.5 วิธีการวิเคราะห์

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

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

3.5.3 ความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์

3.5.4 วัดค่าพีเอชด้วยพีเอชมิเตอร์

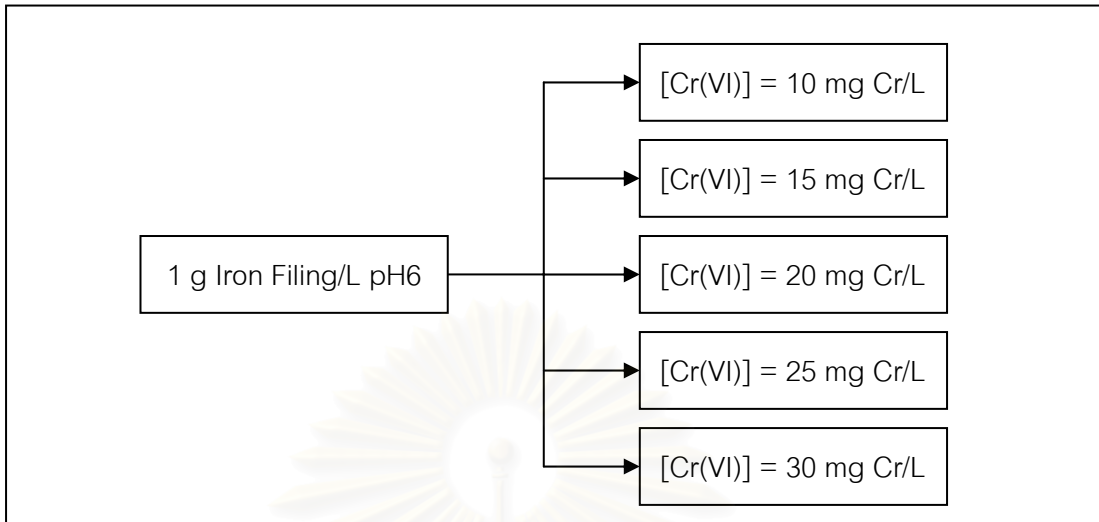
3.5.5 วิเคราะห์ผงตะไบเหล็กที่ได้ภายหลังการทดลองด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรโฟโทมิเตอร์

หมายเหตุ:

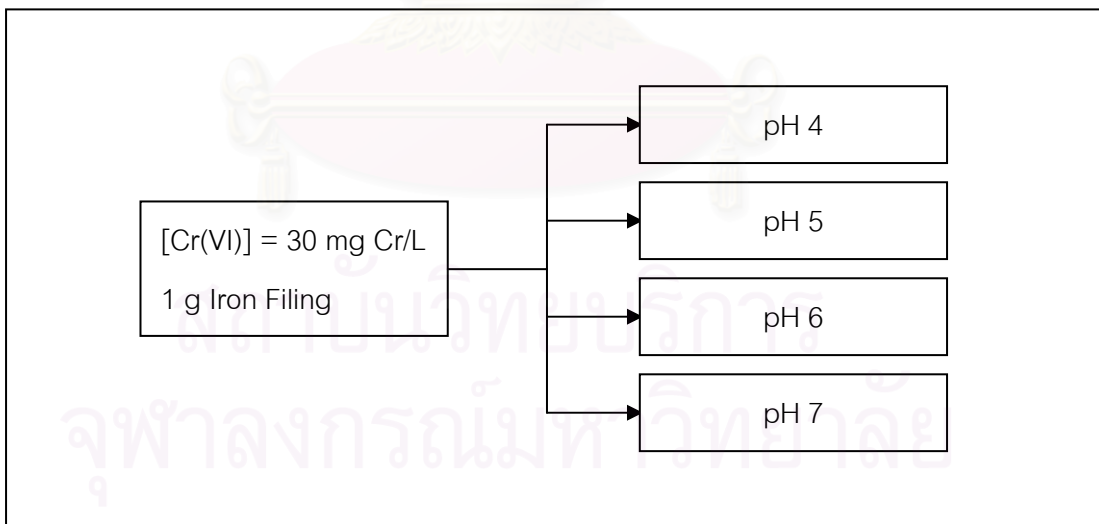
- การทดลองบางสภาวะอาจไม่ต้องเก็บตัวอย่างจนครบ 96 ชั่วโมง จะหยุดเมื่อใครเสียชีวิต
กำจัดจนหมดแล้ว
- การทดลองที่ 3.4.3 ถึง 3.4.5 ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Triplicate)



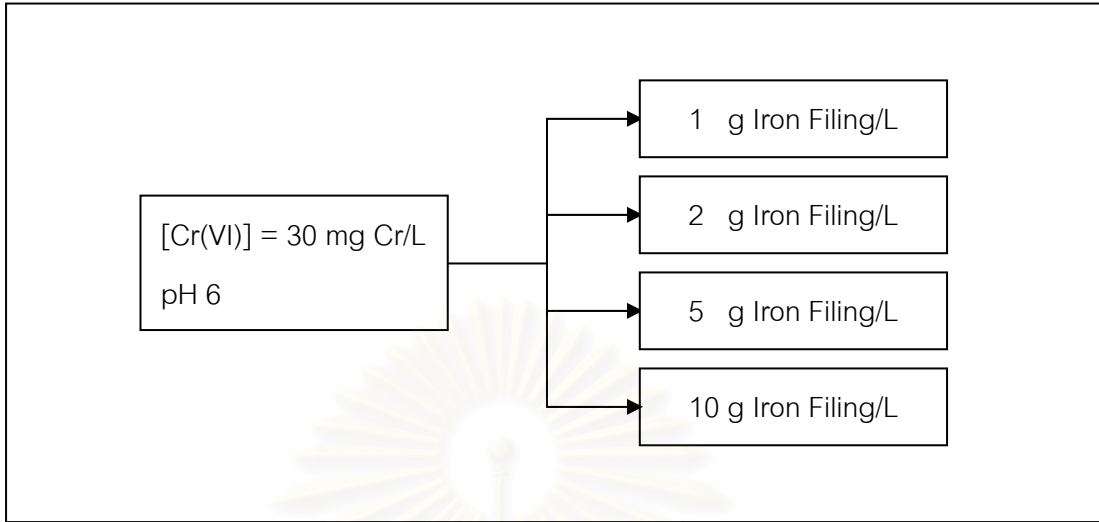
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาค่าพีเอช



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของผงตะไบเหล็ก

ผงตะไบเหล็กที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลดำ ขนาด 75 ถึง 150 ไมโครเมตร ภายหลังจากการทดลองมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแดง เนื่องจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวดังรูปที่ 4.1

เมื่อวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและภายหลังจากการทดลองด้วย SEM (Scanning Electron Microscopes) กำลังขยาย 750 เท่า ดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.3 พบว่าผงตะไบเหล็กภายหลังจากการทดลองมีลักษณะแตกต่างจากผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองคือ ผิวนอกของผงตะไบเหล็กภายหลังจากการทดลองมีลักษณะมนและมีรอยร้าวเนื่องจากการกัดกร่อน นอกจากนี้บางส่วนของผิวนอกของผงตะไบเหล็กภายหลังจากการทดลองมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆที่บริเวณผิว เมื่อวิเคราะห์ด้วยกำลังขยาย 3500 เท่า พบว่าลักษณะดังกล่าวไม่ปรากฏขึ้นในผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.5 เมื่อวิเคราะห์ผลตะไบเหล็กภายหลังจากการทดลองด้วยกำลังขยาย 7500 เท่า เม็ดกลมเล็กๆดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมีลักษณะคล้าย Goethite (α -FeOOH) ดังรูปที่ 2.3 (Pratt และคณะ, 1997)

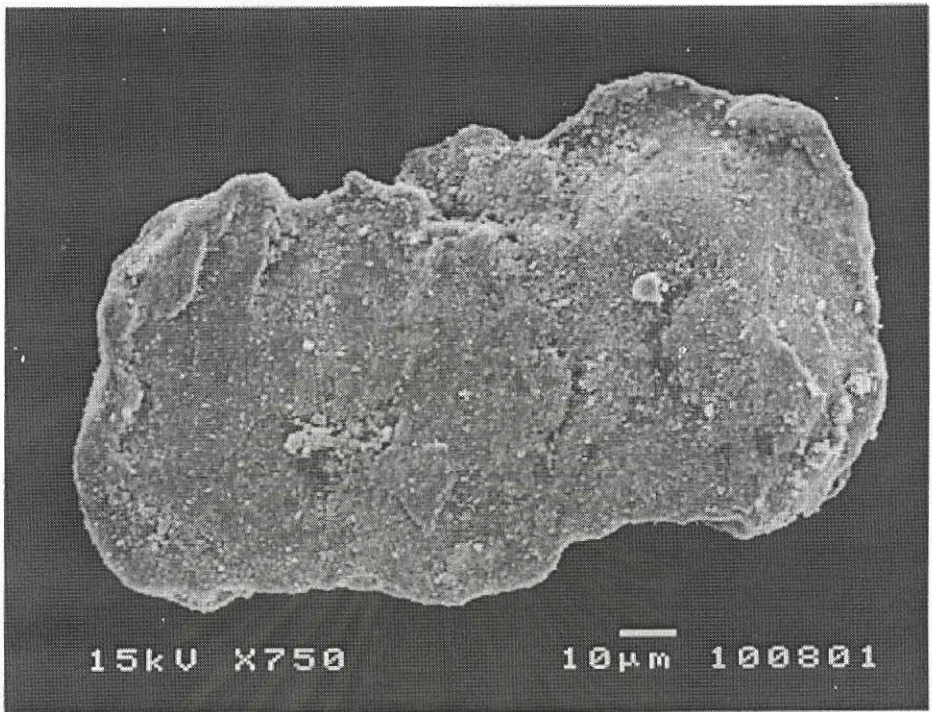
เมื่อวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กหลังการทดลองด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffractometer) ดังรูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะกราฟใกล้เคียงกับ Maghemite (γ -Fe₂O₃) แต่การวิเคราะห์ไม่พบโครเมียมบนผงตะไบเหล็กเนื่องจากภายหลังจากการทดลองโครเมียมบนผงตะไบเหล็กมีปริมาณต่ำจนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้

สรุปได้ว่าออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นบนผงตะไบเหล็กภายหลังจากการทดลองน่าจะเป็น Maghemite มากกว่า Goethite เพราะว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD มีความน่าเชื่อถือมากกว่า ถึงแม้ว่าสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นสามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก คือ Maghemite หรือ Goethite ได้ด้วยการตั้งน้ำออกดังสมการ 2.18 ถึง 2.19 (มันสิน และไพพรรณ, 2527)

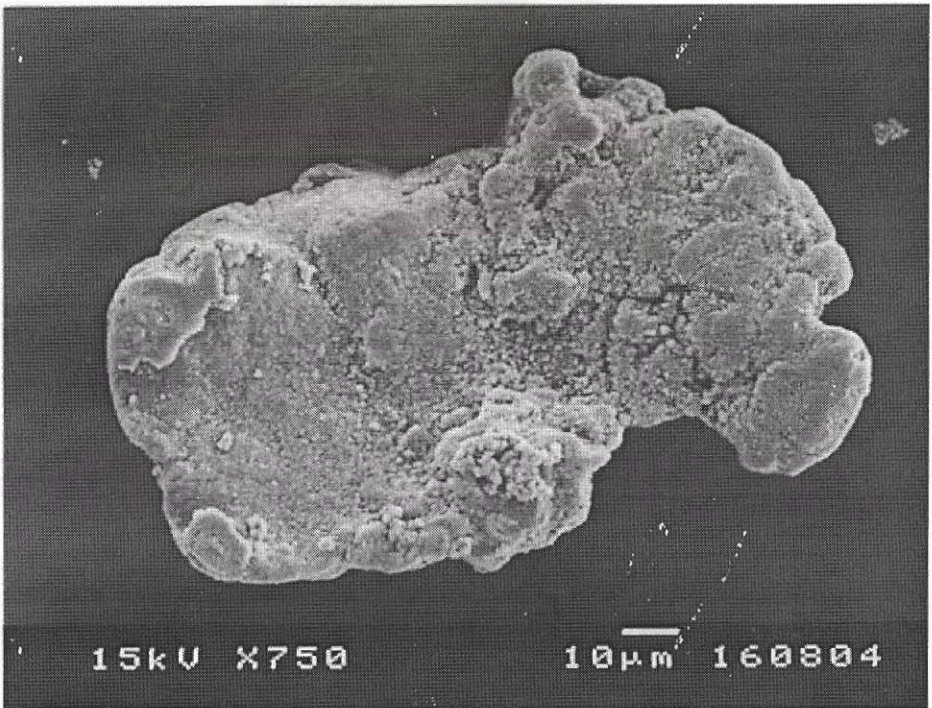


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองและหลังการทดลอง

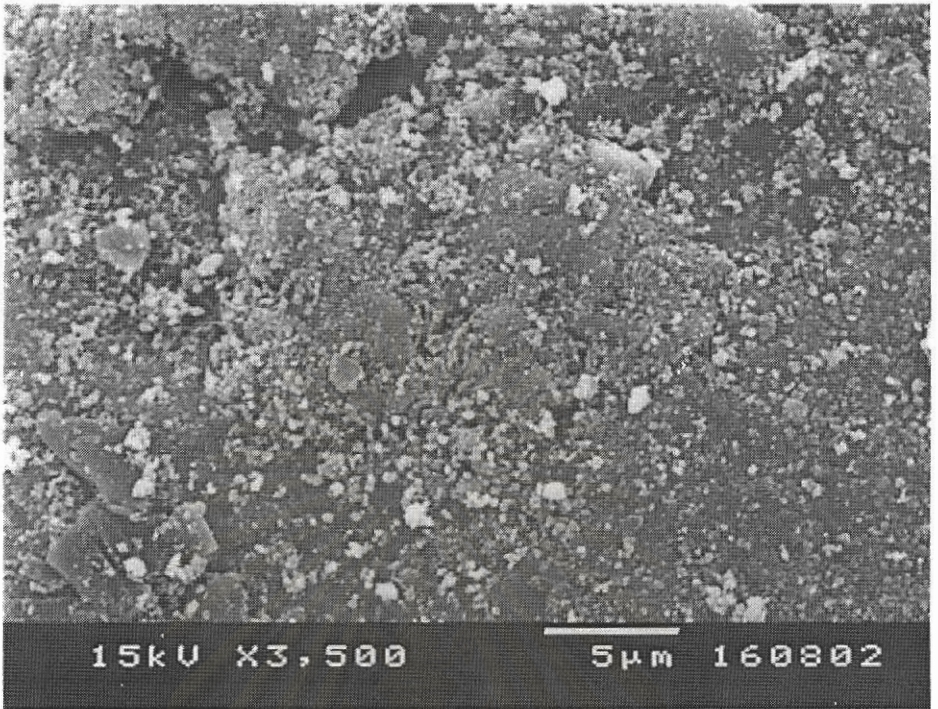
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



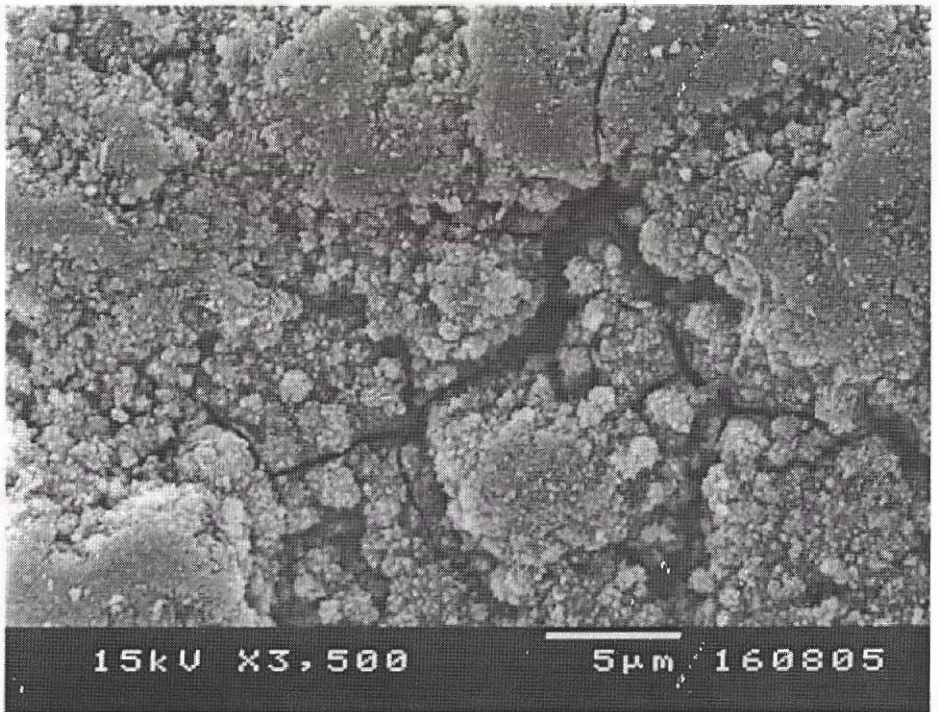
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 750 เท่า



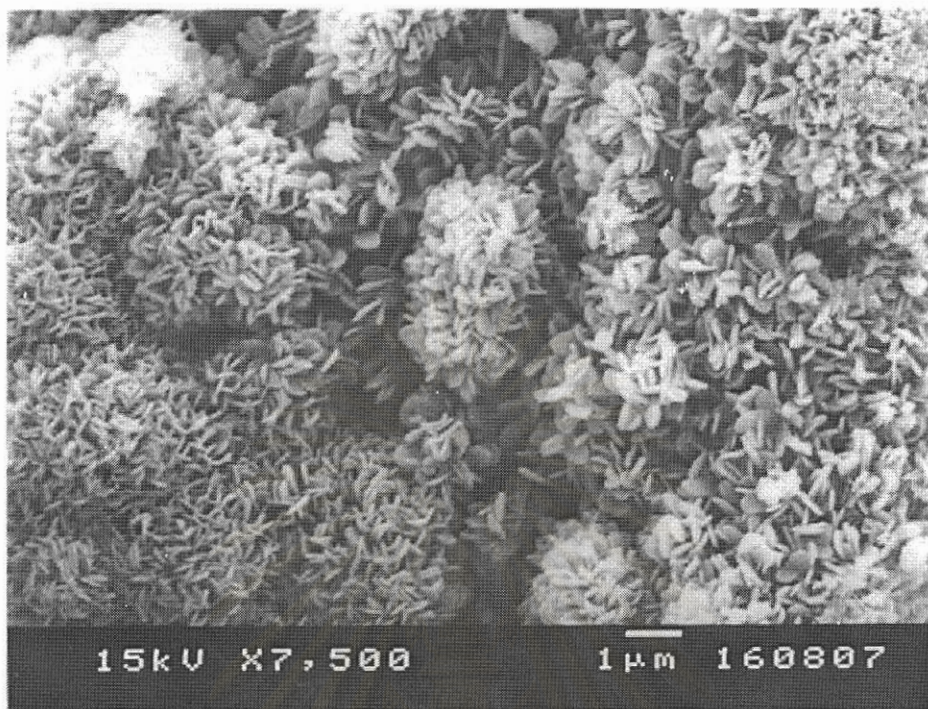
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 750 เท่า



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กก่อนการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 3500 เท่า

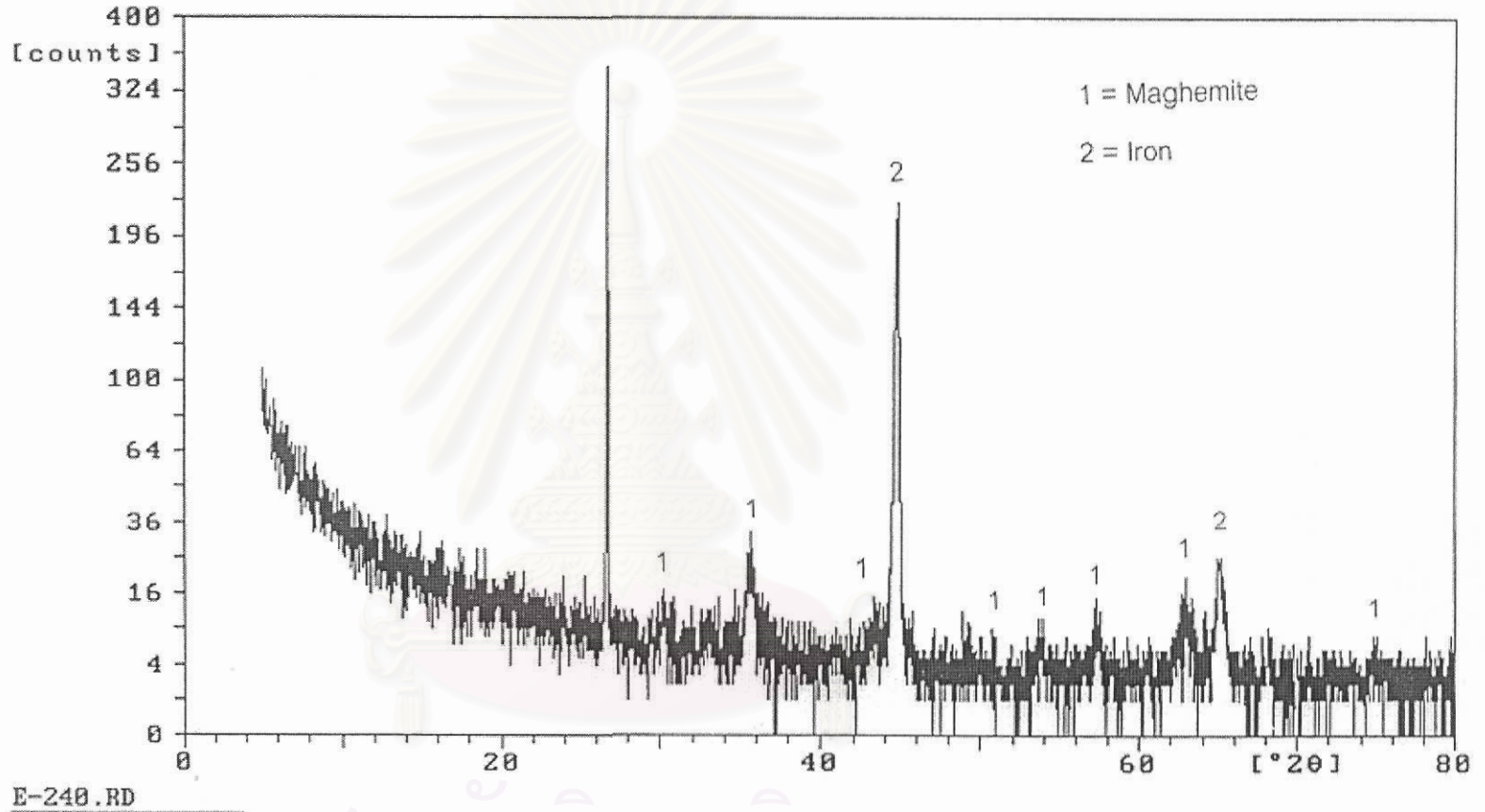


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 3500 เท่า



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายผงตะไประสีกภายหลังการทดลองด้วย SEM กำลังขยาย 7500 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กภายใต้การทดลองด้วยเครื่อง XRD เมื่อความเข้มข้นของเสกชะวาเลนที่โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



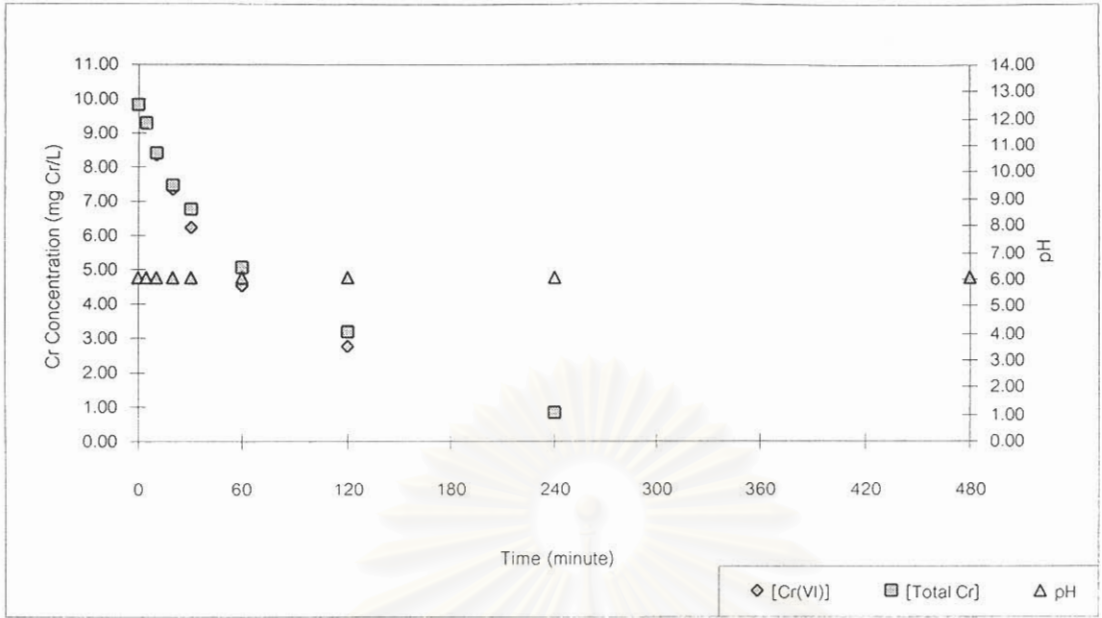
4.2 ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.9 พบว่าทั้งสองสภาวะสามารถกำจัดโครเมียมได้ใกล้เคียงกัน โดยสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้หมดภายใน 240 นาที แต่ยังมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียมซึ่งสามารถถูกกำจัดได้หมดภายใน 480 นาที เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วในสภาวะที่ไม่เติมก๊าซไนโตรเจนผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้ดีกว่าสภาวะที่เติมก๊าซไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันไม่เกิน 8.36 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10

เนื่องจากการเติมก๊าซไนโตรเจนเป็นการกำจัดออกซิเจนละลายในน้ำใต้ดินทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงตะไบเหล็กเกิดขึ้นช้า สังเกตได้จากความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดที่เวลาต่างๆจะน้อยกว่าในสภาวะที่ไม่เติมก๊าซไนโตรเจน ทำให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างผงตะไบเหล็กกับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้การกำจัดโครเมียมเกิดขึ้นได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่เติมก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกศึกษาในสภาวะที่ไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

4.3 ผลการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียม

จากผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลองที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 พบว่าสภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดโครเมียมทั้งหมดได้หมดภายใน 480 นาที จึงเลือกสภาวะดังกล่าวในการศึกษาสมมูลมวลของโครเมียม ผลการศึกษสมมูลมวลของโครเมียมแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดในน้ำตัวอย่างเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับในน้ำที่ได้จากการย่อยตะกอนที่เวลา 480 นาที จึงกล่าวได้ว่าเป็นไปตามสมมูลมวล โดยโครเมียมในน้ำตัวอย่างเริ่มต้นอยู่ในรูปของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมส่วนโครเมียมในน้ำที่ได้จากการย่อยตะกอนอยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียม



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

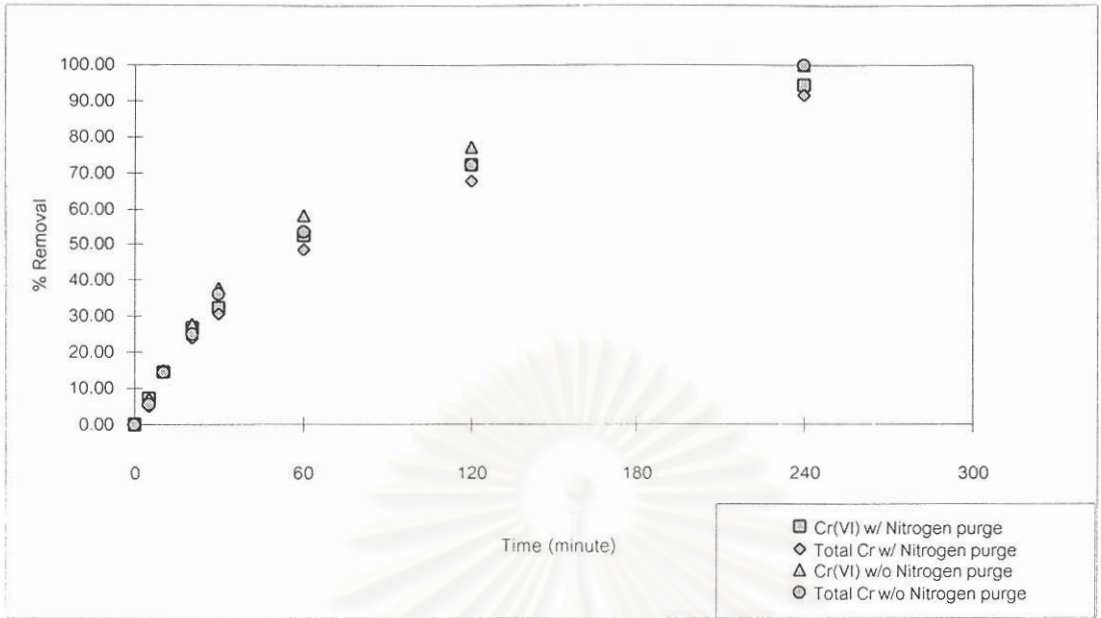


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

ตารางที่ 4.1

ข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมด ของสถานะที่เติมก๊าซไนโตรเจน และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Time (minute)	Cr(VI)			Total Cr		
	% Removal			% Removal		
	w/o Nitrogen Purge	w/ Nitrogen Purge	difference	w/o Nitrogen Purge	w/ Nitrogen Purge	difference
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	7.53	7.27	0.26	5.50	5.22	0.28
10	15.20	14.69	0.51	14.70	14.30	0.40
20	27.66	26.69	0.97	25.20	24.02	1.18
30	38.07	32.27	5.80	36.47	30.81	5.66
60	57.92	52.61	5.31	53.75	48.46	5.29
120	77.20	71.96	5.24	71.88	67.33	4.55
240	100.00	94.56	5.44	100.00	91.64	8.36
480	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	0.00



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมดของสภาวะที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Sample	[Cr(VI)] (mg Cr/L)	[Total Cr] (mg Cr/L)	[Cr(III)] (mg Cr/L)
Blank	9.98	9.95	-
Sample _{480 minute}	<0.01	<0.01	-
Digested Sample _{480 minute}	<0.01	9.91	9.91



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปได้ว่าเฮกซะวาเลนทีโครเมียมถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปไตรวาเลนทีโครเมียมโดยผงตะไบเหล็ก ซึ่งไตรวาเลนทีโครเมียมอาจตกตะกอนทางเคมีในรูปสารละลายของแข็งเป็นโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ออกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$) (Blowes และคณะ, 1997)

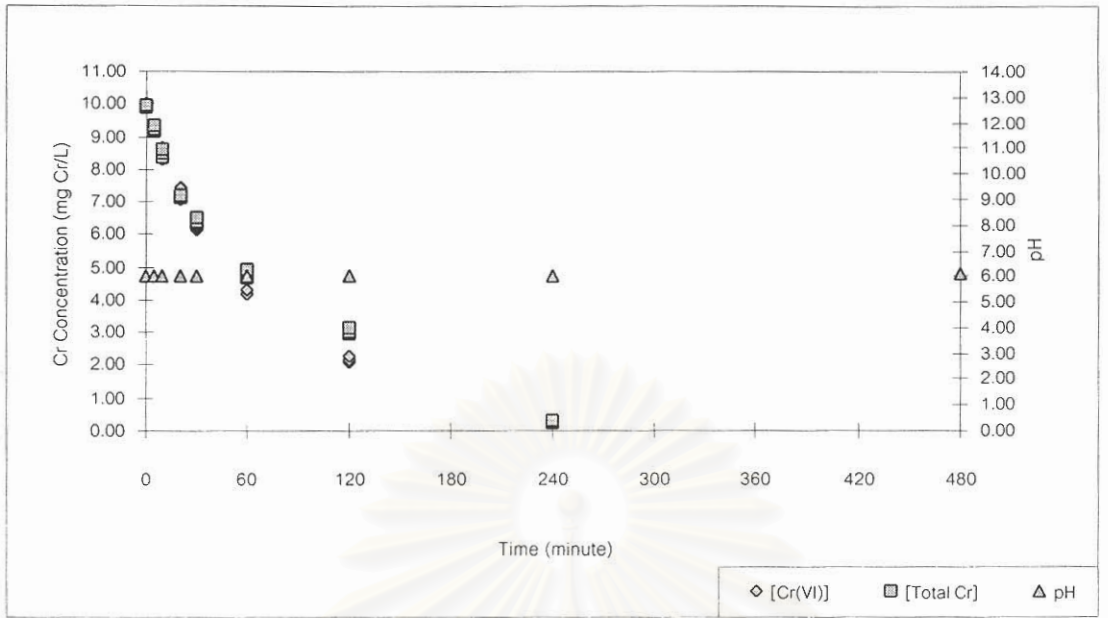
4.4 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

การศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ความเข้มข้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร ค่าพีเอช 6 เป็นดังนี้

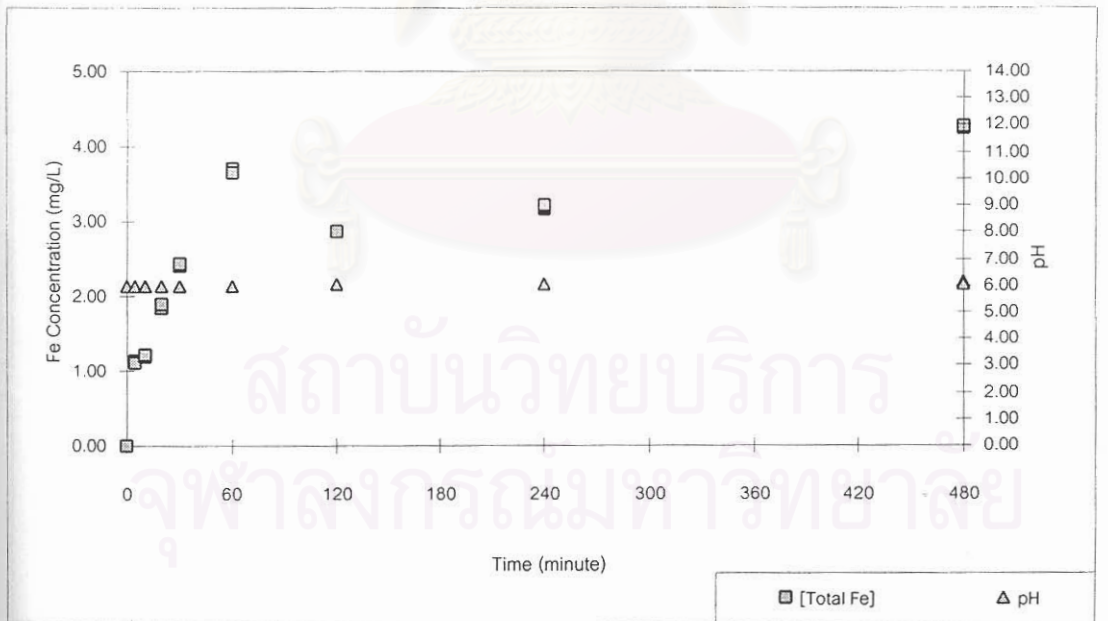
ผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.12 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจาก 9.97 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 240 นาที แต่ยังมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนทีโครเมียมซึ่งสามารถถูกกำจัดได้หมดภายใน 480 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 6.00 ณ จุดเริ่มต้น เป็น 6.04 ที่เวลา 240 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 480 นาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.10 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 1.12 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาที เป็น 3.19 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 240 นาที และเป็น 4.28 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 480 นาที

ผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.14 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดจาก 14.98 มิลลิกรัมโครเมียม /ลิตร ได้หมดภายในเวลา 1440 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 6.00 ณ จุดเริ่มต้น เป็น 6.15 ที่เวลา 1080 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 1440 นาที พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.22 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเปลี่ยนแปลงจาก 0.82 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาทีเป็น 0.09 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 1080 นาที และเป็น 3.83 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 1440 นาที

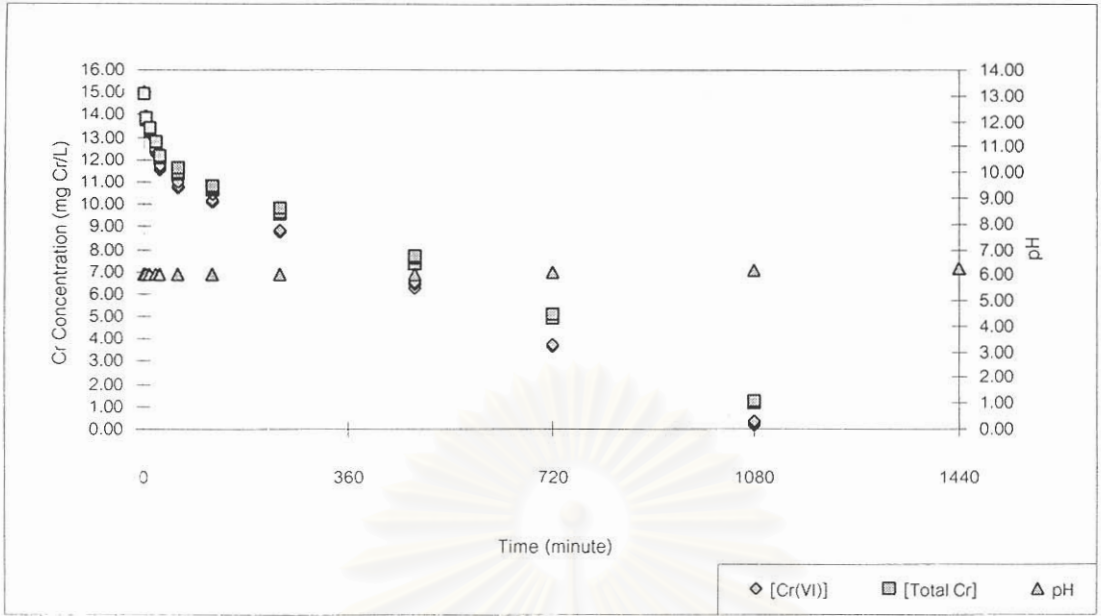
ผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.16 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจาก 19.90 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 2160 นาที แต่ยังมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนทีโครเมียมซึ่งสามารถถูกกำจัดได้หมดภายใน 2520 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 5.95 ณ จุดเริ่มต้น เป็น 6.06 ที่เวลา 2160 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 2520 นาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.20 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 0.56



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



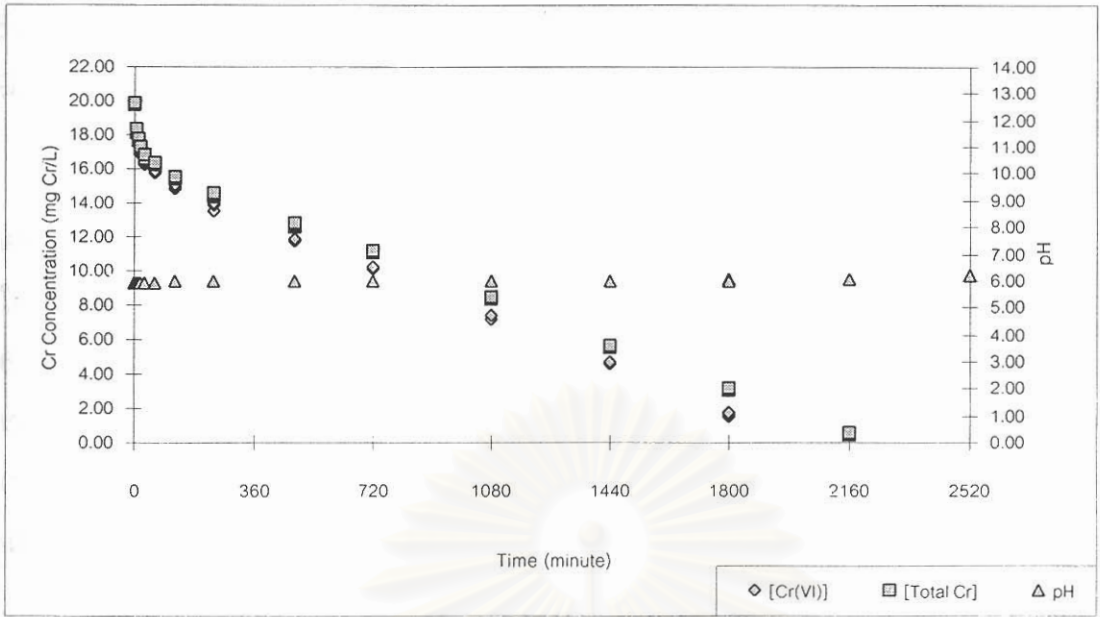
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



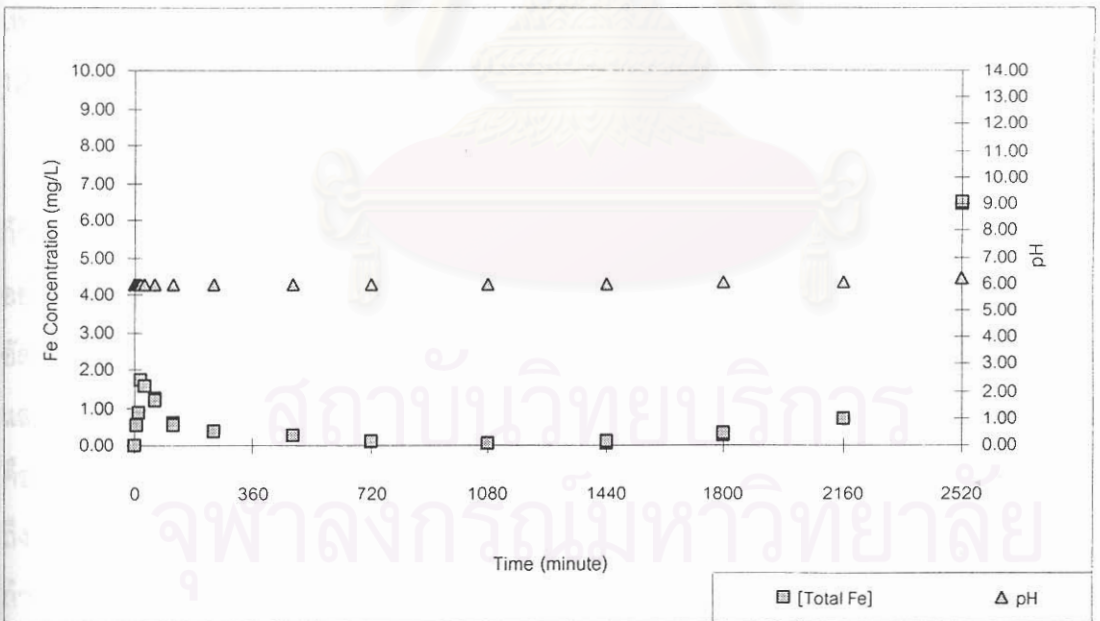
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



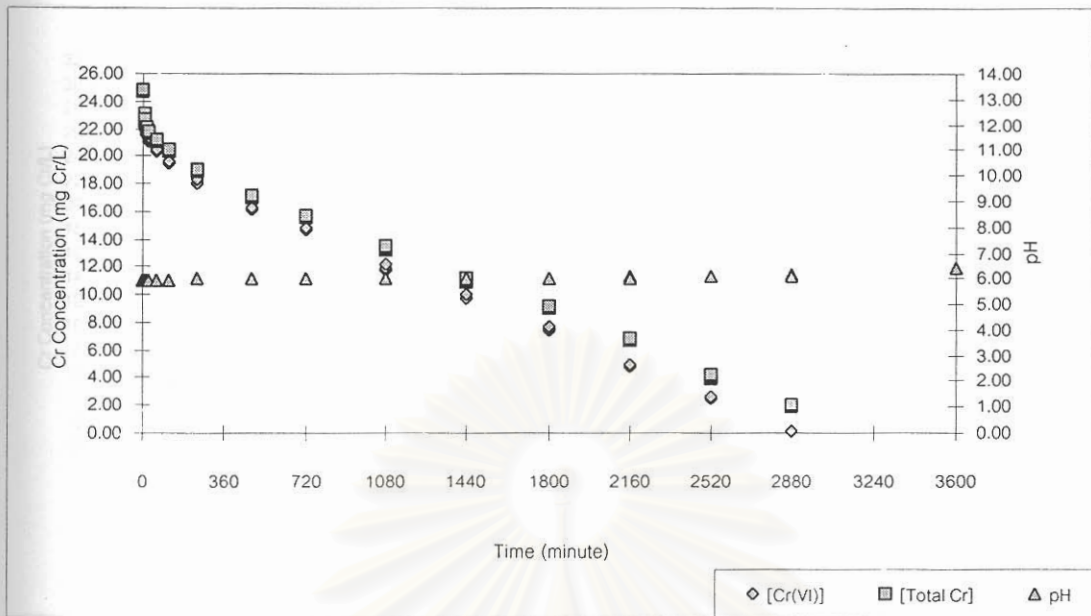
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาที เป็น 0.72 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 2160 นาที และเป็น 6.49 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 2520 นาที

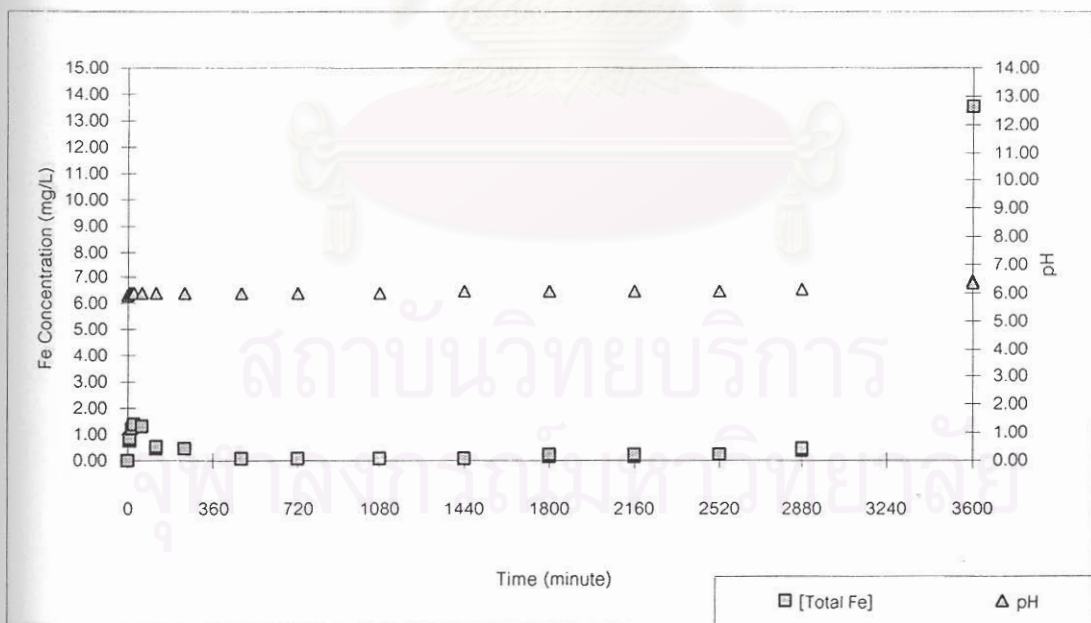
ผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.18 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดจาก 24.80 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 3600 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 5.95 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 6.10 ที่เวลา 2880 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 3600 นาที พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.40 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเปลี่ยนแปลงจาก 0.78 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาทีเป็น 0.41 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 2880 นาที และเป็น 13.53 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 3600 นาที

ผลการศึกษาที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ดังรูปที่ 4.19 ถึง 4.20 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดจาก 30.29 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 4320 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 5.96 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 6.09 ที่เวลา 3600 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 4320 นาที พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.25 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 0.51 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาทีเป็น 0.10 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 3600 นาที และเป็น 12.97 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 4320 นาที

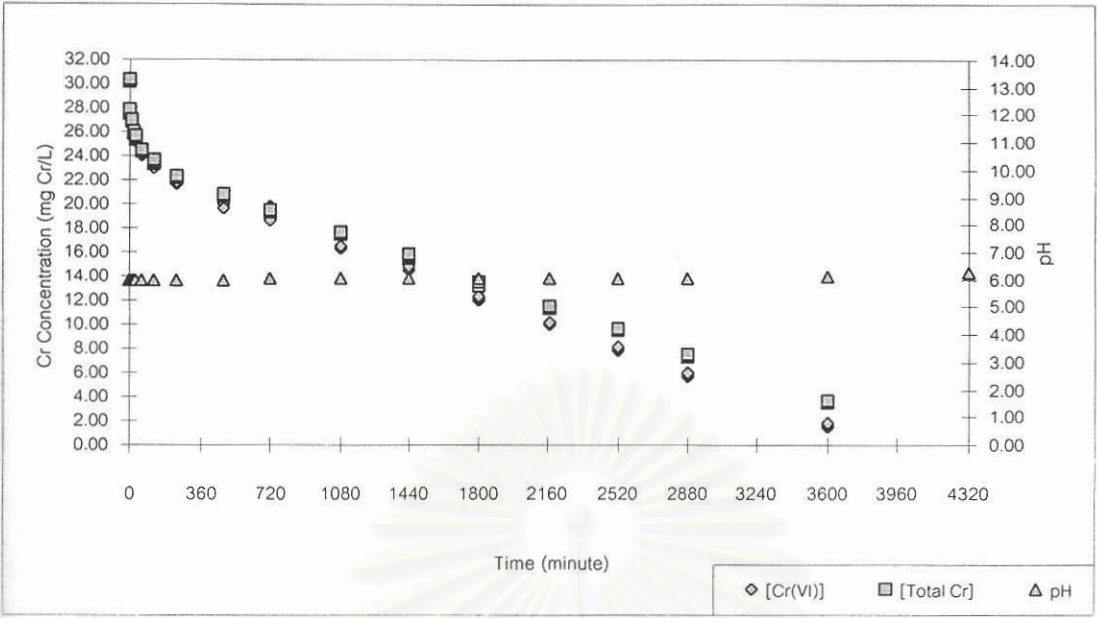
เมื่อนำผลการศึกษาที่ความเข้มข้นต่างๆ มาเปรียบเทียบกับดังรูปที่ 4.21 พบว่าอัตราการกำจัดเริ่มต้น (Initial Removal Rate) ของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่แต่ละความเข้มข้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 ถึง 10 นาทีแรก โดยพบว่ามีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร จะมีอัตราการกำจัดเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสูงสุด คือ 0.556 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที และที่ความเข้มข้น 25, 20, 15 และ 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร จะมีอัตราการกำจัดเริ่มต้นลดลง คือ 0.420, 0.344, 0.242 และ 0.162 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที ตามลำดับ และภายหลังจาก 5 ถึง 10 นาทีแรก อัตราการกำจัดจะเริ่มลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมพบว่าที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร จะใช้เวลานานที่สุดและจะลดลงตามลำดับสำหรับความเข้มข้นที่ลดลงคือ 25, 20, 15 และ 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร โดยในขอบเขตของความเข้มข้นที่ศึกษาพบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



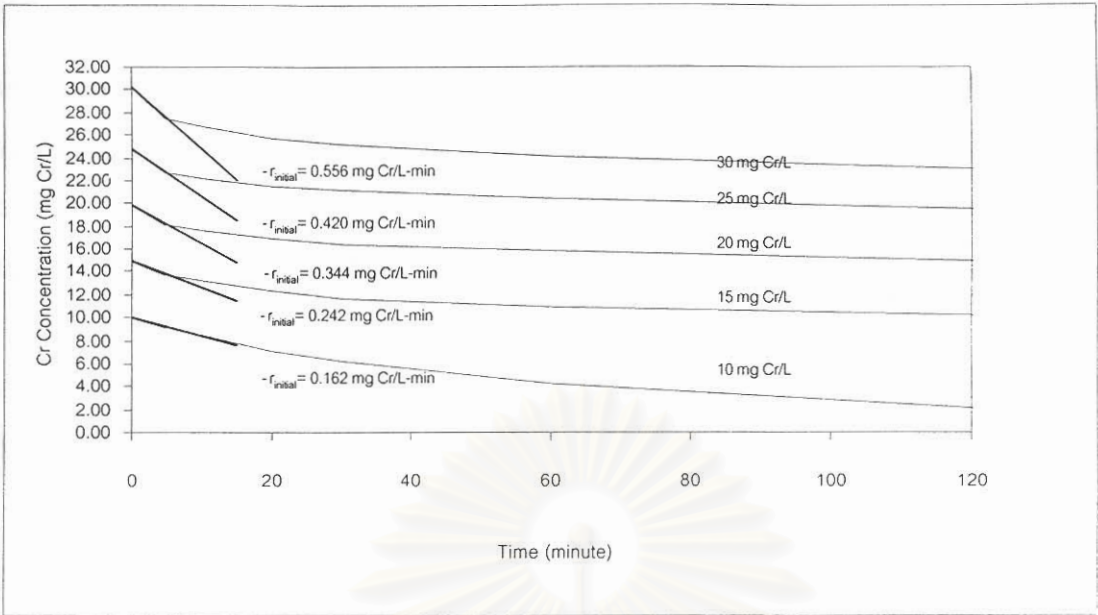
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



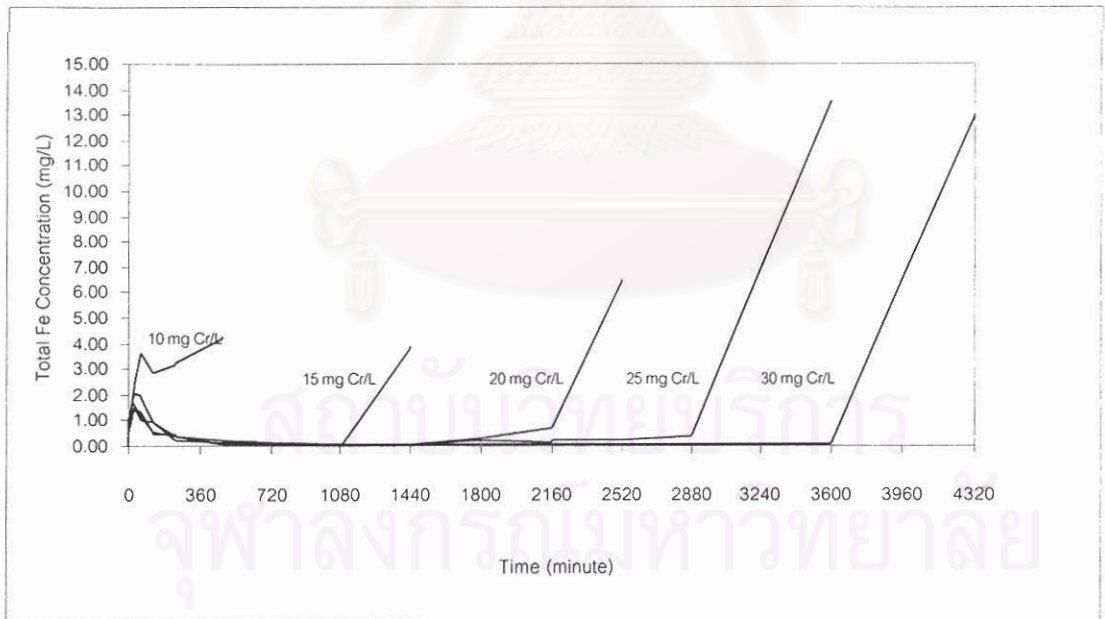
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัด เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดพบว่าตั้งแต่เริ่มต้นการทดลอง ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงช่วง 20 ถึง 60 นาทีแรก และพบตะกอนสนิมเหล็กบนกระดาษกรองน้อย หลังจากช่วงเวลาดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะลดลงและพบตะกอนของสนิมเหล็กบนกระดาษกรองมากขึ้น ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อใกล้ถึงจุดที่โครเมียมถูกกำจัดจนหมด และเพิ่มสูงสุดเมื่อโครเมียมถูกกำจัดจนหมดแล้ว แต่ก็ยังพบตะกอนของสนิมเหล็กบนกระดาษกรองมากขึ้นเช่นเดิม สาเหตุเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงตะไบเหล็กยังคงเกิดขึ้นอยู่แต่ไม่มีการตกตะกอนของโครเมียมเกิดขึ้นอีก เพราะโครเมียมถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนหมด เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดที่แต่ละสภาวะของความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นดังรูปที่ 4.22 พบว่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

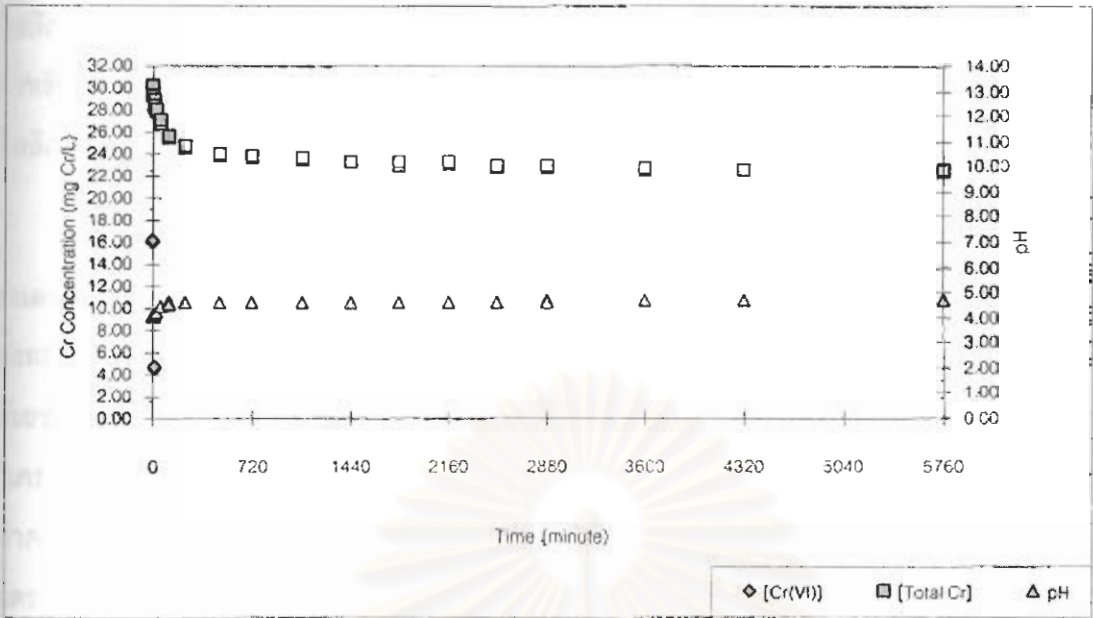
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช จะพิจารณาตั้งแต่ค่าพีเอชเริ่มต้นจนถึงค่าพีเอชของจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ เพราะหลังจากเวลาดังกล่าวค่าพีเอชจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงตะไบเหล็ก การศึกษาพบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาการกำจัดโครเมียมค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูงแต่ระยะเวลาในการกำจัดจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะต่ำลง

4.5 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอช

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร เป็นดังนี้

ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 4 ดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.24 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจาก 30.26 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 20 นาที แต่ยังมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนท์โครเมียม 28.34 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ซึ่งกำจัดได้ยากที่ค่าพีเอชนี้โดยใช้เวลา 5760 นาที ยังคงมีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอยู่สูงถึง 22.48



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

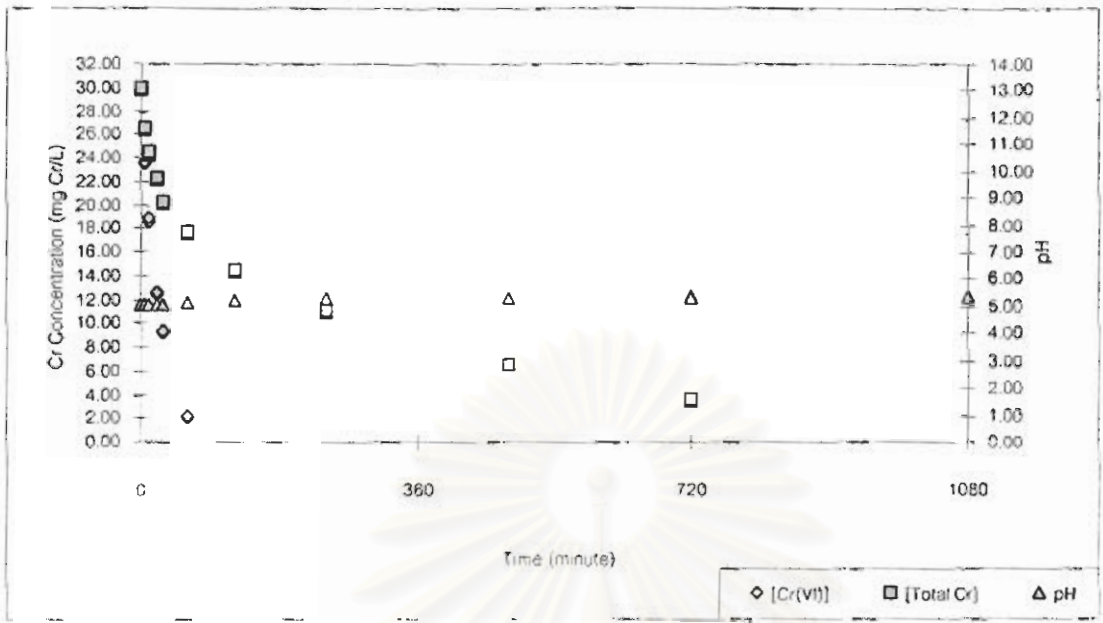
มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร โดยค่าพีเอชเปลี่ยนจาก 4.02 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 4.66 ที่เวลา 5760 นาที สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มการทดลองโดยเท่ากับ 13.53 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาที และเพิ่มขึ้นเป็น 16.59 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5760 นาที

ผลการศึกษาที่ค่าพีเอช 5 ดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.26 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจาก 29.92 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายใน 120 นาที แต่ยังคงมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนทีโครเมียมซึ่งสามารถถูกกำจัดได้หมดภายใน 1080 นาที โดยค่า พีเอชเปลี่ยนจาก 5.03 ณ จุดเริ่มต้น เป็น 5.32 ที่เวลา 720 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 1080 นาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5.36 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มการทดลอง โดยเท่ากับ 11.96 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาที และเพิ่มขึ้นเป็น 16.49 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 1080 นาที

ผลการศึกษาที่พีเอช 6 เป็นสภาวะการทดลองเดียวกับการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

ผลการศึกษาที่พีเอช 7 ดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.28 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้น้อยคือลดลงจาก 29.99 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร เหลือ 20.55 และ 21.33 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ที่เวลา 5760 นาทีตามลำดับโดยค่าพีเอชเปลี่ยนจาก 6.96 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 7.29 ที่เวลา 5760 นาที และไม่พบว่ามีเหล็กละลาย

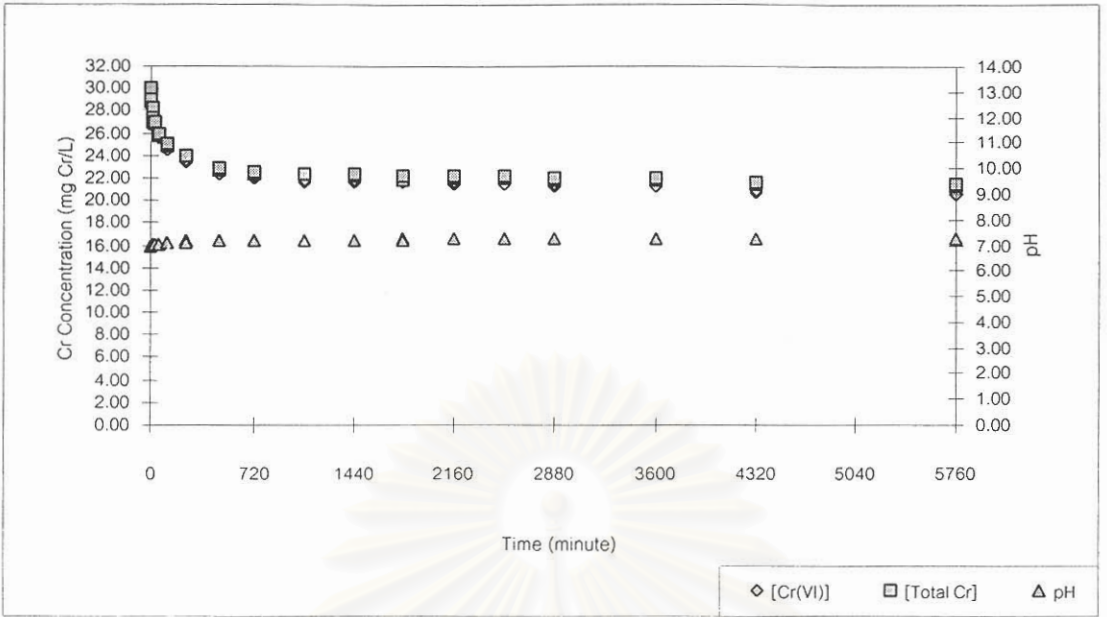
เมื่อนำผลการศึกษาที่ค่าพีเอชต่างๆ มาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.29 พบว่าที่ค่าพีเอช 4 มีอัตราการกำจัดเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสูงสุดคือ 2.842 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที และที่พีเอช 5, 6 และ 7 จะมีอัตราการกำจัดเริ่มต้นลดลงคือ 1.258, 0.556 และ 0.254 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาถึงการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและไตรวาเลนทีโครเมียมแล้ว พบว่าที่ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ดี แต่สามารถกำจัดโครเมียมทั้งหมดได้เพียง 45.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอช 5 และ 6 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดได้ทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพีเอช 6 จะใช้เวลาในการกำจัดสูงกว่าที่ค่าพีเอช 5 ส่วนที่ค่าพีเอช 7 นั้นผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้เพียง 31.48 เปอร์เซ็นต์ และ 28.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



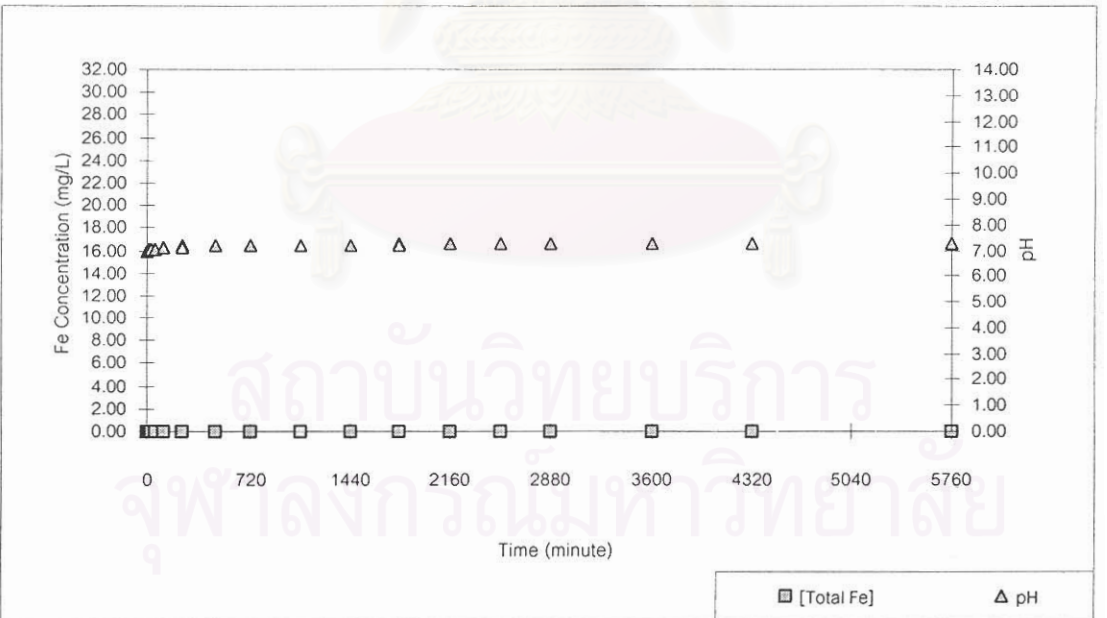
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



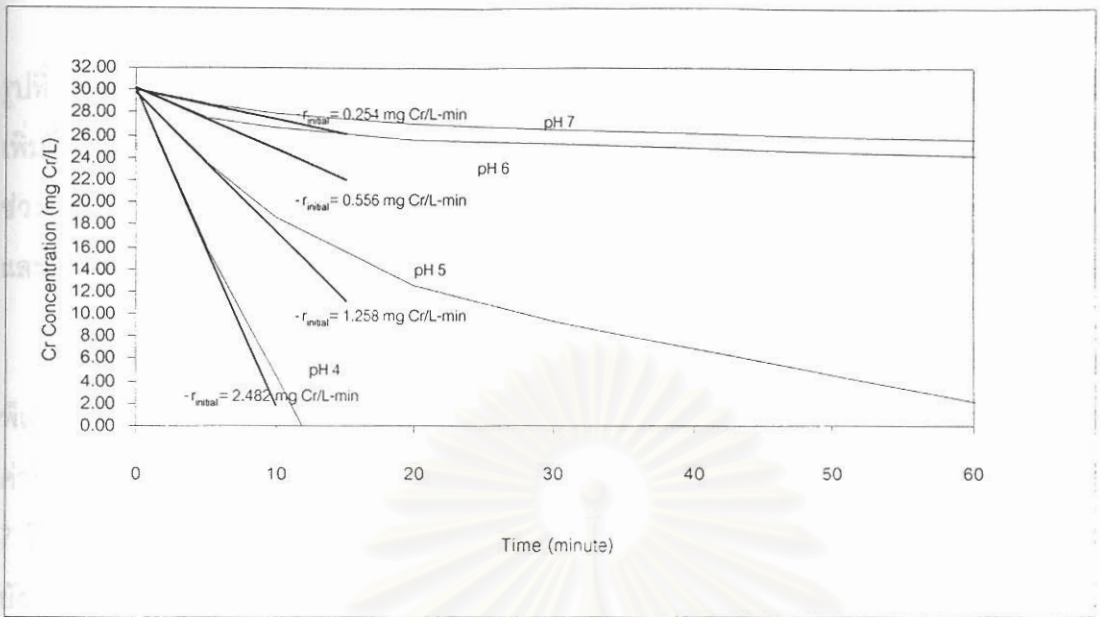
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



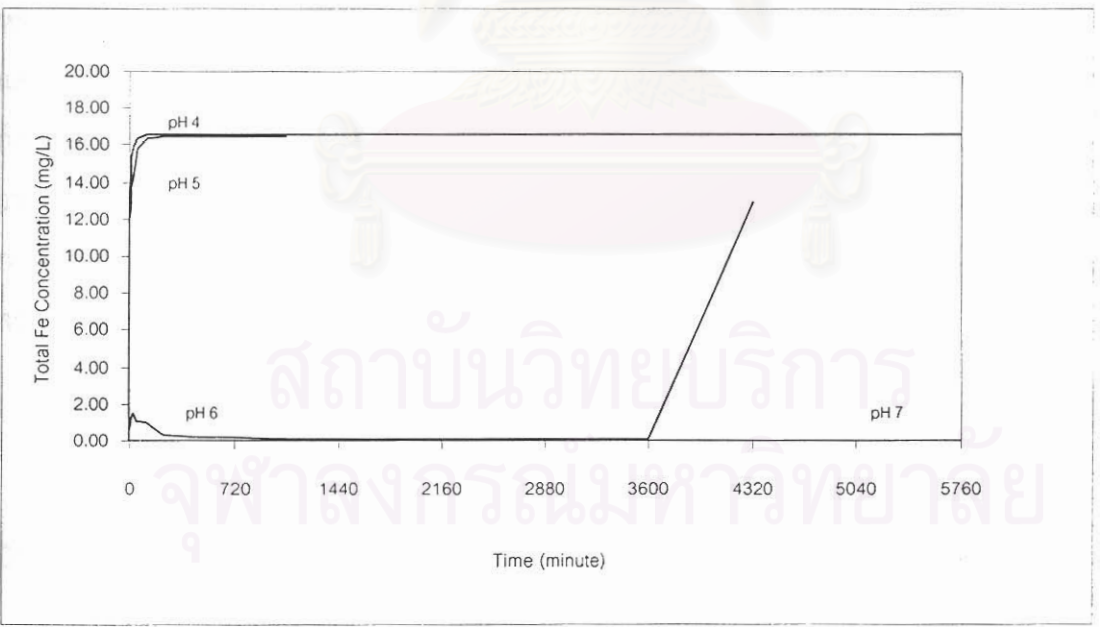
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัด เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนของความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าพีเอชต่างดังรูปที่ 4.30 พบว่ามีค่าพีเอช 4 และ 5 ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาแรกจากนั้นก็ลดลงและจะกลับเพิ่มขึ้นอีกเมื่อใกล้ถึงจุดที่โครเมียมถูกกำจัดจนหมดและเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อโครเมียมถูกกำจัดจนหมดแล้ว ส่วนที่ค่าพีเอช 7 ไม่พบว่ามีเหล็กละลาย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช พบว่าที่ค่าพีเอช 4 และ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีค่ามากเนื่องจากที่ค่าพีเอชดังกล่าวผงตะไบเหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงมาก ส่วนที่ค่าพีเอช 6 ค่าพีเอชมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และที่ค่าพีเอช 7 ถึงแม้ว่าผงตะไบเหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้น้อยแต่การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชก็ยังมีอยู่ สาเหตุเนื่องจากโซเดียมอะซิเตรท (CH_3COONa) ไม่สามารถเป็นบัฟเฟอร์ได้ดีที่ค่าพีเอชดังกล่าว

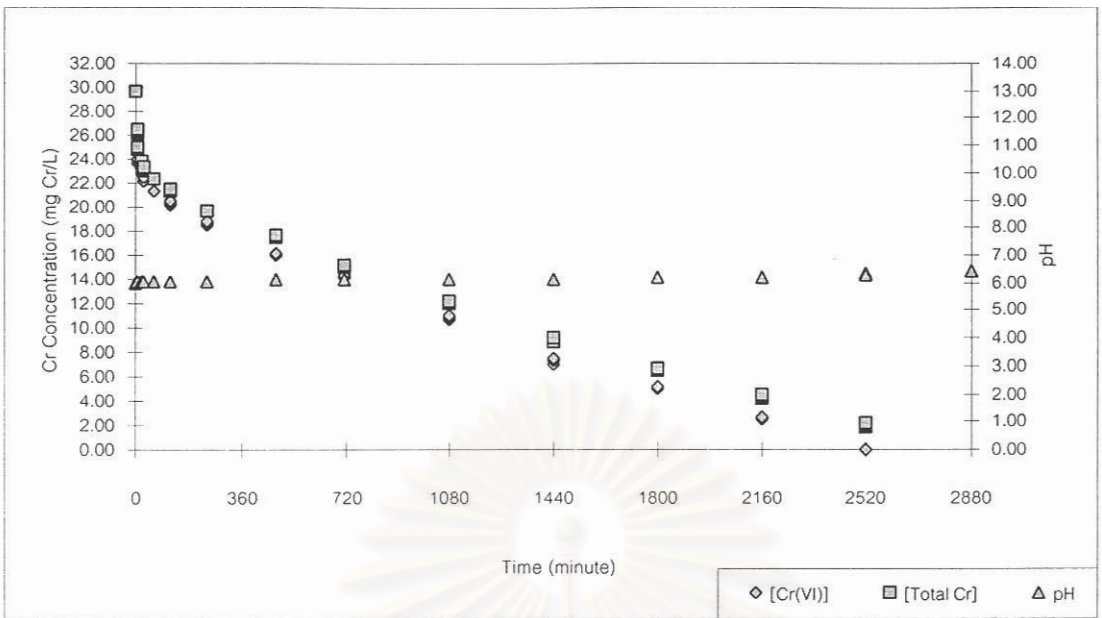
จากผลการศึกษาผลของค่าพีเอช สามารถสรุปได้ว่าเมื่อลดค่าพีเอช อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูง ระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดจะลดลง แต่ที่ค่าพีเอช 4 สามารถกำจัดได้เพียงเฮกซะวาเลนที่โครเมียมได้ดีเท่านั้น ในขณะที่ค่าพีเอช 7 การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดเกิดขึ้นได้ไม่ดี เพราะว่าที่ค่าพีเอชต่ำปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมเกิดขึ้นได้ดี แต่การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) ของไตรวาเลนที่โครเมียมเกิดขึ้นได้ยากจึงทำให้การกำจัดไตรวาเลนที่โครเมียมเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนที่ค่าพีเอชสูงถึงแม้ว่าการตกตะกอนทางเคมีของไตรวาเลนที่โครเมียมเกิดขึ้นได้ดี แต่ปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมเกิดขึ้นได้ไม่ดีจึงทำให้การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะสูงขึ้นเมื่อลดค่าพีเอช

4.6 ผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

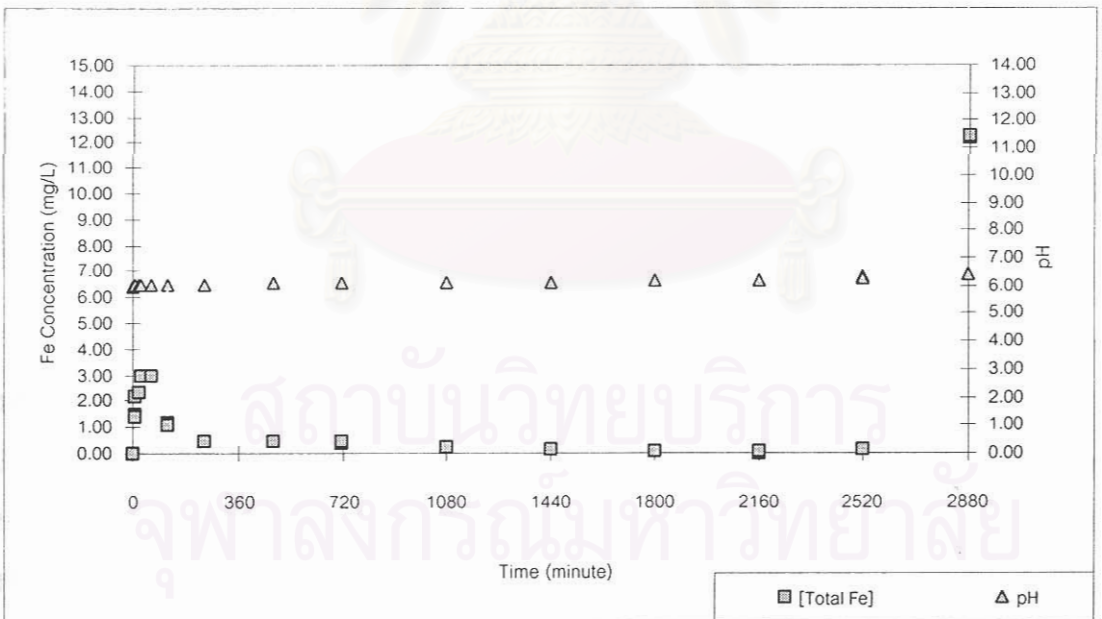
การศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 เป็นดังนี้

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร เป็นสภาวะการทดลองเดียวกับการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร ดังรูปที่ 4.31 ถึง 4.32 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดจาก 29.71 มิลลิกรัมโครเมียม/



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร

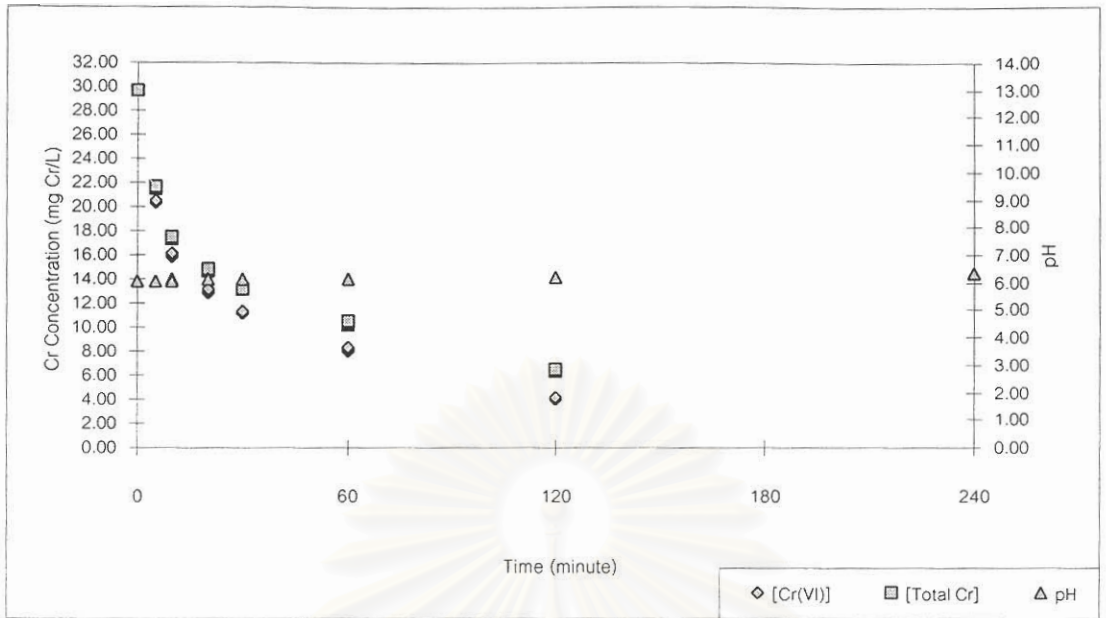
ลิตร ได้หมดภายในเวลา 2880 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 6.01 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 6.31 ที่เวลา 2520 นาทีซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 2880 นาที พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.43 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเปลี่ยนแปลงจาก 1.43 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาทีเป็น 0.17 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 2520 นาที และเป็น 12.23 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 2880 นาที

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 5 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 4.33 ถึง 4.34 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและโครเมียมทั้งหมดจาก 29.63 มิลลิกรัม/ลิตร ได้หมดภายในเวลา 240 นาที โดยค่าพีเอชจะเปลี่ยนจาก 6.03 ณ จุดเริ่มต้นเป็น 6.19 ที่เวลา 120 นาทีซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 240 นาที พบว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.34 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดเปลี่ยนแปลงจาก 6.41 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาทีเป็น 6.01 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 120 นาที และเป็น 12.48 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 240 นาที

ผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร ดังรูปที่ 4.35 ถึง 4.36 พบว่าผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจาก 29.28 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ได้หมดภายใน 20 นาที แต่ยังคงมีโครเมียมทั้งหมดเหลืออยู่ในรูปไตรวาเลนท์โครเมียมซึ่งสามารถถูกกำจัดได้หมดภายใน 60 นาที โดยค่าพีเอชเปลี่ยนจาก 6.01 ณ จุดเริ่มต้น เป็น 6.24 ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมได้ แต่ที่เวลา 60 นาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.40 สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มการทดลอง โดยเท่ากับ 11.84 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 5 นาที และเพิ่มขึ้นเป็น 27.96 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลา 60 นาที

เมื่อนำผลการศึกษาที่ปริมาณผงตะไบเหล็กต่างๆ มาเปรียบเทียบกับดังรูปที่ 4.37 พบว่าที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร มีอัตราการกำจัดเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสูงสุดคือ 3.508 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที และที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 5, 2 และ 1 กรัม/ลิตร จะมีอัตราการกำจัดเริ่มต้นลดลงคือ 1.864, 0.860 และ 0.556 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร-นาที ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมพบว่าที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร จะใช้เวลานานที่สุดและจะลดลงตามลำดับสำหรับปริมาณผงตะไบเหล็กที่เพิ่มขึ้นคือ 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร

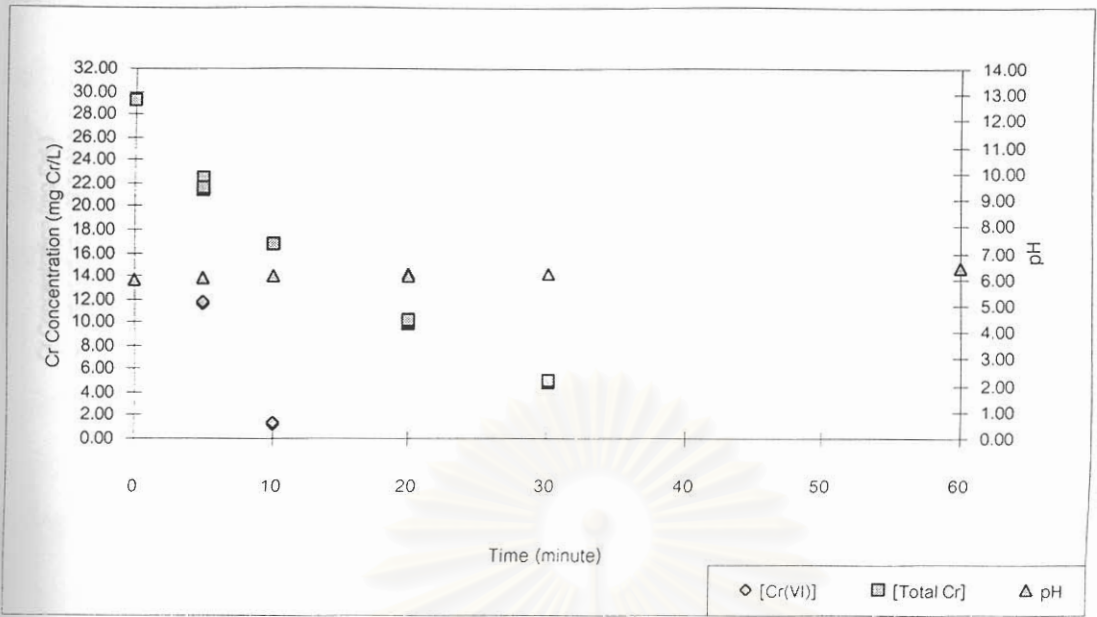
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดที่ปริมาณของตะไบเหล็กต่างๆ ดังรูปที่ 4.38 พบว่าที่ปริมาณผลตะไบเหล็ก 1 และ 2 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นจะลดลงและกลับเพิ่มขึ้นอีกเมื่อใกล้ถึงจุดที่



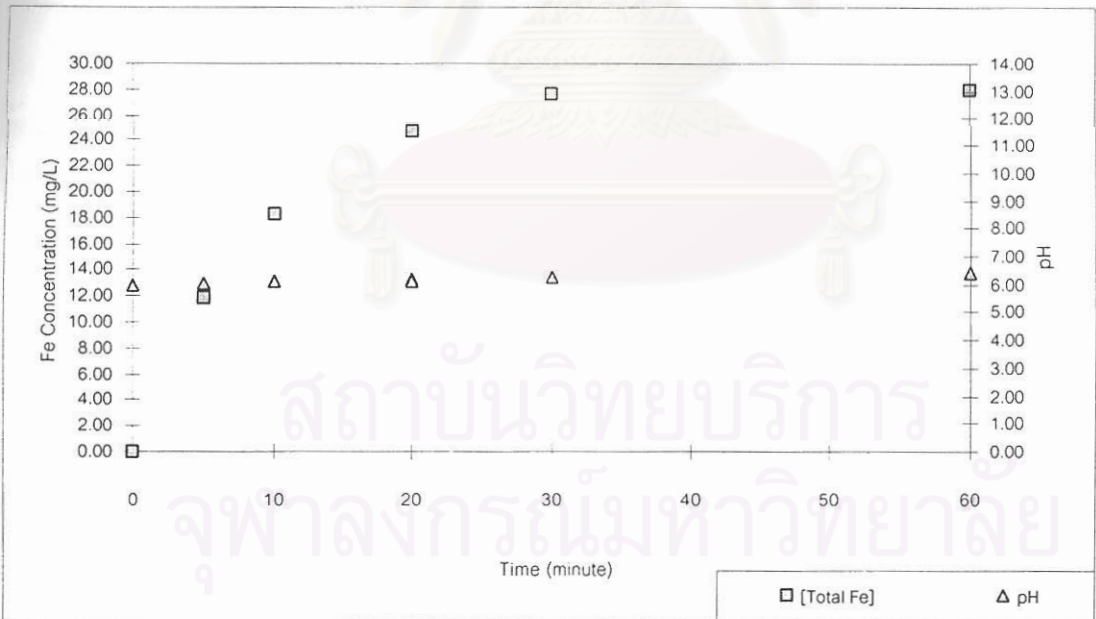
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร



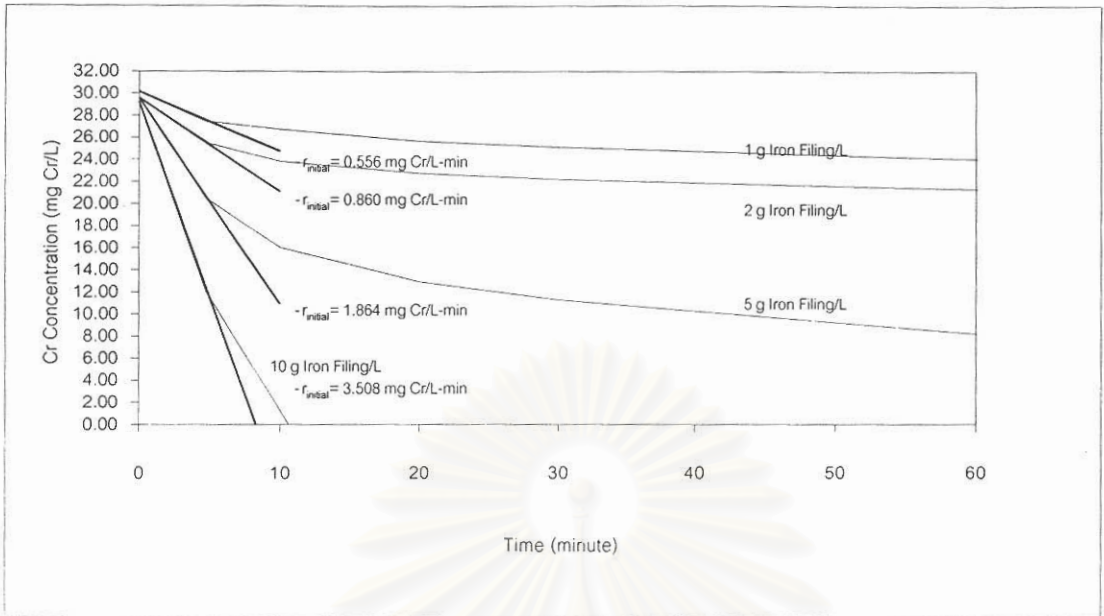
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร



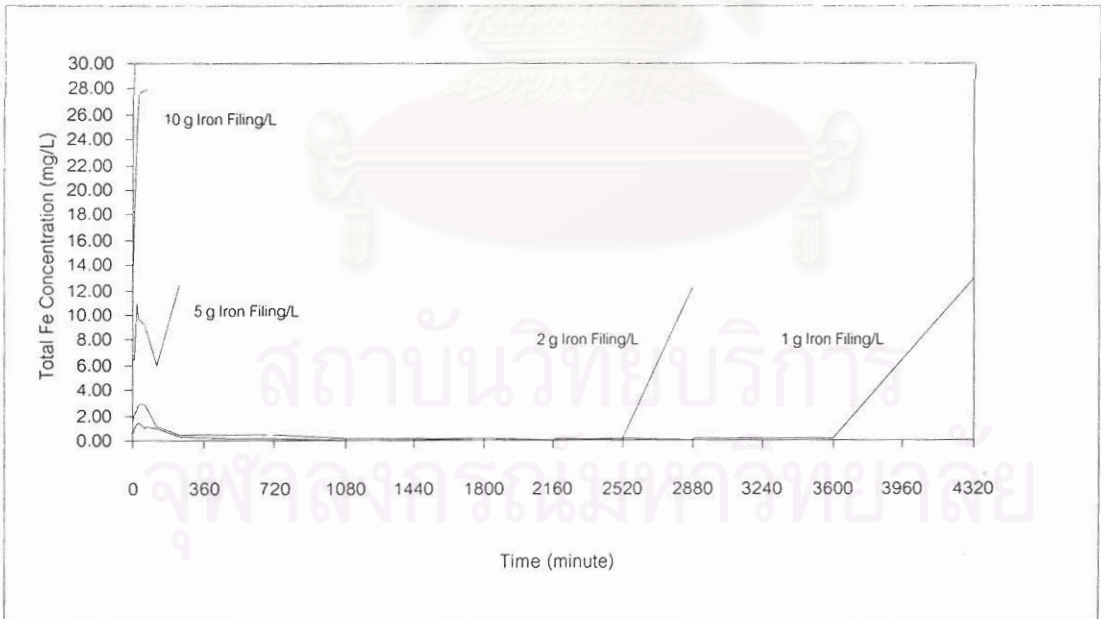
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่า [Cr(VI)] [Total Cr] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่า [Total Fe] และ pH ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าอัตราการกำจัด เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบค่า [Total Fe] ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร

โครเมียมถูกกำจัดจนหมดและเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อโครเมียมถูกกำจัดจนหมดแล้ว ส่วนที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 และ 2 กรัม/ลิตร เพียงแต่ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูงตั้งแต่ 5 นาทีแรก ส่วนที่ปริมาณของผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดมีค่าสูง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชพบว่า ที่ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีค่าน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีมากขึ้น เพราะว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงตะไบเหล็กมากขึ้น

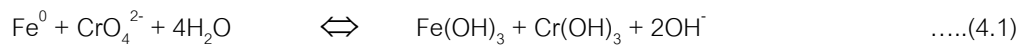
จากผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็กสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผลตะไบเหล็ก อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูง ระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดจะลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะสูงขึ้น

4.7 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์

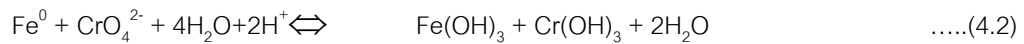
ในขอบเขตของการศึกษาพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร มีความเหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมถึงแม้ว่าที่สภาวะดังกล่าวจะใช้เวลานานที่สุดถึง 4320 นาที หรือ 3 วัน เพื่อให้ประสิทธิภาพกำจัดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับสภาวะอื่นที่ประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดพบว่าที่สภาวะดังกล่าวมีความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดไม่เกิน 1.52 มิลลิกรัม/ลิตรซึ่งต่ำกว่าที่สภาวะอื่นๆ

4.8 ผลการศึกษากฎการเคลื่อนที่ (Kinetic Equation) ของปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ผลของค่าพีเอช และผลของปริมาณของผงตะไบเหล็ก ทำให้สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น ค่าพีเอช และปริมาณผงตะไบเหล็กมีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม ดังสมการ (Powell และคณะ ,1995)



หรือ



ฉะนั้นสมมติฐานของสมการคิเนติก (Kinetic Equation) ของปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจึงเป็นดังนี้

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = k [\text{Cr(VI)}]^a [\text{H}^+]^b \{\text{Fe}^0\}^c \quad \dots(4.3)$$

จะได้ว่า

$$\log(-d[\text{Cr(VI)}] / dt) = \log k + a \log([\text{Cr(VI)}]) + b \log([\text{H}^+]) + c \log(\{\text{Fe}^0\}) \quad \dots(4.4)$$

เมื่อพิจารณาที่อัตราการกำจัดเริ่มต้น (Initial Removal Rate; $-r_{\text{initial}}$) (Levenspiel, 1972) จะได้ว่า

$$\log(-r_{\text{initial}}) = \log k + a \log([\text{Cr(VI)}]_{\text{initial}}) + b \log([\text{H}^+]_{\text{initial}}) + c \log(\{\text{Fe}^0\}_{\text{initial}}) \quad \dots(4.5)$$

จากตารางที่ 4.3 แสดงอัตราการกำจัดเริ่มต้นที่สภาวะต่างๆ ของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([\text{Cr(VI)}]_{\text{initial}})$ กับ $\log(-r_{\text{initial}})$ ดังรูปที่ 4.39 พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งค่าความชันก็คือค่า a เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.5 ฉะนั้นจึงได้ว่าค่า a เท่ากับ 1.11

จากตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการกำจัดเริ่มต้นที่สภาวะต่างๆ ของค่าพีเอช เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([\text{H}^+]_{\text{initial}})$ กับ $\log(-r_{\text{initial}})$ ดังรูปที่ 4.40 พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเช่นกัน ซึ่งความชันคือค่า b เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.5 ฉะนั้นจึงได้ว่า ค่า b เท่ากับ 0.35

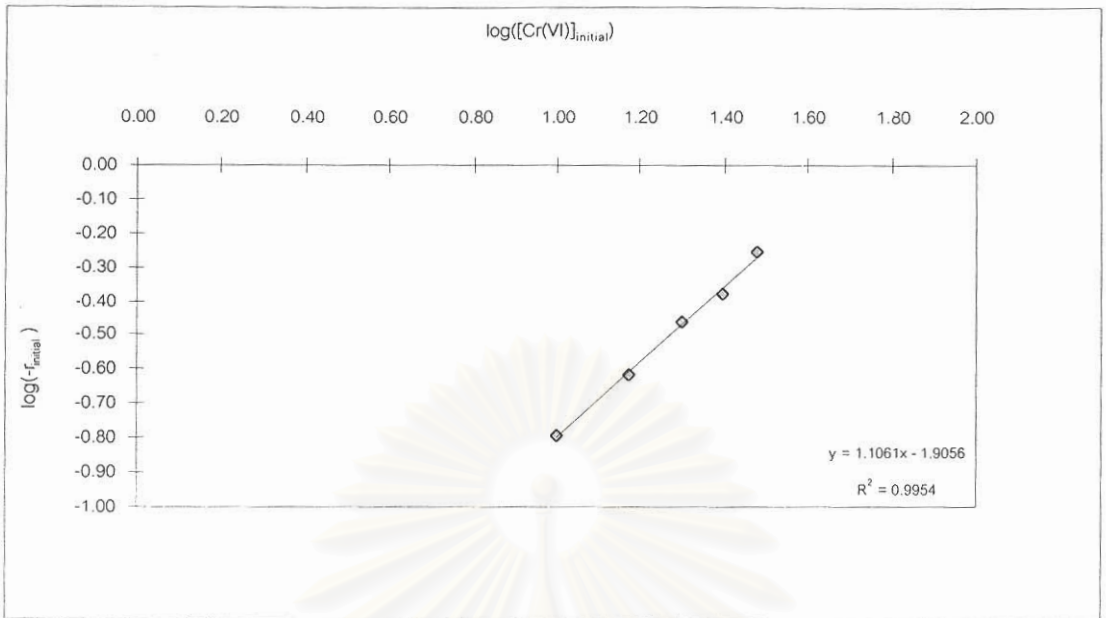
ในลักษณะเดียวกัน จากตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการกำจัดเริ่มต้นที่สภาวะต่างๆ ของปริมาณผงตะไบเหล็ก เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\{\text{Fe}^0\}_{\text{initial}})$ กับ $\log(-r_{\text{initial}})$ ดังรูปที่ 4.41 พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเช่นกัน ซึ่งความชันก็คือค่า c เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.5 ฉะนั้นจึงได้ว่าค่า c เท่ากับ 0.81

ดังนั้นสมการของปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจึงเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Condition	$-r_{Cr(VI)}$ (mg Cr/L-min)	$\log([Cr(VI)]_{t=0})$	$\log(-r_{Cr(VI)})$
10 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.162	1.00	-0.79
15 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.242	1.18	-0.62
20 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.344	1.30	-0.46
25 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.420	1.40	-0.38
30 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.556	1.48	-0.25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



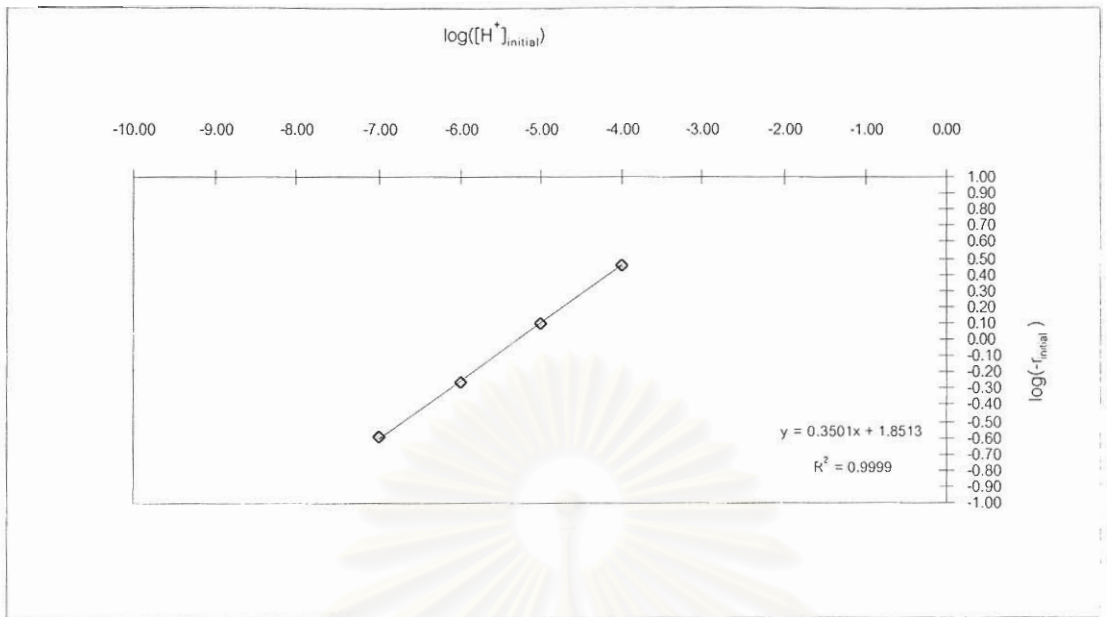
รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([\text{Cr(VI)}]_{\text{initial}})$ กับ $\log(-r_{\text{initial}})$ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Condition	$-r_{\text{initial}}$ (mg Cr/L-min)	$\log([H^+]_{\text{initial}})$	$\log(-r_{\text{initial}})$
30 mg Cr/L, pH4, 1 g Iron Filing/L	2.842	-4.00	0.45
30 mg Cr/L, pH5, 1 g Iron Filing/L	1.258	-5.00	0.10
30 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.556	-6.00	-0.25
30 mg Cr/L, pH7, 1 g Iron Filing/L	0.254	-7.00	-0.60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log([H^+]_{\text{initial}})$ กับ $\log(-r_{\text{initial}})$ เมื่อความเข้มข้นของเสกชะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4, 5, 6 และ 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

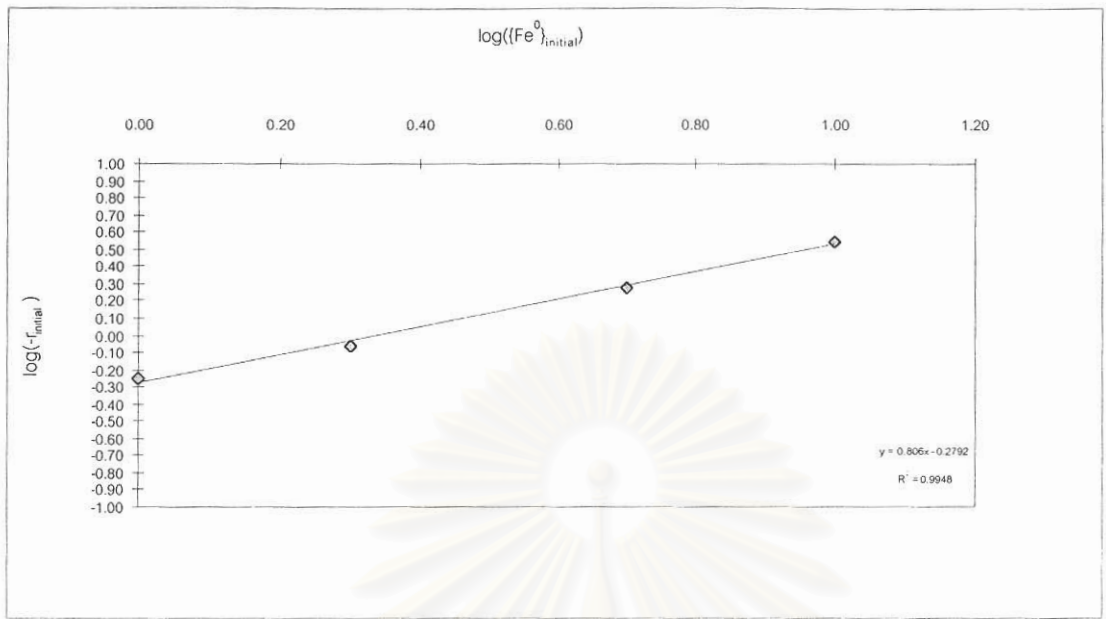
ตารางที่ 4.5

ข้อมูลอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร

Condition	$-r_{\text{initial}}$ (mg Cr/L-min)	$\log(\{\text{Fe}^0\}_{\text{initial}})$	$\log(-r_{\text{initial}})$
30 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.556	0.00	-0.25
30 mg Cr/L, pH6, 2 g Iron Filing/L	0.860	0.30	-0.07
30 mg Cr/L, pH6, 5 g Iron Filing/L	1.864	0.70	0.27
30 mg Cr/L, pH6, 10 g Iron Filing/L	3.508	1.00	0.55



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log((Fe^0)_{initial})$ กับ $\log(-r_{initial})$ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช และ ผงตะไบเหล็ก 1, 2, 5 และ 10 กรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = k [\text{Cr(VI)}]^{1.11} [\text{H}^+]^{0.35} \{\text{Fe}^0\}^{0.81}$$
(4.6) แทนค่า r_{initial} , $[\text{Cr(VI)}]_{\text{initial}}$, $[\text{H}^+]_{\text{initial}}$ และ $\{\text{Fe}^0\}_{\text{initial}}$ ที่สภาวะต่างๆ ในการทดลองลงในสมการ 4.6 เพื่อหาค่า k ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยที่ได้เท่ากับ $1.55 (\text{mgCr/L})^{-0.11} \text{M}^{0.35} (\text{g/L})^{-0.81}$ เมื่อแทนค่า k ลงในสมการ 4.6 จะได้

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = 1.55 [\text{Cr(VI)}]^{1.11} [\text{H}^+]^{0.35} \{\text{Fe}^0\}^{0.81} \quad \text{.....(4.7)}$$

หรือ

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = K [\text{Cr(VI)}]^{1.11} ; K = 1.55 [\text{H}^+]^{0.35} \{\text{Fe}^0\}^{0.81} \quad \text{.....(4.8)}$$

ได้ว่า

$$[\text{Cr(VI)}]_t = ((0.11Kt + ([\text{Cr(VI)}]_{\text{initial}})^{-0.11})^{-1/0.11}) \quad \text{.....(4.9)}$$

เมื่อนำสมการที่ 4.9 ไปสร้างกราฟแสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เวลาต่างๆ ของแต่ละสภาวะดังรูปที่ 4.42 ถึง 4.52 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองในบางสภาวะเท่านั้น คือที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร ส่วนที่สภาวะอื่นๆ ค่าทั้งสองจะใกล้เคียงกันในช่วงเวลาแรกเท่านั้น และค่าจะแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมการคินติกมาจากอัตราการกำจัดเริ่มต้น ไม่ได้มาจากอัตราทั้งหมด (Overall Rate) ซึ่งในช่วงเวลาแรกปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มจากสภาวะที่ยังไม่มีเหล็กละลายในระบบดังนั้นสมการที่ 4.7 จึงควรใช้ในช่วงเวลาแรกๆ เท่านั้นและไม่เหมาะที่จะใช้หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมของสภาวะที่ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนานๆ แต่สมการดังกล่าวเหมาะที่จะใช้หาอัตราการกำจัดเริ่มต้นเพื่อดูว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่

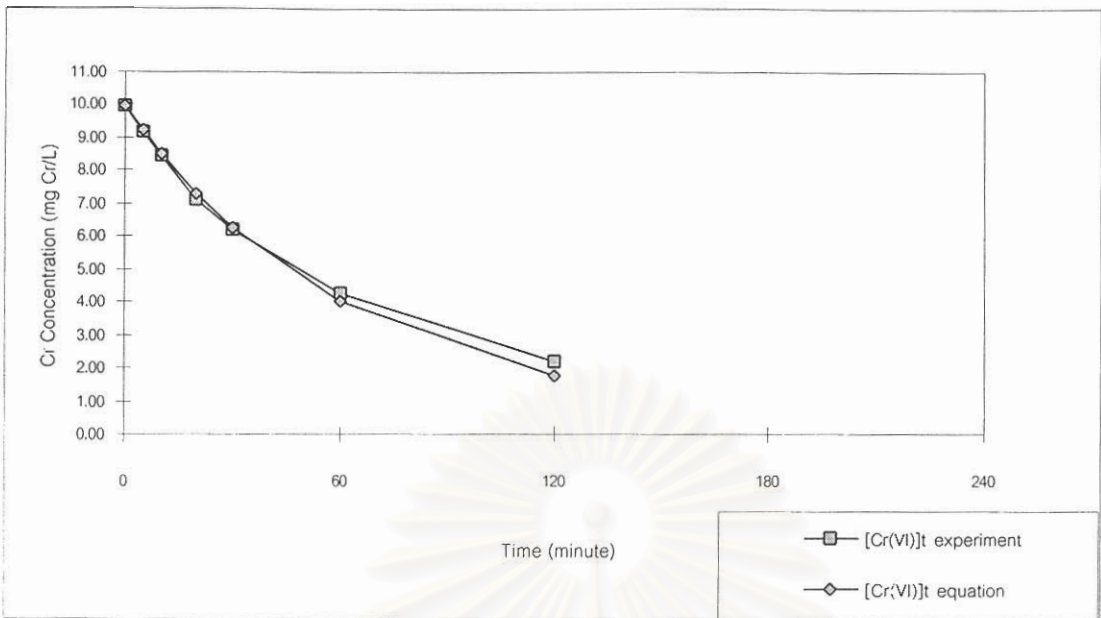
ส่วนที่ค่าพีเอช 4 และ 7 เป็นข้อจำกัดของการใช้หาอัตราการกำจัดเริ่มต้นเนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวการกำจัดโครเมียมเกิดขึ้นได้ไม่ดี

การศึกษา Sensitivity Analysis ดังแสดงในตารางที่...ของสมการหาอัตราการกำจัดเริ่มต้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมากที่สุดคือเพิ่มขึ้นประมาณ 124 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดค่าพีเอชจาก 6 เป็น 5 รองลงมาคือการเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมขึ้น 1 เท่า

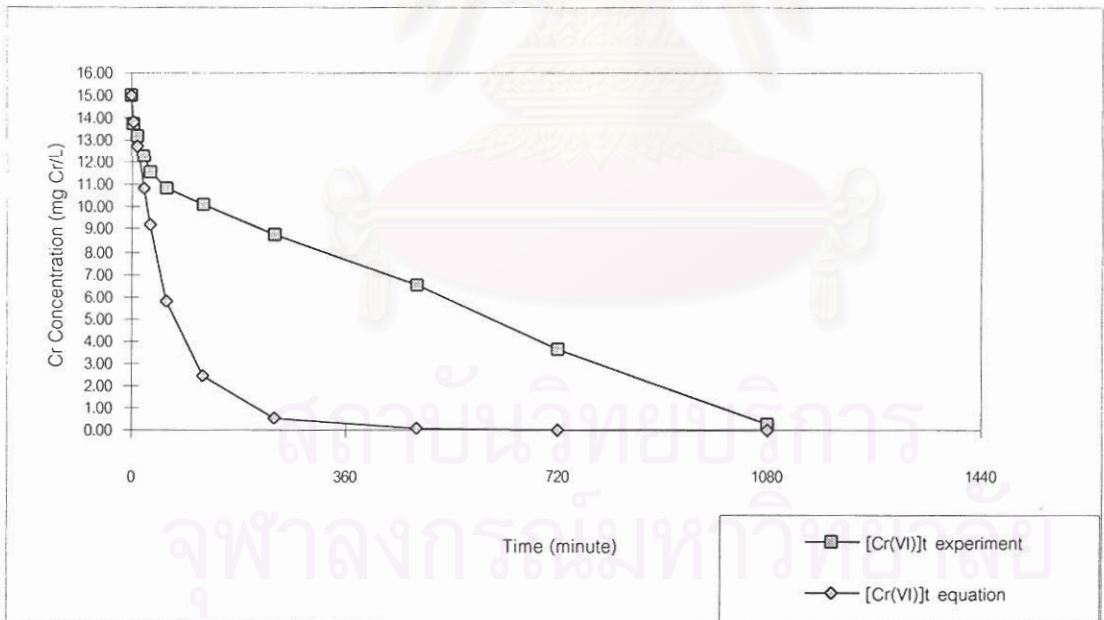
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลค่า k ที่สภาวะต่างๆในขอบเขตของการวิจัย

Condition	$-r_{initial}$ (mg Cr/L-min)	k $((\text{mg Cr/L})^{-0.11} \text{M}^{-0.35} (\text{g/L})^{-0.81})$
10 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.162	1.58
15 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.242	1.51
20 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.344	1.56
25 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.420	1.48
30 mg Cr/L, pH6, 1 g Iron Filing/L	0.556	1.60
30 mg Cr/L, pH4, 1 g Iron Filing/L	2.842	1.64
30 mg Cr/L, pH5, 1 g Iron Filing/L	1.258	1.62
30 mg Cr/L, pH7, 1 g Iron Filing/L	0.254	1.64
30 mg Cr/L, pH6, 2 g Iron Filing/L	0.860	1.42
30 mg Cr/L, pH6, 5 g Iron Filing/L	1.864	1.46
30 mg Cr/L, pH6, 10 g Iron Filing/L	3.508	1.57
Average		1.55

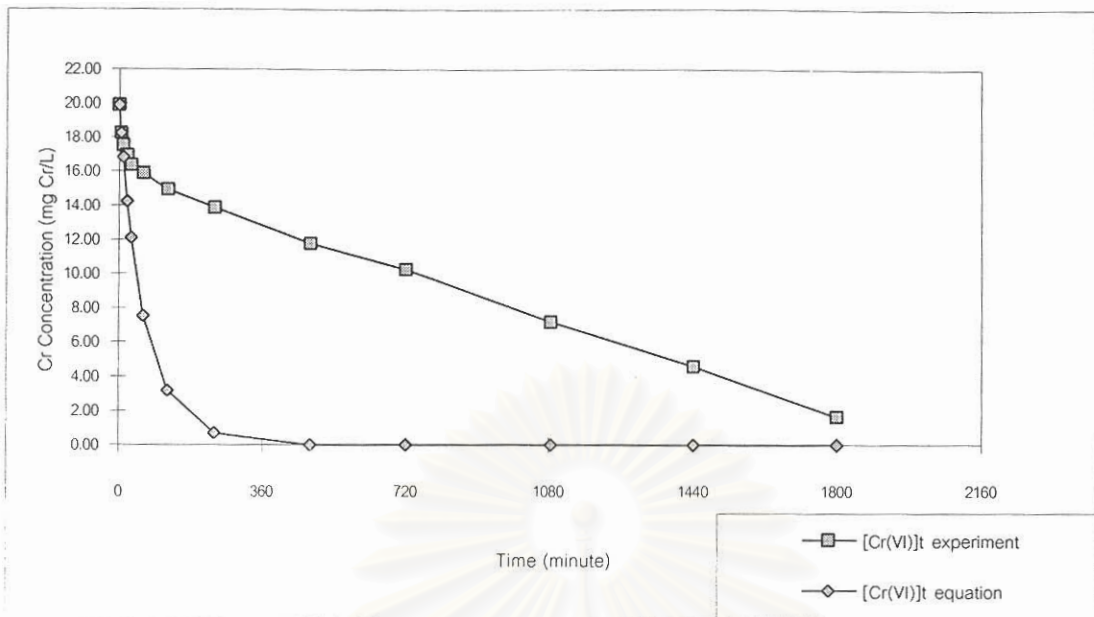
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



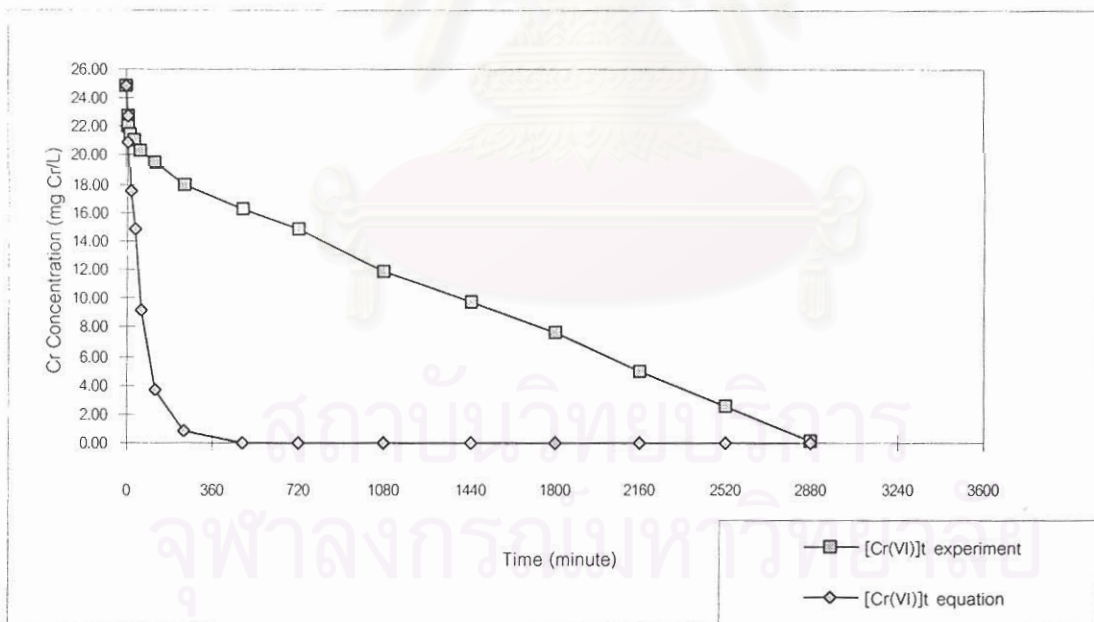
รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



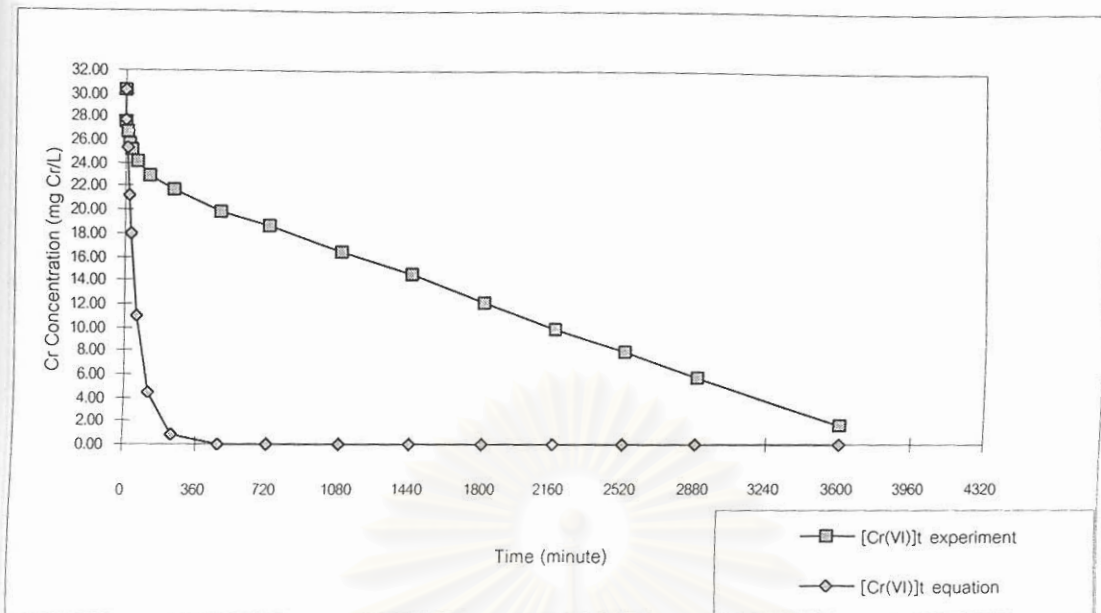
รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



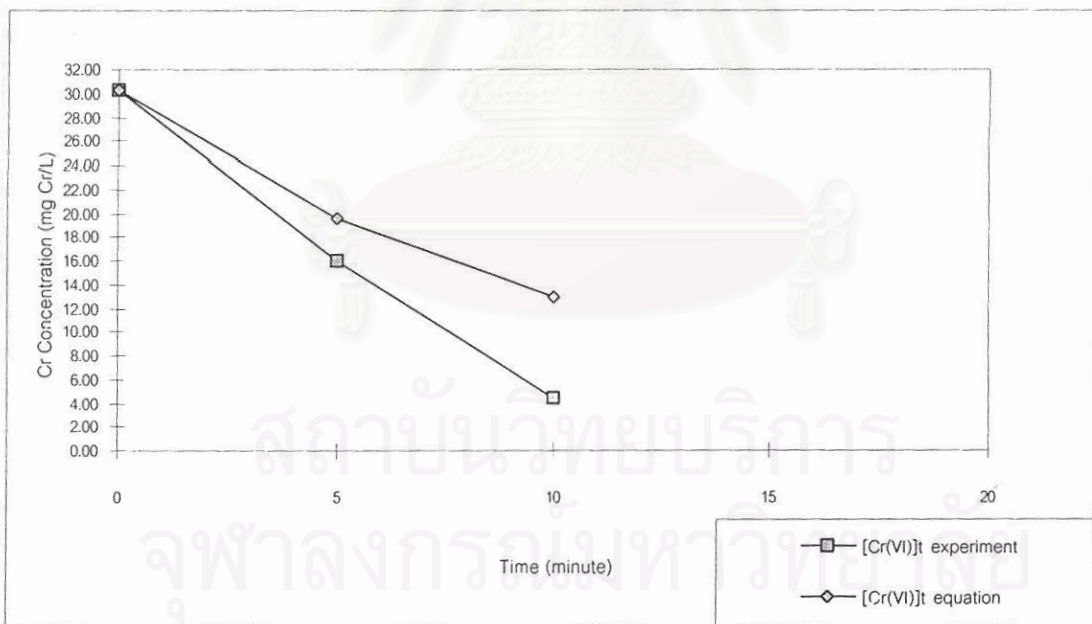
รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



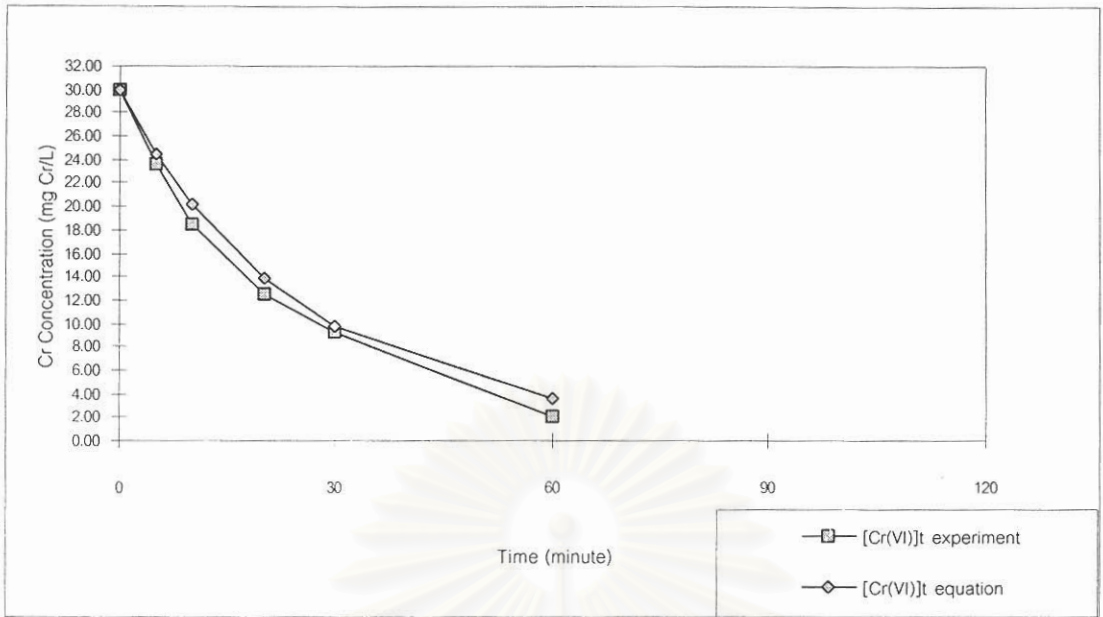
รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



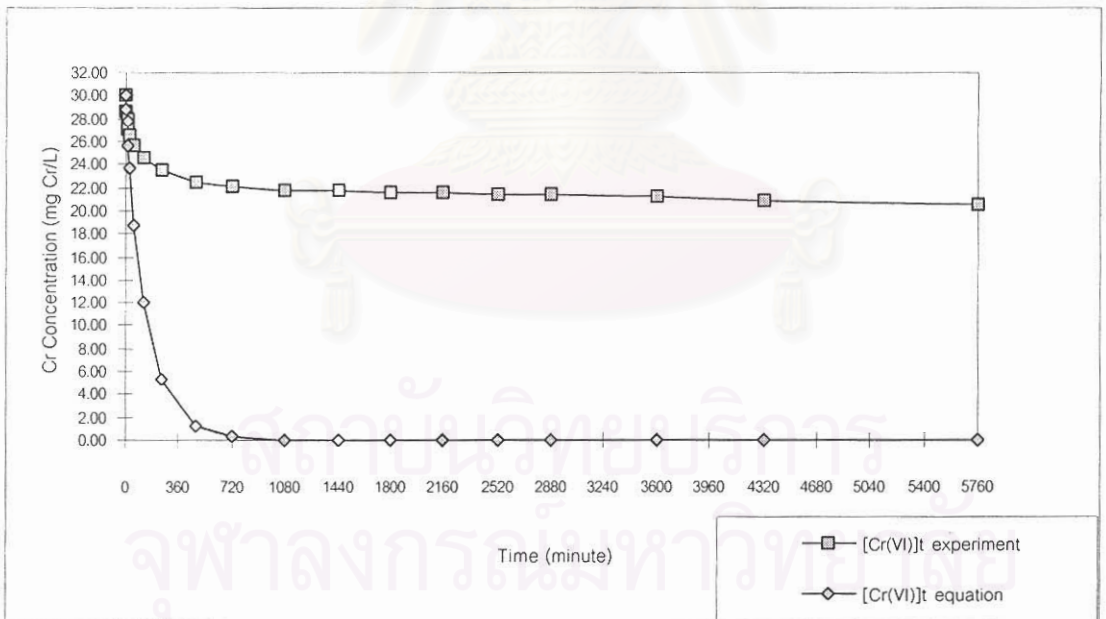
รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



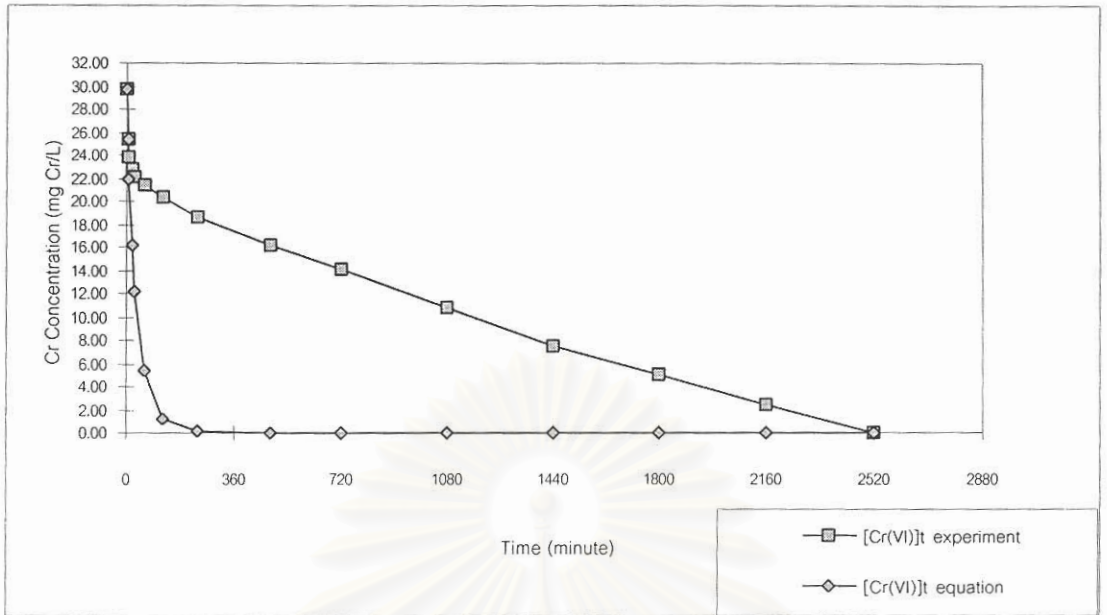
รูปที่ 4.47 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง [Cr(VI)] จากผลการทดลองกับ [Cr(VI)] จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



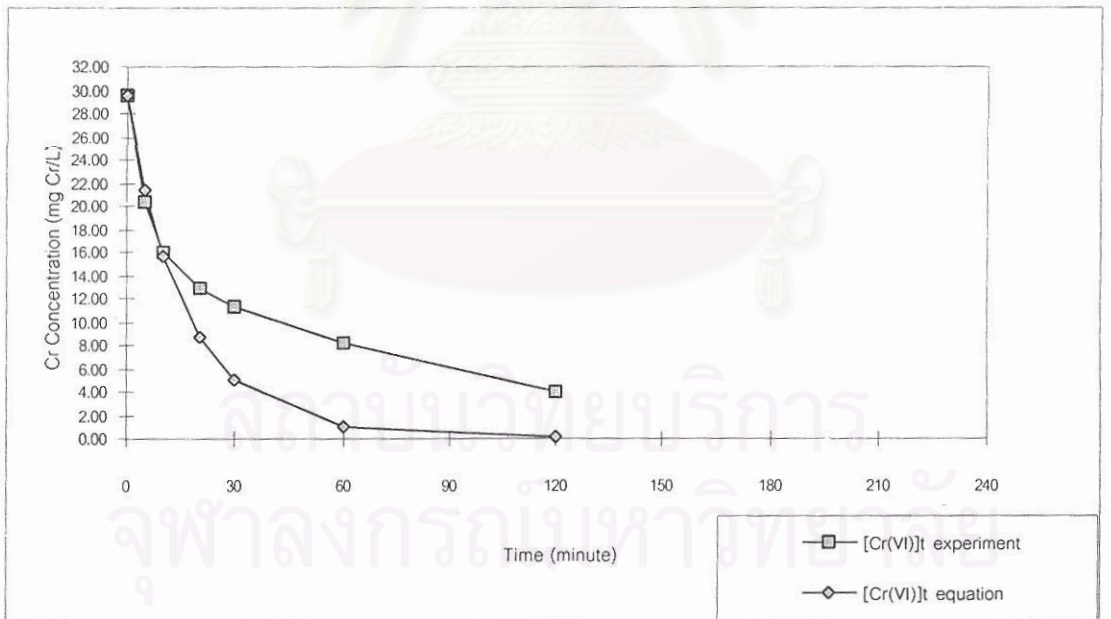
รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]_t$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]_t$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



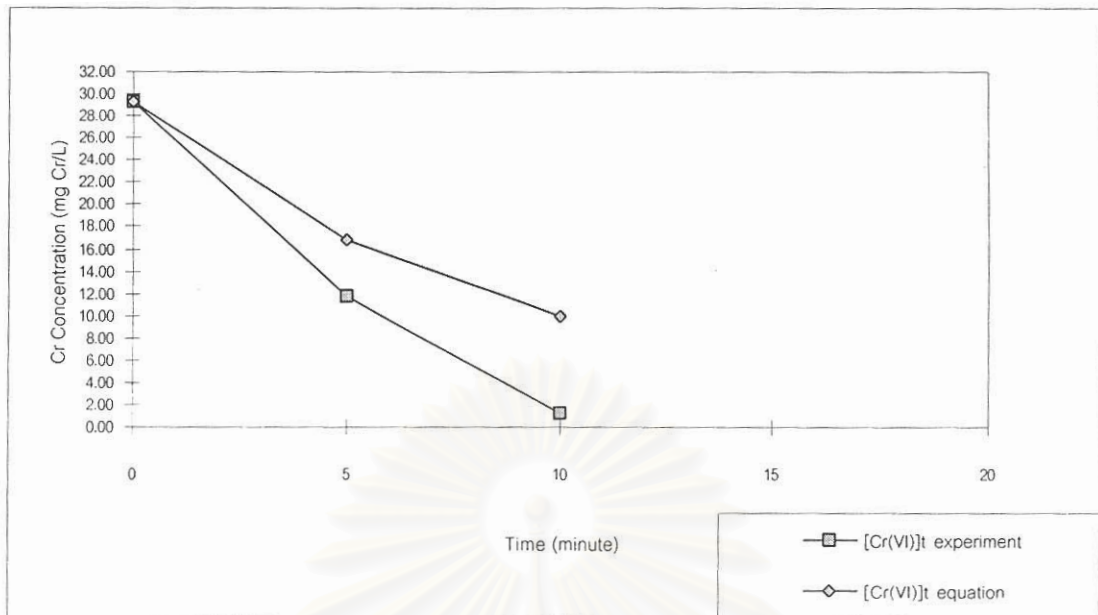
รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]_t$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]_t$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร



รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง $[Cr(VI)]_t$ จากผลการทดลองกับ $[Cr(VI)]_t$ จากการคำนวณด้วยสมการ ที่เวลาต่างๆ เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 อัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น จากการคำนวณด้วยสมการ คินติก

	Initial Cr(VI) Removal Rate (mg Cr/L-min)			
	1 g Iron Filing/L		2 g Iron Filing/L	
	pH5	pH6	pH5	pH6
10 mgCr/L	0.355	0.159	0.623	0.278
20 mgCr/L	0.766	0.342	1.344	0.600

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อลดค่าพีเอชจาก 6 เป็น 5

	% Increasing of Initial Cr(VI) Removal Rate	
	1 g Iron Filing/L	2 g Iron Filing/L
10 mgCr/L	123.27	124.10
20 mgCr/L	123.98	124.00

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมขึ้น 1 เท่า

	% Increasing of Initial Cr(VI) Removal Rate	
	1 g Iron Filing/L	2 g Iron Filing/L
pH5	115.77	115.73
pH6	115.09	115.83

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น
เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กขึ้น 1 เท่า

	% Increasing of Initial Cr(VI) Removal Rate	
	pH5	pH6
10 mgCr/L	75.49	74.84
20 mgCr/L	75.46	75.44



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะทำให้อัตราการกำจัดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประมาณ 116 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็ก
ขึ้น 1 เท่า จะทำให้อัตราการกำจัดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สารประกอบออกไซด์ของเหล็กที่เกิดขึ้นบนผิวผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลอง คือ Maghemite และ Goethite และไตรวาเลนทีโครเมียมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมถูกกำจัดออกโดยการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก หรือถูกดูดติดบนผิวสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก

2. ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น มีผลต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูงขึ้น แต่เวลาในการกำจัดจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีมากขึ้น และความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะต่ำ

3. ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม คือ เมื่อลดค่าพีเอช อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูงขึ้น เวลาในการกำจัดจะลดลง แต่ที่ค่าพีเอช 4 สามารถกำจัดได้เพียงเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ดีเท่านั้น ในขณะที่ค่าพีเอช 7 การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดเกิดขึ้นได้ไม่ดี เพราะว่าที่ค่าพีเอชต่ำปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ดี แต่การตกตะกอนทางเคมีของไตรวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ยากจึงทำให้การกำจัดไตรวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนที่ค่าพีเอชสูงถึงแม้ว่าการตกตะกอนทางเคมีของไตรวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ดี แต่ปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเกิดขึ้นได้ไม่ดีจึงทำให้ การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่วนความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะสูงขึ้นเมื่อลดค่าพีเอช

4. ปริมาณผงตะไบเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพของเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียม คือ เมื่อเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็ก อัตราการกำจัดเริ่มต้นจะมีค่าสูงขึ้น เวลาในการกำจัดลดลง การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีมากขึ้น และความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น

5. ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม ค่าพีเอช 6 และ ปริมาณผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วย เหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ ในขอบเขตของการวิจัยนี้ โดยสามารถกำจัดได้ทั้งเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและโครเมียมทั้งหมดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และมีความเข้มข้นของเหล็กละลายทั้งหมดไม่เกิน 1.52 มิลลิกรัม/ลิตร ในระหว่างบำบัด

6. สมการคิเนติกของปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ คือ

$$-d[\text{Cr(VI)}] / dt = k[\text{Cr(VI)}]^{1.11}[\text{H}^+]^{0.35}\{\text{Fe}^0\}^{0.81}; k = 1.55 (\text{mgCr/L})^{-0.11}\text{M}^{-0.35}(\text{g/L})^{-0.81}$$

สมการดังกล่าวเหมาะสำหรับการหาอัตราการกำจัดเริ่มต้นเพื่อดูว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยผงตะไบเหล็กผสมรวมกับทรายในลักษณะคอลัมน์ เพื่อแก้ปัญหาความเข้มข้นเหล็กละลายทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นสูงเมื่อโครเมียมถูกกำจัดหมดแล้ว โดยพารามิเตอร์ที่ควรศึกษาเพิ่มเติมได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสียผ่านตัวกลาง ความสูงของชั้นตัวกลาง และอัตราส่วนผสมของผงตะไบเหล็กกับทราย เป็นต้น

2. ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยผงตะไบเหล็กในน้ำเสียที่มีโลหะหนักตัวอื่นที่มักพบร่วมกัน เนื่องจากน้ำเสียอาจมีโลหะอื่นเจือปน อาทิเช่น นิเกิลในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ เป็นต้น เพราะวานิเกิลจะถูกดูดติดผิวโดยสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งอาจจะรบกวนกลไกการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยผงตะไบเหล็กได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จินตนา สายวรรณ. การศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์. วิทยาลัทยปีโตรเลียมและปีโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- จิราพร ชยาภิวัดณ์. การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับด้วยเส้นใยปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหิดล, 2542.
- พุทธิสาร ชัยพันธุ์. การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เคมีทั่วไป เล่ม 2. 2542.
- มันลิน ตันกุลเวสศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อน้ำระบบหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
- วิโรจน์ จันท์ศรี. ประสิทธิภาพของโคโคแทนที่สกัดจากเปลือกกุ้งสำหรับการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2538.
- ศิริรัตน์ ชาญไวยวิทย์. ผลกระทบของน้ำชะขยะต่อคุณภาพน้ำใต้ดินในอำเภอหาดใหญ่. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- สุรพล ผดุงชีวิต. การกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการชุบโลหะโดยใช้เพอร์ริสซัลเฟตและปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต คณะสาธารณสุขศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2524.

อธิชัย นพแก้ว. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

อัญชลี จันทวรรณกูร. การกำจัดโครเมียมโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

อำไพเทพิน สิงหะพันธุ์ และ สาวิตรี ผาตยานนท์. การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน
บริเวณสถานที่ฝังกลบขยะ (Landfill) ลาดกระบัง. โครงการเรียนการสอนเพื่อเสริม
ประสบการณ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Agrawal, A. and Trantyeck, P.G. Reduction of Nitro Aromatic Compounds by Zero Valent Iron. Environmental Science & Technology 30,1(1996):153-160.

American Society for testing Materials. Standard Test Methods for Chromium in Water. D1687 – 92, Annual Book of ASTM Standards, Section 11 11.01(1996):162-167.

APHA, AWWA and WEF. 3030G Nitric Acid – Sulfuric Acid Digestion. Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater. 20th ed.1998:3.9.

APHA, AWWA and WEF. 3500 Cr – B Colorimetric Method, Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater. 20th ed.1998:3.66-3.68.

Aoki, T. and Munemori, M. Recovery of Chromium(VI) from Wastewater with Iron(III)Hydroxide - I: Adsorption Mechanism of on Iron(III)Hydroxide. Water Research 16,6(1982):793-796.

Balko, B.A. and Trantyeck, P.G. Photoeffects on the Reduction of Carbon Tetrachloride by Zero - Valent Iron. The Journal of Physical chemistry B 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 31,12(1997):3348-3357.

Buerge, I.J. and Hug, S.J. Influence of Mineral Surfaces on Chromium(VI) Reduction by Iron(II), Environmental Science & Technology 33,23(1999):4285-4291.

Charoensrisomchit, A. Removal of Chromium in Electroplating Wastewater by Sodium Metabisulfite and Potassium Hydroxide. M.D. Thesis, Department of Science in Environmental Sanitation, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University, 1998.

Eary, L.E. and Rai, D. Chromate Removal from Aqueous Wastes by Reduction with Ferrous, Environmental Science & Technology 22,8(1998):972-977.

- Khaodhiar, S. Removal of Chromium, Copper, and Arsenic from Contaminated Groundwater Using Iron - Oxide Composite Adsorbents. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Oregon State University: Corvallis, OR, 1997.
- Levenspiel, O. Chemical Reaction Engineering. 2nd ed. John Wiley & Sons 1972:67-71.
- Kim, J.I. Adsorption of Chromium on Activated carbon. Doctoral Degree Dissertation, University of Florida, 1976.
- Nelson, P.O. Adsorption and Fate of Metals in Wastewater and Soils. A Short Course Presented for Chula Unisearch, Chulalongkorn University, 1995.
- Patterson, R.R. and Fendorf, S. Reduction of Hexavalent Chromium by Amorphous Iron Sulfide, Environmental Science & Technology 31,7(1997):2039-2044.
- 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 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 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.
- Reger, D.L. Goode, S.R, and Mecer, E.E. Chemistry Principle & Practice. Sander College Publishing, 1997.
- Rollinson, C.L., The Chemistry of Chromium, Molybdenum and Tungsten. Pergamon Press, 1973.
- Sass, B.M. and Rai, D. Solubility of Amorphous Chromium (III) – Iron (III) Hydroxide Solid Solutions. Inorganic Chemistry 26,14(1987):2228-2232.

Sayles, G.D., You, G., Wang, M. and Kupferle, M.J. DDT, DDD and DDE Dechlorination by Zero - Valent Iron, Environmental Science & Technology 31,12(1997):3448-3454.

Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. Water Chemistry. John Wiley & Sons, 1980.

Sparks, D. and Grundl, T. ACS Symposium 715(1998):301-322

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 21,6(1987):589-59499.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



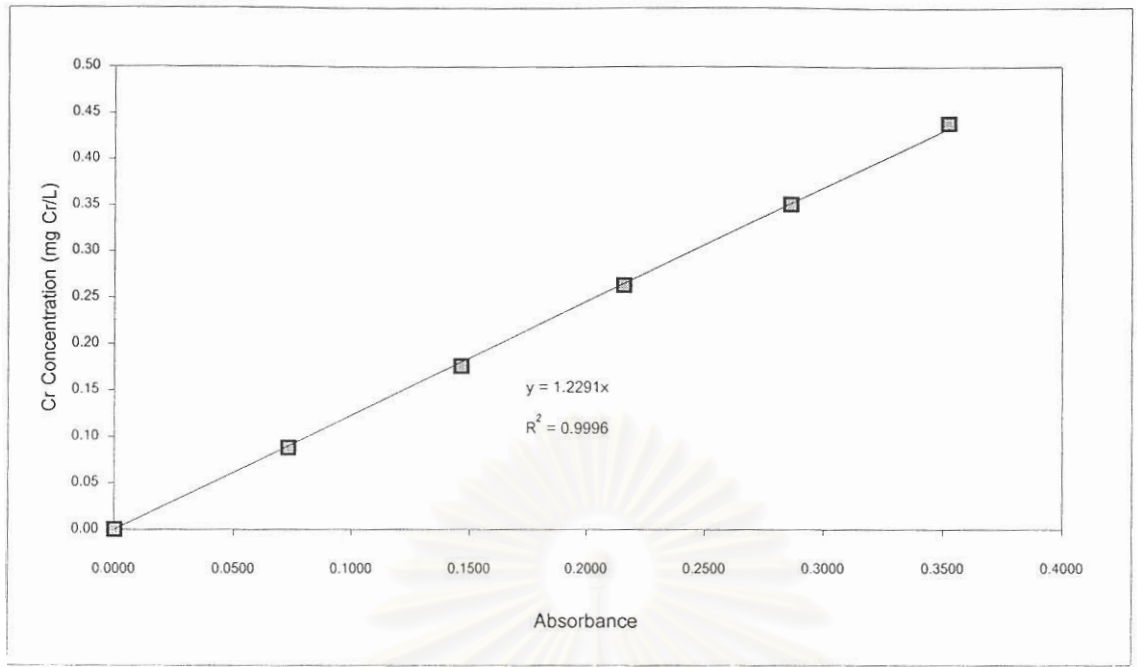
ภาคผนวก ก.

กราฟมาตรฐานของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

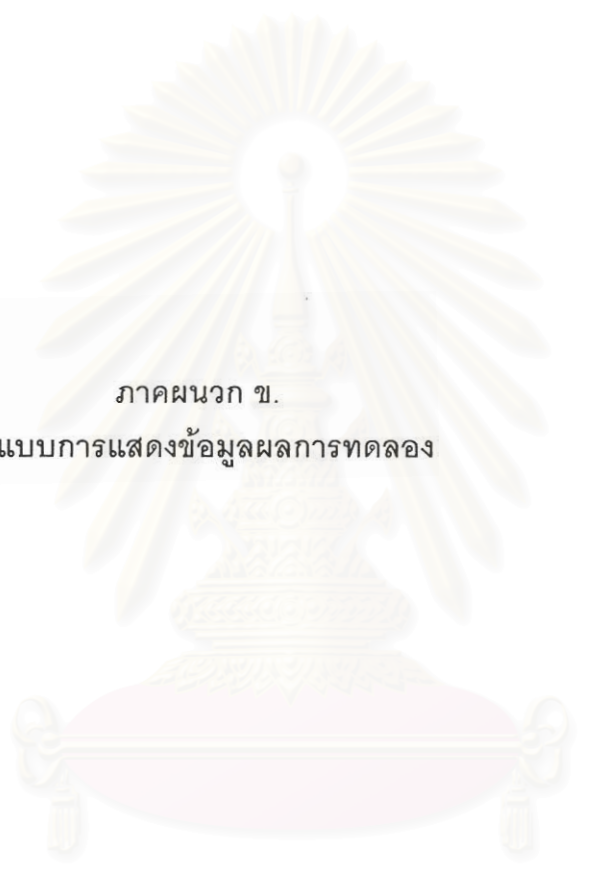
ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลกราฟมาตรฐาน (Standard Curve Data) ของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

Concentration at 50 mL (mg Cr/L)	Concentration at 50 mL (mg Cr/L)	Absorbance
0	0.0000	0.0004
0.1	0.0877	0.0732
0.2	0.1754	0.1466
0.3	0.2632	0.2160
0.4	0.3509	0.2866
0.5	0.4386	0.3528



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐาน (Standard Curve) ของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.
รูปแบบการแสดงผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 รูปแบบการแสดงผลการทดลอง

Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

1. Time(minute) แสดงเวลาในการเก็บน้ำตัวอย่างหลังจากเริ่มเขย่า มีหน่วยเป็นนาที
2. Absorbance แสดงค่าการดูดกลืนแสงจากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม
3. [Cr(VI)]₅₇ (mg Cr/L) แสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ปริมาตร 57 มิลลิลิตร มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

$$[\text{Cr(VI)}]_{57} = 1.2291 \times \text{Absorbance}$$
4. [Cr(VI)]₅₀ (mg Cr/L) แสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

$$[\text{Cr(VI)}]_{50} = [\text{Cr(VI)}]_{57} \times 57 \text{ mL} / 50 \text{ mL}$$
5. Dilution Ratio สัดส่วนการเจือจางน้ำตัวอย่าง
6. [Cr(VI)] (mgCr/L) แสดงความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเจือจาง
7. Absorbance แสดงค่าการดูดกลืนแสงจากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด
8. [TotalCr]₅₇ (mg Cr/L) แสดงความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่ปริมาตร 57 มิลลิลิตร มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

$$[\text{TotalCr(VI)}]_{57} = 1.2291 \times \text{Absorbance}$$

ตารางที่ ข.1 รูปแบบการแสดงผลการทดลอง (ต่อ)

Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

9. [TotalCr]₅₀ (mg Cr/L) แสดงความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร

$$[\text{TotalCr(VI)}]_{50} = [\text{TotalCr(VI)}]_{57} \times 57 \text{ mL} / 50 \text{ mL}$$

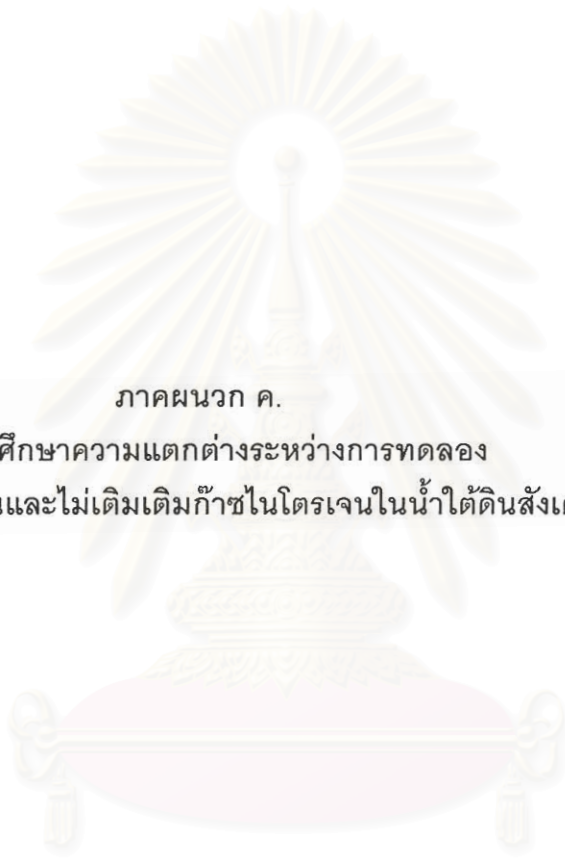
10. Dilution Ratio สัดส่วนการเจือจางน้ำตัวอย่าง

11. [Total Cr](mgCr/L) แสดงความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดในน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเจือจาง

12. pH ค่าพีเอชในน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ

13. [Total Fe](mg/L) ความเข้มข้นของเหล็กที่ละลายทั้งหมดในน้ำตัวอย่างหลังผ่านเมมเบรนฟิลเตอร์

หมายเหตุ : N.D. = Non Detected



ภาคผนวก ค.

ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างการทดลอง
ที่เติมก๊าซไนโตรเจนและไม่เติมเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

Initial Hexavalent Chromium concentration 10 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L with Nitrogen purge ; average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.1401	0.1722	0.1963	50	9.82	0.1399	0.1720	0.1960	50	9.80	6.04	N.D.
5	0.1324	0.1627	0.1855	50	9.28	0.1326	0.1630	0.1858	50	9.29	6.05	1.05
10	0.1195	0.1469	0.1674	50	8.37	0.1199	0.1474	0.1680	50	8.40	6.06	1.10
20	0.1048	0.1288	0.1468	50	7.34	0.1063	0.1307	0.1489	50	7.45	6.07	1.72
30	0.0890	0.1094	0.1247	50	6.24	0.0968	0.1190	0.1356	50	6.78	6.08	2.31
60	0.0648	0.0796	0.0908	50	4.54	0.0721	0.0886	0.1010	50	5.05	6.08	3.56
120	0.0394	0.0484	0.0552	50	2.76	0.0457	0.0562	0.0640	50	3.20	6.09	2.81
240	N.D.			1	<0.01	0.0117	0.0144	0.0164	50	0.82	6.09	2.92
480						N.D.			1	<0.01	6.10	3.10

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

Initial Hexavalent Chromium concentration 10 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L without Nitrogen purge ; average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.1421	0.1747	0.1991	50	9.96	0.1416	0.1740	0.1984	50	9.92	6.05	N.D.
5	0.1314	0.1615	0.1841	50	9.21	0.1313	0.1614	0.1840	50	9.20	6.06	1.07
10	0.1205	0.1481	0.1688	50	8.44	0.1208	0.1485	0.1693	50	8.46	6.07	1.13
20	0.1028	0.1264	0.1440	50	7.20	0.1038	0.1276	0.1454	50	7.27	6.08	1.80
30	0.0880	0.1082	0.1233	50	6.17	0.0959	0.1179	0.1344	50	6.72	6.08	2.35
60	0.0598	0.0735	0.0838	50	4.19	0.0671	0.0825	0.0940	50	4.70	6.09	3.61
120	0.0324	0.0398	0.0454	50	2.27	0.0397	0.0488	0.0556	50	2.78	6.09	2.83
240	N.D.			1	<0.01	0.0077	0.0095	0.0108	50	0.54	6.10	2.96
480						N.D.			1	<0.01	6.11	3.13

ตารางที่ ค.3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร และเติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

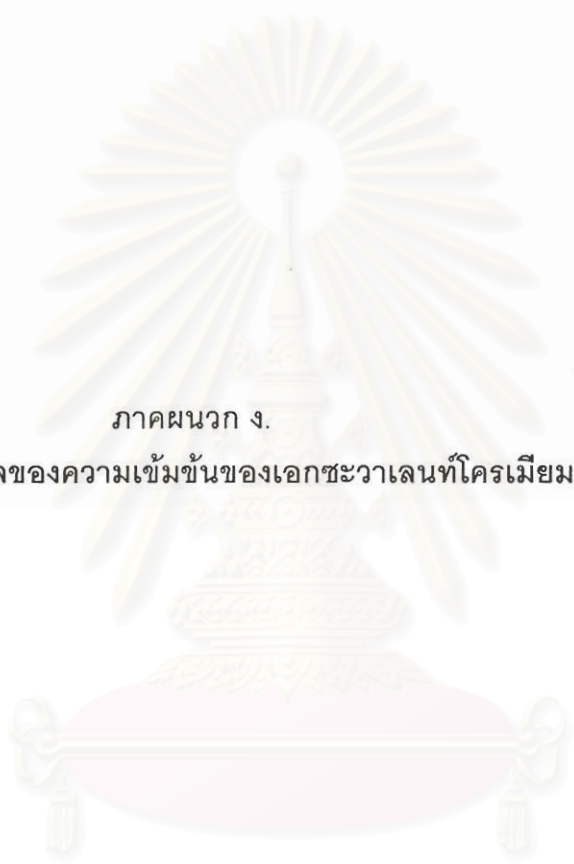
Time (minute)	Cr(VI)		Total Cr	
	[Cr(VI)] (mgCr/L)	%Cr(VI) Removal	[Total Cr] (mgCr/L)	%Total Cr Removal
0	9.82	0.00	9.80	0.00
5	9.28	5.50	9.29	5.22
10	8.37	14.70	8.40	14.30
20	7.34	25.20	7.45	24.02
30	6.24	36.47	6.78	30.81
60	4.54	53.75	5.05	48.46
120	2.76	71.88	3.20	67.33
240	<0.01	100.00	0.82	91.64
480	<0.01	100.00	<0.01	100.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก1 กรัม/ลิตร และไม่เติมก๊าซไนโตรเจนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์

Time (minute)	Cr(VI)		Total Cr	
	[Cr(VI)] (mgCr/L)	%Cr(VI) Removal	[Total Cr] (mgCr/L)	%Total Cr Removal
0	9.96	0.00	9.92	0.00
5	9.21	7.53	9.20	7.27
10	8.44	15.20	8.46	14.69
20	7.20	27.66	7.27	26.69
30	6.17	38.07	6.72	32.27
60	4.19	57.92	4.70	52.61
120	2.27	77.20	2.78	71.96
240	<0.01	100.00	0.54	94.56
480	<0.01	100.00	<0.01	100.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง.

ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของเอกซะวาเลนซ์โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 10 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.1420	0.1745	0.1990	50	9.95	0.1413	0.1737	0.1980	50	9.90	6.00	N.D.
0	0.1423	0.1749	0.1994	50	9.97	0.1419	0.1744	0.1988	50	9.94	6.00	N.D.
0	0.1427	0.1754	0.1999	50	10.00	0.1420	0.1745	0.1990	50	9.95	6.00	N.D.
5	0.1303	0.1602	0.1826	50	9.13	0.1304	0.1603	0.1827	50	9.14	6.01	1.11
5	0.1311	0.1611	0.1837	50	9.18	0.1313	0.1614	0.1840	50	9.20	6.01	1.13
5	0.1333	0.1638	0.1868	50	9.34	0.1332	0.1637	0.1866	50	9.33	6.01	1.12
10	0.1182	0.1453	0.1656	50	8.28	0.1196	0.1470	0.1676	50	8.38	6.01	1.18
10	0.1206	0.1482	0.1690	50	8.45	0.1213	0.1491	0.1700	50	8.50	6.01	1.19
10	0.1236	0.1519	0.1732	50	8.66	0.1225	0.1506	0.1716	50	8.58	6.01	1.21
20	0.1011	0.1243	0.1417	50	7.08	0.1018	0.1251	0.1426	50	7.13	6.01	1.85
20	0.1019	0.1252	0.1428	50	7.14	0.1026	0.1261	0.1438	50	7.19	6.01	1.85
20	0.1058	0.1300	0.1482	50	7.41	0.1030	0.1266	0.1443	50	7.22	6.01	1.88

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 10 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.0879	0.1080	0.1232	50	6.16	0.0903	0.1110	0.1265	50	6.33	6.01	2.41
30	0.0883	0.1085	0.1237	50	6.19	0.0913	0.1122	0.1279	50	6.40	6.01	2.40
30	0.0896	0.1101	0.1255	50	6.28	0.0926	0.1138	0.1297	50	6.49	6.01	2.43
60	0.0598	0.0735	0.0838	50	4.19	0.0666	0.0819	0.0933	50	4.67	6.01	3.69
60	0.0611	0.0751	0.0856	50	4.28	0.0684	0.0841	0.0958	50	4.79	6.01	3.66
60	0.0618	0.0760	0.0866	50	4.33	0.0701	0.0862	0.0982	50	4.91	6.01	3.66
120	0.0296	0.0364	0.0415	50	2.07	0.0425	0.0522	0.0595	50	2.98	6.03	2.87
120	0.0307	0.0377	0.0430	50	2.15	0.0434	0.0533	0.0608	50	3.04	6.02	2.87
120	0.0326	0.0401	0.0457	50	2.28	0.0449	0.0552	0.0629	50	3.15	6.02	2.86
240	N.D.			1	<0.01	0.0033	0.0041	0.0046	50	0.23	6.04	3.17
240	N.D.			1	<0.01	0.0035	0.0043	0.0049	50	0.25	6.04	3.19
240	N.D.			1	<0.01	0.0047	0.0058	0.0066	50	0.33	6.03	3.22

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 10 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480						N.D.			1	<0.01	6.10	4.24
480						N.D.			1	<0.01	6.10	4.27
480						N.D.			1	<0.01	6.09	4.28

ตารางที่ ง.2 แสดงผลการศึกษากำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 15 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.2137	0.2627	0.2994	50	14.97	0.2133	0.2622	0.2989	50	14.94	6.00	N.D.
0	0.2138	0.2628	0.2996	50	14.98	0.2135	0.2624	0.2992	50	14.96	6.00	N.D.
0	0.2139	0.2629	0.2997	50	14.99	0.2135	0.2624	0.2992	50	14.96	6.00	N.D.
5	0.1962	0.2411	0.2749	50	13.75	0.1961	0.2410	0.2748	50	13.74	6.01	0.81
5	0.1968	0.2419	0.2758	50	13.79	0.1967	0.2418	0.2756	50	13.78	6.01	0.82
5	0.1987	0.2442	0.2784	50	13.92	0.1977	0.2430	0.2770	50	13.85	6.01	0.82
10	0.1876	0.2306	0.2629	50	13.14	0.1890	0.2323	0.2648	50	13.24	6.01	1.39
10	0.1885	0.2317	0.2641	50	13.21	0.1903	0.2339	0.2666	50	13.33	6.01	1.40
10	0.1907	0.2344	0.2672	50	13.36	0.1908	0.2345	0.2673	50	13.37	6.01	1.43
20	0.1747	0.2147	0.2448	50	12.24	0.1793	0.2204	0.2512	50	12.56	6.01	1.84
20	0.1750	0.2151	0.2452	50	12.26	0.1802	0.2215	0.2525	50	12.62	6.01	1.84
20	0.1764	0.2168	0.2472	50	12.36	0.1830	0.2249	0.2564	50	12.82	6.01	1.85

ตารางที่ ง.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 15 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.1646	0.2023	0.2306	50	11.53	0.1717	0.2110	0.2406	50	12.03	6.01	2.04
30	0.1656	0.2035	0.2320	50	11.60	0.1727	0.2123	0.2420	50	12.10	6.01	2.05
30	0.1669	0.2051	0.2339	50	11.69	0.1740	0.2139	0.2438	50	12.19	6.01	2.03
60	0.1528	0.1878	0.2141	50	10.70	0.1622	0.1994	0.2273	50	11.36	6.01	1.98
60	0.1547	0.1901	0.2168	50	10.84	0.1630	0.2003	0.2284	50	11.42	6.01	1.96
60	0.1575	0.1936	0.2207	50	11.03	0.1659	0.2039	0.2325	50	11.62	6.01	1.93
120	0.1441	0.1771	0.2019	50	10.10	0.1519	0.1867	0.2128	50	10.64	6.02	0.94
120	0.1457	0.1791	0.2042	50	10.21	0.1531	0.1882	0.2145	50	10.73	6.02	0.93
120	0.1499	0.1842	0.2100	50	10.50	0.1541	0.1894	0.2159	50	10.80	6.01	0.93
240	0.1246	0.1531	0.1746	50	8.73	0.1369	0.1683	0.1918	50	9.59	6.04	0.21
240	0.1259	0.1547	0.1764	50	8.82	0.1379	0.1695	0.1932	50	9.66	6.03	0.21
240	0.1268	0.1558	0.1777	50	8.88	0.1401	0.1722	0.1963	50	9.82	6.03	0.20

ตารางที่ ง.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 15 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.0897	0.1103	0.1257	50	6.28	0.1040	0.1278	0.1457	50	7.29	6.05	0.19
480	0.0925	0.1137	0.1296	50	6.48	0.1079	0.1326	0.1512	50	7.56	6.04	0.18
480	0.0935	0.1149	0.1310	50	6.55	0.1092	0.1342	0.1530	50	7.65	6.04	0.18
720	0.0517	0.0635	0.0724	50	3.62	0.0699	0.0859	0.0979	50	4.90	6.10	0.14
720	0.0519	0.0638	0.0727	50	3.64	0.0705	0.0867	0.0988	50	4.94	6.10	0.14
720	0.0541	0.0665	0.0758	50	3.79	0.0722	0.0887	0.1012	50	5.06	6.09	0.14
1080	0.0026	0.0032	0.0036	50	0.18	0.0167	0.0205	0.0234	50	1.17	6.15	0.10
1080	0.0041	0.0050	0.0057	50	0.29	0.0171	0.0210	0.0240	50	1.20	6.15	0.09
1080	0.0051	0.0063	0.0071	50	0.36	0.0181	0.0222	0.0254	50	1.27	6.14	0.09
1440	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.24	3.82
1440	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.22	3.83
1440	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.22	3.86

ตารางที่ ง.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 20 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.2835	0.3484	0.3972	50	19.86	0.2828	0.3476	0.3963	50	19.81	5.95	N.D.
0	0.2840	0.3491	0.3979	50	19.90	0.2835	0.3484	0.3972	50	19.86	5.95	N.D.
0	0.2845	0.3497	0.3986	50	19.93	0.2837	0.3487	0.3975	50	19.88	5.95	N.D.
5	0.2591	0.3185	0.3630	50	18.15	0.2593	0.3187	0.3633	50	18.17	5.95	0.55
5	0.2599	0.3194	0.3642	50	18.21	0.2598	0.3193	0.3640	50	18.20	5.95	0.56
5	0.2620	0.3220	0.3671	50	18.36	0.2625	0.3226	0.3678	50	18.39	5.95	0.56
10	0.2497	0.3069	0.3499	50	17.49	0.2514	0.3090	0.3523	50	17.61	5.95	0.85
10	0.2502	0.3075	0.3506	50	17.53	0.2526	0.3105	0.3539	50	17.70	5.95	0.86
10	0.2518	0.3095	0.3528	50	17.64	0.2534	0.3115	0.3551	50	17.75	5.95	0.87
20	0.2397	0.2946	0.3359	50	16.79	0.2445	0.3005	0.3426	50	17.13	5.95	1.74
20	0.2415	0.2968	0.3384	50	16.92	0.2456	0.3019	0.3441	50	17.21	5.95	1.75
20	0.2426	0.2982	0.3399	50	17.00	0.2468	0.3033	0.3458	50	17.29	5.95	1.74

ตารางที่ ง.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 20 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.2314	0.2844	0.3242	50	16.21	0.2370	0.2913	0.3321	50	16.60	5.95	1.58
30	0.2335	0.2870	0.3272	50	16.36	0.2399	0.2949	0.3361	50	16.81	5.95	1.56
30	0.2345	0.2882	0.3286	50	16.43	0.2407	0.2958	0.3373	50	16.86	5.95	1.57
60	0.2248	0.2763	0.3150	50	15.75	0.2323	0.2855	0.3255	50	16.27	5.95	1.22
60	0.2261	0.2779	0.3168	50	15.84	0.2333	0.2867	0.3269	50	16.34	5.95	1.21
60	0.2268	0.2788	0.3178	50	15.89	0.2340	0.2876	0.3279	50	16.39	5.95	1.18
120	0.2123	0.2609	0.2975	50	14.87	0.2203	0.2708	0.3087	50	15.43	5.96	0.58
120	0.2138	0.2628	0.2996	50	14.98	0.2218	0.2726	0.3108	50	15.54	5.96	0.58
120	0.2157	0.2651	0.3022	50	15.11	0.2224	0.2734	0.3116	50	15.58	5.96	0.56
240	0.1938	0.2382	0.2715	50	13.58	0.2055	0.2526	0.2879	50	14.40	5.96	0.40
240	0.1977	0.2430	0.2770	50	13.85	0.2073	0.2548	0.2905	50	14.52	5.96	0.39
240	0.1991	0.2447	0.2790	50	13.95	0.2088	0.2566	0.2926	50	14.63	5.96	0.40

ตารางที่ ง.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 20 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.1676	0.2060	0.2348	50	11.74	0.1801	0.2214	0.2524	50	12.62	5.97	0.26
480	0.1685	0.2071	0.2361	50	11.80	0.1813	0.2228	0.2540	50	12.70	5.97	0.25
480	0.1703	0.2093	0.2386	50	11.93	0.1830	0.2249	0.2564	50	12.82	5.97	0.25
720	0.1449	0.1781	0.2030	50	10.15	0.1576	0.1937	0.2208	50	11.04	5.98	0.13
720	0.1456	0.1790	0.2040	50	10.20	0.1586	0.1949	0.2222	50	11.11	5.98	0.12
720	0.1460	0.1794	0.2046	50	10.23	0.1595	0.1960	0.2235	50	11.17	5.98	0.12
1080	0.1026	0.1261	0.1438	50	7.19	0.1188	0.1460	0.1665	50	8.32	5.99	0.08
1080	0.1030	0.1266	0.1443	50	7.22	0.1192	0.1465	0.1670	50	8.35	5.99	0.07
1080	0.1056	0.1298	0.1480	50	7.40	0.1207	0.1484	0.1691	50	8.46	5.99	0.08
1440	0.0651	0.0800	0.0912	50	4.56	0.0784	0.0964	0.1099	50	5.49	6.00	0.08
1440	0.0662	0.0814	0.0928	50	4.64	0.0791	0.0972	0.1108	50	5.54	6.00	0.08
1440	0.0671	0.0825	0.0940	50	4.70	0.0804	0.0988	0.1127	50	5.63	6.00	0.09

ตารางที่ ง.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 20 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800	0.0224	0.0275	0.0314	50	1.57	0.0434	0.0533	0.0608	50	3.04	6.03	0.29
1800	0.0229	0.0281	0.0321	50	1.60	0.0445	0.0547	0.0624	50	3.12	6.03	0.31
1800	0.0244	0.0300	0.0342	50	1.71	0.0454	0.0558	0.0636	50	3.18	6.02	0.32
2160	N.D.			1	<0.01	0.0063	0.0077	0.0088	50	0.44	6.07	0.70
2160	N.D.			1	<0.01	0.0071	0.0087	0.0099	50	0.50	6.06	0.72
2160	N.D.			1	<0.01	0.0077	0.0095	0.0108	50	0.54	6.06	0.72
2520						N.D.			1	<0.01	6.21	6.45
2520						N.D.			1	<0.01	6.20	6.48
2520						N.D.			1	<0.01	6.20	6.49

ตารางที่ ง.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 25 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filling/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.3536	0.4346	0.4955	50	24.77	0.3534	0.4344	0.4952	50	24.76	5.95	N.D.
0	0.3540	0.4351	0.4960	50	24.80	0.3540	0.4351	0.4960	50	24.80	5.95	N.D.
0	0.3543	0.4355	0.4964	50	24.82	0.3543	0.4355	0.4964	50	24.82	5.95	N.D.
5	0.3226	0.3965	0.4520	50	22.60	0.3274	0.4024	0.4587	50	22.94	5.96	0.78
5	0.3239	0.3981	0.4538	50	22.69	0.3286	0.4039	0.4604	50	23.02	5.96	0.77
5	0.3256	0.4002	0.4562	50	22.81	0.3298	0.4054	0.4621	50	23.11	5.96	0.79
10	0.3139	0.3858	0.4398	50	21.99	0.3216	0.3953	0.4506	50	22.53	5.96	0.83
10	0.3153	0.3875	0.4418	50	22.09	0.3223	0.3961	0.4516	50	22.58	5.96	0.84
10	0.3173	0.3900	0.4446	50	22.23	0.3243	0.3986	0.4544	50	22.72	5.96	0.86
20	0.3068	0.3771	0.4299	50	21.49	0.3132	0.3850	0.4388	50	21.94	5.96	1.23
20	0.3074	0.3778	0.4307	50	21.54	0.3142	0.3862	0.4402	50	22.01	5.96	1.26
20	0.3095	0.3804	0.4337	50	21.68	0.3160	0.3884	0.4428	50	22.14	5.96	1.26

ตารางที่ ง.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 25 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.3005	0.3693	0.4211	50	21.05	0.3083	0.3789	0.4320	50	21.60	5.96	1.41
30	0.3017	0.3708	0.4227	50	21.14	0.3096	0.3805	0.4338	50	21.69	5.96	1.43
30	0.3053	0.3752	0.4278	50	21.39	0.3107	0.3819	0.4353	50	21.77	5.96	1.42
60	0.2899	0.3563	0.4062	50	20.31	0.3013	0.3703	0.4222	50	21.11	5.97	1.32
60	0.2912	0.3579	0.4080	50	20.40	0.3019	0.3711	0.4230	50	21.15	5.97	1.29
60	0.2930	0.3601	0.4105	50	20.53	0.3033	0.3728	0.4250	50	21.25	5.97	1.33
120	0.2776	0.3412	0.3890	50	19.45	0.2902	0.3567	0.4066	50	20.33	5.98	0.52
120	0.2792	0.3432	0.3912	50	19.56	0.2916	0.3584	0.4086	50	20.43	5.98	0.50
120	0.2803	0.3445	0.3927	50	19.64	0.2928	0.3599	0.4103	50	20.51	5.98	0.51
240	0.2562	0.3149	0.3590	50	17.95	0.2696	0.3314	0.3778	50	18.89	5.99	0.46
240	0.2578	0.3169	0.3612	50	18.06	0.2699	0.3317	0.3782	50	18.91	5.99	0.44
240	0.2612	0.3210	0.3660	50	18.30	0.2720	0.3343	0.3811	50	19.06	5.99	0.43

ตารางที่ ง.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 25 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.2305	0.2833	0.3230	50	16.15	0.2432	0.2989	0.3408	50	17.04	6.00	0.07
480	0.2313	0.2843	0.3241	50	16.20	0.2444	0.3004	0.3424	50	17.12	6.00	0.06
480	0.2327	0.2860	0.3261	50	16.30	0.2453	0.3015	0.3437	50	17.19	6.00	0.07
720	0.2090	0.2569	0.2928	50	14.64	0.2211	0.2718	0.3098	50	15.49	6.01	0.07
720	0.2107	0.2590	0.2952	50	14.76	0.2222	0.2731	0.3113	50	15.57	6.01	0.07
720	0.2113	0.2597	0.2961	50	14.80	0.2244	0.2758	0.3144	50	15.72	6.01	0.06
1080	0.1689	0.2076	0.2367	50	11.83	0.1897	0.2332	0.2658	50	13.29	6.02	0.08
1080	0.1699	0.2088	0.2381	50	11.90	0.1917	0.2356	0.2686	50	13.43	6.02	0.06
1080	0.1734	0.2131	0.2430	50	12.15	0.1927	0.2368	0.2700	50	13.50	6.02	0.07
1440	0.1388	0.1706	0.1945	50	9.72	0.1563	0.1921	0.2190	50	10.95	6.03	0.08
1440	0.1399	0.1720	0.1960	50	9.80	0.1573	0.1933	0.2204	50	11.02	6.03	0.07
1440	0.1424	0.1750	0.1995	50	9.93	0.1597	0.1963	0.2238	50	11.19	6.03	0.07

ตารางที่ ง.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 25 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800	0.1066	0.1310	0.1494	50	7.47	0.1293	0.1589	0.1812	50	9.06	6.05	0.20
1800	0.1078	0.1325	0.1510	50	7.55	0.1301	0.1599	0.1823	50	9.11	6.05	0.18
1800	0.1098	0.1350	0.1538	50	7.69	0.1308	0.1608	0.1833	50	9.16	6.04	0.21
2160	0.0684	0.0841	0.0958	50	4.79	0.0955	0.1174	0.1338	50	6.69	6.07	0.19
2160	0.0701	0.0862	0.0982	50	4.91	0.0962	0.1182	0.1348	50	6.74	6.06	0.20
2160	0.0708	0.0870	0.0992	50	4.96	0.0978	0.1202	0.1370	50	6.85	6.06	0.21
2520	0.0346	0.0425	0.0485	50	2.42	0.0562	0.0691	0.0787	50	3.94	6.09	0.20
2520	0.0354	0.0435	0.0496	50	2.48	0.0581	0.0714	0.0814	50	4.07	6.09	0.22
2520	0.0367	0.0451	0.0514	50	2.57	0.0594	0.0730	0.0832	50	4.16	6.08	0.23
2880	0.0013	0.0016	0.0018	50	0.09	0.0271	0.0333	0.0380	50	1.90	6.14	0.40
2880	0.0016	0.0020	0.0022	50	0.11	0.0277	0.0340	0.0388	50	1.94	6.14	0.41
2880	0.0027	0.0033	0.0038	50	0.19	0.0286	0.0352	0.0401	50	2.00	6.13	0.43

ตารางที่ ง.4 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 25 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
3600	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.40	13.55
3600	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.40	13.52
3600	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.38	13.53

ตารางที่ ง.5 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.1 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4310	0.53	0.60	50	30.20	0.4309	0.53	0.60	50	30.19	5.96	N.D.
0	0.4320	0.53	0.61	50	30.27	0.4316	0.53	0.60	50	30.24	5.96	N.D.
0	0.4325	0.53	0.61	50	30.30	0.4319	0.53	0.61	50	30.26	5.96	N.D.
5	0.3910	0.48	0.55	50	27.39	0.3926	0.48	0.55	50	27.51	5.97	0.50
5	0.3925	0.48	0.55	50	27.50	0.3956	0.49	0.55	50	27.72	5.97	0.51
5	0.3936	0.48	0.55	50	27.58	0.3964	0.49	0.56	50	27.77	5.97	0.53
10	0.3788	0.47	0.53	50	26.54	0.3838	0.47	0.54	50	26.89	5.97	0.97
10	0.3804	0.47	0.53	50	26.65	0.3848	0.47	0.54	50	26.96	5.97	0.97
10	0.3824	0.47	0.54	50	26.79	0.3857	0.47	0.54	50	27.02	5.97	0.98
20	0.3648	0.45	0.51	50	25.56	0.3697	0.45	0.52	50	25.90	5.97	1.24
20	0.3658	0.45	0.51	50	25.63	0.3703	0.46	0.52	50	25.94	5.97	1.23
20	0.3681	0.45	0.52	50	25.79	0.3714	0.46	0.52	50	26.02	5.97	1.26

ตารางที่ ง.5 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.1 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.3581	0.44	0.50	50	25.09	0.3620	0.44	0.51	50	25.36	5.98	1.50
30	0.3588	0.44	0.50	50	25.14	0.3636	0.45	0.51	50	25.47	5.98	1.52
30	0.3611	0.44	0.51	50	25.30	0.3658	0.45	0.51	50	25.63	5.98	1.51
60	0.3419	0.42	0.48	50	23.95	0.3474	0.43	0.49	50	24.34	5.99	1.03
60	0.3435	0.42	0.48	50	24.07	0.3496	0.43	0.49	50	24.49	5.99	1.03
60	0.3448	0.42	0.48	50	24.16	0.3501	0.43	0.49	50	24.53	5.99	1.06
120	0.3275	0.40	0.46	50	22.94	0.3329	0.41	0.47	50	23.32	6.00	0.97
120	0.3286	0.40	0.46	50	23.02	0.3353	0.41	0.47	50	23.49	6.00	0.94
120	0.3322	0.41	0.47	50	23.27	0.3370	0.41	0.47	50	23.61	6.00	0.95
240	0.3102	0.38	0.43	50	21.73	0.3158	0.39	0.44	50	22.12	6.01	0.38
240	0.3113	0.38	0.44	50	21.81	0.3169	0.39	0.44	50	22.20	6.01	0.37
240	0.3120	0.38	0.44	50	21.86	0.3185	0.39	0.45	50	22.31	6.01	0.36

ตารางที่ ๓.5 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)


Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.1 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.2803	0.34	0.39	50	19.64	0.2951	0.36	0.41	50	20.67	6.01	0.22
480	0.2819	0.35	0.39	50	19.75	0.2961	0.36	0.41	50	20.74	6.01	0.20
480	0.2852	0.35	0.40	50	19.98	0.2973	0.37	0.42	50	20.83	6.01	0.21
720	0.2643	0.32	0.37	50	18.52	0.2759	0.34	0.39	50	19.33	6.02	0.19
720	0.2655	0.33	0.37	50	18.60	0.2760	0.34	0.39	50	19.34	6.02	0.17
720	0.2666	0.33	0.37	50	18.68	0.2787	0.34	0.39	50	19.53	6.02	0.19
1080	0.2325	0.29	0.33	50	16.29	0.2498	0.31	0.35	50	17.50	6.02	0.08
1080	0.2341	0.29	0.33	50	16.40	0.2502	0.31	0.35	50	17.53	6.02	0.08
1080	0.2344	0.29	0.33	50	16.42	0.2514	0.31	0.35	50	17.61	6.02	0.09
1440	0.2076	0.26	0.29	50	14.54	0.2222	0.27	0.31	50	15.57	6.03	0.09
1440	0.2080	0.26	0.29	50	14.57	0.2235	0.27	0.31	50	15.66	6.03	0.09
1440	0.2109	0.26	0.30	50	14.78	0.2249	0.28	0.32	50	15.76	6.03	0.08

ตารางที่ ง.5 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.1 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800	0.1720	0.21	0.24	50	12.05	0.1881	0.23	0.26	50	13.18	6.03	0.09
1800	0.1732	0.21	0.24	50	12.13	0.1889	0.23	0.26	50	13.23	6.03	0.08
1800	0.1767	0.22	0.25	50	12.38	0.1924	0.24	0.27	50	13.48	6.03	0.09
2160	0.1416	0.17	0.20	50	9.92	0.1607	0.20	0.23	50	11.26	6.04	0.07
2160	0.1426	0.18	0.20	50	9.99	0.1626	0.20	0.23	50	11.39	6.04	0.08
2160	0.1441	0.18	0.20	50	10.10	0.1635	0.20	0.23	50	11.45	6.04	0.09
2520	0.1128	0.14	0.16	50	7.90	0.1352	0.17	0.19	50	9.47	6.05	0.08
2520	0.1153	0.14	0.16	50	8.08	0.1374	0.17	0.19	50	9.63	6.05	0.09
2520	0.1163	0.14	0.16	50	8.15	0.1384	0.17	0.19	50	9.70	6.05	0.09
2880	0.0805	0.10	0.11	50	5.64	0.1053	0.13	0.15	50	7.38	6.07	0.08
2880	0.0829	0.10	0.12	50	5.81	0.1075	0.13	0.15	50	7.53	6.07	0.08
2880	0.0850	0.10	0.12	50	5.95	0.1079	0.13	0.15	50	7.56	6.07	0.09

ตารางที่ ง.5 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 29.1 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
3600	0.0222	0.03	0.03	50	1.56	0.0496	0.06	0.07	50	3.47	6.10	0.10
3600	0.0241	0.03	0.03	50	1.69	0.0512	0.06	0.07	50	3.59	6.09	0.11
3600	0.0254	0.03	0.04	50	1.78	0.0525	0.06	0.07	50	3.68	6.09	0.10
4320	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.25	12.96
4320	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.25	12.98
4320	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.25	12.97



ภาคผนวก จ.
ผลการศึกษามูลของค่าพีเอช

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 4 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.6celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4316	0.5305	0.6047	50	30.24	0.4309	0.5296	0.6038	50	30.19	4.02	N.D.
0	0.4319	0.5308	0.6052	50	30.26	0.4314	0.5302	0.6045	50	30.22	4.02	N.D.
0	0.4320	0.5310	0.6053	50	30.27	0.4315	0.5304	0.6046	50	30.23	4.02	N.D.
5	0.2277	0.2799	0.3190	50	15.95	0.4174	0.5130	0.5849	50	29.24	4.06	13.53
5	0.2290	0.2815	0.3209	50	16.04	0.4178	0.5135	0.5854	50	29.27	4.06	13.51
5	0.2308	0.2837	0.3234	50	16.17	0.4185	0.5144	0.5864	50	29.32	4.05	13.54
10	0.0641	0.0788	0.0898	50	4.49	0.4092	0.5029	0.5734	50	28.67	4.08	14.40
10	0.0646	0.0794	0.0905	50	4.53	0.4108	0.5049	0.5756	50	28.78	4.08	14.42
10	0.0664	0.0816	0.0930	50	4.65	0.4115	0.5058	0.5766	50	28.83	4.07	14.42
20	N.D.			1	<0.01	0.4034	0.4958	0.5652	50	28.26	4.16	15.35
20	N.D.			1	<0.01	0.4044	0.4970	0.5666	50	28.33	4.16	15.38
20	N.D.			1	<0.01	0.4058	0.4988	0.5686	50	28.43	4.15	15.39

ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 4 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.6celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30						0.3977	0.4888	0.5572	50	27.86	4.24	15.89
30						0.3981	0.4893	0.5578	50	27.89	4.24	15.87
30						0.4005	0.4923	0.5612	50	28.06	4.22	15.91
60						0.3827	0.4704	0.5362	50	26.81	4.44	16.39
60						0.3854	0.4737	0.5400	50	27.00	4.43	16.38
60						0.3864	0.4749	0.5414	50	27.07	4.42	16.39
120						0.3634	0.4467	0.5092	50	25.46	4.58	16.56
120						0.3655	0.4492	0.5121	50	25.61	4.57	16.56
120						0.3664	0.4503	0.5134	50	25.67	4.57	16.57
240						0.3503	0.4306	0.4908	50	24.54	4.59	16.58
240						0.3517	0.4323	0.4928	50	24.64	4.58	16.59
240						0.3521	0.4328	0.4934	50	24.67	4.58	16.59

ตารางที่ จ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 4 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.6celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480						0.3399	0.4178	0.4763	50	23.81	4.62	16.60
480						0.3406	0.4186	0.4772	50	23.86	4.62	16.61
480						0.3416	0.4199	0.4786	50	23.93	4.62	16.60
720						0.3377	0.4151	0.4732	50	23.66	4.62	16.60
720						0.3387	0.4163	0.4746	50	23.73	4.62	16.59
720						0.3391	0.4168	0.4751	50	23.76	4.62	16.61
1080						0.3346	0.4113	0.4688	50	23.44	4.63	16.60
1080						0.3352	0.4120	0.4697	50	23.48	4.63	16.60
1080						0.3368	0.4140	0.4719	50	23.60	4.62	16.60
1440						0.3313	0.4072	0.4642	50	23.21	4.64	16.61
1440						0.3326	0.4088	0.4660	50	23.30	4.64	16.60
1440						0.3333	0.4097	0.4670	50	23.35	4.64	16.61

ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 4 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.6celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800						0.3279	0.4030	0.4594	50	22.97	4.65	16.61
1800						0.3309	0.4067	0.4636	50	23.18	4.64	16.61
1800						0.3317	0.4077	0.4648	50	23.24	4.64	16.60
2160						0.3295	0.4050	0.4617	50	23.08	4.64	16.60
2160						0.3302	0.4058	0.4627	50	23.13	4.64	16.59
2160						0.3309	0.4067	0.4636	50	23.18	4.64	16.59
2520						0.3256	0.4002	0.4562	50	22.81	4.65	16.58
2520						0.3260	0.4007	0.4568	50	22.84	4.65	16.59
2520						0.3267	0.4015	0.4578	50	22.89	4.65	16.60
2880						0.3237	0.3979	0.4536	50	22.68	4.66	16.59
2880						0.3246	0.3990	0.4548	50	22.74	4.65	16.59
2880						0.3277	0.4028	0.4592	50	22.96	4.65	16.60

ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 4 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 4 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.6celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
3600						0.3219	0.3956	0.4510	50	22.55	4.66	16.60
3600						0.3230	0.3970	0.4526	50	22.63	4.66	16.60
3600						0.3236	0.3977	0.4534	50	22.67	4.66	16.60
4320						0.3211	0.3947	0.4499	50	22.50	4.66	16.60
4320						0.3217	0.3954	0.4508	50	22.54	4.66	16.59
4320						0.3227	0.3966	0.4522	50	22.61	4.66	16.60
5760						0.3199	0.3932	0.4482	50	22.41	4.67	16.59
5760						0.3210	0.3945	0.4498	50	22.49	4.66	16.59
5760						0.3219	0.3956	0.4510	50	22.55	4.66	16.60

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 5 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.9 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4268	0.5246	0.5980	50	29.90	0.4261	0.5237	0.5970	50	29.85	5.03	N.D.
0	0.4271	0.5249	0.5984	50	29.92	0.4264	0.5241	0.5975	50	29.87	5.03	N.D.
0	0.4273	0.5252	0.5987	50	29.94	0.4269	0.5247	0.5982	50	29.91	5.03	N.D.
5	0.3362	0.4132	0.4711	50	23.55	0.3761	0.4623	0.5270	50	26.35	5.04	11.95
5	0.3372	0.4145	0.4725	50	23.62	0.3765	0.4628	0.5275	50	26.38	5.04	11.97
5	0.3387	0.4163	0.4746	50	23.73	0.3781	0.4647	0.5298	50	26.49	5.04	11.96
10	0.2642	0.3247	0.3702	50	18.51	0.3454	0.4245	0.4840	50	24.20	5.04	12.68
10	0.2652	0.3260	0.3716	50	18.58	0.3463	0.4256	0.4852	50	24.26	5.04	12.70
10	0.2685	0.3300	0.3762	50	18.81	0.3490	0.4290	0.4890	50	24.45	5.04	12.71
20	0.1783	0.2191	0.2498	50	12.49	0.3161	0.3885	0.4429	50	22.15	5.05	13.68
20	0.1790	0.2200	0.2508	50	12.54	0.3170	0.3896	0.4442	50	22.21	5.05	13.69
20	0.1801	0.2214	0.2524	50	12.62	0.3179	0.3907	0.4454	50	22.27	5.05	13.70

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 5 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.9 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.1318	0.1620	0.1847	50	9.23	0.2856	0.3510	0.4002	50	20.01	5.06	14.30
30	0.1324	0.1627	0.1855	50	9.28	0.2867	0.3524	0.4017	50	20.09	5.06	14.32
30	0.1346	0.1654	0.1886	50	9.43	0.2880	0.3540	0.4035	50	20.18	5.06	14.31
60	0.0282	0.0347	0.0395	50	1.98	0.2495	0.3067	0.3496	50	17.48	5.15	15.84
60	0.0298	0.0366	0.0418	50	2.09	0.2511	0.3086	0.3518	50	17.59	5.14	15.87
60	0.0310	0.0381	0.0434	50	2.17	0.2522	0.3100	0.3534	50	17.67	5.14	15.87
120	N.D.			1	<0.01	0.2031	0.2496	0.2846	50	14.23	5.20	16.37
120	N.D.			1	<0.01	0.2048	0.2517	0.2870	50	14.35	5.19	16.36
120	N.D.			1	<0.01	0.2069	0.2543	0.2899	50	14.50	5.19	16.39
240					<0.01	0.1553	0.1909	0.2176	50	10.88	5.28	16.49
240					<0.01	0.1578	0.1940	0.2211	50	11.06	5.27	16.49
240					<0.01	0.1580	0.1942	0.2214	50	11.07	5.27	16.48

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 5 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 5 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.9 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480						0.0918	0.1128	0.1286	50	6.43	5.30	16.48
480						0.0928	0.1141	0.1300	50	6.50	5.30	16.47
480						0.0933	0.1147	0.1307	50	6.54	5.29	16.49
720						0.0476	0.0585	0.0667	50	3.33	5.33	16.49
720						0.0494	0.0607	0.0692	50	3.46	5.32	16.48
720						0.0505	0.0621	0.0708	50	3.54	5.32	16.49
1080						N.D.			1	<0.01	5.36	16.49
1080						N.D.			1	<0.01	5.36	16.47
1080						N.D.			1	<0.01	5.35	16.49

ตารางที่ จ.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 7 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4278	0.5258	0.5994	50	29.97	0.4271	0.5249	0.5984	50	29.92	6.96	N.D.
0	0.4280	0.5261	0.5997	50	29.99	0.4278	0.5258	0.5994	50	29.97	6.96	N.D.
0	0.4282	0.5263	0.6000	50	30.00	0.4282	0.5263	0.6000	50	30.00	6.96	N.D.
5	0.4085	0.5021	0.5724	50	28.62	0.4118	0.5061	0.5770	50	28.85	7.00	N.D.
5	0.4102	0.5042	0.5748	50	28.74	0.4123	0.5068	0.5777	50	28.89	6.99	N.D.
5	0.4115	0.5058	0.5766	50	28.83	0.4142	0.5091	0.5804	50	29.02	6.99	N.D.
10	0.3972	0.4882	0.5565	50	27.83	0.3999	0.4915	0.5603	50	28.02	7.02	N.D.
10	0.3984	0.4897	0.5582	50	27.91	0.4011	0.4930	0.5620	50	28.10	7.02	N.D.
10	0.3999	0.4915	0.5603	50	28.02	0.4020	0.4941	0.5633	50	28.16	7.01	N.D.
20	0.3821	0.4696	0.5354	50	26.77	0.3856	0.4739	0.5403	50	27.01	7.03	N.D.
20	0.3851	0.4733	0.5396	50	26.98	0.3886	0.4776	0.5445	50	27.22	7.03	N.D.
20	0.3858	0.4742	0.5406	50	27.03	0.3897	0.4790	0.5460	50	27.30	7.03	N.D.

ตารางที่ ๑.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 7 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.3778	0.4644	0.5294	50	26.47	0.3820	0.4695	0.5352	50	26.76	7.04	N.D.
30	0.3785	0.4652	0.5303	50	26.52	0.3830	0.4707	0.5366	50	26.83	7.04	N.D.
30	0.3801	0.4672	0.5326	50	26.63	0.3844	0.4725	0.5386	50	26.93	7.03	N.D.
60	0.3644	0.4479	0.5106	50	25.53	0.3680	0.4523	0.5156	50	25.78	7.06	N.D.
60	0.3653	0.4490	0.5118	50	25.59	0.3692	0.4538	0.5173	50	25.87	7.06	N.D.
60	0.3681	0.4524	0.5158	50	25.79	0.3706	0.4555	0.5193	50	25.96	7.05	N.D.
120	0.3487	0.4286	0.4886	50	24.43	0.3541	0.4352	0.4962	50	24.81	7.11	N.D.
120	0.3494	0.4294	0.4896	50	24.48	0.3563	0.4379	0.4992	50	24.96	7.11	N.D.
120	0.3505	0.4308	0.4911	50	24.56	0.3578	0.4398	0.5013	50	25.07	7.10	N.D.
240	0.3342	0.4108	0.4683	50	23.41	0.3411	0.4192	0.4779	50	23.90	7.16	N.D.
240	0.3356	0.4125	0.4702	50	23.51	0.3415	0.4197	0.4785	50	23.93	7.15	N.D.
240	0.3366	0.4137	0.4716	50	23.58	0.3431	0.4217	0.4807	50	24.04	7.15	N.D.

ตารางที่ ๑.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)


Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 7 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.3185	0.3915	0.4463	50	22.31	0.3243	0.3986	0.4544	50	22.72	7.17	N.D.
480	0.3191	0.3922	0.4471	50	22.36	0.3250	0.3995	0.4554	50	22.77	7.17	N.D.
480	0.3201	0.3934	0.4485	50	22.43	0.3261	0.4008	0.4569	50	22.85	7.16	N.D.
720	0.3140	0.3859	0.4400	50	22.00	0.3187	0.3917	0.4466	50	22.33	7.19	N.D.
720	0.3150	0.3872	0.4414	50	22.07	0.3213	0.3949	0.4502	50	22.51	7.19	N.D.
720	0.3165	0.3890	0.4435	50	22.17	0.3220	0.3958	0.4512	50	22.56	7.18	N.D.
1080	0.3100	0.3810	0.4344	50	21.72	0.3178	0.3906	0.4453	50	22.26	7.20	N.D.
1080	0.3113	0.3826	0.4362	50	21.81	0.3181	0.3910	0.4457	50	22.29	7.20	N.D.
1080	0.3121	0.3836	0.4373	50	21.87	0.3191	0.3922	0.4471	50	22.36	7.19	N.D.
1440	0.3089	0.3797	0.4328	50	21.64	0.3167	0.3893	0.4438	50	22.19	7.22	N.D.
1440	0.3098	0.3808	0.4341	50	21.70	0.3173	0.3900	0.4446	50	22.23	7.21	N.D.
1440	0.3109	0.3821	0.4356	50	21.78	0.3187	0.3917	0.4466	50	22.33	7.20	N.D.

ตารางที่ ๑.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 7 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800	0.3079	0.3784	0.4314	50	21.57	0.3120	0.3835	0.4372	50	21.86	7.24	N.D.
1800	0.3086	0.3793	0.4324	50	21.62	0.3156	0.3879	0.4422	50	22.11	7.23	N.D.
1800	0.3097	0.3807	0.4339	50	21.70	0.3167	0.3893	0.4438	50	22.19	7.23	N.D.
2160	0.3067	0.3770	0.4297	50	21.49	0.3139	0.3858	0.4398	50	21.99	7.25	N.D.
2160	0.3073	0.3777	0.4306	50	21.53	0.3152	0.3874	0.4417	50	22.08	7.25	N.D.
2160	0.3081	0.3787	0.4317	50	21.59	0.3164	0.3889	0.4433	50	22.17	7.24	N.D.
2520	0.3053	0.3752	0.4278	50	21.39	0.3140	0.3859	0.4400	50	22.00	7.26	N.D.
2520	0.3063	0.3765	0.4292	50	21.46	0.3143	0.3863	0.4404	50	22.02	7.25	N.D.
2520	0.3070	0.3773	0.4302	50	21.51	0.3153	0.3875	0.4418	50	22.09	7.25	N.D.
2880	0.3039	0.3735	0.4258	50	21.29	0.3121	0.3836	0.4373	50	21.87	7.27	N.D.
2880	0.3049	0.3748	0.4272	50	21.36	0.3129	0.3846	0.4384	50	21.92	7.26	N.D.
2880	0.3058	0.3759	0.4285	50	21.42	0.3143	0.3863	0.4404	50	22.02	7.25	N.D.

ตารางที่ ๑.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 7 ผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 7 and 1 g Iron Filing/L ;average temperature 28.8 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
3600	0.3028	0.3722	0.4243	50	21.21	0.3116	0.3830	0.4366	50	21.83	7.26	N.D.
3600	0.3035	0.3730	0.4253	50	21.26	0.3121	0.3836	0.4373	50	21.87	7.26	N.D.
3600	0.3044	0.3741	0.4265	50	21.33	0.3129	0.3846	0.4384	50	21.92	7.25	N.D.
4320	0.2969	0.3649	0.4160	50	20.80	0.3060	0.3761	0.4288	50	21.44	7.28	N.D.
4320	0.2980	0.3663	0.4175	50	20.88	0.3070	0.3773	0.4302	50	21.51	7.28	N.D.
4320	0.2987	0.3671	0.4185	50	20.93	0.3084	0.3791	0.4321	50	21.61	7.27	N.D.
5760	0.2922	0.3591	0.4094	50	20.47	0.3041	0.3738	0.4261	50	21.30	7.30	N.D.
5760	0.2934	0.3606	0.4111	50	20.56	0.3043	0.3740	0.4264	50	21.32	7.29	N.D.
5760	0.2943	0.3617	0.4124	50	20.62	0.3056	0.3756	0.4282	50	21.41	7.29	N.D.



ภาคผนวก จ.
ผลการศึกษาผลของปริมาณผงตะไบเหล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 2 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4238	0.5209	0.5938	50	29.69	0.4234	0.5204	0.5933	50	29.66	6.01	N.D.
0	0.4241	0.5213	0.5942	50	29.71	0.4238	0.5209	0.5938	50	29.69	6.01	N.D.
0	0.4245	0.5218	0.5948	50	29.74	0.4241	0.5213	0.5942	50	29.71	6.01	N.D.
5	0.3610	0.4437	0.5058	50	25.29	0.3743	0.4601	0.5245	50	26.22	6.02	1.43
5	0.3626	0.4457	0.5081	50	25.40	0.3757	0.4618	0.5264	50	26.32	6.02	1.45
5	0.3645	0.4480	0.5107	50	25.54	0.3778	0.4644	0.5294	50	26.47	6.02	1.44
10	0.3386	0.4162	0.4744	50	23.72	0.3547	0.4360	0.4970	50	24.85	6.03	2.15
10	0.3406	0.4186	0.4772	50	23.86	0.3560	0.4376	0.4988	50	24.94	6.03	2.16
10	0.3416	0.4199	0.4786	50	23.93	0.3577	0.4396	0.5012	50	25.06	6.03	2.16
20	0.3249	0.3993	0.4552	50	22.76	0.3386	0.4162	0.4744	50	23.72	6.04	2.34
20	0.3254	0.3999	0.4559	50	22.80	0.3397	0.4175	0.4760	50	23.80	6.04	2.34
20	0.3273	0.4023	0.4586	50	22.93	0.3403	0.4183	0.4768	50	23.84	6.04	2.35

ตารางที่ ฉ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 2 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.3160	0.3884	0.4428	50	22.14	0.3273	0.4023	0.4586	50	22.93	6.05	2.93
30	0.3169	0.3895	0.4440	50	22.20	0.3310	0.4068	0.4638	50	23.19	6.05	2.93
30	0.3203	0.3937	0.4488	50	22.44	0.3326	0.4088	0.4660	50	23.30	6.05	2.94
60	0.3039	0.3735	0.4258	50	21.29	0.3182	0.3911	0.4459	50	22.29	6.06	2.93
60	0.3044	0.3741	0.4265	50	21.33	0.3195	0.3927	0.4477	50	22.38	6.06	2.94
60	0.3056	0.3756	0.4282	50	21.41	0.3198	0.3931	0.4481	50	22.40	6.06	2.93
120	0.2872	0.3530	0.4024	50	20.12	0.3040	0.3736	0.4260	50	21.30	6.07	1.15
120	0.2902	0.3567	0.4066	50	20.33	0.3056	0.3756	0.4282	50	21.41	6.07	1.13
120	0.2928	0.3599	0.4103	50	20.51	0.3067	0.3770	0.4297	50	21.49	6.07	1.12
240	0.2645	0.3251	0.3706	50	18.53	0.2796	0.3437	0.3918	50	19.59	6.08	0.47
240	0.2654	0.3262	0.3719	50	18.59	0.2806	0.3449	0.3932	50	19.66	6.08	0.46
240	0.2685	0.3300	0.3762	50	18.81	0.2819	0.3465	0.3950	50	19.75	6.08	0.46

ตารางที่ ฉ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 2 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
480	0.2291	0.2816	0.3210	50	16.05	0.2497	0.3069	0.3499	50	17.49	6.09	0.45
480	0.2306	0.2834	0.3231	50	16.16	0.2502	0.3075	0.3506	50	17.53	6.09	0.45
480	0.2312	0.2842	0.3240	50	16.20	0.2515	0.3091	0.3524	50	17.62	6.09	0.45
720	0.2016	0.2478	0.2825	50	14.12	0.2137	0.2627	0.2994	50	14.97	6.10	0.43
720	0.2026	0.2490	0.2839	50	14.19	0.2142	0.2633	0.3001	50	15.01	6.10	0.42
720	0.2057	0.2528	0.2882	50	14.41	0.2160	0.2655	0.3027	50	15.13	6.10	0.43
1080	0.1515	0.1862	0.2123	50	10.61	0.1709	0.2101	0.2395	50	11.97	6.14	0.21
1080	0.1537	0.1889	0.2154	50	10.77	0.1719	0.2113	0.2409	50	12.04	6.13	0.22
1080	0.1566	0.1925	0.2194	50	10.97	0.1728	0.2124	0.2421	50	12.11	6.13	0.20
1440	0.1011	0.1243	0.1417	50	7.08	0.1263	0.1552	0.1770	50	8.85	6.16	0.16
1440	0.1056	0.1298	0.1480	50	7.40	0.1272	0.1563	0.1782	50	8.91	6.16	0.15
1440	0.1066	0.1310	0.1494	50	7.47	0.1298	0.1595	0.1819	50	9.09	6.15	0.15

ตารางที่ ฉ.1 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 2 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 2 g Iron Filing/L ;average temperature 29.5 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
1800	0.0705	0.0867	0.0988	50	4.94	0.0935	0.1149	0.1310	50	6.55	6.19	0.10
1800	0.0717	0.0881	0.1005	50	5.02	0.0939	0.1154	0.1316	50	6.58	6.19	0.09
1800	0.0732	0.0900	0.1026	50	5.13	0.0952	0.1170	0.1334	50	6.67	6.18	0.09
2160	0.0345	0.0424	0.0483	50	2.42	0.0604	0.0742	0.0846	50	4.23	6.22	0.04
2160	0.0352	0.0433	0.0493	50	2.47	0.0623	0.0766	0.0873	50	4.36	6.22	0.03
2160	0.0377	0.0463	0.0528	50	2.64	0.0635	0.0780	0.0890	50	4.45	6.21	0.05
2520	0.0158	0.0194	0.0221	1	0.02	0.0273	0.0336	0.0383	50	1.91	6.31	0.14
2520	0.0166	0.0204	0.0233	1	0.02	0.0289	0.0355	0.0405	50	2.02	6.31	0.16
2520	0.0179	0.0220	0.0251	1	0.03	0.0299	0.0368	0.0419	50	2.09	6.30	0.17
2880	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.44	12.22
2880	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.43	12.21
2880	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.43	12.25

ตารางที่ ฉ.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 5 g Iron Filing/L ;average temperature 29.0 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4225	0.5193	0.5920	50	29.60	0.4224	0.5192	0.5919	50	29.59	6.03	N.D.
0	0.4231	0.5200	0.5928	50	29.64	0.4225	0.5193	0.5920	50	29.60	6.03	N.D.
0	0.4233	0.5203	0.5931	50	29.66	0.4228	0.5197	0.5924	50	29.62	6.03	N.D.
5	0.2895	0.3558	0.4056	50	20.28	0.3071	0.3775	0.4303	50	21.52	6.08	6.41
5	0.2902	0.3567	0.4066	50	20.33	0.3080	0.3786	0.4316	50	21.58	6.08	6.40
5	0.2923	0.3593	0.4096	50	20.48	0.3093	0.3802	0.4334	50	21.67	6.07	6.41
10	0.2268	0.2788	0.3178	50	15.89	0.2468	0.3033	0.3458	50	17.29	6.09	6.48
10	0.2287	0.2811	0.3204	50	16.02	0.2495	0.3067	0.3496	50	17.48	6.09	6.50
10	0.2297	0.2823	0.3218	50	16.09	0.2504	0.3078	0.3509	50	17.54	6.08	6.50
20	0.1842	0.2264	0.2581	50	12.90	0.2105	0.2587	0.2949	50	14.75	6.11	10.58
20	0.1852	0.2276	0.2595	50	12.97	0.2115	0.2600	0.2963	50	14.82	6.11	11.00
20	0.1883	0.2314	0.2638	50	13.19	0.2126	0.2613	0.2979	50	14.89	6.10	11.02

ตารางที่ ฉ.2 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 5 กรัม/ลิตร (ต่อ)

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 6 and 5 g Iron Filing/L ;average temperature 29.0 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30	0.1600	0.1967	0.2242	50	11.21	0.1873	0.2302	0.2624	50	13.12	6.12	9.74
30	0.1609	0.1978	0.2254	50	11.27	0.1884	0.2316	0.2640	50	13.20	6.12	9.72
30	0.1623	0.1995	0.2274	50	11.37	0.1891	0.2324	0.2650	50	13.25	6.11	9.73
60	0.1140	0.1401	0.1597	50	7.99	0.1463	0.1798	0.2050	50	10.25	6.14	9.15
60	0.1158	0.1423	0.1623	50	8.11	0.1475	0.1813	0.2067	50	10.33	6.14	9.12
60	0.1179	0.1449	0.1652	50	8.26	0.1496	0.1839	0.2096	50	10.48	6.13	9.14
120	0.0572	0.0703	0.0801	50	4.01	0.0898	0.1104	0.1258	50	6.29	6.19	6.02
120	0.0575	0.0707	0.0806	50	4.03	0.0922	0.1133	0.1292	50	6.46	6.19	6.00
120	0.0591	0.0726	0.0828	50	4.14	0.0926	0.1138	0.1297	50	6.49	6.18	6.01
240	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.34	12.47
240	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.34	12.48
240	N.D.			1	<0.01	N.D.			1	<0.01	6.34	12.50

ตารางที่ ฉ.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร

Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 5 and 10 g Iron Filing/L ;average temperature 29.3 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
0	0.4177	0.5134	0.5853	50	29.26	0.4172	0.5128	0.5846	50	29.23	6.01	N.D.
0	0.4179	0.5136	0.5856	50	29.28	0.4175	0.5131	0.5850	50	29.25	6.01	N.D.
0	0.4184	0.5143	0.5863	50	29.31	0.4177	0.5134	0.5853	50	29.26	6.01	N.D.
5	0.1666	0.2048	0.2334	50	11.67	0.3199	0.3932	0.4482	50	22.41	6.08	11.82
5	0.1674	0.2058	0.2346	50	11.73	0.3071	0.3775	0.4303	50	21.52	6.08	11.84
5	0.1687	0.2073	0.2364	50	11.82	0.3083	0.3789	0.4320	50	21.60	6.07	11.85
10	0.0170	0.0209	0.0238	50	1.19	0.2392	0.2940	0.3352	50	16.76	6.12	18.33
10	0.0179	0.0220	0.0251	50	1.25	0.2394	0.2942	0.3354	50	16.77	6.12	18.32
10	0.0204	0.0251	0.0286	50	1.43	0.2407	0.2958	0.3373	50	16.86	6.13	18.35
20	N.D.			1	<0.01	0.1413	0.1737	0.1980	50	9.90	6.17	24.70
20	N.D.			1	<0.01	0.1433	0.1761	0.2008	50	10.04	6.16	24.70
20	N.D.			1	<0.01	0.1446	0.1777	0.2026	50	10.13	6.16	24.74

ตารางที่ ฉ.3 แสดงผลการศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตร ค่าพีเอช 6 ผงตะไบเหล็ก 10 กรัม/ลิตร (ต่อ)

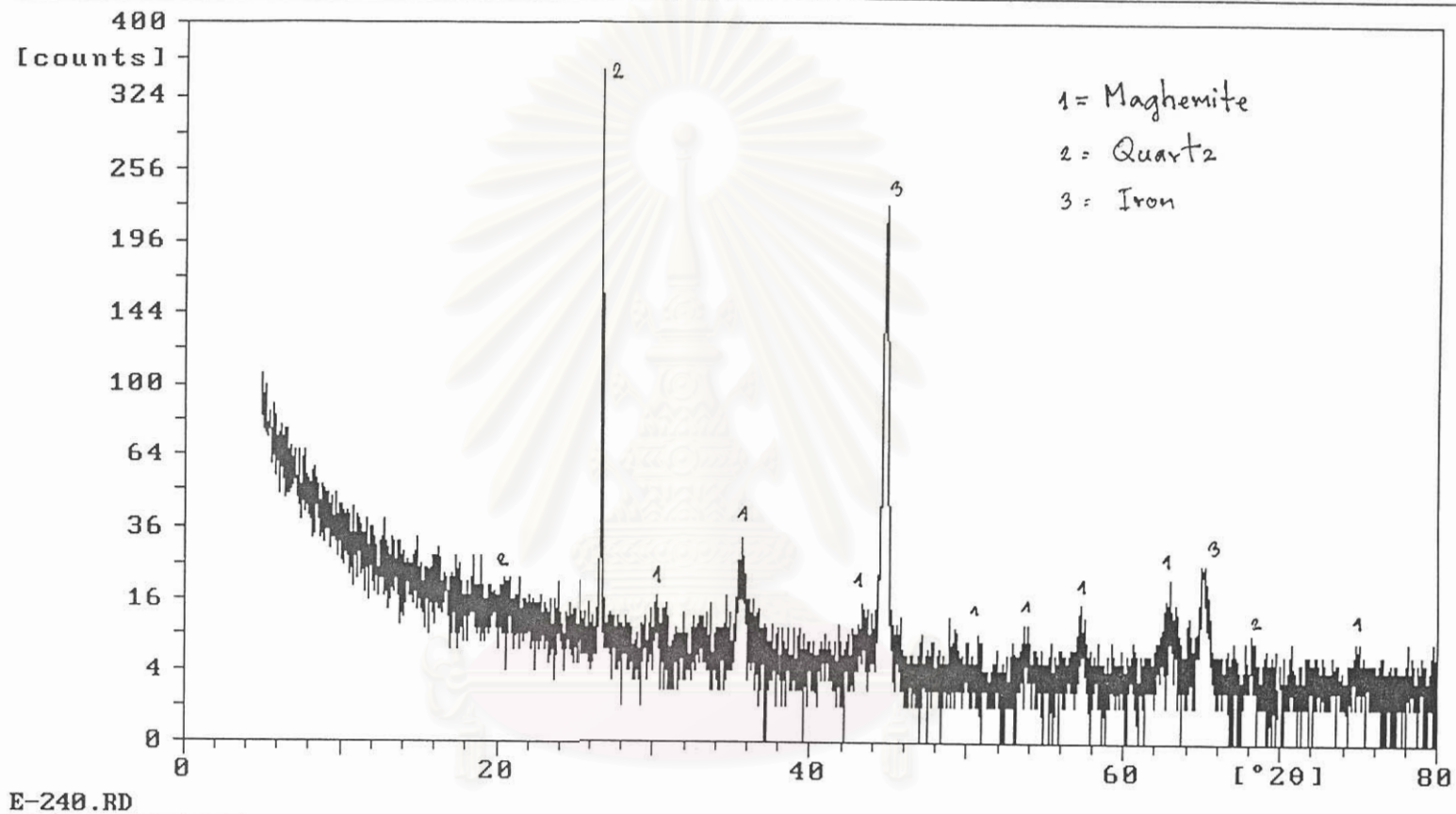
Initial Hexavalent Chromium concentration 30 mg Cr/L, pH 5 and 10 g Iron Filing/L ;average temperature 29.3 celcius												
Time (minute)	Cr(VI)					Total Cr					pH	[Total Fe] (mg/L)
	Absorbance	[Cr(VI)] ₅₇ (mg Cr/L)	[Cr(VI)] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Cr(VI)] (mgCr/L)	Absorbance	[TotalCr] ₅₇ (mg Cr/L)	[TotalCr] ₅₀ (mg Cr/L)	Dilution Ratio	[Total Cr] (mgCr/L)		
30						0.0701	0.0862	0.0982	50	4.91	6.24	27.68
30						0.0710	0.0873	0.0995	50	4.97	6.24	27.70
30						0.0721	0.0886	0.1010	50	5.05	6.24	27.69
60						N.D.			1	<0.01	6.41	27.94
60						N.D.			1	<0.01	6.40	27.96
60						N.D.			1	<0.01	6.40	27.99



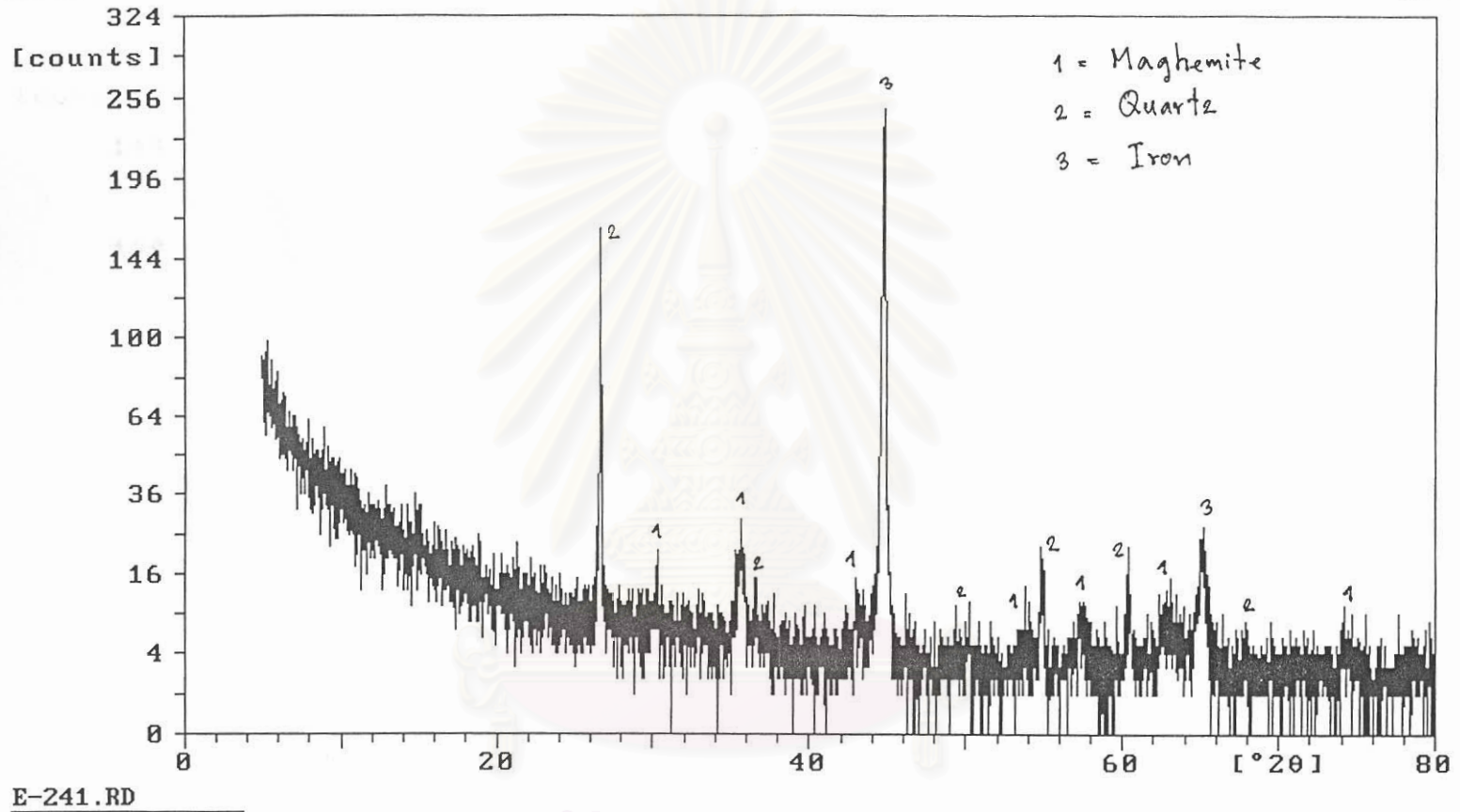
ภาคผนวก ซ.

ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD

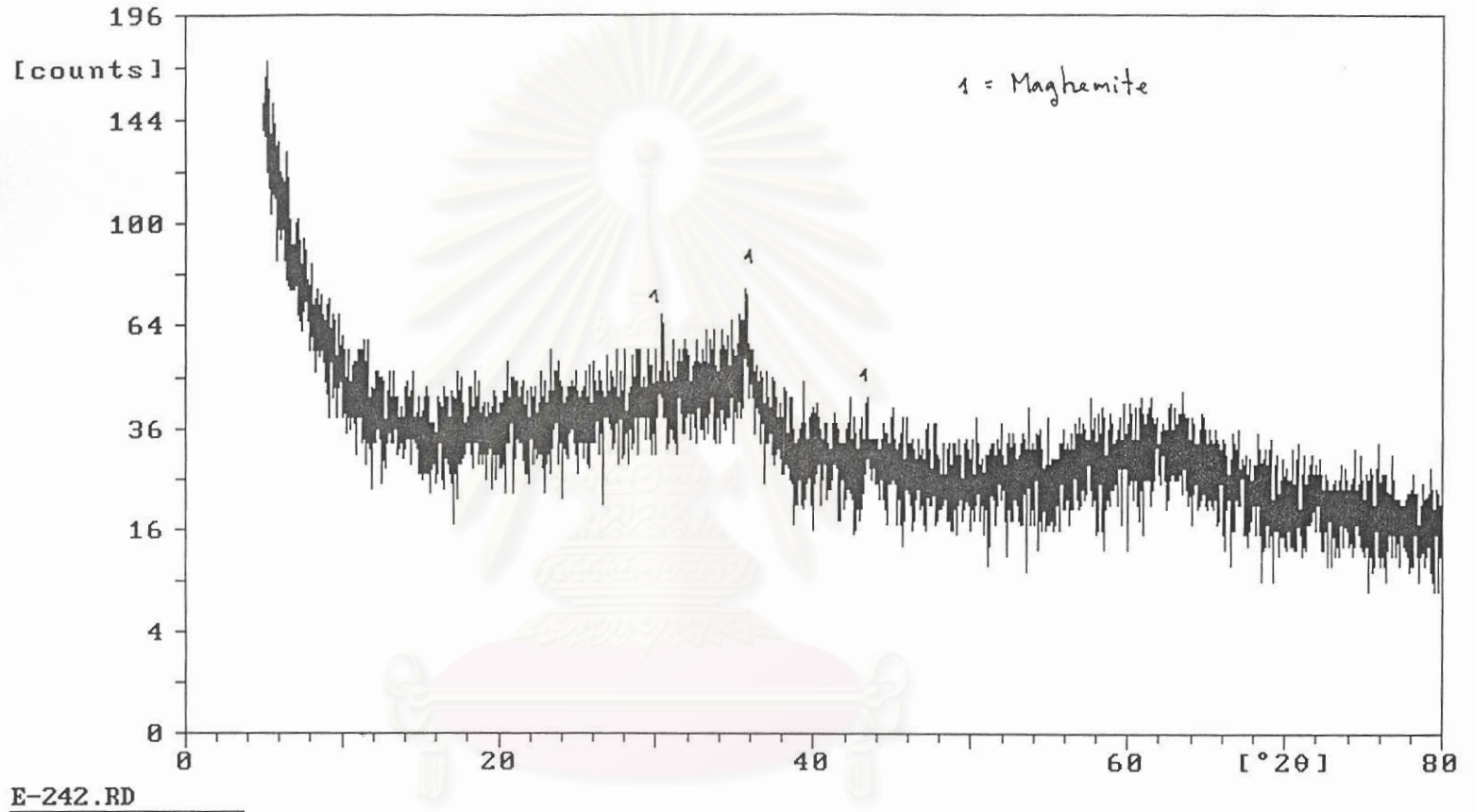
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ช.1 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กภายหลังการทดลองตัวอย่างที่ 1 ด้วยเครื่อง XRD เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตรค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ ๒.2 กราฟการวิเคราะห์ผงตะไบเหล็กภายใต้การทดลองตัวอย่างที่ 2 ด้วยเครื่อง XRD เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมโครเมียม/ลิตรค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร



รูปที่ ช.3 กราฟการวิเคราะห์สัณนิมเหล็กภายหลังการทดลองด้วยเครื่อง XRD เมื่อความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัม โครเมียม/ลิตรค่าพีเอช 6 และผงตะไบเหล็ก 1 กรัม/ลิตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิชิต จริยธรรมานุกูล เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ.2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย