

การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม
โดยใช้เศษผงเหล็ก

REMOVAL OF CHROMIUM (VI) FROM CHROMIUM PLATING
WASTEWATER USING IRON WASTE PARTICLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**REMOVAL OF CHROMIUM (VI) FROM CHROMIUM PLATING
WASTEWATER USING IRON WASTE PARTICLES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-2056-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดเฮกซะวาเลนไทโครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก
REMOVAL OF CHROMIUM (VI) FROM CHROMIUM PLATING
WASTEWATER USING WASTE IRON PARTICLES
ชื่อนักศึกษา นางสาวศุภชวตี วีระพงษ์
รหัสประจำตัว 46064503
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.อุสารัตน์	ถาวรชัยสิทธิ์
ดร.สุวรรณี	จรรยาพูน
ดร.ชลด	จารุสุทธิรักษ์
ดร.เสาวภาค	สุขตระกูลเวช

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 ตุลาคม 2548 เวลา 9.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารัตนวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 602

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....13.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๘.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงาน ชุบโครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก
นักศึกษา	นางสาวศุทธวดี วีระพงษ์
รหัสประจำตัว	46064503
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมด้วยเศษผงเหล็ก โดยทำการทดลองแบบแบทช์ และคอลัมน์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม จากผลการศึกษาสถานะในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสถานะในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม คือ พีเอช 3 ขนาดของเศษผงเหล็ก 35->200 เมช ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที และปริมาณของเศษผงเหล็ก 10 กรัมค่อน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 1 ลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมด คือ 100% และ 84.9% ตามลำดับ สำหรับปริมาณ NaOH และ Ca(OH)₂ 50 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ใช้ในการตกตะกอน ไดรวาเลนท์โครเมียมและเหล็กทั้งหมด คือ 0.1 และ 0.2 มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่าปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอน NaOH และ Ca(OH)₂ คือ 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาทางจลนศาสตร์เคมีพบว่า ปฏิกริยาการกำจัดเป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่ง การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงชุบโครเมียมโดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมด คือ 100 % สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าที่อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมดได้ แต่จะเกิดการอุดตันที่ชั่วโมงที่ 10 นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และโครเมียมทั้งหมดในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมได้

คำสำคัญ : เฮกซะวาเลนท์โครเมียม น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม เศษผงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Removal of Chromium (VI) from Chromium Plating Wastewater using Iron Waste Particles
Student	Ms. Suttawadee Weerapong
Student ID.	46064503
Degree	Master of Science
Programme	Environmental Chemistry
Year	2005
Thesis Advisor	Dr. Suwannee Junyapoon

ABSTRACT

This research studied the removal efficiency of hexavalent chromium contaminated in chromium plating wastewater using waste iron particles both in batch and column experiments. Synthetic wastewater and chromium plating wastewater were used in this study. Optimum conditions for removal of 30 mg/l of hexavalent chromium in synthetic wastewater were examined using batch experiment. It was found that the optimum conditions were pH 3, iron particle sizes 35->200 mesh, agitating rate 250 rpm, contact time 180 minutes and iron dosage 10 g/l. Removal efficiencies of hexavalent chromium and total chromium were 100% and 84.9%, respectively. Trivalent chromium and total iron were removed by precipitating with NaOH and Ca(OH)₂ 50 %w/v. The amounts of NaOH and Ca(OH)₂ used were 0.1 and 0.2 ml, respectively. The amounts of precipitate of trivalent chromium and total iron precipitated by NaOH and Ca(OH)₂ 50% w/v were 200 and 500 mg/l, respectively. A kinetic reaction of hexavalent chromium degradation was first order reaction. Removal of hexavalent chromium and total chromium in chromium plating wastewater was also investigated under optimum conditions obtained from batch experiments. Removal efficiencies of both hexavalent chromium and total chromium were 100%. Column experiment was also studied under the optimum conditions obtained from batch experiments. At flow rate of 25 ml/min and hexavalent chromium concentration of 30 mg/l, hexavalent chromium and total chromium were removed however the flow rate decreased after 10 hours because of clogging. The removal of hexavalent chromium and total chromium in chromium plating wastewater was also investigated.

Key words : hexavalent chromium, chromium plating wastewater, iron waste particles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวศ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัททงทน โลหะ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากบริษัท

ขอขอบพระคุณ บริษัทผลิตภัณฑ์วิสวะ ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษผงเหล็ก

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นอกเหนือจากบุคคลที่กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้กำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

ศุทธวดี วีระพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครเมียม.....	4
2.1.1 การหุบโครเมียม.....	9
2.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม.....	12
2.1.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	13
2.2 เหล็ก.....	16
2.2.1 ประเภทของเหล็ก.....	16
2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี.....	18
2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	19
2.3.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation).....	19
2.3.2 ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction).....	19
2.4 ปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก.....	20
2.5 จลนพลศาสตร์เคมี.....	21
2.5.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา.....	21
2.5.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.5.1.2 ปฏิบัติงานอันดับหนึ่ง.....	23
2.5.1.3 ปฏิบัติงานอันดับสอง.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี.....	31
3.1.1 อุปกรณ์.....	31
3.1.2 สารเคมี.....	31
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก.....	32
3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก.....	33
3.2.3 การเตรียมสตัด้อคสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	33
3.2.3.1 เตรียมสตัด้อคสารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	33
3.2.3.2 เตรียมน้ำเตียสังเคราะห์โครเมียม.....	33
3.2.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	33
3.2.4.1 ศึกษาผลของ pH.....	33
3.2.4.2 ศึกษาผลของขนาดของเศษผงเหล็ก.....	34
3.2.4.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า.....	34
3.2.4.4 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส.....	34
3.2.4.5 ศึกษาผลของปริมาณของเศษผงเหล็ก.....	35
3.2.5 ศึกษาปริมาณ NaOH และ Ca(OH) ₂ ที่ใช้ในการตกตะกอนไฮดรอกไซด์โครเมียม และเหล็ก.....	35
3.2.6 ศึกษาตัวขัดขวางการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	36
3.2.6.1 Cr:Ni.....	36
3.2.6.2 Cr:Cu.....	37
3.2.6.3 Cr:Ni:Cu.....	37
3.2.7 ศึกษาจลนศาสตร์เคมี.....	38
3.2.8 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	38
3.2.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจากโรงงานชุบโครเมียม.....	39
3.2.9.1 การทดลองแบบเบทซ์.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญต์เห็นหน้าเบเซประโยชน์ท่านการค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.2.9.2 การทดลองแบบคอลัมน์.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเศษผงเหล็ก.....	40
4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	43
4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	44
4.2.2 ขนาดที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	44
4.2.3 ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	45
4.2.4 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม...	46
4.2.5 ปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัด เฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	47
4.3 คุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็ก.....	47
4.4 ผลการศึกษาปริมาณ NaOH และ Ca(OH) ₂ ที่ใช้ในการตกตะกอน ไตรวาเลนท์โครเมียม และเหล็ก.....	48
4.5 ผลการศึกษาตัวขัดขวางในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	49
4.6 ผลการศึกษากลศาสตร์เคมี.....	51
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยการทดลอง แบบคอลัมน์.....	54
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้ง โรงงานชุบโครเมียม.....	55
4.8.1 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงาน ชุบโครเมียม โดยการทดลองแบบเบทซ์.....	55
4.8.2 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงาน ชุบโครเมียม โดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
บรรณานุกรม.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก. วิธีการวัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	64
ภาคผนวก ข. กราฟมาตรฐานของเฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	66
ภาคผนวก ค. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด ในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	68
ภาคผนวก ง. ปริมาณของ NaOH และ Ca(OH) ₂ ที่ใช้ในการตกตะกอน ไทรวาเลนที่โครเมียม และเหล็ก.....	72
ภาคผนวก จ. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาตัวขัดขวาง.....	76
ภาคผนวก ฉ. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาอันดับของปฏิกิริยากำจัด เฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	84
ภาคผนวก ช. การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	87
ภาคผนวก ซ. การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม.....	89
ภาคผนวก ฌ. ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทของอุตสาหกรรมที่มีการใช้โครเมียมในกระบวนการผลิต.....	4
2.2	วิธีการแยกโลหะออกจากสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	16
2.3	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่ 25 ⁰ C.....	20
3.1	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของเศษผงเหล็ก.....	33
4.1	พื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กวิเคราะห์โดยเครื่องออร์โตซอร์บ.....	42
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กวิเคราะห์โดย XRF.....	42
4.3	องค์ประกอบของธาตุในเศษผงเหล็กก่อนและหลังการทดลอง วิเคราะห์ โดย XRD.....	42
4.4	ความเข้มข้น Cr ⁶⁺ , Total Cr และ Total Fe ก่อนและหลังการทดลองภายใต้ สภาวะที่เหมาะสม.....	48
4.5	ปริมาณ NaOH 50% w/v และ Ca(OH) ₂ 50% w/v ที่ใช้, น้ำหนักตะกอนที่ เกิดขึ้น, และปริมาณ Cr ⁶⁺ , Total Chromium และ Total Fe ในน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH) ₂	48
4.6	ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ.....	53
4.7	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ , Total Cr และ Total Fe ก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ที่ อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที.....	55
4.8	ผลการวิเคราะห์ค่าโลหะหนักต่างๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม.....	55
4.9	ผลการวิเคราะห์ Cr ⁶⁺ , Total Cr, นิกเกิล, คอปเปอร์ และ Total Fe ในน้ำ ทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบเบทซ์	56
ข.1	ข้อมูลกราฟมาตรฐาน (Standard Curve Data) ของเฮกซะวาเลนซ์- โครเมียม.....	67
ค.1	ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม.....	69
ค.2	ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์- โครเมียม.....	69
ค.3	ผลของความเร็วยวรอบที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่	หน้า	
ค.4	ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม...	70
ค.5	ผลของปริมาณเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....	71
ง.1	ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลือหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH) ₂ 50% w/v.....	73
ง.2	ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH) ₂	73
ง.3	ผลของปริมาณ NaOH และ Ca(OH) ₂ ที่ใช้ในการตกตะกอน และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH) ₂	73
จ.1.1	ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลือ.....	77
จ.1.2	ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ.....	77
จ.1.3	ผลของความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือ.....	78
จ.1.4	ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น.....	78
จ.2.1	ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลือ.....	79
จ.2.2	ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ.....	79
จ.2.3	ผลของความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่เหลือ.....	80
จ.2.4	ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น.....	80
จ.3.1	ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลือ.....	81
จ.3.2	ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ.....	81
จ.3.3	ผลของความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือ.....	82
จ.3.4	ผลของความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่เหลือ.....	82
จ.3.5	ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น.....	83
ฉ.1	ผลของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	85
ช.1	ผลการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมแบบคอลัมน์.....	88
ช.1	ผลของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และคอปเปอร์ ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมแบบแบทช์.....	90
ช.2	ผลการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และคอปเปอร์ ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมแบบคอลัมน์.....	90
ฉ.1	ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของ ไตรวาเลนท์โครเมียม.....	6
2.2	ผลของ pH ต่อรูปแบบของ Cr^{3+} (Cr^{3+} ตกตะกอนในรูป $Cr(OH)_3$ ที่ pH=6.4).....	9
2.3	ขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะ รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ และสารมลพิษที่เกิดขึ้น..	11
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	23
2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	24
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/[A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง.....	26
4.1	ลักษณะทางกายภาพของเศษผงเหล็ก.....	40
4.2	ลักษณะของอนุภาคของเศษผงเหล็กด้วย SEM กำลังขยาย 300 เท่า.....	41
4.3	โครงสร้างผลึกด้วย XRD.....	43
4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่พีเอชต่าง ๆ.....	44
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ	45
4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	45
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ..	46
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่เศษผงเหล็กปริมาณต่าง ๆ.....	47
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และนิเกิล ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ.....	49
4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และคอปเปอร์ ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ.....	50
4.11	ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม, นิเกิล และคอปเปอร์ ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ.....	51
4.12	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	52
4.13	ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่		หน้า
4.14	ปฏิกริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	53
4.15	ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมและโครเมียมทั้งหมด...	54
4.16	ประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล คอปเปอร์ เหล็ก ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	57
ก.1	ขั้นตอนการวัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	65
ข.1	กราฟมาตรฐาน (Standard Curve) ของเฮกซะวาเลนที่โครเมียม.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
Cr ³⁺	ไตรวาเลนต์โครเมียม
Cr ⁶⁺	เฮกซะวาเลนต์โครเมียม
Fe	เหล็ก
Cu	คอปเปอร์
Ni	นิกเกิล
UV-Vis	เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
AAS	อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
XRF	เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometer)
SEM	สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope)
EDS	เอนเนอจิสเพอร์ซิฟสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive Spectrometer)
XRD	เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction)
A _t	ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
A ₀	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
t	เวลา (นาที)
°C	องศาเซลเซียส
k	ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา
R ²	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
kcal/mol	กิโลแคลอรีต่อโมล
cal/mol	แคลอรีต่อโมล
g/cc	กรัมต่อคิวบิกเซนติเมตร
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
w/v	โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
e ⁰	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันมีการแข่งขันทางเศรษฐกิจของนานาประเทศอย่างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมุ่งพัฒนา ด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ให้ทันสมัย สำหรับประเทศไทยได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางการผลิตของ ประเทศจากเดิมที่เป็นประเทศเกษตรกรรมไปเป็นประเทศกึ่งอุตสาหกรรม ทำให้มีการขยายตัวของ ภาคอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้าขาดการจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างถูกวิธีจะ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัญหามลพิษทางน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ พบว่าน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุทำให้น้ำในแม่น้ำเน่าเสียกว่าร้อยละ 30 ของน้ำทิ้งทั้งหมด (ศิริกัลยา และคณะ, 2541) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทิ้งนี้มีความเข้มข้นของมลพิษสูง จะเห็นได้จากแม่น้ำสายหลักของ ประเทศ เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำพอง แม่น้ำปิง พบว่ามีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรมเน่าเสีย ซึ่งหนึ่งในสาเหตุสำคัญเกิดจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนั่นเอง (สมชาย และคณะ, 2539)

อุตสาหกรรมชุบโลหะ ได้แก่ การชุบโครเมียม นิกเกิล สังกะสี ทองแดง ฯลฯ เป็น อุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งน้ำทิ้งจาก โรงงานประเภทนี้มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่มาก ประเภทของโลหะหนักที่ปนเปื้อนขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของแต่ละ โรงงาน โครเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ โครเมียมที่พบมากในน้ำทิ้งส่วนใหญ่ อยู่ในรูปไตรวาเลนท์โครเมียม และเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (อนันต์, 2527) สารประกอบโครเมียมทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำลายเซลล์ต่างๆ ของร่างกาย และสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิต ได้ทั้งทางการหายใจ การบริโภค และทางผิวหนัง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของ แหล่งน้ำ (กรรณิการ์ และคณะ, 2527) ปัจจุบันแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะมีระบบการ กำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม จากการที่เฮกซะวาเลนท์โครเมียมมีความเป็นพิษสูงกว่าไตรวาเลนท์โครเมียม และไม่สามารถถูกกำจัดโดยวิธีตกตะกอน โดยต่าง ทำให้การบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมต้องใช้หลายขั้นตอน เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กหลายแห่งไม่สามารถมีระบบบำบัดที่มี ประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ จึงมีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีโครเมียมปนอยู่ ลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยที่ไม่ผ่านการบำบัด การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยใช้เศษผง เหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ มีข้อดีคือ เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกไม่ต้องใช้ขั้นตอนการกำจัดหลายขั้นตอน ไม่ต้อง ใช้สารเคมีหลายชนิด ใช้พื้นที่น้อย มีราคาถูก รวมทั้งเป็นการนำเอาเศษวัสดุเหลือใช้นำมาใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำทิ้งจาก โรงงานชุบโครเมียม โดยใช้เศษผงเหล็ก ซึ่งเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนรูปเป็น ไตรวาเลนท์โครเมียม จากนั้น แยกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะตกตะกอนไทรวาเลนท์โครเมียมด้วยต่าง โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมชุบโครเมียมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาสภาวะในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำทิ้ง โดยใช้เศษผงเหล็ก
- 2) ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก และกำจัดไทรวาเลนท์โครเมียม และเหล็กทั้งหมดโดยการตกตะกอนด้วยต่าง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเศษผงเหล็ก ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X – ray Fluorescence Spectrometer; XRF) โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X – ray Diffraction Spectrometer; XRD) องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ของเศษผงเหล็กโดยใช้เครื่องเอ็นเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive Spectrometer; EDS) ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องออโตซอร์บ (Autosorb) และขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope; SEM)
- 2) ศึกษาสภาวะในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยการทดลองแบบแบทช์ (batch test) ได้แก่ พีเอช ขนาดของเศษผงเหล็ก ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาในการสัมผัส และปริมาณของเศษผงเหล็ก โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์
- 3) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลา
- 4) ศึกษาปริมาณ NaOH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ใช้ในการตกตะกอนไทรวาเลนท์โครเมียม และเหล็กทั้งหมด
- 5) ศึกษาสภาวะในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ (column test) โดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์
- 6) นำเอาสภาวะที่ได้จากการทดลอง ไปใช้ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้สภาวะการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมในน้ำทิ้งโดยใช้เศษผงเหล็ก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม
- 2) ได้วิธีการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมที่ง่าย มีต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง
- 3) เป็นการใช้เศษผงเหล็กซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์
- 4) เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครเมียม

ปัจจุบันโครเมียมนับเป็นโลหะหนักที่มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมทั่วโลก จากข้อมูลปริมาณการใช้โครเมียม ในปี ค.ศ. 1930 – 1989 พบว่าทั่วโลกมีการใช้โครเมียมในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี โดยเฉพาะแล้วจะมีปริมาณการใช้มากถึง 10^7 ตันต่อปี (Ozer และคณะ, 1997) และคาดว่าปริมาณการใช้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมที่ใช้โครเมียมในกระบวนการผลิตมีหลายประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.1

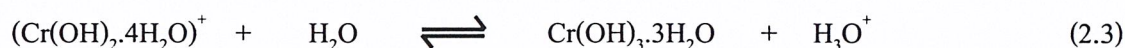
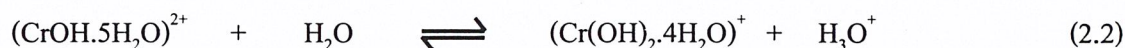
ตารางที่ 2.1 ประเภทของอุตสาหกรรมที่มีการใช้โครเมียมในกระบวนการผลิต (เพิ่มพงษ์, 2541)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
อุตสาหกรรมก่อสร้าง	โครเมียม (II) ออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมสี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	คะตะลิสต์, ออกซิไดส์ สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมียม (VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียม (III) อะซิเตต, โครเมียม (III) ฟลูออไรด์	ย้อมสีผ้า

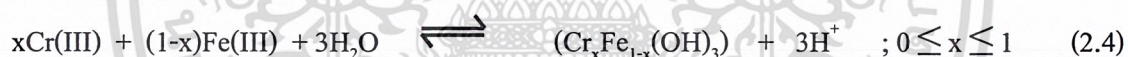
สาเหตุสำคัญที่ทำให้โครเมียมมีบทบาทต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากโครเมียมมีคุณสมบัติพิเศษที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุคืบในกระบวนการผลิตได้ (Richard, 1998) คือ

1. เป็นหมู่ธาตุทรานซิชันที่มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ที่สำคัญได้แก่ ไตรวาเลนต์โครเมียม (trivalent chromium; Cr^{3+}) และ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (hexavalent chromium; Cr^{6+}) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบต่าง ๆ ที่มีสีได้ เช่น Cr_2O_3 , มีสีเขียว, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$, มีสีม่วง เป็นต้น จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเม็ดสี

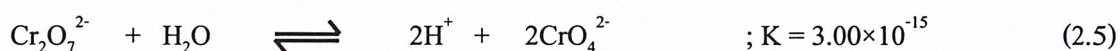
ไตรวาเลนต์โครเมียม ปรากฏอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solution) ในรูปของไฮดรตไอออน (hydrated ion) คือ $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ดังปฏิกิริยาที่ 2.1 - 2.3



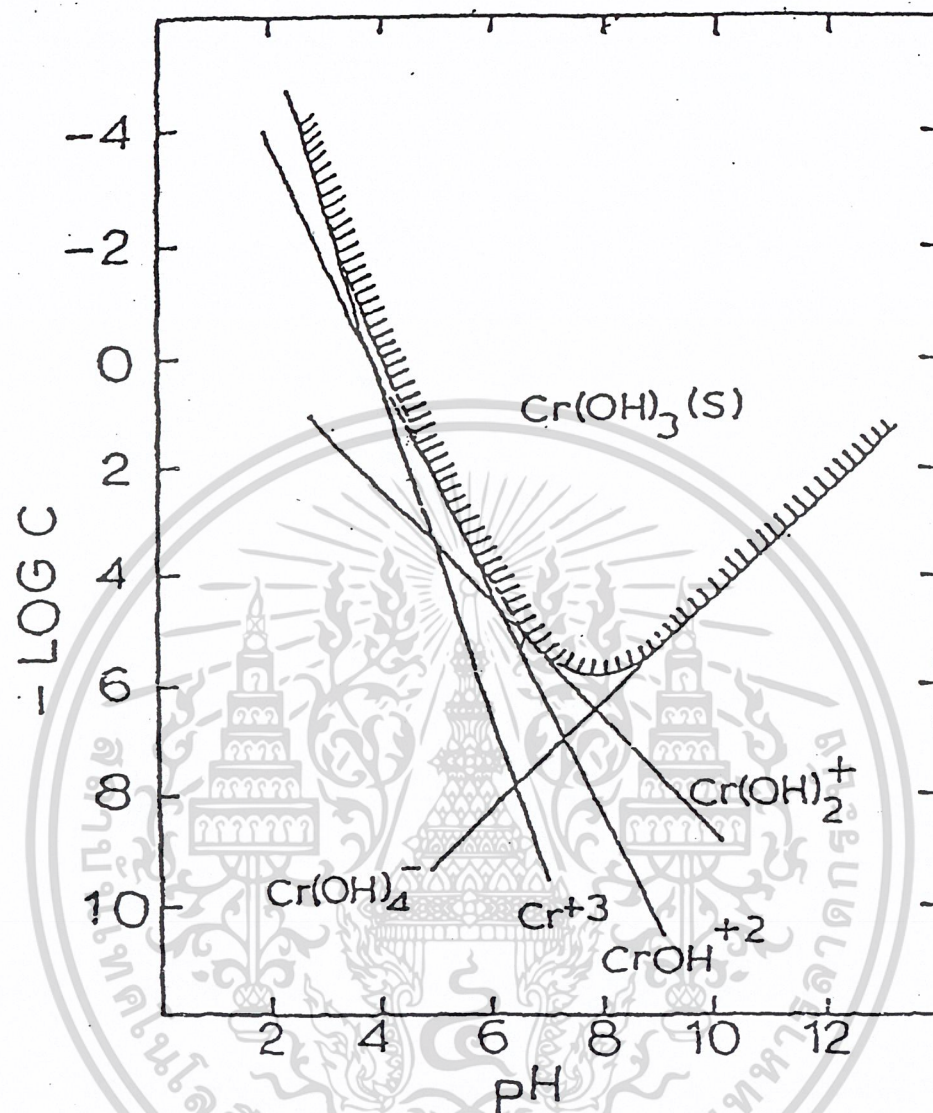
ดังนั้น การเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จำนวน 3 ไอออน จะทำให้ $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ กลายเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3.3\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่มีความสามารถในการละลายต่ำ (Quagliano, 1963) และเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 10.5 (Rai และ Zachara, 1986) ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนต์โครเมียมขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรวาเลนต์โครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Kim, 1976) นอกจากนี้ สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมยังสามารถปรากฏในรูปสารละลายของแข็ง (solid solution) โครเมียม (III) เหล็ก (III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) (Eary และ Rai, 1988) ดังปฏิกิริยาที่ 2.4



เฮกซะวาเลนต์โครเมียมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบร่วมกับออกซิเจน (Oxospecies) คือ โครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) (Reger และคณะ, 1997) โดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีแนวโน้มที่จะปรากฏเป็นไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกรด และความเข้มข้นของโครเมียมมากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Khadhiar, 1997) และปรากฏเป็น โครเมตไอออนในสารละลายที่มีค่าพีเอชเป็นกลางหรือเป็นด่าง สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออนและโครเมตไอออนเป็นดังปฏิกิริยาที่ 2.5

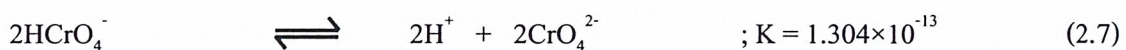


โดยที่ K คือ ค่าคงที่ของการละลาย



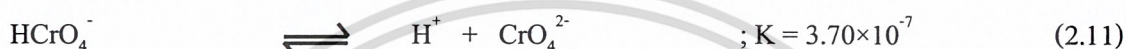
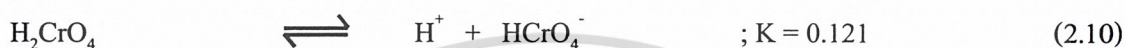
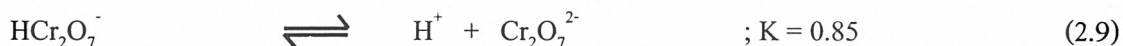
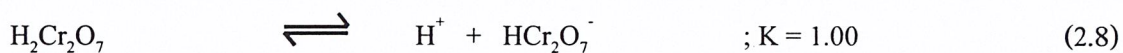
รูปที่ 2.1 ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโครมาเลนที่โครเมียม (Kim, 1976)

ปฏิกิริยาเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ไบโครเมตไอออน (HCrO_4^-) และ โครเมตไอออน (CrO_4^{2-}) เป็นดังปฏิกิริยาที่ 2.6 และ 2.7 (Quagliano, 1963)

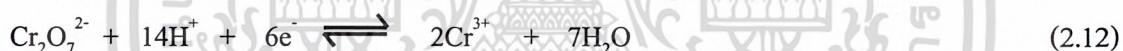


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

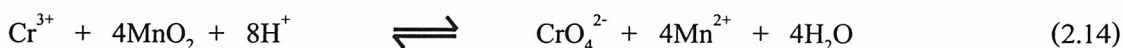
ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมจะอยู่ในรูปโบโครเมตไอออน แต่เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมตไอออน (Khadhiar, 1997) ปฏิริยาเคมีแสดงการแตกตัวให้เฮกซะวาเลนซ์โครเมียมไอออนต่าง ๆ เมื่อสารประกอบของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมละลายน้ำดังปฏิริยาที่ 2.8 - 2.11 (จินตนา, 2541)



สารประกอบของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อเกิดปฏิริยาแล้วจะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนซ์โครเมียมโดยตัวให้อิเลคตรอนเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อัตราการเกิดปฏิริยาของสารประกอบของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเป็นดังปฏิริยาที่ 2.12 (Rollinson, 1973) หรือ 2.13 (Nelson, 1995)



สารประกอบของไตรวาเลนซ์โครเมียมที่ได้จากปฏิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม อาจเกิดปฏิริยาออกซิเดชันขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Reoxidation reaction) ทำให้ได้สารออกซิไดซ์ที่สำคัญ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของแมงกานีส (III, IV) และสารประกอบไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส (III, IV) (Mn (III, IV) Hydroxide) (Buerge และ Hug, 1999) ตัวอย่างเช่น สารประกอบแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ดังปฏิริยาที่ 2.14 (Nelson, 1995)



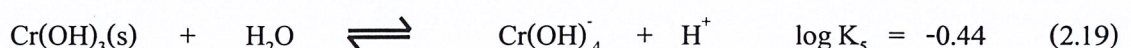
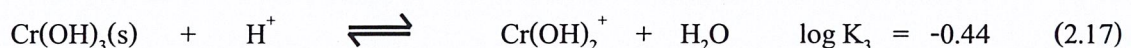
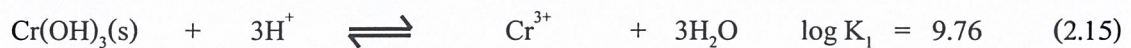
2. โลหะโครเมียมสามารถทำปฏิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก กรดคลอริก และกรดเปอร์คลอริก ทำให้เกิดออกไซด์ชั้นบาง ๆ เคลือบที่ผิว และส่งผลให้โลหะที่อยู่ด้านในไม่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือทำปฏิริยากับกรดอ่อนทั่วไปได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าโครเมียมออกไซด์เหล่านี้ สามารถต้านการผุกร่อนโลหะชนิดอื่นได้เป็นอย่างดี

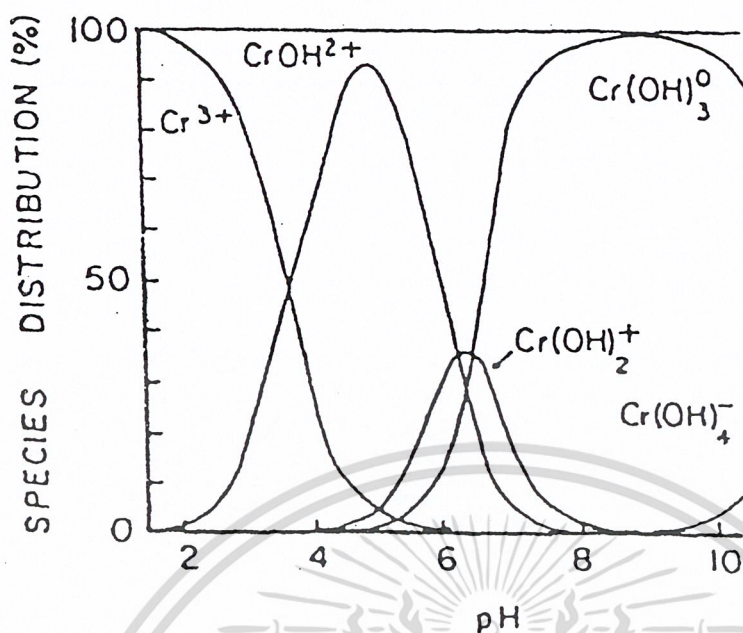
3. โครเมียมสามารถเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordinations) หรือสารเชิงซ้อน (complex compounds) ที่มีเลขโคออดิเนชัน 6 เช่น $[\text{Cr}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$, $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ และ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$ เป็นต้น จึงมักจะถูกนำมาใช้ในการผลิตสารเคมีต่าง ๆ ได้

4. สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ เช่น จุดหลอมเหลว $1,875^\circ\text{C}$, จุดเดือด $2,199^\circ\text{C}$, ความหนาแน่น 7.19 g/cc (ที่อุณหภูมิ 20°C), ความร้อนของการหลอมเหลว $3.2-3.5\text{ kcal/mol}$, ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่จุดเดือด 76.635 kcal/mol และความร้อนจำเพาะ 5.55 cal/mol เป็นต้น

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะ อุตสาหกรรมสี ฟอกย้อม ฟอกหนัง อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี ได้นำโครเมียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งไตรวาเลนท์โครเมียม และเฮกซะวาเลนท์โครเมียมมาใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ และเมื่อกระบวนการผลิตสิ้นสุดลง โครเมียมในน้ำที่จะผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อลดความเป็นพิษลง โดยเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนท์โครเมียม ก่อนจะถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จากข้อมูลการสำรวจในปี 1988 โดย Nriagu และ Pancyna รายงานว่า มีปริมาณโครเมียมที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำทั่วโลกมากถึง $45 \times 10^3 - 239 \times 10^3$ ตันต่อปี (James, 1995) ส่งผลให้ทั่วโลกมีการปนเปื้อนของโครเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติ แหล่งน้ำใต้ดิน และดินเป็นจำนวนมาก

โครเมียมส่วนใหญ่ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ มักจะอยู่ในรูปไตรวาเลนท์โครเมียม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภท hydroxocomplexes ในรูปต่าง ๆ ดังปฏิกิริยาที่ 2.15 - 2.19 และรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปแบบ (species) ของไตรวาเลนท์โครเมียมจะขึ้นอยู่กับ pH ของระบบ หรือการเปลี่ยนแปลง pH ของแหล่งน้ำนั้น โครเมียมดังกล่าวจะไปจับกับอนุภาค (particles) และสารอินทรีย์ (organic matters) ต่าง ๆ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกอนดินในแหล่งน้ำนั้นได้ นอกจากนี้แหล่งน้ำและตะกอนดินเหล่านี้ มักจะมีสาร oxidizing agent เช่น MnO_2 จึงมีผลทำให้ไตรวาเลนท์โครเมียมถูกออกซิไดซ์กลายเป็นเฮกซะวาเลนท์โครเมียมสะสมอยู่ในแหล่งน้ำ





รูปที่ 2.2 ผลของ pH ต่อรูปแบบของ Cr^{3+} (Cr^{3+} ตกตะกอนในรูป $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ที่ $\text{pH}=6.4$) (Alan, 1995)

2.1.1 การชุบโครเมียม (Chromium Plating) (เฮเลน, 2537)

การชุบเคลือบผิวบนโลหะชนิดอื่นด้วยโครเมียมโดยทั่วไป มี 2 ลักษณะ คือ

1. การชุบโครเมียมชนิดบาง หรือชุบเพื่อความสวยงาม มีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันไม่ให้โลหะอื่นเป็นสนิม และให้ความสวยงามทนทานต่อการเสียดสี และทนต่อการผุกร่อน
2. การชุบโครเมียมชนิดหนา มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาของผิวโลหะนั้น เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องมือ เครื่องจักรที่สึกหรอ เนื่องจากการใช้งาน หรือเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ทนต่อความร้อน ทนต่อการเสียดสี มีความฝืดต่ำ

สำหรับกระบวนการชุบโลหะในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับลักษณะและข้อจำกัดของชิ้นงานที่ชุบ ลักษณะของงานชุบสารเคมีที่ใช้ และวัตถุประสงค์ในการชุบ เป็นต้น

(จารุวรรณ, 2542)

ขั้นตอนการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (เฮเลน, 2537)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

1. การเตรียมผิวงานก่อนชุบ

เป็นการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงาน ก่อนที่จะนำมาชุบโลหะเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อให้การเคลือบผิวได้ผลดี โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สิ่งสกปรกได้แก่คราบน้ำมัน ไขมัน สนิมเหล็ก ถูกกำจัดออกไป โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

1.1) การขัดชิ้นงานก่อนชุบ (Polishing)

การขัดมี 2 แบบคือ การขัดหยาบและการขัดละเอียด โดยชิ้นงานก่อนงานชุบต้องนำมาขัดทำความสะอาดเสียก่อน ซึ่งอุปกรณ์ในการขัดประกอบด้วยมอเตอร์วงล้อผ้า ผงซิลิกา และไขวัว

สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก อาจใช้มอเตอร์โดยเป็นตัวหมุน ซึ่งชิ้นงานภายในถังหมุนจะเสียดสีกับหินขัด หรืออาจใช้ขัดด้วยถังเขย่า ซึ่งคล้ายกับถังแบบหมุน โดยใช้เครื่องเขย่า (Vibration) ให้ชิ้นงานเสียดสีกับหินขัดทำให้เรียบเป็นเงา

1.2) การทำความสะอาดก่อนชุบ (Cleaning)

เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าผิวของชิ้นงานไม่สะอาดพอ จะทำให้การชุบได้ผลไม่ดี เพราะโลหะจะเกาะติดกับผิวของชิ้นงานได้ไม่ดี การล้างทำความสะอาดมีหลายวิธีดังนี้

- การล้างด้วยสารละลาย (Solvent cleaner) มักใช้ทำความสะอาดผิวเพื่อล้างคราบไขมัน น้ำมัน ไขมัน พาราฟิน และเรซินออกไป โดยสารละลายที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่ดี คือ สามารถทำความสะอาดได้ทั้งร้อนและเย็น หรือลักษณะที่เป็นไอ ไม่ติดไฟง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะ มีลักษณะอยู่ตัว ที่นิยมใช้ คือ trichloroethylene และ tetrachloroethylene แต่มีข้อจำกัดคือ ค่อนข้างเป็นพิษ การล้างชิ้นงานด้วยวิธีนี้ต้องมีการกำจัดฝุ่นหรือของแข็งที่ผสมคราบน้ำมันที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าเป็นฟิล์มบาง ๆ ดังนั้นจึงต้องล้างด้วยด่างก่อนนำไปชุบต่อไป

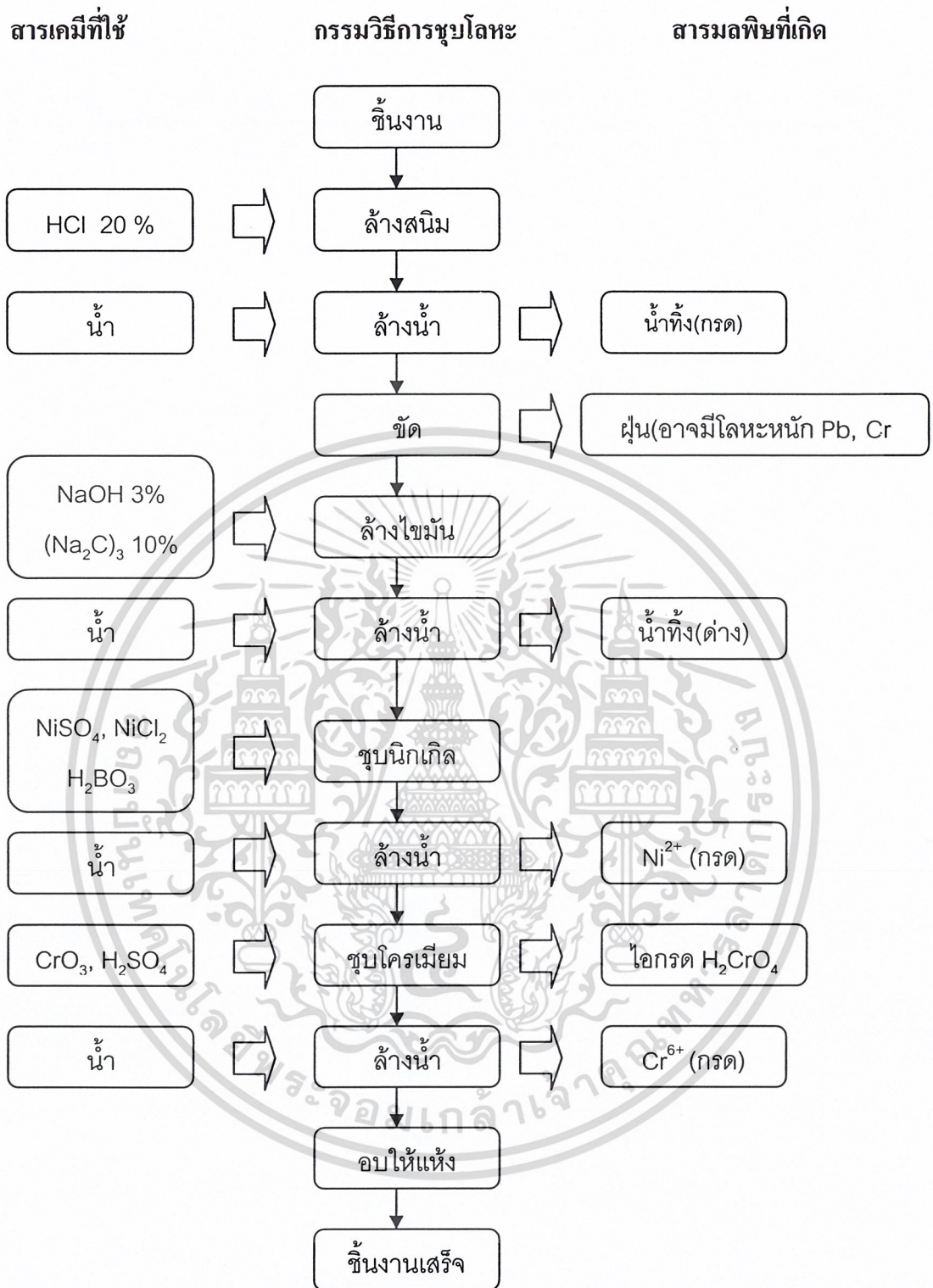
- การล้างด้วยด่าง (Alkaline cleaner) ด่างที่ใช้ทำความสะอาดนี้ ต้องมีคุณสมบัติที่ดี คือ ละลายน้ำได้ดี สามารถทำความสะอาดผิวโลหะ กำจัดฝุ่นที่เกาะอยู่ ละลายไขมันพืช และสัตว์ออกไปได้ ล้างออกได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ และไม่ทำให้ค่า pH เปลี่ยน ด่างที่นิยมใช้คือ Soda ash (Sodium carbonate) และ Caustic soda (Sodium hydroxide)

- การล้างด้วยกรด (Pickling) เป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดสนิม หรือออกไซด์ หรือตะกอนออกโดยใช้จุ่มในกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) ความเข้มข้น 5 - 15% หรือกรดเกลือ (Hydrochloric acid) 10 - 20% สำหรับกรดกำมะถันเจือจางมักเหมาะสำหรับกัดสนิมเหล็กบาง ๆ เช่น เหล็กกล้า ทองแดง นิกเกิล-เงา และทองแดงผสมอื่น ๆ กรดเกลือโดยปกติจะใช้กับชิ้นงานได้เกือบทุกชนิด เพื่อกำจัดสนิมที่บริเวณผิวหน้าอย่างรวดเร็ว ทั้งยังมีราคาไม่แพง

2. การชุบเคลือบผิวโลหะ

สำหรับการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ที่นิยมชุบโดยทั่วไป ได้แก่ การชุบทองแดง (Copper plating) การชุบนิกเกิล (Nickel plating) การชุบโครเมียม (Chromium plating) และการชุบสังกะสี (Zinc plating)

สำหรับขั้นตอนการชุบเคลือบผิวโลหะไฟฟ้า รวมทั้งสารเคมีที่ใช้และมลพิษที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโครเมียมจะมีโลหะหนักปนเปื้อนออกมา หลังจากการล้างชิ้นงานที่มีการชุบนิกเกิล และ โครเมียม



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะ รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ และสารมลพิษที่เกิดขึ้น (เฮเลน, 2537)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม (เพิ่มพงษ์, 2541 ; สุรพล, 2524)

ความเป็นพิษของโครเมียมขึ้นอยู่กับปริมาณและสถานะของโครเมียมที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย โดยทั่วไปโครเมียมจะอยู่ในรูปเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และไตรวาเลนต์โครเมียม โดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะมีพิษมากกว่าไตรวาเลนต์โครเมียม กล่าวคือเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ร่างกายได้รับเข้าไปเพียงจำนวนเล็กน้อยก็สามารถทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอน เกิดการระคายเคืองที่ไต เป็นสาเหตุทำให้ไตอักเสบถึงแก่ความตายได้ เฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางผิวหนังหรือริวิตซ์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียมในชั้นคอร์เรียม (corium) ของผิวหนัง ซึ่งไตรวาเลนต์โครเมียมนี้ จะไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกายเกิดเป็นสารแอนติเจน – แอนติบอดีเชิงซ้อน (antigen antibody complex) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง (dermatitis)

ความเป็นพิษของโครเมียมมีผลกระทบทั้งแบบเฉียบพลัน (acute effect) แบบเรื้อรัง (chronic effect) และการกลายพันธุ์ (mutagenicity) โดยทั่วไปแล้วพิษที่เกิดจากโครเมียมสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แผลจากโครเมียม (chrome ulcers) มีสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม โดยมากจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนัง และพบมากที่สุดที่โคนเล็บมือ ตามข้อนิ้วมือ หรือที่หลังเท้า มีลักษณะแผลเป็นวงกลม ขอบค่อนข้างเรียบ บวมเล็กน้อย ปกติมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรหรือเล็กกว่า ซึ่งมองคล้ายถูกเจาะด้วยตะปู แผลจะไม่มีอาการเจ็บปวดแต่จะคันมากในเวลากลางคืน หากเกิดอาการติดเชื้ออาจลุกลามไปถึงข้อใกล้เคียง จนอาจทำให้ต้องตัดนิ้วทิ้ง ฝุ่นของเกลือโครเมตหรือควันของกรดโครมิก อาจตกลงบนหนังตาและปลายจมูก ซึ่งอาจอาจเกิดแผลขึ้นได้เช่นเดียวกัน
2. มะเร็งที่ปอดอาจเกิดขึ้นกับผู้ที่สูดดมเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายเป็นประจำ และระยะเวลาสั้นซึ่งเป็นอันตรายมากแก่ชีวิต
3. ผนังกันในจุกทะเล ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครเมียม และได้รับเอาควันของกรดโครมิก หรือฝุ่นโครเมียมอยู่เป็นประจำ จะทำให้ผนังกันในจุกถูกทำลายจนเป็นรูทะเล ซึ่งการทะเลนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างใด จะรู้สึกก็ต่อเมื่อมีเสียงอู้อ้อหรือเมื่อตั้งจุกบนลง
4. ผิวหนังอักเสบ บริเวณที่อาจเกิดการอักเสบได้แก่ มือ แขน ใบหน้า จะมีสีแดงเข้มและบวม ส่วนที่อักเสบจะคันมาก และเจ็บแสบ

จากคุณสมบัติของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และไตรวาเลนต์โครเมียม พบว่าไตรวาเลนต์โครเมียมละลายน้ำได้น้อย และเคลื่อนที่ได้ช้าในดินและมีความเป็นพิษต่ำกว่าในขณะที่เฮกซะวาเลนต์โครเมียมสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้เคลื่อนที่ได้ดี และมีความเป็นพิษสูง เพื่อความปลอดภัยของประชาชนส่วนใหญ่ที่เป็นผู้ใช้น้ำ ทำให้ต้องมีการกำหนดระดับของโครเมียมในน้ำที่จากโรงงาน โดยพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 กำหนดไว้ว่าในน้ำที่โรงงานจะต้องมีเฮกซะวาเลนต์โครเมียมไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และไตรวาเลนต์โครเมียมต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (นิรนาม ก, 2547)

2.1.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (Willian, 1994)

2.1.3.1 แบบดั้งเดิม (Conventional Technique)

ใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation) โลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โลหะบางชนิดที่มีความเป็นพิษสูงและละลายน้ำได้ดี เช่น โครเมต (Cr⁶⁺) ดังนั้นจึงต้องรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียม ที่ไม่เป็นพิษและตกตะกอนเป็น Cr(OH)₃ สารเคมีที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น แบเรียมซัลไฟด์ (BaS), เฟอรัสซัลเฟต (FeSO₄·7H₂O) ปฏิบัติการรีดิวซ์และตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับพีเอช ปริมาณชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ วิธีนี้มีข้อเสียในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสีย จะต้องตกตะกอนโลหะหนักทีละชนิด จึงต้องใช้เวลานาน และต้องนำกากตะกอนไปฝังกลบ ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่กากตะกอนเหล่านี้จะปะปนไปกับขยะชุมชน ประการสำคัญ คือ อาจสูญเสียโลหะอื่นที่มีค่า และน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยไม้อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตัวอย่างปฏิกิริยารีดิวซ์ และการตกตะกอน ดังปฏิกิริยาที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ



2.1.3.2 การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recover and Recycle)

มีหลายวิธี เช่น

1. รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

แยกโลหะออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) และโพลีเอไมด์ (Polyamide) ที่ให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน (Semi-permeable membrane) เพื่อแยกสารที่ต้องการออก และทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูง และต้องมีการบำบัดขึ้นตันโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการนี้มีอุณหภูมิสูง ต้นทุนก่อสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบต่อวัน และต้องการพลังงานประมาณ 10 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ต่อปริมาณน้ำ 1,000 แกลลอน

2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange, IE)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเหมือนกันที่อยู่ในสารละลายกับไอออนที่เกาะอยู่บนผิวของเรซิน (Resin) โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุภาคในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนที่มีประจุลบ (anion) และไอออนที่มีประจุบวก (cation) อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนควบคุมได้ด้วยอัตราการไหล วิธีนี้มีความจำเพาะเจาะจง (selectivity) สำหรับไอออนแต่ละชนิด เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณของโลหะในน้ำต่ำ หรือมีความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลย์ต่อลิตร เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

3. การระเหย (Evaporation)

ใช้การระเหยน้ำออก ทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศ (atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (vacuum evaporation) น้ำเสียต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับวิธีแลกเปลี่ยนไอออน แต่ต้นทุนการดำเนินการสูง

4. การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery, ER)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง เช่น น้ำทิ้งจากกระบวนการขจัดเงาโลหะ วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากสารละลายที่เจือจางทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะระหว่าง 10 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน เหมาะสำหรับสารละลายที่มีปริมาณโลหะระหว่าง 200 – 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความบริสุทธิ์ของไอออน ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีที่สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

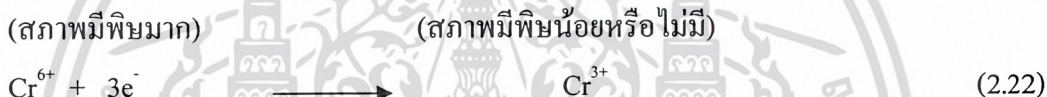
6. ดอนแนน ไดอะไลซิส (Donnan Dialysis, DD)

เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เมมเบรนที่ยอมให้ไอออนบวกหรือลบผ่านได้ เมมเบรนมีลักษณะเป็นท่อที่ด้านในให้น้ำเสียไหลผ่าน ในขณะที่ด้านนอกมีสารละลายของรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ไหลผ่านด้านบนและด้านล่างของท่อในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของน้ำเสีย โดยความเข้มข้นของตัวรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้จะมีความเข้มข้นต่างกัน ความเข้มข้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะในสารละลายจะลดลงตามความยาวของท่อ วิธีนี้ทำให้สารมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 10 – 50 เท่า มีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้แยกทองแดง แคดเมียม หรือสังกะสี ที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีนี้ใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีเวิร์สออสโมซิส และอิเล็กโทรไดอะไลซิส อย่างไรก็ตามวิธีนี้อยู่ระหว่างการพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

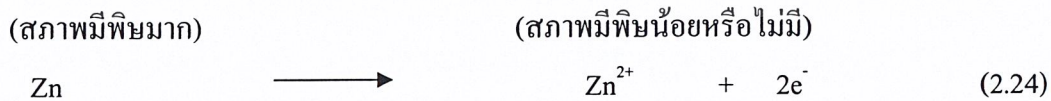
7. การเกิดรีดักชัน (Chemical Reduction) (ธงชัย, 2539)

การเกิดรีดักชันเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาเกี่ยวกับการเพิ่มอิเล็กตรอนของอะตอม โดยเปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารที่มีพิษมากไปเป็นมลสารที่มีพิษน้อยหรือไม่มีเลย โลหะหนักที่สามารถกำจัดโดยวิธีนี้ได้แก่ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ทองแดง และปรอท ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการเคมี 2.22 และ 2.23 ซึ่งเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่เฉพาะเจาะจง เช่น ในของเสียมีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่ ต้องใช้ไอร์ออน(II)ซัลเฟต เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดได้ดีในช่วงพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริก ลงไปด้วย



8. การเกิดออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) (ธงชัย, 2539)

การเกิดออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาเกี่ยวกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยเปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารที่มีพิษมากไปเป็นมลสารที่มีพิษน้อยหรือไม่มีเลย โลหะหนักที่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีนี้ได้แก่ สังกะสี ไซยาไนต์ เหล็ก และ แมงกานีส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ 2.24 และ 2.25 ซึ่งต้องเลือกใช้สารเคมีในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เฉพาะเจาะจงกับโลหะหนักแต่ละชนิด เช่น ในของเสียมีไซยาไนต์ละลายปนอยู่ ต้องใช้คลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์เติมลงไป เพื่อทำปฏิกิริยากับไซยาไนต์



การนำโลหะกลับมาใช้ใหม่แต่ละวิธีมีต้นทุนและข้อกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วิธีการแยกโลหะออกจากสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Willian, 1994)

วิธีการ	ต้นทุนสารเคมี	ความสิ้นเปลืองพลังงาน	ความเข้มข้นของน้ำเสียที่สามารถบำบัดได้
RO	ต่ำ	10Wh/1,000 gal	เจือจางและเข้มข้น
IE	ขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้น	ต่ำ	<2,500 mg/L ถึง 10,000 mg/L
Evaporation	ต่ำ	100 - 1,100 Btu	Upper limit solution saturated or until heat transfer impered
ER	ต่ำ	ขึ้นอยู่กับลักษณะความเข้มข้นของน้ำเสียและอุปกรณ์ที่ใช้	
ED	ต่ำ	5kWh/1,000 ppm ของน้ำเสีย 1,000 gal	200-500 mg/L
DD	ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและปริมาณของน้ำเสีย	ต่ำ	<500 mg/L

2.2 เหล็ก

2.2.1 ประเภทของเหล็ก

เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. เหล็กดิบ

เหล็กดิบ (pig iron) หมายถึง เหล็กที่เกิดจากสินแร่เหล็กดิบที่ขุดขึ้นมาโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่มีลักษณะเป็นเหล็กที่ไม่บริสุทธิ์ จึงไม่อาจนำมาใช้งานได้ทันที เนื่องจากมีสิ่งเจือปนอยู่ โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ดังนั้นจึงต้องทำการขจัดออกซิเจนออกจากสินแร่เหล็กก่อนที่จะนำสินแร่เหล็กไปใช้ประโยชน์ โดยถลุงเหล็กภายในเตาสูง การถลุงสินแร่เหล็กเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็ก เหล็กที่ได้จากเตาสูงเรียกว่าเหล็กดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำไปใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ และเหล็กกล้าในขั้นตอนต่อไป (นิรนาม ข, 2547)

2. เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้า หมายถึง เหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยจะถือหลักที่ว่าในเหล็กมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2% จะเรียกว่าเหล็กกล้า นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส เหล็กกล้า แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนธาตุอื่น ๆ มีอยู่น้อยไม่เจาะจงผสมลงไป แต่อาจจะติคมาจากกรรมวิธีหลอม หรือกรรมวิธีการไล่แก๊ส

2.2) เหล็กกล้าผสม (Alloy steel)

คือเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม วาเนเดียม และโคบอลต์ สำหรับแมงกานีส และซิลิกอน ถ้ามีปริมาณสูงกว่าในเหล็กกล้าคาร์บอน จะจัดเป็นธาตุผสมเช่นเดียวกัน เช่น ผสมแมงกานีสหรือซิลิกอนเกินกว่า 1% การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กกล้าคาร์บอนส่วนใหญ่เพื่อจะปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง และในบางกรณีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก

3. เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ (Cast iron) หมายถึง เหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และมีเป็นส่วนใหญ่ที่คาร์บอนมากกว่า 4.5 เปอร์เซ็นต์ การหลอมละลายเหล็กหล่อตามปกติจะทำในเตาคิวโปลาหรือเตาไฟฟ้าโดยการผสมเหล็กดิบ เศษเหล็กกล้า ถ่าน โถก และสารเจือเหล็ก (ferro-alloy) เข้าไป การเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เหล็กหล่อแข็งตัวเป็นระบบเหล็ก-คาร์บอนที่ไม่เสถียร (metastable Fe-C system) นั่นคือคาร์บอนจะอยู่ในรูปคาร์ไบด์ (โครงสร้างจะเรียกว่าซีเมนไตต์) รอยแตกหักในเนื้อเหล็กเป็นรอยเหมือนเปล่งรัศมีสีสว่างขาว เม็ดละเอียด แข็งเปราะ เจียรนัยผิวได้อย่างเดียว เหล็กนี้เรียกว่า "เหล็กหล่อขาว"

เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะวิธีการหนึ่ง คือ การหล่อโดยการให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงจุดหลอมเหลวเป็นน้ำเหล็ก แล้วนำไปเทลงในโพรงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายละเอียด เรียกว่า ทรายหล่อ เตรียมไว้เป็นรูปทรงของเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ แล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น จึงค่อยแกะแบบทรายออก จะได้เหล็กที่แข็งตัวไปตกแต่งและใช้งานได้ ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นปรับปรุงและพัฒนาเหล็กหล่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น พร้อมกับการแก้ไขจุดด้อยต่าง ๆ ให้ลดน้อยลง ทำให้มีวัสดุเหล็กหล่อที่สามารถสนองความต้องการในการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง (นิรนามข,

2547) เหล็กหล่อที่พบเห็นโดยทั่วไปสามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างพื้นฐานได้ 4 กลุ่ม คือ (กนกวรรณ, 2547)

3.1) เหล็กหล่อเทา

เนื้อด้านในเป็นสีเทา คุณสมบัติการหล่อดี ความทนแรงดึงสูง ราคาถูก พบในชิ้นส่วนรถยนต์ เสื้อสูบ ฝาสูบ ปลอกเสื้อสูบ งานถ่วง กังหันน้ำ เฟือง ข้อต่อส่งกำลัง ลูกรอก

3.2) เหล็กหล่อเหนียว

ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องกลที่ทนแรงกระแทกสูงกว่าเหล็กหล่อเทา เช่น ลูกรอก เพลาข้อเหวี่ยง ลูกกลิ้งรีดเหล็ก แบบหล่ออินกอท ท่อน้ำ

3.3) เหล็กหล่อขาว

เนื้อด้านในเป็นสีขาวเหมือนเหล็กทั่วไป พบในชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการความคงทนต่อการเสียดสี เช่น ส่วนประกอบใบพัดของเครื่องยิงทราญ งานเจียรนัยเพชรพลอย

3.4) เหล็กหล่อผสม

ใช้ผลิตชิ้นส่วนของปั๊ม และข้อต่อต่าง ๆ

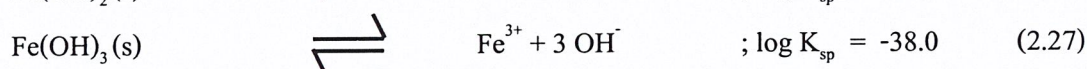
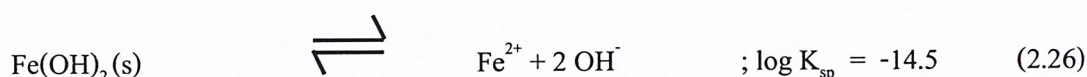
เศษผงเหล็กจากโรงกลึงประกอบด้วยเหล็กชนิดต่าง ๆ ผสมกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมากลึง โดยส่วนใหญ่มักจะพบในรูปเหล็กหล่อ (นิรนามข, 2547)

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zerovalent iron ; Fe^0) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้น หรือที่เรียกว่า เหล็กกล้า (Steel)

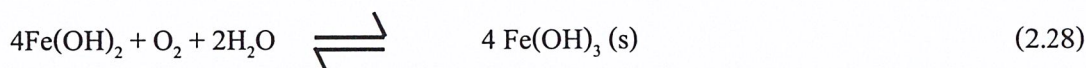
เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+})

เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (solubility constant, K_{sp}) ดังปฏิกิริยา 2.26 และ 2.27

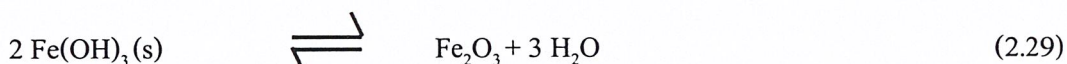


เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อย จึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็ว และเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตาม เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำ จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดังปฏิกิริยา 2.29 และ 2.30

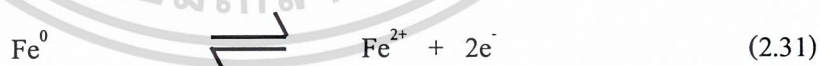


สนิมเหล็กโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (anodic region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเกาะเอาสนิมเหล็กมาวิเคราะห์ดู มักปรากฏว่ามีสารประกอบของความกระด้าง เศษดินทรายต่าง ๆ ปะปนอยู่ด้วยเสมอ (มันสัน และ ไพพรรณ, 2527)

2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

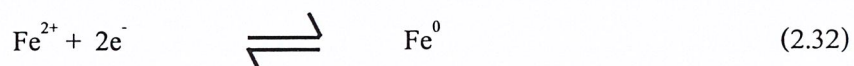
ปฏิกิริยาจำนวนมากมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า ออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อมีการลดเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นควบคู่พร้อมกันไปเสมอ เพื่อที่จะทำให้เลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นเท่ากับลดกับเลขออกซิเดชันที่ลดลง

2.3.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.31



ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) หมายถึง สารที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ จากปฏิกิริยา 2.31 ตัวออกซิไดซ์ คือ Fe^{2+}

2.3.2 ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) หมายถึง สารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ จากปฏิกิริยา 2.32
ตัวรีดิวซ์ คือ Fe^0 (กฤษณา, 2531)

สารตัวใดจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน (E^0) โดยครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายบวก และมีเครื่องหมายลบ ถ้าครึ่งเซลล์นั้นเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน (อินทรา, 2539) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของครึ่งเซลล์ที่ 25°C (อินทรา, 2539)

Half – Reaction	E^0 (volts)
$\text{Al}^{3+} + 3e^-$	-1.67
$\text{Mn}^{2+} + 2e^-$	-0.83
$\text{Zn}^{2+} + 2e^-$	-0.76
$\text{Cr}^{3+} + 3e^-$	-0.74
$\text{Fe}^{2+} + 2e^-$	-0.44
$\text{Ni}^{2+} + 2e^-$	-0.25
$\text{Pb}^{2+} + 2e^-$	-0.13
$\text{Fe}^{3+} + 3e^-$	-0.14
$\text{Cu}^{2+} + 2e^-$	0.34
$\text{Fe}^{3+} + e^-$	0.77
$\text{Ag}^+ + e^-$	0.80
$\text{Br}_2 + 2e^-$	1.09
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6e^-$	1.33
	$2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$

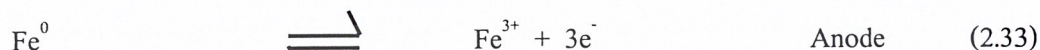
2.4 ปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก

เหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์เป็นโลหะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำเนื่องจากเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี ไม่เป็นพิษ และราคาถูก นอกจากนี้เหล็กยังมีศักย์รีดักชัน (reduction potential) สูง และอัตราการทำปฏิกิริยาถูกจำกัดโดยการเคลื่อนย้ายมวล (mass transport) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้จะต้องปรับพีเอชให้มีสภาพเป็นกรด

ในกระบวนการบำบัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic instability) ของโลหะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอก ถ้ามีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม สามารถป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้าได้ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เหล็กจะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กเฟอร์ริก และเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียม ซึ่งอาศัยกลไกของเซลล์กัลวานิกไฟฟ้าเคมีสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้แสดงดังปฏิกิริยาที่ 2.33 – 2.35



นอกจากนี้ Fe^0 ยังสามารถรีดิวซ์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ทำให้เกิด $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$ ดังสมการ 2.36 (Sherman และคณะ, 2000)



เศษผงเหล็กมีองค์ประกอบเป็นเหล็ก Fe_2O_3 ส่วนใหญ่ (วรรณวิภา, 2547) จัดเป็นเหล็กออกซิเดชันศูนย์ สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำทิ้ง ตัวอย่างสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่สามารถใช้วิธีการบำบัดด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์ ได้แก่ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride), DDT, DDD และ DDE (Balko และ Trantyeck, 1998) สารประกอบไนโตรอะโรมาติก (Nitro aromatic compounds) (Agrawal และ Trantyeck, 1996) และโครเมียม (Powell และคณะ, 1995)

2.5 จลนพลศาสตร์เคมี

2.5.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา

กฎอัตรา (rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

ลำดับของปฏิกิริยา (order of reaction) คือผลรวมของกำลังหรือเอ็กซ์โปเนนเชียลของสารที่ปรากฏในกฎของอัตรา

กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการ 2.37

$$\text{อัตรา} = k [\text{A}]^n [\text{B}]^m \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ [A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

n และ m เป็นเลขยกกำลังตามทีสารเข้าทำปฏิกิริยาซึ่งมีค่า = 0, ½, 1, 2, 3.....

เมื่อ $n + m = 1$ เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$n + m = 2$ เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

k ในกฎอัตรา คือค่าคงที่เฉพาะของอัตราที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ค่า k จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ

1) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

อัตราของปฏิกิริยาจะคงที่เสมอ ไม่ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่ามากน้อยเพียงใด ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ และกฎอัตราแสดงดังสมการ 2.38 - 2.40

$$\text{อัตรา} = \frac{d[A]}{Dt} = -k \quad (2.38)$$

อินทิเกรตสมการ (Integrate) 2.38 จะได้สมการ 2.39

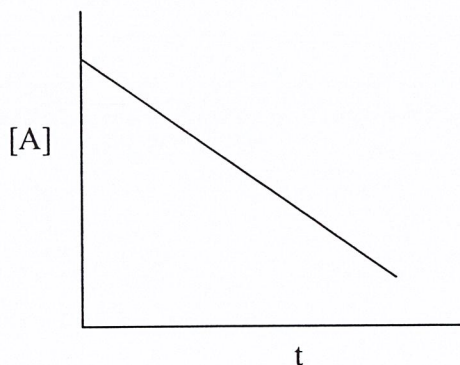
$$[A]_0 - [A] = kt \quad (2.39)$$

$$\text{ถ้า } [A] = \frac{[A]_0}{2}, \quad t_{1/2} = \frac{[A]_0}{2k} \quad (2.40)$$

อัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์โดยปกติขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่นในปฏิกิริยาประเภทโฟโตเคมีคัล (photochemical reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีแสงเป็นตัวเร่ง อัตราจะขึ้นกับปริมาณหรือความเข้มของแสง หรือในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ (enzyme) เป็นตัวเร่ง อัตราขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ เป็นต้น

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ([A]) กับเวลา (t) แสดงดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

2) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) เมื่อผลบวกของ n และ m ในกฎอัตราเท่ากับหนึ่ง ซึ่งในกรณีทั่วไป $n = 1, m = 0$ หรือ $n = 0, m = 1$ อาจเขียนกฎอัตราทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังสมการ 2.41

$$\text{อัตรา} = -k [A] \quad (2.41)$$

เมื่อ [A] = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ลำดับของปฏิกิริยาสามารถหาได้โดยทำการทดลองหลายๆ การทดลอง แต่ละการทดลองให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแตกต่างกันออกไป แล้วทำการวัดอัตรา ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยานั้นมีลำดับเท่าใดตามสารตั้งต้นนั้น ลำดับของปฏิกิริยาอาจหาได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงหนึ่งค่าแล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นนี้กับเวลา ข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถนำไปหาลำดับของปฏิกิริยาโดยวิธีการเขียนกราฟ แต่ต้องดัดแปลงสมการของกฎอัตราให้เป็นสมการที่สะดวกต่อการเขียนกราฟดังนี้

อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเขียนในรูปของการลดสารตั้งต้นกับเวลา ดังสมการ 2.42

$$\text{อัตรา} = \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -k [A] \quad (2.42)$$

หรือเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.43 หรือ 2.44

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A] \quad (2.43)$$

$$\frac{d[A]}{[A]} = -kdt \quad (2.44)$$

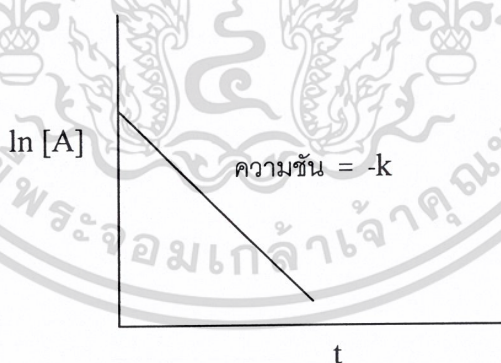
อินทิเกรต (Integrate) สมการ 2.44 จะได้สมการ 2.45 หรือ 2.46

$$\ln [A] - \ln [A]_0 = -kt \quad (2.45)$$

$[A]_0$ = ความเข้มข้นของ A เมื่อ $t = 0$

$$\text{หรือ} \quad 2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (2.46)$$

ถ้าเขียนกราฟของ $\ln [A]$ หรือ $\log [A]$ กับเวลา จะได้เส้นตรงที่มีความชัน = $-k$ (รูป 2.5) ค่า $\ln [A]$ ลดลง เมื่อเวลา t ผ่านไป และเมื่อปริมาณ $[A]$ หกตไปครึ่งหนึ่ง เวลา t เรียกว่าครึ่งเวลา ($t_{1/2}$) ขึ้นอยู่กับค่า k เท่านั้น



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln [A]$ กับ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ครึ่งชีวิต (half life) หรือครึ่งเวลา (half time) คือ เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณสารเดิม ดังสมการ 2.47

$$[A] = \frac{[A]_0}{2} \quad (2.47)$$

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า [A] จากสมการ 2.47 ในสมการ 2.46 จะได้สมการ 2.48 - 2.49

$$2.303 \log 2 = kt_{1/2} \quad (2.48)$$

$$t_{1/2} = \frac{2.303 \log 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (2.49)$$

จากสมการ 2.49 จะเห็นได้ว่า $t_{1/2}$ เป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงครึ่งหนึ่งในช่วงเวลาครึ่งชีวิต ไม่ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นจะเป็นเท่าใดก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปอีก $t_{1/2}$ ความเข้มข้นก็จะลดลงอีก $\frac{1}{2}$ เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ อาจกล่าวได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น

3) ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ผลบวกของ m และ n ในกฎอัตราเท่ากับสอง ซึ่งอาจเป็นกรณีที่ $n = 1, m = 1$ หรือ $n = 2, m = 0$ หรือ $n = 0, m = 2$ ดังสมการ 2.50 หรือ 2.51

$$\text{อัตรา} = k[A][B] \quad (2.50)$$

$$\text{อัตรา} = k[A]^2 \quad (2.51)$$

เมื่อ [A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา
k เป็นค่าคงที่เฉพาะของอัตราของปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมการ 2.50 และ 2.51 จะเห็นว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ A และ B ในสมการ 2.50 หรือความเข้มข้นของ A ในสมการ 2.51 เป็น 2 เท่า อัตราของปฏิกิริยาจะเพิ่มเป็น 4 เท่า ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของปฏิกิริยาอันดับสอง ดังนั้นสมมติสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีเพียงสารเดียวคือ สาร A หรือถ้ามีสองสารคือ A หรือ B แต่มี $[A] = [B]$ วัตอัตราการเปลี่ยนแปลงของสาร A สมการ 2.50 หรือ 2.51 อาจเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.52

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

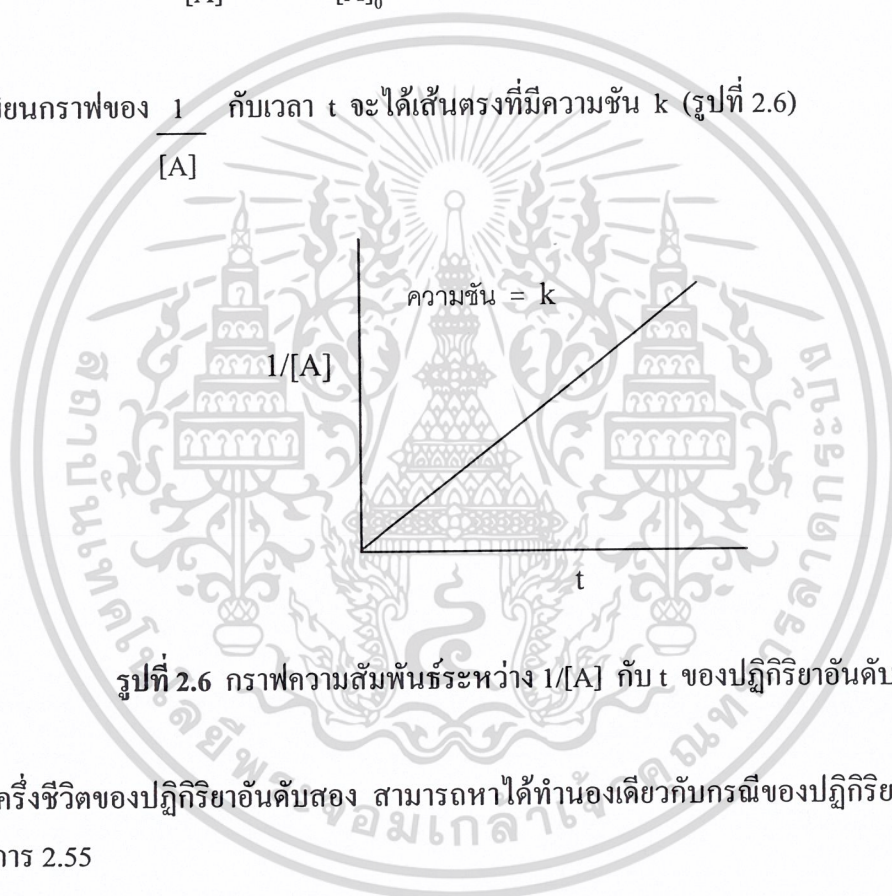
ย้ายข้าง [A] ในสมการ 2.52 จะได้สมการ 2.53

$$-\frac{d[A]}{[A]^2} = k dt \quad (2.53)$$

อินทิเกรต (Integrate) สมการ 2.53 จะได้สมการ 2.54

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt \quad (2.54)$$

ถ้าเราเขียนกราฟของ $\frac{1}{[A]}$ กับเวลา t จะได้เส้นตรงที่มีความชัน k (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ กับ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง

ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสอง สามารถหาได้ทำนองเดียวกับกรณีของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ดังสมการ 2.55

ที่ $t_{1/2}$,

$$[A] = \frac{[A]_0}{2} \quad (2.55)$$

แทนค่าในสมการ 2.55 จะได้สมการ 2.56

$$\frac{1}{\frac{1}{2} [A]_0} - \frac{1}{[A]_0} = kt_{1/2} \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} \quad (2.57)$$

จากสมการ 2.57 จะเห็นได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสอง แปรอย่างผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ($[A]_0$) ซึ่งแตกต่างกับครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งซึ่งเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ปฏิกิริยาอันดับสองมีหน่วยเป็น ลิตร โมล⁻¹ เวลา⁻¹

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Eary และ Rai (1988) กำจัดโครเมตออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการรีดักชันด้วยเฟอร์รัสไอออน พบว่าเฟอร์รัสไอออนสามารถรีดิวซ์โครเมตได้ในช่วงระหว่างค่าพีเอช 2 ถึง 10 แม้แต่ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายในน้ำเสีย แต่พบว่าเมื่อมีฟอสเฟตทั้งหมดในน้ำเสียมากกว่า 10^{-4} โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพของการรีดิวซ์โครเมตจะลดลงเนื่องจากเฟอร์รัสไอออนจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่ละลายในน้ำเสีย ปฏิกิริยารีดักชันของโครเมตด้วยเฟอร์รัสไอออนจะกำจัดโครเมียมออกในรูปสารละลายของแฉ่งโครเมียม(III)-เหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ ($Cr_xFe_{1-x}(OH)_3$) โดยสัดส่วนโมล (Mole Fraction) ของไตรวาเลนต์โครเมียม (X) เท่ากับ 0.25

Lin และ คณะ (1990) ศึกษาปฏิกิริยาในการบำบัดโครเมียม ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย จากการศึกษพบว่า ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ขึ้นอยู่กับพีเอช โดยโครเมียมจะอยู่ในรูปที่ต่างกันเมื่อพีเอชต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้เหล็กเฟอร์รัส(Fe^{2+})ในการออกซิไดซ์เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) เปลี่ยนเป็นไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) ก่อนแล้วจึงทำให้ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) ตกตะกอนด้วยการปรับพีเอชที่ต่าง ๆ กัน ผลจากการศึกษาสรุปว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือที่พีเอช 6.7 โดยจะตกตะกอน ไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) ได้มากที่สุด

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) เพื่อหาความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมออกจากสารละลาย ผลจากการศึกษาแบบแบทช์ (Batch Study) แสดงให้เห็นว่าอัตราของการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดมีค่ามากกว่า Pyrite และเหล็กเม็ดหยาบ กลไกของการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียด และเหล็กเม็ดหยาบ คือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นไตรวาเลนต์โครเมียมควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กศูนย์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเฟอร์ริก ไตรวาเลนซ์โครเมียมที่เกิดขึ้นจะตกผลึกในรูปสารละลายของแข็งโครเมียม (III)-เหล็ก (III) ออกซิไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$) และผลจากการวิเคราะห์ทางแร่พบว่า ไตรวาเลนซ์โครเมียมสามารถกำจัดออกได้ในรูปสารละลายของแข็งและการดูดซับบนผิวของ Geothite นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างการทดลองที่ใช้ผงตะไบเหล็กในการทดลองที่อุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส และ 4 องศาเซลเซียส

Munaf และ Zein (1997) ได้ทำการศึกษาโดยใช้เกลบในการกำจัดโครเมียม สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสีย โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์แปรผันกับขนาดเกลบ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ พบว่าในสภาวะที่เหมาะสมสามารถกำจัดโครเมียม สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมได้ร้อยละ 79, 85, 80 และ 85 ตามลำดับ ส่วนเกลบที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก โดยล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Pratt และคณะ (1997) ศึกษาความเป็นไปของไตรวาเลนซ์โครเมียมจากกระบวนการโครเมตรีดักชันด้วยผงตะไบเหล็ก (Iron Filing) และทรายควอทซ์ (Quartz Grain) โดยให้สารละลายที่ประกอบด้วยเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม 20 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุผงตะไบเหล็กผสมกับทรายควอทซ์ ผงตะไบเหล็กที่ถูกทำปฏิกิริยาจะสร้างชั้นเคลือบผิวที่ประกอบด้วย Geothite ($\alpha\text{-FeOOH}$) ซึ่งจะดูดซับโครเมียมทำให้มีความเข้มข้นของไตรวาเลนซ์โครเมียมสูงจะมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยารีดักชันของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมไปเป็นไตรวาเลนซ์โครเมียมสามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พร้อมทั้งได้สารประกอบของไตรวาเลนซ์โครเมียมสามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์พร้อมทั้งได้สารประกอบของไตรวาเลนซ์โครเมียมที่ละลายน้ำได้น้อยด้วย

Baig และคณะ (1999) ศึกษาโดยใช้พืชชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า *Solanum elaeagnifolium* (silverleaf nightshade) กำจัดแคดเมียม เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ไตรวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{3+}) เลด ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยนำพืชชนิดดังกล่าวไปล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นจึงนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ทำการทดลองแบบแบทช์ศึกษาพืชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักแต่ละตัว โดยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละตัวมีความเข้มข้น 0.1 mol/l และศึกษาเวลาที่ที่เหมาะสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละตัวมีความเข้มข้น 0.3 mol/l ผลการทดลองพบว่า สำหรับโลหะหนักทุกตัวพืชที่เหมาะสม คือ พืช 5 ยกเว้นเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ที่พืชที่เหมาะสมคือ พืช 2 เวลาที่เหมาะสมคือ 10-15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sherman และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และไดวาเลนท์เลด (Pb^{2+}) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์ (Fe^0) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-30 นาโนเมตร และผงเหล็กขนาด 40 mesh และ 325 mesh โดยทำการทดลองแบบแบทช์ จากการทดลองพบว่าเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์และผงเหล็กสามารถกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และไดวาเลนท์เลด ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยเหล็กสามารถรีดิวซ์เฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) กลายเป็นไตรวาเลนท์โครเมียม (Cr^{3+}) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแข็งโครเมียม (III) – เหล็ก (III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$) และรีดิวซ์ไดวาเลนท์เลด (Pb^{2+}) กลายเป็นซีโรวาเลนท์เลด (Pb^0) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำโดยที่เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์สังเคราะห์ (Fe^0) มีอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและไดวาเลนท์เลดสูงกว่าผงเหล็กขนาด 40 mesh และ 325 mesh ถึง 30 เท่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า

Young และ Jung (2001) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการ Photocatalysis ซึ่งใช้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะแปรผันตาม pH ปริมาณ TiO_2 ความเข้มแสง และระดับออกซิเจนละลายน้ำ พบว่าอัตราเร็วในการกำจัดโครเมียมจะมีประสิทธิภาพดีในสถานะที่เป็นกรด และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราเร็วในการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความสามารถสูงสุดในการกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมเอทานอลลงไปจะทำให้การกำจัดโครเมียมดียิ่งขึ้น

วุฒิชัย ทิวพงษ์ (2545) ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก จากการศึกษาโดยการทดลองแบบแบทช์พบว่า การกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) ด้วยปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ ส่วนการลดค่าของนิกเกิลบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของผงตะไบเหล็กเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชสูง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดทั้งเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และ นิกเกิล คือ พีเอช 6 โดยสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ผงตะไบเหล็ก 1 กรัมเหล็กต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ได้ 100 % และ 49 % ตามลำดับ ถ้าเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และนิกเกิลสูงขึ้น ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และนิกเกิลจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) และนิกเกิลต่ำลง ภายหลังจากทดลองผงตะไบเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จะเปลี่ยนรูปเป็นแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ส่วนเฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Cr^{6+}) ถูกรีดิวซ์เป็นไตรวาเลนท์โครเมียม (Cr^{3+}) อยู่ในรูปโครไมต์ (FeCr_2O_4)

และโครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) ในขณะที่นิกเกิลตกผลึกเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) บนเหล็กออกไซด์

Lee และคณะ (2003) ศึกษาการใช้เศษผงเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ในน้ำ จากการศึกษาโดยการทดลองแบบแบทช์พบว่า เศษผงเหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า Peerless iron (ชื่อทางการค้า) โดยเหล็ก (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และจากการทดลองพบว่าถ้าเติม IRC (iron-reducing consortium) สามารถเร่งปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr^{6+}) ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
Jenway Co., Ltd. รุ่น 6405 ประเทศอังกฤษ
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) Shimadzu Co., Ltd. รุ่น AA-680 ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometer) Bruker A.G. Co., Ltd. รุ่น SRS 3400 ประเทศเยอรมัน
4. เครื่องออโตซอร์บ (Autosorb) Quanta Chrome Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction Spectrometer) Bruker A.G. Co., Ltd. รุ่น D8 Advance ประเทศเยอรมัน
6. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) Leo Co., Ltd. รุ่น 1455VP และเอนเนอจีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive Spectrometer) EDAX Co., Ltd. รุ่น 1455VP ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องคัดขนาด (Sieve) Laboratory Test Sieve Co., Ltd. ประเทศเยอรมัน
8. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) Denver Instrument Co., Ltd. รุ่น Model 215
9. ใช้อุปกรณ์และสารเคมี
10. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
11. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance)
12. คอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
13. เครื่องแก้วต่าง ๆ
14. อุปกรณ์พลาสติก

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์, Carlo Erba Co., Ltd.
2. 1,5 Diphenylcarbazine เกรดวิเคราะห์, Fluka Co., Ltd.
3. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) เกรดวิเคราะห์, J.T. Baker Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรควิเคราะห์, Carlo Erba Co., Ltd.
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรควิเคราะห์, Lab Scan Co., Ltd.
6. อะซิโตน (Acetone) เกรควิเคราะห์, Lab Scan Co., Ltd.
7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
8. แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) บริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
9. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เกรควิเคราะห์, Carlo Erba Co., Ltd.
10. นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$) เกรควิเคราะห์, BHD Laboratory Supplies Co., Ltd.
11. คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) เกรควิเคราะห์, Carlo Erba Co., Ltd.
12. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกรควิเคราะห์, Carlo Erba Co., Ltd.
13. น้ำทิ้งจากบริษัททองโโลหะ จำกัด กรุงเทพมหานคร
14. เศษผงเหล็กจากบริษัทผลิตภัณฑ์วิเศษไทย จำกัด จังหวัดปทุมธานี

3.2 การดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก

1. คัดขนาดเศษผงเหล็กขนาด 35-50 เมช, 50-70 เมช, 70-100 เมช, 100-200 เมช และ 35- >200 เมช จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาสัดส่วนในรูปเปอร์เซ็นต์ของเศษผงเหล็กแต่ละขนาดจากเศษผงเหล็กทั้งหมด
2. ชั่งเศษผงเหล็กแต่ละขนาดจำนวน 100 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ล้างด้วย 3% HCl by v/v ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
4. เขย่าเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที
5. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนที่กำจัดแก๊สออกซิเจนออก (โดยการเติมแก๊สไนโตรเจน) จำนวน 3 ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และกรดที่หลงเหลือ
6. ล้างด้วยอะซิโตน 1 ครั้ง เพื่อกำจัดน้ำ
7. ทำให้แห้งด้วยการเป่าแห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจน
8. เก็บเศษผงเหล็กที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้วในขวดสีชา เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก

ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของเศษผงเหล็ก

พารามิเตอร์	เครื่องมือในการวิเคราะห์
องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็ก	X-ray Fluorescence Spectrometer
ลักษณะของอนุภาค	Scanning Electron Microscope
องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ของเศษผงเหล็ก	Energy Dispersive Spectrometer
พื้นที่ผิว	Autosorb
โครงสร้างผลึก	X-ray Diffraction Spectrometer

3.2.3 การเตรียมสตัดของสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

3.2.3.1 เตรียมสตัดสารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ที่อบที่อุณหภูมิ $105^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 2.828 กรัม
2. ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับให้เป็น 1 ลิตรในขวดวัดปริมาตร

3.2.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

โดยการเจือจางจากสตัดสารละลายมาตรฐาน

3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

3.2.4.1 ศึกษาผลของ pH

1. ปรับพีเอช สารละลายมาตรฐานโครเมียมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 3, 4, 5, 7 และ 9 ด้วย $0.1 M HNO_3$ หรือ $0.5 M NaOH$
2. ชั่งเศษผงเหล็กขนาด 35-200 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายที่ได้จากข้อ 1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
4. เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. นำส่วนใสมาวินิจฉัยหาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม โดยวิธี โฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ซ้ำ

3.2.4.2 ศึกษาผลของขนาดของเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็ก 1 กรัม ขนาด 35-50 เมช, 50-70 เมช, 70-100 เมช, 100-200 และ 35->200 เมช ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนใสมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก)
6. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.4.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็ว 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนใสมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก)
6. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.4.4 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนในสมมติวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก)
6. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.4.5 ศึกษาผลของปริมาณของเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็ก 0.5, 1, 1.5, 2 และ 3 กรัม โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนในสมมติวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก)
6. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.5 ศึกษาปริมาณ NaOH และ Ca(OH)₂ ที่ใช้ในการตกตะกอนไตรวาเลนท์โครเมียม

และเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. ปรับ pH ให้ได้ 6.7 (Lin และคณะ, 1990) ด้วย NaOH 50% w/v และ Ca(OH)₂ 50% w/v
6. นำกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ก่อนการกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
8. นำกระดาษกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก หลังการกรอง
9. นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริก-ไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดและความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบ-ชันสเปกโตรมิเตอร์
10. ชุคควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-10 อีก 2 ซ้ำ

3.2.6 ศึกษาตัวขัดขวางการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

ตัวขัดขวางที่ทำการศึกษาคือ นิกเกิล และคอปเปอร์ เนื่องจากในกระบวนการชุบโครเมียม (เฮเลน, 2537) จะมีโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้ปนเปื้อนออกมา และอัตราส่วนของความเข้มข้นที่ทำการศึกษานั้นได้จากค่าเฉลี่ยจากการสำรวจลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงานในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541) (ภาคผนวก ฉ)

3.2.6.1 Cr:Ni

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม : นิกเกิล ที่มีความเข้มข้น 30:5, 30:10, 30:20, 30:30 และ 30:50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดและความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมด ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์
6. ชุคควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.6.2 Cr:Cu

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม : คอปเปอร์ ที่มีความเข้มข้น 30:1, 30:3, 30:5, 30:10 และ 30:20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิโนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด และความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมด ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน - สเปกโตรมิเตอร์
6. ชูดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

3.2.6.3 Cr:Ni:Cu

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม : นิกเกิล : คอปเปอร์ ที่มีความเข้มข้น 30:5:1, 30:10:3, 30:20:5, 30:30:10 และ 30:50:20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4
4. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิโนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด และความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน - สเปกโตรมิเตอร์
6. ชูดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี โดยใช้สารละลายโครเมียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์

- นำสารละลายมาตรฐานโครเมียมที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเป็นพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 0.1 M HNO_3 หรือ 0.5 M NaOH
- ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 จำนวน 1 กรัมใส่ลงในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 180 มิลลิลิตร
- เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากข้อ 1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
- เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที
- กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริก ไดฟิไนลคาร์บาร์ไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดและความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์
- ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใช่เศษผงเหล็ก
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ชุด

3.2.8 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบคอลัมน์

- ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 จำนวน 200 กรัมใส่ในคอลัมน์อะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
- นำน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในถังพลาสติก
- สูบน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมจากถังพลาสติกผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเศษผงเหล็กด้วยอัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดอัตราการไหลเข้าคอลัมน์เท่ากับอัตราการไหลออกจากคอลัมน์
- เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมหลังจากผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บทุก 30 นาที
- กรองสารละลายโครเมียมที่ไหลผ่านคอลัมน์จากการทดลองข้อ 4 ผ่านกระดาษ กรอง Whatman เบอร์ 42
- นำส่วนใสมาวเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริก ไดฟิไนลคาร์บาร์ไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดและความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.9 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจากโรงงานชุบโครเมียม

3.2.9.1 การทดลองแบบแบทช์

1. นำน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น โดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์
2. นำน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมปรับสถานะโดยใช้สถานะที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4

3. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
4. นำส่วนใสมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด และความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์
5. ชุคควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่ใส่เศษผงเหล็ก
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ

3.2.9.2 การทดลองแบบคอลัมน์

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2 จำนวน 200 กรัม ใส่ในคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร
2. นำน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม โดยใช้สถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ ใส่ในถังพลาสติก
3. ป้อนน้ำทิ้งจากถังพลาสติกผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเศษผงเหล็กที่อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที
4. เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมหลังจากผ่านคอลัมน์ทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง
5. กรองน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์จากข้อ 4 ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. นำส่วนใสมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยวิธีโฟโตเมตริกไดฟิไนลคาร์บาริไซด์ (ภาคผนวก ก) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด และความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

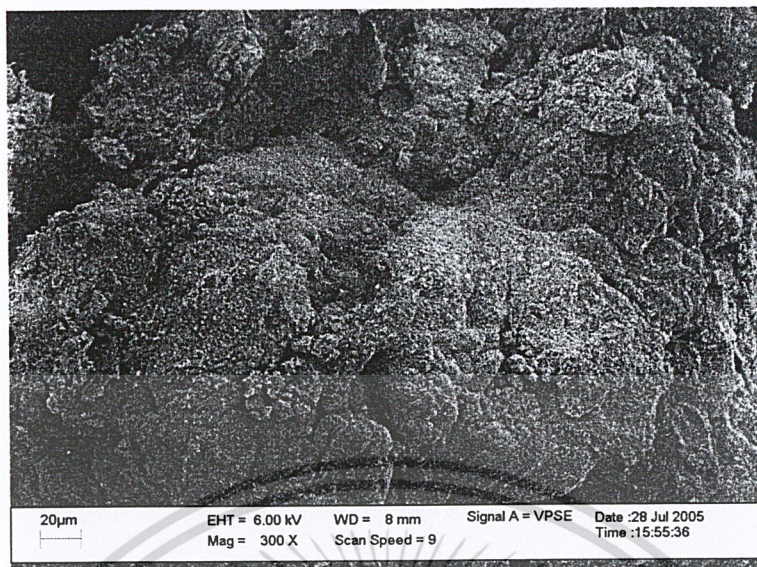
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเศษผงเหล็ก

จากการทดลองใช้เศษผงเหล็กจากโรงกลึง (รูปที่ 4.1) เป็นตัวรีดิวซ์ในการกำจัด Cr^{6+} ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเศษผงเหล็ก โดยการวัดพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Autosorb จากผลการทดลองพบว่า เศษผงเหล็กที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูงกว่าขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนลักษณะของอนุภาคเศษผงเหล็กวัดโดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า พบว่าพื้นผิวของเศษผงเหล็กก่อนการทดลองมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุน (รูปที่ 4.2ก) ส่วนเศษผงเหล็กหลังการทดลองมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น (รูปที่ 4.2ข) ทั้งนี้อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของออกไซด์บนผิวของเศษผงเหล็กจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กโดยใช้ XRF พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Fe_2O_3 รองลงมา Cr_2O_3 และ SiO_2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าเศษผงเหล็กมีการจัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน (amorphous) คือมีการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน (รูปที่ 4.3)

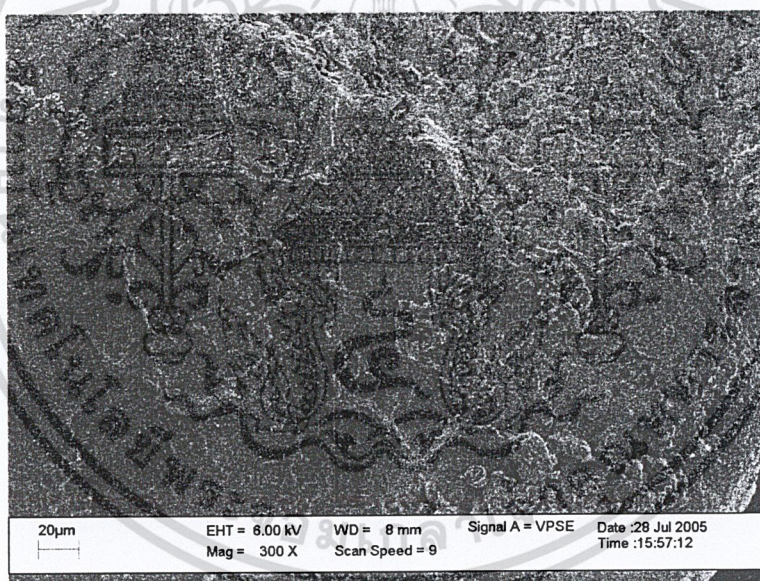


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษผงเหล็ก

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.2 ลักษณะของอนุภาคของเศษผงเหล็กวิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 300 เท่า
(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กวิเคราะห์โดยเครื่อง Autosorb

ขนาดของเศษผงเหล็ก	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	เศษส่วนของเศษผงเหล็ก (%)
เศษผงเหล็กขนาด 35-50 เมช	1.85	10
เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช	2.05	17
เศษผงเหล็กขนาด 80-100 เมช	3.02	16
เศษผงเหล็กขนาด 100-200 เมช	4.28	34
เศษผงเหล็กขนาด 200->200 เมช	*	22
เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช	5.55	100

หมายเหตุ ; * คือไม่สามารถล้างเศษผงเหล็กขนาดนี้ได้เพราะมีความละเอียดมากเมื่อดำด้วยกรดจะเกิดเป็นไอ

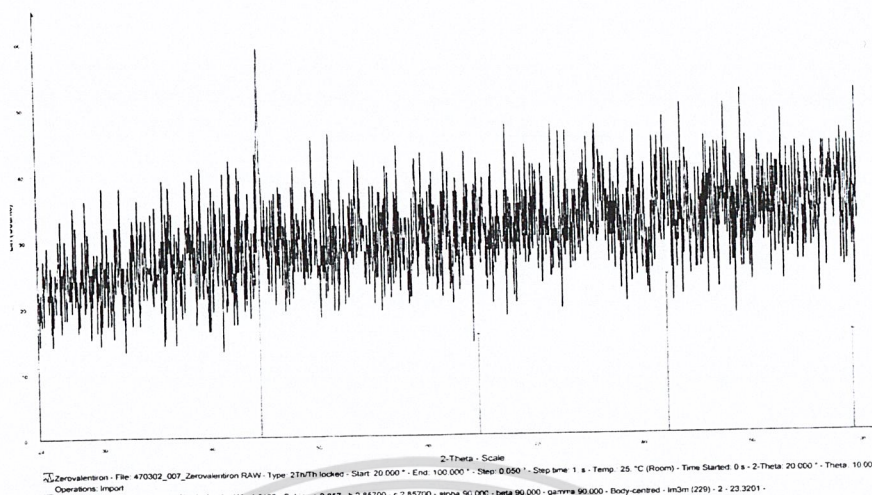
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กวิเคราะห์โดย XRF

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์
Fe ₂ O ₃	90.70
Cr ₂ O ₃	5.41
SiO ₂	1.16
MoO ₃	0.86
MnO	0.55
Al ₂ O ₃	0.42
อื่นๆ	0.91

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุในเศษผงเหล็กก่อนและหลังการทดลอง วิเคราะห์โดย EDS

ธาตุ	ก่อนการทดลอง (%Wt)	หลังการทดลอง (%Wt)
Fe	62.97	58.13
O	19.16	23.86
C	15.38	14.92
Al	2.49	1.15
Cr	0	1.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



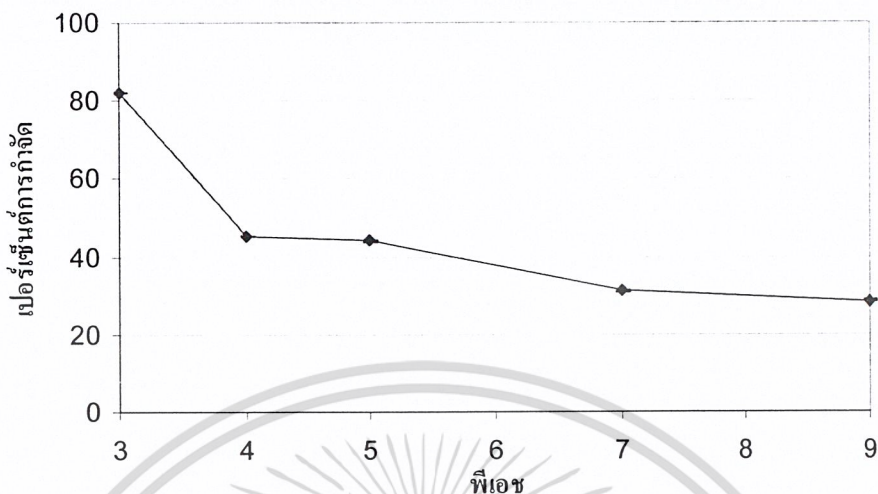
รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของเศษผงเหล็กวิเคราะห์โดย XRD

วิเคราะห์โครงสร้างของเศษผงเหล็กก่อนการทดลองด้วย EDS พบว่า องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในเศษผงเหล็กส่วนใหญ่เป็นเหล็กมีปริมาณ 62.97 % โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็นออกซิเจน, คาร์บอน, อลูมิเนียม และโครเมียมมีปริมาณ 19.16, 15.38, 2.49 และ 0 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเศษผงเหล็กหลังการทดลองพบว่า ปริมาณของเหล็ก และ คาร์บอนลดลง คือมีปริมาณ 58.13 และ 14.92 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนปริมาณของออกซิเจน และโครเมียมเพิ่มขึ้น คือมีปริมาณ 22.92 และ 1.94 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณเหล็กที่ลดลงอาจเกิดจาก Fe^0 จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} ในขณะที่ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจาก Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} แล้วตกผลึกในรูป Chromite ($FeCr_2O_4$) หรืออยู่ในรูปออกไซด์โครเมียม (Cr_2O_3) อยู่บนผิวของเหล็กออกไซด์ (พิชิต, 2544) ส่วนปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอาจเกิดเนื่องจากเหล็กออกไซด์ ได้แก่ $Fe(OH)_3$, $FeCr_2O_4$ จับบนผิวเศษผงเหล็ก ส่วนคาร์บอนที่ลดลงอาจเกิดเนื่องจากการจับกับออกไซด์ต่างๆ อยู่บนผิวของเศษผงเหล็ก

4.2 สภาวะในการกำจัด Cr^{6+}

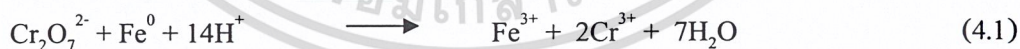
เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} โดยการวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย UV-Visible Spectrophotometer คำนวณปริมาณ Cr^{6+} โดยใช้กราฟมาตรฐานในภาคผนวก ข

4.2.1 พิเศษในการกำจัด Cr^{6+}



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่พีเอชต่าง ๆ

จากรูป 4.4 (รายละเอียดดูตาราง ค.1 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} ที่พีเอช 3, 4, 5, 7 และ 9 ซึ่งการทดลองนี้ทำการทดลองที่พีเอช 3-9 เนื่องจากที่พีเอชต่ำกว่าพีเอช 3 จะมีความเป็นกรดสูง ทำให้มีอัตราการกัดกร่อนสูง จึงไม่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} สูงสุด คือ 82.2% โดยที่พีเอชเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัด Cr^{6+} ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชต่ำ ๆ เนื่องจากที่พีเอชต่ำไฮโดรเจนไอออน (H^+) มีปริมาณมาก จะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาของสมการ ทำให้เหล็กสามารถรีดิวซ์โครเมตได้ดีขึ้น(สมการ 4.1) (Lee *et al.*, 2003) จึงสรุปได้ว่าพีเอชเป็นกรดทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{6+} ไปเป็น Cr^{3+} ได้ดี



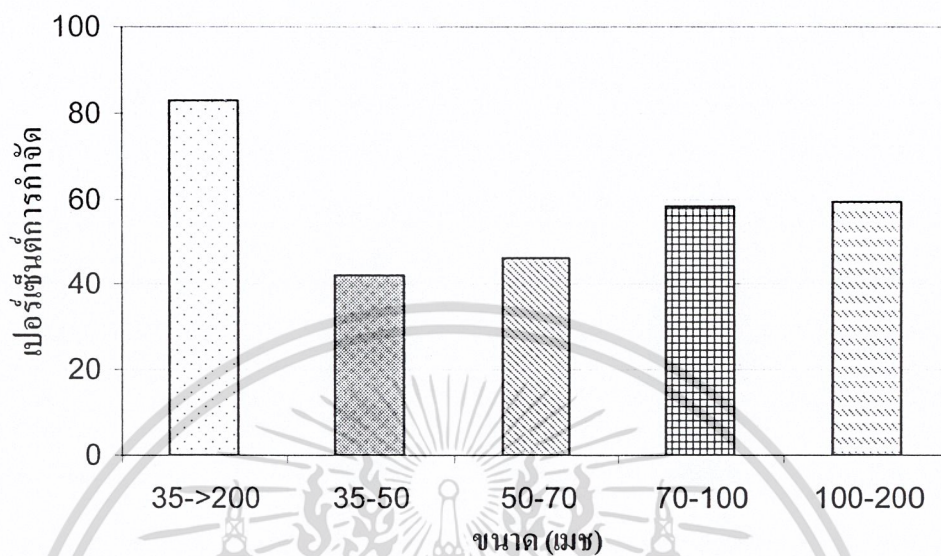
4.2.2 ขนาดของเศษผงเหล็กในการกำจัด Cr^{6+}

รูป 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค.2 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} โดยใช้เศษผงเหล็กขนาด 35-50 เมช, 50-80 เมช, 80-100 เมช, 100-200 เมช และ 35->200 เมช พบว่าการกำจัด Cr^{6+} ของผงเหล็กขนาด 35->200 เมช ซึ่งเป็นเศษผงเหล็กจากโรงกลึงที่ไม่ต้องผ่านการคัดแยกขนาดมีประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ได้สูงสุดคือ 82.8% เนื่องจากเศษผงเหล็กที่ไม่คัดขนาดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเศษผงเหล็กขนาดอื่น (ตารางที่ 4.1) จากงานวิจัย (พิชิต, 2544) พบว่าโครเมียมบางส่วนจะถูกกำจัดโดยเกิดเป็นออกไซด์โครเมียม (Cr_2O_3) จับอยู่บนผิวของเศษผงเหล็ก ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

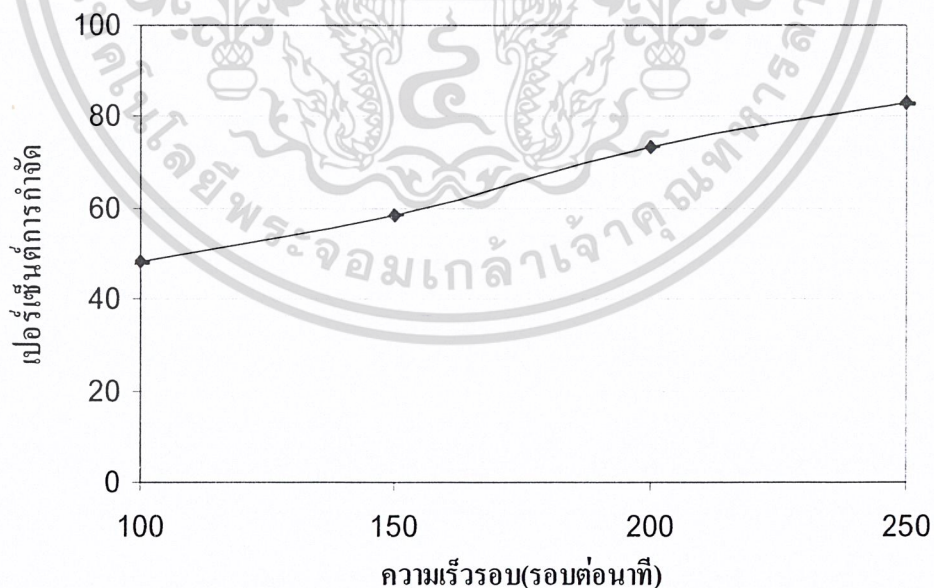
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ผิวของเศษผงเหล็กหลังการทดลอง โดยใช้ EDS ที่พบว่ามีปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3)



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ

4.2.3 ความเร็วรอบในการเขย่าในการกำจัด Cr^{6+}



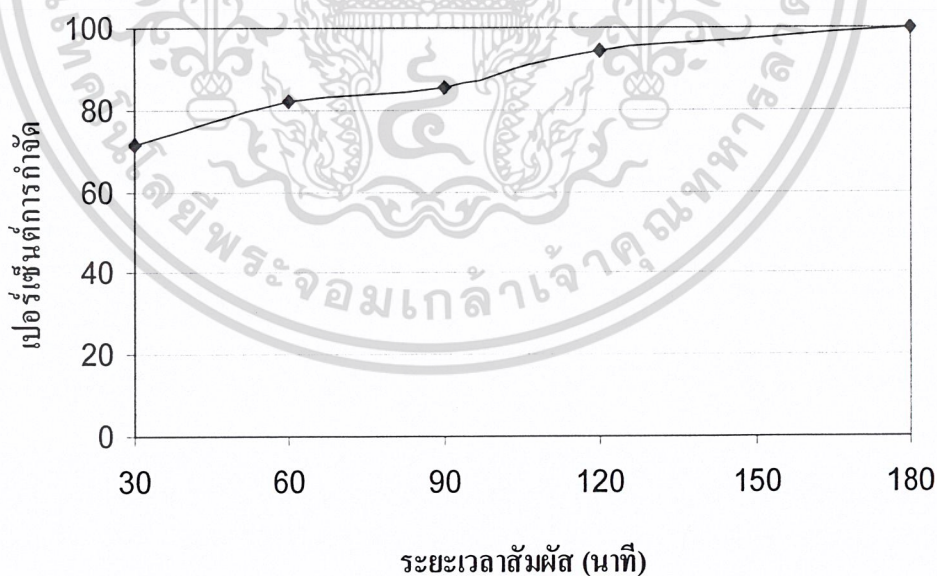
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค.3 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัด Cr^{6+} มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากเมื่อความเร็วในการเขย่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ Fe^0 ทำปฏิกิริยากับ H^+ ได้ดีขึ้น ทำให้ Fe^0 ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} ได้มากขึ้น จากผลการทดลองพบว่าความเร็วรอบในการเขย่าที่สามารถกำจัด Cr^{6+} สูงสุดที่ 250 รอบต่อนาที สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้ 82.9% อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้มีขีดความสามารถสูงสุดของเครื่องเขย่า คือ 250 รอบต่อนาที ทำให้ได้ข้อมูลจำกัด

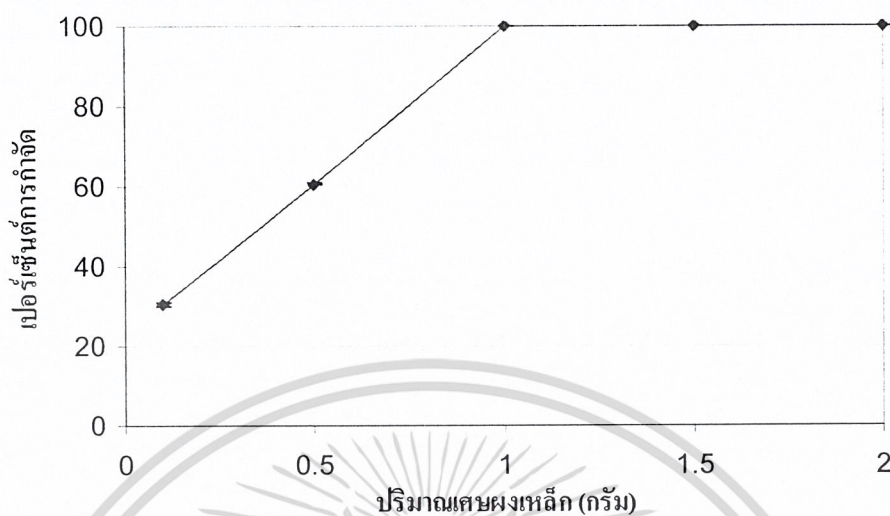
4.2.4 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัด Cr^{6+}

รูป 4.7 (รายละเอียดดูตาราง ค.4 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} ที่ระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัด Cr^{6+} เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Lee *et al.* (2003) เนื่องจากเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้โมเลกุลของ Cr^{6+} มีโอกาสเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับ Fe^0 ได้เพิ่มขึ้น ทำให้ Cr^{6+} เปลี่ยนเป็น Cr^{3+} ได้มากขึ้น จากรูป 4.7 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด Cr^{6+} คือ 180 นาที สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้ทั้งหมด



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

4.2.5 ปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัด Cr^{6+}



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่เศษผงเหล็กปริมาณต่างๆ

จากรูป 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค.5 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} ที่ปริมาณของเศษผงเหล็ก 0.1 กรัม, 0.5 กรัม, 1 กรัม, 1.5 กรัม และ 2 กรัมต่อ Cr^{6+} 3 มิลลิกรัม (น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัด Cr^{6+} เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของ Fe^{2+} มากขึ้น มีผลทำให้โมเลกุลของ Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์โดย Fe^{2+} กลายเป็น Cr^{3+} เพิ่มขึ้น (Rollinson, 1973) จากรูป 4.8 จะเห็นได้ว่าปริมาณของเศษผงเหล็กที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากำจัด Cr^{6+} คือ 1 กรัมต่อ Cr^{6+} 3 มิลลิกรัม มีเปอร์เซ็นต์การกำจัด Cr^{6+} ได้ทั้งหมด

4.3 คุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็ก

วิเคราะห์ Total Cr และ Total Fe ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 คือ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร, พีเอช 3, ขนาดของเศษผงเหล็ก 35-200 เมช ความเร็วรอบในการสัมผัส 250 รอบต่อนาที, ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที และปริมาณของเศษผงเหล็ก 1 กรัม

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.4) พบว่าเศษผงเหล็กสามารถทำปฏิกิริยากำจัด Cr^{6+} ได้ โดย Cr^{6+} จะถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} สำหรับ Total Cr จะมีปริมาณลดลงเนื่องจากถูกกำจัดโดยตกตะกอนในรูป $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$ ส่วนปริมาณ Total Fe จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Fe^0 จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Fe^{2+} ในสภาวะที่เป็นกรด ถึงแม้ว่าเหล็กจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เหล็กเป็นธาตุที่พบมากในธรรมชาติ

และยังไม่มีค่ามาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดไว้ ในขณะที่พีเอชเพิ่มขึ้นเข้าใกล้พีเอช 6 ทั้งนี้เนื่องจากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการกำจัด Cr^{6+} ไฮโครเจนไอออน (H^+) จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเปลี่ยนรูปเป็นน้ำ (สมการที่ 4.1) ทำให้มีพีเอชเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของ Cr^{6+} , Total Cr และ Total Fe ในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

พีเอช		Cr^{6+} (mg/l)		Total Cr (mg/l)		Total Fe (mg/l)	
ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
3.01	5.75	30±0.01	n.d.	30±0.05	4.54±0.02	<0.02	13.85±0.04

*n.d. = non-detectable

4.4 ผลการศึกษาปริมาณของ NaOH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ใช้ในการตกตะกอน และน้ำหนักระตะกอนที่เกิดขึ้น

จากปฏิกิริยาการกำจัด Cr^{6+} Cr^{6+} จะถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} โดย Fe^0 จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} , Fe^{3+} เนื่องจาก Cr^{3+} และ Total Fe เป็นโลหะหนักที่อาจเปลี่ยนเป็นรูปที่มีอันตรายจึงควรกำจัดออกจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การทดลองนี้ใช้ NaOH 50% w/v และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v ในการตกตะกอน Cr^{3+} และ Total Fe โดยปรับพีเอชให้เป็น 6.7 (Lin และคณะ, 1990) พร้อมทั้งวัดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณ NaOH 50% w/v และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v ที่ใช้, น้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้น, ปริมาณ Cr^{6+} , Total Cr และ Total Fe ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการตกตะกอนด้วย NaOH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

NaOH 50% w/v					$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v				
ปริมาณ (ml)	ตะกอน (mg/l)	Cr^{6+} (mg/l)	Total Cr (mg/l)	Total Fe (mg/l)	ปริมาณ (ml)	ตะกอน (mg/l)	Cr^{6+} (mg/l)	Total Cr (mg/l)	Total Fe (mg/l)
0.1	200	n.d.	<0.01	1.75	0.2	500	n.d.	<0.01	<0.02

*n.d. = non-detectable

ตารางที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง.1-ง.3 ในภาคผนวก ง) แสดงปริมาณ NaOH 50% w/v และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v ที่ใช้ในการตกตะกอน Cr^{3+} และ Total Fe หลังจาก Cr^{6+} ทำปฏิกิริยากับเศษผงเหล็กพบว่าใช้ NaOH 50% w/v ในปริมาณที่น้อยกว่า $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณคือ 200 และ 500 มิลลิกรัมกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 50% w/v

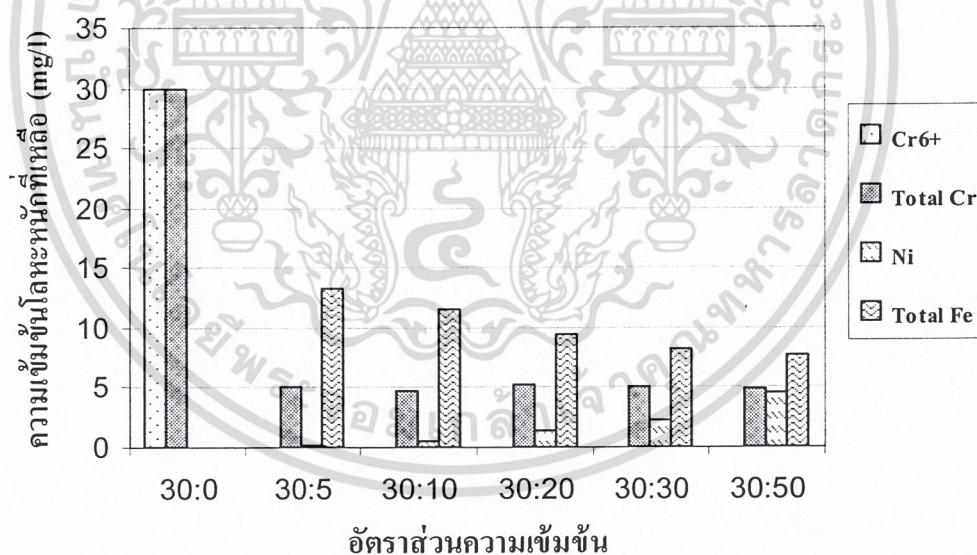
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถตกตะกอน Cr^{3+} และ Total Fe เกือบทั้งหมดได้ แต่ NaOH 50% w/v สามารถตกตะกอน Cr^{3+} ได้แต่ยังเหลือปริมาณ Total Fe ปริมาณเล็กน้อย

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายของ NaOH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ใช้ (ดูรายละเอียดใน ง.2 ในภาคผนวก ง) พบว่าค่าใช้จ่ายของ NaOH ที่ใช้คือ 0.06 บาทต่อลิตร และค่าใช้จ่ายของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ใช้คือ 0.1 บาทต่อลิตร (คำนวณจากราคา NaOH 136 บาทต่อกิโลกรัม และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 100 บาทต่อกิโลกรัม) และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนด้วย NaOH มีน้อยกว่าการตกตะกอนด้วย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการตกตะกอน Cr^{3+} และ Total Fe โดยใช้ NaOH จะถูกกว่าการกำจัดโดยใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

4.5 ผลการศึกษาตัวขัดขวางในการกำจัด Cr^{6+}

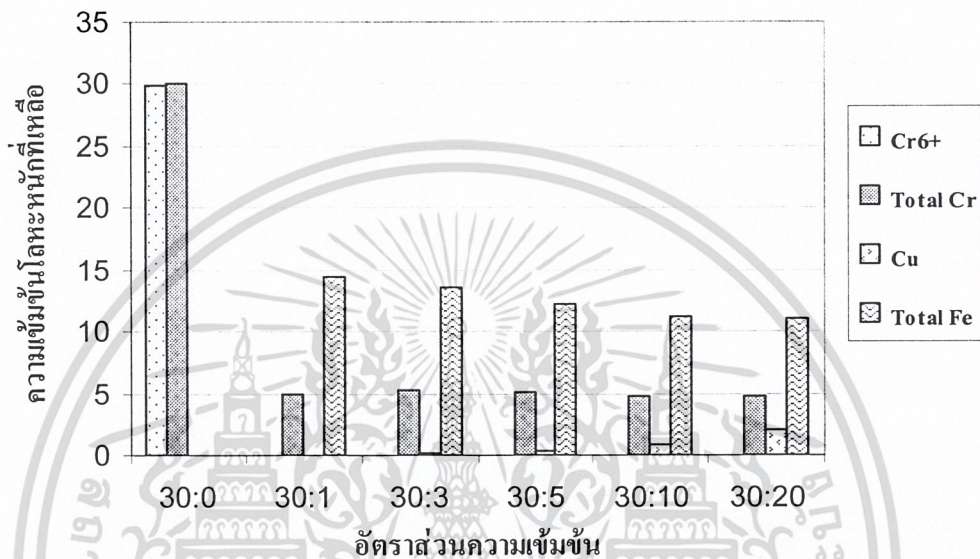
ตัวขัดขวางที่ใช้ในการศึกษาคือ นิกเกิล และ คอปเปอร์ เนื่องจากนิกเกิล และคอปเปอร์เป็นโลหะที่ใช้ในกระบวนการชุบโครเมียม ผลจากการศึกษาตัวขัดขวางในการกำจัด Cr^{6+} ด้วยเศษผงเหล็กที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งสัดส่วนของความเข้มข้นของนิกเกิลและคอปเปอร์นั้นได้จากค่าเฉลี่ยของ 80 โรงงานในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ในภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} และนิกเกิล ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ

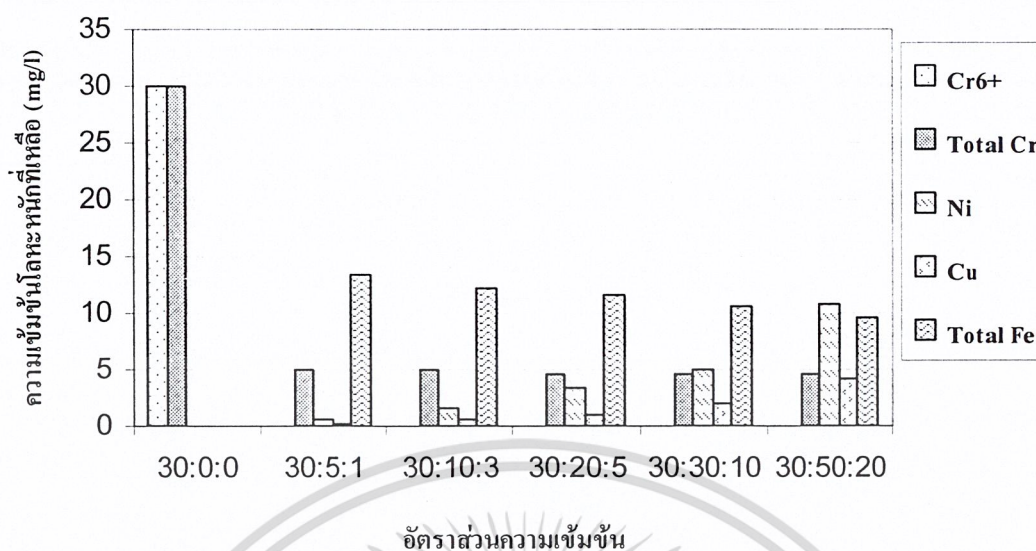
จากรูป 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ 1.1 - จ. 1.4 ในภาคผนวก จ) พบว่านิกเกิลไม่มีผลต่อการกำจัด Cr^{6+} โดย Cr^{6+} สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเศษผงเหล็กกลายเป็น Cr^{3+} ทั้งหมด ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลต่าง ๆ ส่วนปริมาณนิกเกิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของนิกเกิล เนื่องจาก นิกเกิลนั้นไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเศษผงเหล็กได้เนื่องจากผลต่างระหว่าง e^0 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของนิกเกิลและเหล็กนั้นมีค่าติดลบ (ตารางที่ 2.3) อย่างไรก็ตามปริมาณนิกเกิลจะลดลงจากปริมาณเริ่มต้นทั้งนี้อาจเกิดจากนิกเกิลถูกดูดซับอยู่บนผิวของเศษผงเหล็กซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (วุฒิชัย, 2545) และนิกเกิลอาจตกตะกอนเนื่องจาก $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่ง $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีคุณสมบัติเป็น flocculant โดย $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เกิดจาก Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} แล้ว Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับ OH^- ส่วนปริมาณ Total Fe มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} และคอปเปอร์ ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูป 4.10 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ 2.1 - จ. 2.4 ในภาคผนวก จ) พบว่า คอปเปอร์ไม่มีผลต่อการกำจัด Cr^{6+} โดย Cr^{6+} สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเศษผงเหล็กกลายเป็น Cr^{3+} ทั้งหมดที่ความเข้มข้นของคอปเปอร์ต่าง ๆ ส่วนปริมาณคอปเปอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของคอปเปอร์ อย่างไรก็ตามปริมาณคอปเปอร์จะลดลงจากปริมาณเริ่มต้น ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากคอปเปอร์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเศษผงเหล็กได้โดยพิจารณาจากค่า E^0 (ตารางที่ 2.3) นั่นคือผลต่างระหว่าง E^0 ของคอปเปอร์และเหล็กนั้นมีค่าเป็นบวก ซึ่งผลต่างของ E^0 เป็นบวก แสดงว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เอง แต่ปฏิกิริยาการกำจัดนั้นเกิดขึ้นได้น้อยกว่าการกำจัด Cr^{6+} โดยผลต่างของ E^0 ระหว่างคอปเปอร์กับเหล็กมีค่าน้อยกว่าผลต่างของ E^0 ระหว่าง Cr^{6+} กับเหล็ก จึงทำให้เหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ Cr^{6+} ได้มากกว่าคอปเปอร์ นอกจากนี้คอปเปอร์บางส่วนอาจตกตะกอนเนื่องจากจับกับ $\text{Fe}(\text{OH})_3$



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr⁶⁺, นิกเกิล และคอปเปอร์ ที่สัดส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ

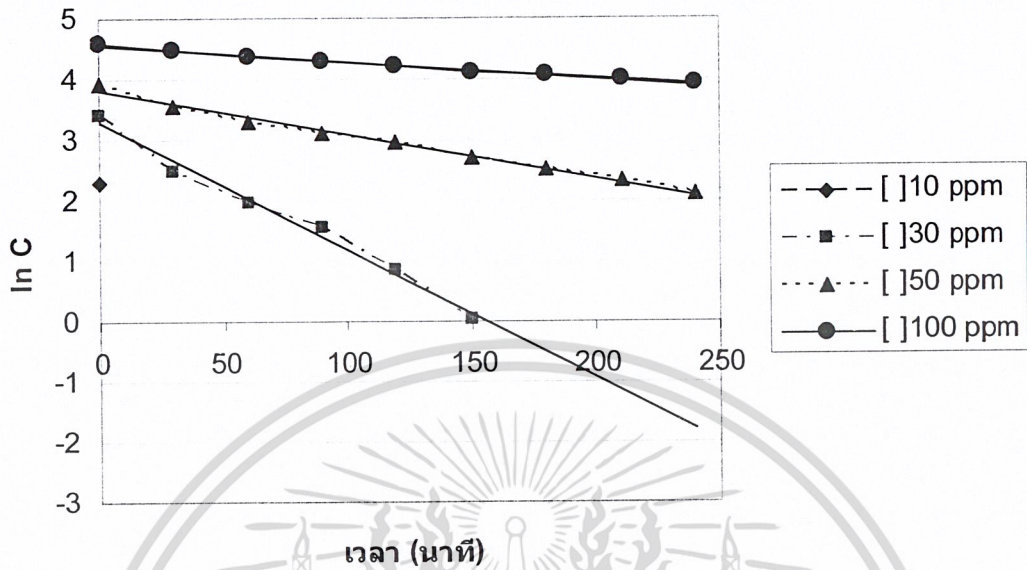
จากรูป 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ จ 3.1 - จ. 3.4 ในภาคผนวก จ) พบว่าทั้งนิกเกิลและคอปเปอร์ไม่มีผลต่อการกำจัด Cr⁶⁺ โดย Cr⁶⁺ สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับเศษผงเหล็กกลายเป็น Cr³⁺ ทั้งหมดที่ความเข้มข้นของนิกเกิลและคอปเปอร์ต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ใช้นิกเกิลและคอปเปอร์เป็นตัวขัดขวางเพียงสารเดียว

จากรูปที่ 4.9 – 4.11 Cr⁶⁺ สามารถถูกกำจัดได้หมด แสดงว่าปริมาณของเหล็กมีมากพอในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และปริมาณ Total Cr ลดลงเนื่องจากเมื่อ Cr⁶⁺ ถูกรีดิวซ์กลายเป็น Cr³⁺ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้ Cr³⁺ บางส่วนสามารถตกตะกอนกลายเป็น Fe_(1-x)Cr_xOOH ส่วนปริมาณนิกเกิลและคอปเปอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของสารตั้งต้น ส่วนปริมาณ Total Fe มีแนวโน้มลดลง

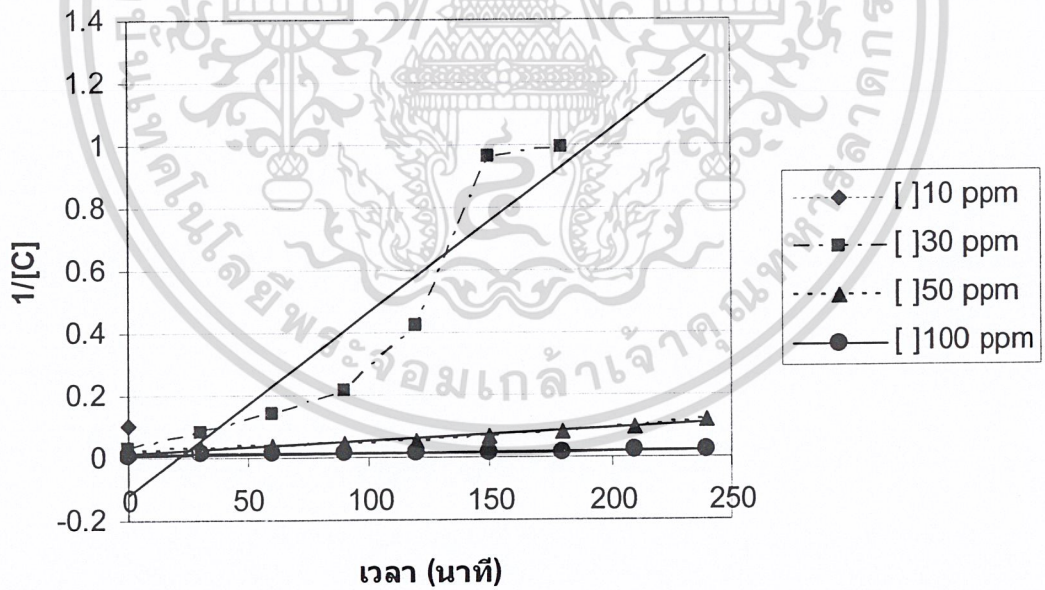
4.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีในการกำจัด Cr⁶⁺ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเศษผงเหล็กที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.12-4.14 แสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อันดับสอง และอันดับศูนย์ (ดูรายละเอียดในตาราง จ. 1 ในภาคผนวก จ)

4.6.1 ผลการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

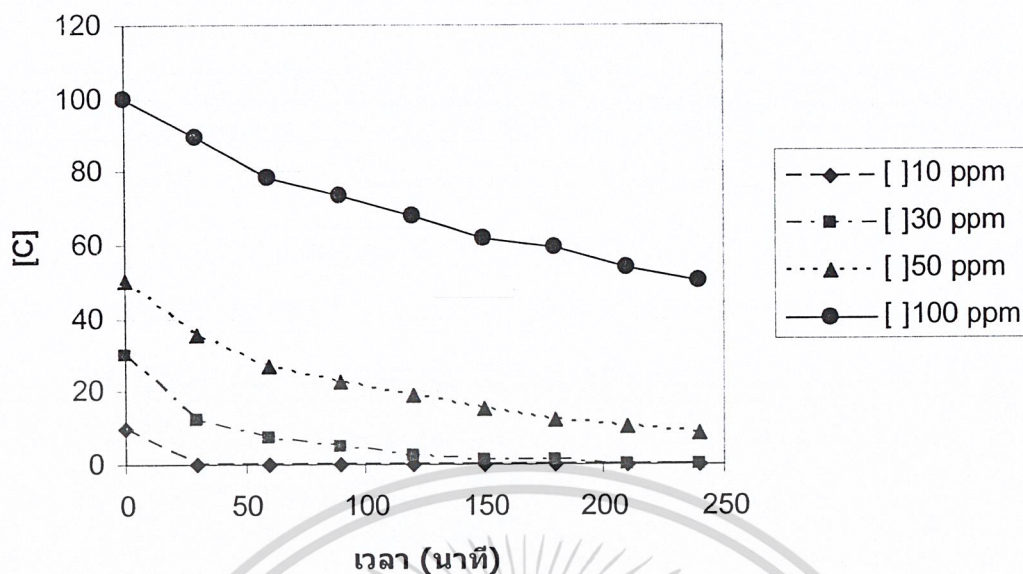


รูปที่ 4.12 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ปฏิกริยาอันดับศูนย์ของการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากสมการปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกริยาอันดับสอง และปฏิกริยาอันดับศูนย์ สามารถหาค่าคงที่ต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกริยาอันดับสอง และปฏิกริยาอันดับศูนย์ของการกำจัด Cr^{6+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

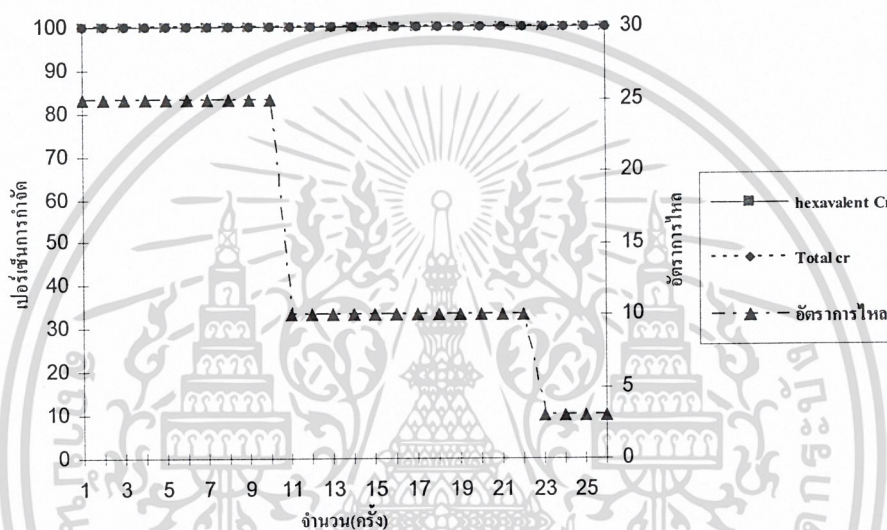
ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง		ปฏิกริยาอันดับสอง		ปฏิกริยาอันดับศูนย์	
	k	R^2	k	R^2	k	R^2
10	-	-	-	-	-0.0222	0.3000
30	-0.0028	0.9885	0.0059	0.8611	-0.0959	0.6600
50	-0.0071	0.9910	0.0004	0.9604	-0.1544	0.8832
100	-0.0211	0.9979	0.0001	0.9854	-0.1968	0.9595

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของการกำจัดปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกริยาอันดับสอง และปฏิกริยาอันดับศูนย์ พบว่าการกำจัด Cr^{6+} ด้วยเศษผงเหล็กที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่งเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าปฏิกริยาอันดับสอง และปฏิกริยาอันดับศูนย์ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) หาค่าไม่ได้เนื่องมาจากเศษผงเหล็กสามารถกำจัด Cr^{6+} ได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น 30, 50, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ลดลงเรื่อย ๆ คือจาก -0.0028 ไปเป็น -0.0071 และ -0.0211 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของเศษผงเหล็กมีปริมาณเท่าเดิม จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัด Cr^{6+} ลดลง

4.7 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} โดยการทดลองแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} และ Total Cr

รูปที่ 4.15 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข 1 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัด Cr^{6+} และ Total Cr โดยการทดลองแบบคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{6+} 30 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อัตราการไหล 25 มิลลิตรต่อนาที ที่เวลา 2 นาที, ทุกๆ 1 ชั่วโมง และหลังจากชั่วโมงที่ 10 เก็บทุก 30 นาที พบว่า Cr^{6+} สามารถถูกกำจัดได้จนกระทั่งชั่วโมงที่ 10 จะเกิดการอุดตันของเศษผงเหล็ก ทั้งนี้ อาจเกิดเนื่องจากตะกอนของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ไปอุดตันช่องว่างภายในคอลัมน์ ทำให้อัตราการไหลลดลง ดังนั้นจึงควรทำการรีเจนเนอเรตคอลัมน์หลังการบำบัดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า สามารถกำจัด Cr^{6+} , Total Cr ได้เกือบหมด (ตารางที่ 4.7) ส่วนปริมาณ Total Fe หลังการทดลองมีปริมาณเพิ่มขึ้นคือ 34.41 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของ Cr^{6+} , Total Cr และ Total Fe ก่อนและหลังจากผ่านคอลัมน์ที่อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที

pH		Cr^{6+} (mg/l)		Total Cr (mg/l)		Total Fe (mg/l)	
ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
3.01±0.02	4.98±0.01	30±0.01	n.d.	30±0.05	<0.01	<0.02	34.41

*n.d. = non-detectable

4.8 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} จากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม

ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าโลหะที่พบในน้ำทิ้งมีเพียง Cr^{6+} , Total Cr และนิกเกิล โดยโลหะทั้งสองชนิดนี้จะพบว่ามีค่าความเข้มข้นต่ำ ซึ่งความเข้มข้นของโลหะในน้ำทิ้งนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการชุบของแต่ละโรงงาน

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าโลหะหนักต่างๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม

โลหะหนัก	ปริมาณ (mg/l)
Total Cr	5.80±0.03
Cr^{6+}	2.51±0.01
Ni	1.15±0.03
Cu	<0.01
Fe	<0.02
Pb	<0.01
Mn	<0.01

4.8.1 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบแบทช์

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียม โดยศึกษาโลหะหนักที่มักพบในน้ำทิ้งจากโรงงานประเภทนี้ ได้แก่ Cr^{6+} , Total Cr และนิกเกิล ผลการทดลองการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เป็น 3 และไม่ปรับพีเอช (พีเอช 6.99) โดยการทดลองแบบแบทช์ แสดงดังตารางที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางภาคผนวก ข.1 ในภาคผนวก ข) พบว่า Cr^{6+} ที่สถานะที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เป็น 3 ถูกกำจัดได้ทั้งหมด ส่วนในสถานะที่ไม่มีการปรับพีเอช Cr^{6+} ถูกกำจัดได้เพียงบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจาก Fe^0 ถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} ได้ดีที่สถานะเป็นกรด ส่งผลให้ Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} ได้ดี นอกจากนี้ ที่สถานะที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอช 3 ยังสามารถกำจัด Total Cr ได้ดีกว่า เนื่องจากที่พีเอช 3 Cr^{6+} จะถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} ได้มากกว่าที่พีเอช 6.99 จึงจึงสามารถกำจัดโดยการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณ Total Cr มีค่าลดลง ส่วนการกำจัดนิกเกิลทั้งในสภาวะที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เป็น 3 และไม่มี การปรับพีเอช พบว่าสามารถกำจัดได้ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากนิกเกิลไม่สามารถกำจัดได้โดย ปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนคอปเปอร์ทั้งก่อนและหลังการกำจัด โดยใช้เศษผงเหล็กมีปริมาณน้อยมาก ในขณะที่ Total Fe ที่สภาวะที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เป็นพีเอช 3 จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ พีเอช 3 Fe^0 ถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} ได้มากจึงมีปริมาณเหล็กมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบัน เหล็กยังไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

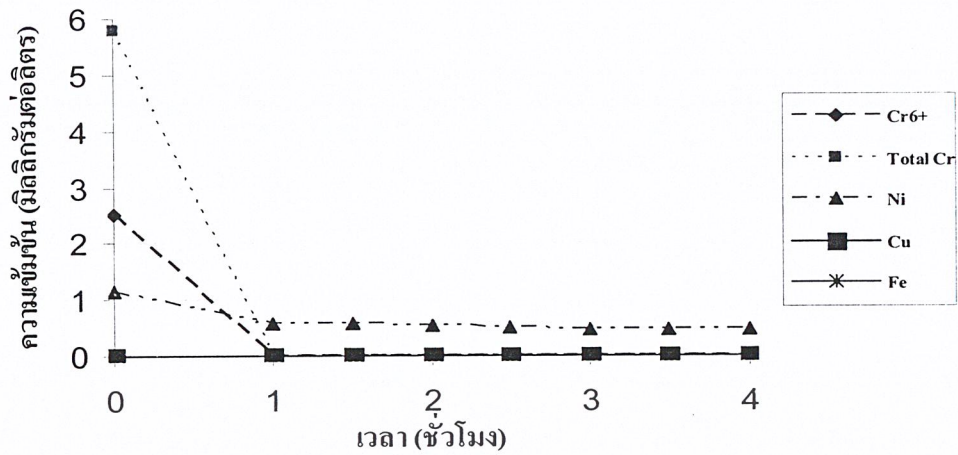
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่า Cr^{6+} , Total Cr, นิกเกิล, คอปเปอร์ และ Total Fe ในน้ำทิ้งจาก โรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบแบทช์

	พีเอช	Cr^{6+} (mg/l)	Total Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Cu (mg/l)	Total Fe (mg/l)
ก่อน	6.99±0.02	2.51±0.01	5.80±0.03	1.15±0.03	<0.01	<0.02
หลัง	8.24±0.02	2.02±0.01	0.69±0.03	0.55±0.03	<0.01	<0.02
ก่อน	3±0.01	2.51±0.01	5.75±0.03	1.15±0.01	<0.01	<0.02
หลัง	5.36±0.03	n.d.	<0.01	0.44±0.01	<0.01	6.54±0.04

*n.d. = non-detectable

4.8.2 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบ คอลัมน์

ผลการทดลองในการกำจัด Cr^{6+} , Total Cr, นิกเกิล, คอปเปอร์ และ Total Fe ในน้ำทิ้งจาก โรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ดูรายละเอียดในตาราง ภาคผนวก ซ.2 ในภาคผนวก ซ) พบว่ามีผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองแบบแบทช์ โดย Cr^{6+} และ Total Cr ถูกกำจัดได้ทั้งหมด ส่วนนิกเกิลถูกกำจัดได้เพียงบางส่วน อย่างไรก็ตาม ไม่พบ Total Fe หลังการบำบัด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการทดลองใช้เวลาเพียง 4 ชั่วโมง เนื่องจากมี ปริมาณน้ำทิ้งจำนวนจำกัด ทำให้ปริมาณเหล็กในรูปสารละลายเกิดขึ้นน้อย และอาจทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ค้างอยู่ในคอลัมน์



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} , Total Cr, นิกเกิล, คอปเปอร์ และ Total Fe ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมโดยการทดลองแบบคอลัมน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดลองแบบแบทช์

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยการทดลองแบบแบทช์ที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เศษผงเหล็ก 1 กรัม สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- 5.1.1.1 ผลของพีเอชต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ 82.2%
- 5.1.1.2 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ขนาดเศษผงเหล็กที่เหมาะสมคือ ขนาด 35->200 เมช ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ 82.8% นั่นคือขนาดของเศษผงเหล็กไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม
- 5.1.1.3 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ 82.9%
- 5.1.1.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 180 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ 100%
- 5.1.1.5 ผลปริมาณของเศษผงเหล็กต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่ากำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ปริมาณเศษผงเหล็กที่เหมาะสมคือ 1 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ได้ 100%
- 5.1.1.6 ตะกอนของไตรวาเลนท์โครเมียมและเหล็กที่เกิดจากการใช้ NaOH 50 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ Ca(OH)₂ 50 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในการตกตะกอนนั้น พบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และใช้ NaOH 50 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในปริมาณที่น้อยกว่า Ca(OH)₂ 50 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.1.1.7 การศึกษาตัวชี้คขวางในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่านิกเกิลและคอปเปอร์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม
- 5.1.1.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
- 5.1.1.9 การทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม เศษผงเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมได้ และสามารถลดปริมาณโครเมียมทั้งหมด และนิกเกิลได้ และค่าพีเอชหลังการบำบัดมีค่าพีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนปริมาณเหล็กทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งยังไม่มีกำหนดค่าในมาตรฐานน้ำทิ้ง

5.1.2 การทดลองแบบคอลัมน์

จากการนำเอาสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบทซ์ไปใช้ในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการทดลองแบบคอลัมน์ ที่อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม และ โครเมียมทั้งหมดได้ และค่าพีเอช เข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนปริมาณเหล็กทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งยังไม่มีกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม เศษผงเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมได้ และสามารถลดปริมาณโครเมียมทั้งหมด และนิกเกิลได้ และค่าพีเอชหลังการบำบัดเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนปริมาณเหล็กทั้งหมด ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งยังไม่มีกำหนดค่าในมาตรฐานน้ำทิ้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการอุดตันของเศษผงเหล็กแบบคอลัมน์ เช่น การใช้เศษผงเหล็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรืออาจใช้ทรายกรวดผสมกับเศษผงเหล็ก
- 5.2.2 ศึกษาอัตราการกักคร่อนของเศษผงเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม
- 5.2.3 ศึกษาการอิทธิพลของโลหะอื่นๆ เช่น สังกะสี ต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

บรรณานุกรม

- กฤษณา จงศิริลักษณ์. 2531. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (จากห้องปฏิบัติการ) ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์. วารสารวิจัยสถานะแวดล้อม. 9(1) : 32-78
- กนกวรรณ แสงเกียรติคุณ. 2547. เหล็กหล่อ. [Online].
Available : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/june/radio6-1.htm>
- กรมควบคุมมลพิษ. 2542. ข่าวสารคุณภาพน้ำ คพ. (PCD Water Quality Newsletters). ปีที่ 4. ฉบับที่ 4 (16) : 15-18.
- กรรณิการ์ สิริสิงห์, สุรพล ผดุงชีวิต และกฤษณ์ เทียรชมประสิทธิ์. 2527. รายงานการวิจัยเรื่องภาวะและวิธีที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ. กรุงเทพฯ. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- จารุวรรณ วีระวงษ์นุสร. 2542. การบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ. วารสารโรงงาน. 17(3) : 28 – 32.
- จินตนา ชยาภิวัฒน์. 2541. “การศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์.” วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2539. “โครเมียมจากการฟอกหนัง : ปุจฉาที่รอคำตอบ.” *The Environmental Engineering*. pp. 28-30.
- นรินาม ก. 2547. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [Online].
Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
- นรินาม ข. 2547. แผนบริหารการสอนประจำปี 3. [Online].
Available : <http://www.library.rink.ac.th/WEB%20MATERIAL/noname6.htm>.
- พิชิต จริยธรรมานุกูล. 2544. “การกำจัดเอกซะวาเลนที่โครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ด้วยเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- เพิ่มพงษ์ พุ่มวิเศษ. 2541. “การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสาขาวิชาสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- มันลิน ตันทุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2527. การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อน้ำระบบหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร. กรุงเทพฯ ฯ ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

วรรณวิภา พลาหาญ. 2547. “การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้เศษผงเหล็ก.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วุฒิชัย ทิวทอง. 2545. “การกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบ
เหล็ก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, จูไรรัตน์ เกิดดอนแฝก และปราณี พันธุมสินชัย. 2541. การป้องกันและ
ควบคุมมลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมชาย สกุลอิสรียาภรณ์, เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ และเลิศชัย เจริญธัญรักษ์. 2539. โครงการแก้ไข
ปัญหาน้ำเสียเจ้าพระยา. กองอนามัยสิ่งแวดล้อม.

สุรพล ผดุงชีวิต. 2524. “การกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการชุบโลหะโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต และ
ปูนขาว.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยมหิดล.

อนันต์ ทองมอญ. 2527. ชุบโครเมียม-ชุบทอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนการพิมพ์ จำกัด.
อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เติบโตไป สำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ.
โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เฮเลน อารมณีดี. 2537. ชุบโลหะ. วารสารโรงงาน. 12(1): 38 – 58.

Agrawal, A. and Trantyeck, P.G. 1996. “Reduction of Nitro Aromatic Compounds by Zero Valent
Iron.” *Environmental Science and Technology*. Vol. 31(1), 153-160.

Alan, T. 1995. *Encyclopedia of Analytical Science*. Harcourt Brace&company. Publishers, Vol.
2, pp. 729-743.

Baig, T.H., Garcia, A.E., Tiemann, K.J., Gardea-Torresdey, J.L. 1999. “Adsorption of Heavy Metal
Ions by the Biomass of *Solanum elaeagnifolium* (silverleaf nightshade)” *Proceedings of
the 1999 conference on hazardous waste research*. pp. 234-241.

Balko, B.A. and Trantyeck, P.G. 1998. “Photoeffects on the Reduction of Carbon Tetrachloride by
Zero-Valent iron.” *The Journal of Physical chemistry B*. Vol. 102(8). pp. 1459-1465.

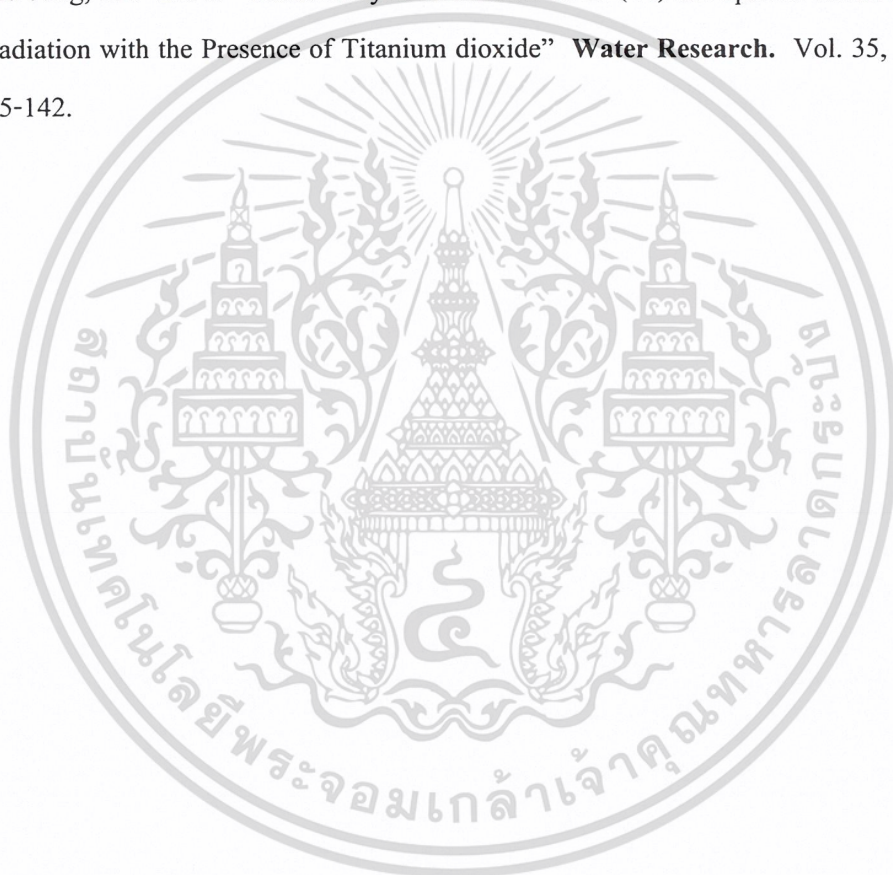
Blowes, D.W., Ptacek, C.J. and Jambor, J.L. 1997. “Situ Remediation of Cr(VI) Contaminated
Groundwater Using Permeable Reactive Walls.” *Environmental Science and
Technology*. Vol. 31(12), pp. 3348-3357.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Eary, L.E. and Rai, D. 1988. "Chromate Removal from Aqueous Wastes by Reduction with Ferrous." **Environmental Science and Technology**. Vol. 22(8), pp. 972-977.
- James, W.M. 1995. "Inorganic Contaminants of Surface Water." **Research and Monitoring Priorities**. Springer verlag, pp. 83-93.
- Khadhiar, S. 1997. "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.
- Kim, J.I. 1976. "Adsorption of Chromium on Activated Carbon." Doctoral Degree Dissertation, University of Florida.
- Lee, T., Lim, H. and Park, J.W. 2003. "Use of waste iron metal for removal of Cr(VI) from water." **Chemosphere**. Vol. 53, pp. 479-485.
- Lin, Q., Zhao G. and Yuan W. 1990. "Chemical Equilibrium Calculation in Treatment of Wastewater Containing Chromium." **Water Treatment**. Vol. 4, pp. 79-90.
- Munaf, E. and Zein R. 1997. "The Use of Rice Husk for Removal of Toxic Metals from Wastewater." **Environmental Technology**. Vol. 18, pp. 359-362.
- Nelson, P.O. 1995. "Adsorption and Fate of Metals in Wastewater and Soils." A Short Course Present for Chula University, Chulalongkorn University.
- Ozer, A., Tumen, F. and Bildik, M. 1997. "Chromium (III) Removal from Aqueous Solutions by Depectinated Sugar Beet Pulp." **Environmental Technology**. Vol. 18, pp. 893-901.
- Powell, R.M., Puls, R.W., Hightower, S.K. and Sabatini, D.A. 1995. "Couple Iron Corrosion and Chromate Reduction : Mechanism for Subsurface Remediation." **Environmental Science and Technology**. Vol. 29(8), pp. 1931-1922.
- Pratt, A.R., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J. 1997. "Product of Chromate Reduction on Proposed Subsurface Reduction Material." **Environmental Science and Technology**. Vol. 31(9), pp. 2492-2498.
- Quagliano, J.V. 1963. **Chemistry**. Prentice-Hall, New York. pp. 543.
- Rai, D. and Zachara, J.M. 1986. "Geochemical Behavior of Chromium Species." Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Reger, D.L. Goode, S.R. and Mecer, E.E. 1997. **Chemistry Principle & Practice**. Sander College Publishing, New York. pp. 1324.
- Richard, J.W. 1998. **Hazardous Waste**. John Wiley&Son, New York. pp. 354.

- Rollinson, C.L. 1973. **The Chemistry of Chromium.** Molybdenum and Tungsten. Pergamon Press, New York. pp. 424
- Sherman, M., Ponder, G. and Thomas, E. 2000. "Remediation of Cr (VI) and Pb(II) Aqueous Solutions Using Supported, Nanoscale Zero-Valent Iron." **Environmental Science and Technology.**Vol. 34(12), pp. 2564-2569.
- Standard Test Methods for Chromium in Water. 1996. ASTM, D 1678-92.
- Willian, C.A. 1994, **Innovaation Site Remendation Technology Chemical Treatment.,** U.S. : American Academy of Envirmental Engineers.
- Young, K. and Jung, I.L. 2001. "Photocatalytic Reduction of Cr (VI) in Aqueous Solutions by UV Irradiation with the Presence of Titanium dioxide" **Water Research.** Vol. 35, No. 1, pp. 135-142.

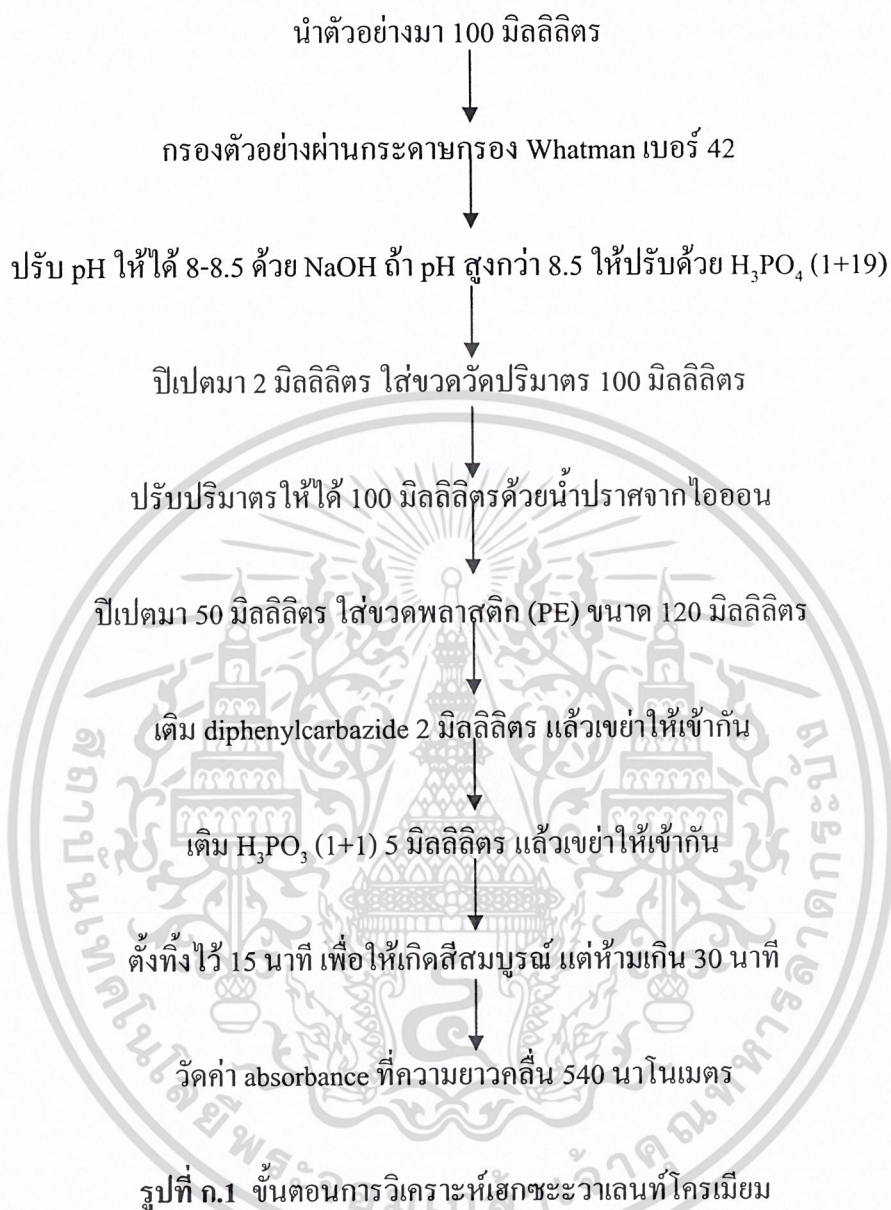


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์สีกะวาเลนที่โครเมียม
(Standard Test Methods for Chromium in Water ; ASTM : D 1678-92)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

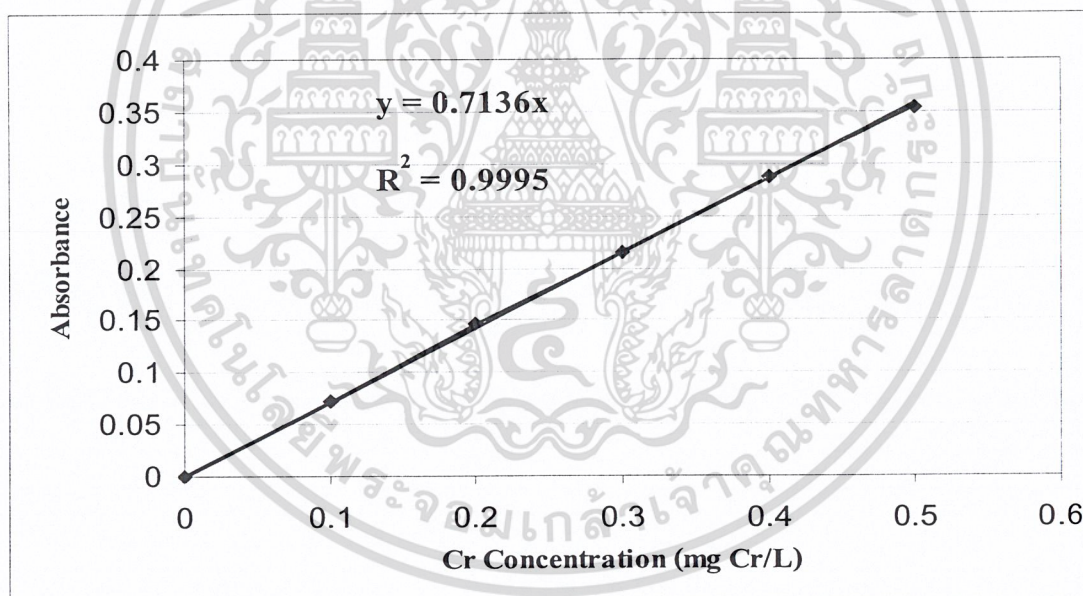




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐาน (Standard Curve Data) ของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

Concentration at 50 ml (mg Cr/L)	Absorbance
0	0.0004
0.1	0.0732
0.2	0.1466
0.3	0.2160
0.4	0.2866
0.5	0.3528



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐาน (Standard Curve) ของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ผลของพีเอชในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

ตารางที่ ค.1 ผลของพีเอชในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 35->200 mesh 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

pH	Control (mg/l)	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	30.05	5.36	5.30	5.36	5.34	0.04	82.23
4	29.93	16.36	16.42	16.48	16.42	0.06	45.14
5	30.01	16.60	16.91	16.97	16.83	0.20	44.10
7	29.93	20.47	20.66	20.66	20.60	0.11	31.17
9	30.11	21.34	21.58	21.64	21.52	0.16	28.53

ค.2 ผลของขนาดในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

ตารางที่ ค.2 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กจำนวน 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขนาด(เมช)	Control (mg/l)	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
35->200	29.99	5.36	4.99	5.17	5.17	0.18	82.76
35-50	29.99	17.28	17.46	17.09	17.28	0.18	42.38
50-70	29.99	16.17	16.17	16.17	16.17	n.d.	46.08
70-100	29.99	12.98	12.24	12.42	12.55	0.38	58.15
100-200	29.99	12.18	12.24	12.30	12.24	0.06	59.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 ผลของความเร็วยรอบในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม

ตารางที่ ค.3 ผลของความเร็วยรอบในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช จำนวน 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายเฮกซะวาเลนที่โครเมียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ความเร็วยรอบ (รอบต่อนาที)	Control (mg/l)	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
100	29.98	15.25	15.74	15.68	15.56	0.27	48.10
150	30.09	12.55	12.36	12.42	12.44	0.09	58.39
200	30.04	8.06	8.06	7.94	8.02	0.07	73.30
250	29.97	5.23	5.05	5.11	5.13	0.09	82.88

ค.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม

ตารางที่ ค.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช จำนวน 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ของสารละลายเฮกซะวาเลนที่โครเมียม เขย่าที่ความเร็วยรอบ 250 รอบต่อนาที

ระยะเวลา (นาที)	Control (mg/l)	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	30.04	8.86	8.55	8.43	8.61	0.22	71.34
60	29.99	5.42	5.36	5.42	5.40	0.04	81.99
90	30.01	4.50	4.43	4.25	4.39	0.13	85.37
120	30.03	1.61	1.79	1.55	1.65	0.13	94.51
180	29.98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

*n.d. = non-detectable

ค.5 ผลของปริมาณเศษผงเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม

ตารางที่ ค.5 ผลของปริมาณเศษผงเหล็กในการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช เวลาที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

ปริมาณ เหล็ก(กรัม)	Control (mg/l)	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.1	30.02	20.54	20.78	21.40	20.90	0.44	30.37
0.5	29.97	11.81	11.93	11.56	11.77	0.19	60.73
1	29.99	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
1.5	30.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
2	29.98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

n.d. = non-detectable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น และปริมาณ NaOH และ Ca(OH)₂ ที่ใช้

ตารางที่ ง.1 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่เหลือหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH)₂ 50% w/v

50% w/v	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่เหลือ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
NaOH	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
Ca(OH) ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

n.d. = non-detectable

ตารางที่ ง.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH)₂ 50% w/v

50% w/v	ความเข้มข้นของ Total Cr (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
NaOH	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	100
Ca(OH) ₂	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	100

ตารางที่ ง.3 ผลของปริมาณ NaOH และ Ca(OH)₂ 50% w/v ที่ใช้ในการตกตะกอน และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการตกตะกอนด้วย NaOH และ Ca(OH)₂ 50% w/v

50% w/v	ปริมาณต่างที่ใช้ในการตกตะกอน (ml)	ตะกอนที่เกิดขึ้น (กรัม)			เฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
NaOH	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
Ca(OH) ₂	0.20	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00

ง.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายของ NaOH และ Ca(OH)₂ ที่ใช้

NaOH MW = 40 g/mol ชนิด Commercial grade ราคา 136 บาทต่อกิโลกรัม

เตรียม NaOH 50% w/v

หมายความว่า ใช้ NaOH 500 → ในน้ำ 1000 ml

$$\text{ดังนั้นต้นทุน} = \frac{500 \times 136}{1000} = 68$$

คิดเป็นต่อ 1 ml

1000 ml ราคา 68 บาท

$$\text{ถ้า } 1 \text{ ml} = \frac{68 \times 1}{1000}$$

$$= 0.06 \text{ บาท ต่อ } 1 \text{ ml}$$

น้ำทิ้ง 100 ml ใช้ 0.1 ml

$$1000 \text{ ml} = \frac{0.1 \times 1000}{100}$$

$$= 1 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นเสียค่าใช้จ่าย} &= 0.06 \times 1 \\ &= 0.06 \text{ บาทต่อลิตร} \end{aligned}$$

Ca(OH)₂ MW = 74 g/mol ชนิด Commercial grade ราคา 100 บาทต่อกิโลกรัม

เตรียม Ca(OH)₂ 50% w/v

หมายความว่า ใช้ Ca(OH)₂ 500 → ในน้ำ 1000 ml

$$\text{ดังนั้นต้นทุน} = \frac{500 \times 100}{1000} = 50$$

คิดเป็นต่อ 1 ml

1000 ml ราคา 50 บาท

$$\text{ถ้า } 1 \text{ ml} = \frac{50 \times 1}{1000}$$

$$= 0.05 \text{ บาท ต่อ } 1 \text{ ml}$$

น้ำทิ้ง 100 ml ใช้ 0.2 ml

$$1000 \text{ ml} = \frac{0.2 \times 1000}{100}$$

$$= 2 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้นเสียค่าใช้จ่าย} &= 0.05 * 2 \\ &= 0.10 \text{ บาทต่อลิตร}\end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.1 อัตราส่วนระหว่าง Cr:Ni

ตารางที่ จ.1.1 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	29.97	29.95	30.01	29.98	0.03	-
30:5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100.
30:30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

*n.d. = non-detectable

ตารางที่ จ.1.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni	ความเข้มข้นของ Total Cr (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	29.98	30.05	30.01	30.01	0.03	-
30:5	5.41	5.16	4.41	4.99	0.52	83.37
30:10	4.82	4.80	4.63	4.75	0.10	84.17
30:20	5.21	5.39	5.26	5.29	0.09	82.37
30:30	5.05	5.02	4.96	5.01	0.05	83.31
30:50	5.00	5.05	4.91	4.98	0.07	83.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1.3 ผลของความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni	ความเข้มข้นของ Ni (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00.	-
30:5	0.09	0.19	0.12	0.13	0.05	97.36
30:10	0.56	0.58	0.56	0.57	0.01	94.41
30:20	1.55	1.43	1.28	1.42	0.14	92.88
30:30	2.34	2.18	2.15	2.22	0.10	92.61
30:50	4.76	4.23	4.51	4.50	0.27	90.98

ตารางที่ จ.1.4 ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น

อัตราส่วน Cr:Ni	ความเข้มข้นของ Fe (mg/l)			เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30:0	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.00
30:5	13.15	13.54	13.39	13.36	0.20
30:10	11.50	11.74	11.41	11.55	0.17
30:20	9.22	9.63	9.53	9.46	0.22
30:30	8.27	8.03	8.15	8.15	0.12
30:50	7.17	7.66	7.32	7.72	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2 อัตราส่วนระหว่าง Cr:Cu

ตารางที่ จ.2.1 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Cu	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	29.98	30.02	29.94	29.98	0.04	-
30:1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

*n.d. = non-detectable

ตารางที่ จ.2.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Cu	ความเข้มข้นของ Total Cr (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	30.04	29.94	30.01	29.99	0.05	-
30:1	4.78	4.87	4.95	4.87	0.08	83.76
30:3	5.41	4.94	5.24	5.20	0.24	82.66
30:5	4.98	5.21	5.18	5.12	0.12	82.93
30:10	4.82	4.80	4.79	4.80	0.02	83.99
30:20	4.78	4.78	4.68	4.74	0.06	84.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2.3 ผลของความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Cu	ความเข้มข้นของ Cu (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	-
30:1	0.02	0.03	0.09	0.05	0.04	95.28
30:3	0.23	0.20	0.22	0.21	0.02	93.14
30:5	0.35	0.39	0.35	0.36	0.02	92.84
30:10	0.87	0.85	0.84	0.85	0.02	91.53
30:20	2.05	2.04	2.04	2.05	0.00	89.72

ตารางที่ จ.2.4 ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น

อัตราส่วน Cr:Cu	ความเข้มข้นของ Fe (mg/l)			เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30:0	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.00
30:1	14.15	14.54	14.79	14.49	0.32
30:3	13.50	13.78	13.41	13.56	0.19
30:5	12.21	12.99	12.31	12.17	0.42
30:10	11.11	11.52	11.19	11.27	0.22
30:20	10.17	10.01	10.73	10.97	0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.3 อัตราส่วนระหว่าง Cr:Ni:Cu

ตารางที่ จ.3.1 ผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni:Cu	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0:0	29.89	29.99	30.01	29.96	0.06	-
30:5:1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:10:3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:20:5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:30:10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100
30:50:20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	100

*n.d. = non-detectable

ตารางที่ จ.3.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni:Cu	ความเข้มข้นของ Total Cr (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0:0	30.05	30.01	30.03	30.03	0.02	-
30:5:1	5.26	4.75	4.93	4.98	0.26	83.42
30:10:3	5.05	5.02	5.22	5.10	0.11	83.02
30:20:5	4.52	4.74	5.36	4.54	0.43	84.88
30:30:10	4.63	4.87	4.54	4.68	0.17	84.42
30:50:20	4.56	4.50	4.62	4.56	0.06	84.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3.3 ผลของความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni:Cu	ความเข้มข้นของ Ni (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0:0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	-
30:5:1	0.84	0.60	0.27	0.57	0.28	88.90
30:10:3	1.73	1.46	1.44	1.54	0.16	84.04
30:20:5	3.10	3.60	3.34	3.34	0.25	83.27
30:30:10	5.13	5.00	5.88	5.00	0.47	80.02
30:50:20	10.75	10.89	10.54	10.73	0.17	78.54

ตารางที่ จ.3.4 ผลของความเข้มข้นของคอปเปอร์ที่เหลือ

อัตราส่วน Cr:Ni:Cu	ความเข้มข้นของ Cu (mg/l)			เฉลี่ย	SD	%การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30:0:0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.00	-
30:5:1	0.22	0.10	0.14	0.15	0.06	84.21
30:10:3	0.53	0.55	0.53	0.54	0.01	83.01
30:20:5	0.96	0.95	0.97	0.96	0.01	81.02
30:30:10	2.09	2.08	2.10	2.09	0.01	79.30
30:50:20	4.22	4.22	4.22	4.22	n.d.	78.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3.5 ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่เกิดขึ้น

อัตราส่วน Cr:Ni:Cu	ความเข้มข้นของ Fe (mg/l)			เฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30:0:0	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.00.
30:5:1	13.19	13.36	13.43	13.32	0.12
30:10:3	12.24	12.30	12.17	12.23	0.07
30:20:5	11.85	11.53	11.32	11.56	0.27
30:30:10	10.68	10.56	10.49	10.57	0.10
30:50:20	9.39	9.51	9.71	9.53	0.16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.1 ผลของอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียม

ตารางที่ ฉ.1 ผลของการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ

C ₀	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น Cr ⁶⁺ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	ln C	ln C ₀	1/C	1/C ₀	%การกำจัด
		ครั้งที่1 (mg/l)	ครั้งที่2 (mg/l)	ครั้งที่3 (mg/l)							
10	0	9.97	9.98	10.02	9.99	0.03	2.30	2.30	0.10	0.10	-
10	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	90	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	120	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	180	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	210	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
10	240	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.30	n.d.	0.10	100
30	0	29.98	30.08	30.09	30.05	0.06	3.40	3.40	0.03	0.03	-
30	30	8.19	8.51	8.41	8.37	0.16	2.12	3.40	0.12	0.03	72.15
30	60	3.52	3.06	3.38	3.32	0.24	1.20	3.40	0.30	0.03	88.93
30	90	0.51	0.76	1.41	0.89	0.46	0.12	3.40	1.12	0.03	97.04
30	120	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.33	n.d.	3.40	n.d.	0.03	100
30	150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	n.d.	3.40	n.d.	0.03	100
30	180	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.04	n.d.	3.40	n.d.	0.03	100
30	210	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.40	n.d.	0.03	100
30	240	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.40	n.d.	0.03	100
50	0	49.97	50.03	50.25	50.08	0.15	3.91	3.91	0.02	0.02	-
50	30	31.61	31.39	31.30	31.43	0.16	3.44	3.91	0.03	0.02	37.24
50	60	22.77	22.83	23.34	22.98	0.31	3.13	3.91	0.04	0.02	54.11
50	90	18.57	18.74	18.70	18.67	0.09	2.93	3.91	0.05	0.02	62.72
50	120	15.35	15.38	15.38	15.37	0.02	2.73	3.19	0.07	0.02	69.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 ผลของการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

C ₀	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น Cr ⁶⁺ (mg/l)			เฉลี่ย	SD	ln C	ln C ₀	1/C	1/C ₀	%การ กำจัด
		ครั้งที่ 1 (mg/l)	ครั้งที่ 2 (mg/l)	ครั้งที่ 3 (mg/l)							
50	150	11.07	11.41	11.20	11.22	0.17	2.42	3.91	0.09	0.02	77.59
50	180	8.81	8.71	8.71	8.74	0.06	2.17	3.91	0.11	0.02	82.55
50	210	6.37	6.51	6.41	6.43	0.07	1.86	3.91	0.16	0.02	87.16
50	240	4.44	4.67	4.46	4.52	0.13	1.51	3.91	0.22	0.02	90.07
100	0	100.01	100.05	100.06	100.04	0.03	4.61	4.61	0.01	0.01	-
100	30	85.17	85.46	85.47	85.36	0.17	4.45	4.61	0.01	0.01	14.67
100	60	74.81	74.86	74.85	74.84	0.03	4.32	4.61	0.01	0.01	25.19
100	90	69.39	69.44	69.50	69.44	0.06	4.24	4.61	0.01	0.01	30.59
100	120	64.06	64.05	64.01	64.04	0.03	4.16	4.61	0.02	0.01	35.99
100	150	58.04	58.12	58.10	58.09	0.04	4.06	4.61	0.02	0.01	41.93
100	180	55.86	55.87	55.88	55.87	0.01	4.02	4.61	0.02	0.01	44.15
100	210	49.91	49.85	49.91	49.89	0.03	3.91	4.61	0.02	0.01	50.13
100	240	46.57	46.73	46.57	46.62	0.09	3.84	4.61	0.02	0.01	53.39

*n.d. = non-detectable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.1 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยวิธีแบบคอลัมน์

ตารางที่ ช.1 ผลการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช จำนวน 200 กรัม อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 17 ชั่วโมง

ชั่วโมง	pH	[Cr ⁶⁺] (mg/l)	%การ กำจัด	Total Cr (mg/l)	%การกำจัด	Total Fe (mg/l)
2 นาที	3.81	n.d.	100	<0.01	100	42.75
30 นาที	4.25	n.d.	100	<0.01	100	34.85
1.00	4.36	n.d.	100	<0.01	100	34.85
2.00	4.36	n.d.	100	<0.01	100	34.85
3.00	4.26	n.d.	100	<0.01	100	34.78
4.00	4.34	n.d.	100	<0.01	100	34.73
5.00	4.3	n.d.	100	<0.01	100	34.71
6.00	4.28	n.d.	100	<0.01	100	34.67
7.00	4.37	n.d.	100	<0.01	100	34.59
8.00	4.41	n.d.	100	<0.01	100	34.57
9.00	4.49	n.d.	100	<0.01	100	34.54
10.00	4.44	n.d.	100	<0.01	100	34.53
10.50	4.47	n.d.	100	<0.01	100	34.53
11.00	4.50	n.d.	100	<0.01	100	34.46
11.50	4.55	n.d.	100	<0.01	100	34.49
12.00	4.64	n.d.	100	<0.01	100	34.29
12.50	4.63	n.d.	100	<0.01	100	34.20
13.00	4.73	n.d.	100	<0.01	100	34.15
13.50	4.73	n.d.	100	<0.01	100	33.68
14.00	4.91	n.d.	100	<0.01	100	33.68
14.50	4.91	n.d.	100	<0.01	100	33.39
15.00	5.09	n.d.	100	<0.01	100	33.37
15.50	4.91	n.d.	100	<0.01	100	33.06
16.00	4.94	n.d.	100	<0.01	100	33.11
16.50	5.02	n.d.	100	<0.01	100	32.57
17.00	4.98	n.d.	100	<0.01	100	31.30

*n.d. = non-detectable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ.1 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยวิธีแบบเบบท์

ตารางที่ ซ.1 ผลของการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และคอปเปอร์ ในน้ำที่จากโรงงานชุบโครเมียม เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช จำนวน 1 กรัมต่อน้ำที่ 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที นาน 3 ชั่วโมง

pH	ความเข้มข้นของ Cr ⁶⁺ ที่			เฉลี่ย	SD	Total Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Cu (mg/l)	Total Fe (mg/l)
	เหลือ (mg/l)								
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3						
3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<0.01	0.44	<0.01	6.54
6.99	2.01	2.02	2.02	2.02	0.00	0.69	0.55	<0.01	<0.02

*n.d. = non-detectable

ซ.2 ประสิทธิภาพการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โดยวิธีแบบคอลัมน์

ตารางที่ ซ.2 ผลการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียม โครเมียมทั้งหมด นิกเกิล และคอปเปอร์ เศษผงเหล็กขนาด 35->200 เมช จำนวน 200 กรัม อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชั่วโมง	pH	[Cr ⁶⁺] (mg/l)	Total Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)
0	3.01	2.51	5.80	1.15	<0.01	<0.02
1	6.87	n.d.	<0.01	0.56	<0.01	<0.02
1.5	6.75	n.d.	<0.01	0.56	<0.01	<0.02
2	7.62	n.d.	<0.01	0.54	<0.01	<0.02
2.5	8.21	n.d.	<0.01	0.50	<0.01	<0.02
3	7.61	n.d.	<0.01	0.48	<0.01	<0.02
3.5	8.46	n.d.	<0.01	0.47	<0.01	<0.02
4	8.59	n.d.	<0.01	0.47	<0.01	<0.02

*n.d. = non-detectable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฅ.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงานในเขต

กรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ. 2537-2541)

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2542

ที่	ลักษณะกิจการ	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)				
			Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
1	โรงงานชุบโครเมียม	1.8	11	6	-	-	-
2	โรงงานชุบสังกะสี	9.2	-	-	-	8	-
3	โรงงานทำไฟแช็ค	4.6	0.2	300	-	-	-
4	โรงงานผลิตล้อจักรยาน	6.1	60	140	-	-	-
5	โรงงานทำโลหะแปรรูป	3.3	32	44	-	-	-
6	โรงงานผลิตอะไหล่รถจักรยาน	6.2	184	208	-	-	-
7	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	7	0.1	3.8	-	-	-
8	โรงงานชุบโลหะ	12.5	1.5	-	-	-	-
9	โรงงานประกอบพัดลม	4.3	-	60	-	400	-
10	โรงงานชุบโลหะ	9.1	-	-	-	60	-
11	โรงงานชุบโลหะ	7.8	0.1	20	1.28	22	-
12	โรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้ารถยนต์	7.3	0.1	1.6	-	-	-
13	โรงงานผลิตชิบ	7.7	-	0.1	-	0.1	-
14	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	8.7	2.7	19	-	-	-
15	โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า	8.1	0.8	0.3	-	-	-
16	โรงงานชุบโลหะ	5.5	41.3	33.3	-	-	-
17	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	7.5	-	-	-	7.3	1.1
18	โรงงานผลิตน้อด, ดอกสว่าน	8.4	39.6	0.18	-	29.7	-
19	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	2.2	51.5	46.6	-	-	-
20	โรงงานผลิตน้อด, ดอกสว่าน	5.1	6.27	-	-	346.5	-
21	โรงงานชุบโลหะ	6	-	0.05	-	-	-
22	โรงงานชุบโลหะ	4.4	20.2	300	-	-	-
23	โรงงานชุบสังกะสี	2	-	-	-	34	-
24	โรงงานผลิตอุปกรณ์รถยนต์	7	0.02	0.12	-	-	-
25	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	5.6	39.4	73.8	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นไปไซ่ประโยชน์ดานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	โรงงานชุบอะไหล่รถจักรยาน	4	105	274	-	-	-
27	โรงงานผลิตซีบ	7.6	-	0.05	-	0.08	-
28	โรงงานชุบโลหะ	2.7	0.06	-	0.19	16.3	-
29	โรงงานผลิตพัคลม	8.1	-	4.72	0.02	48	0.01
30	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	7.9	0.48	54.4	-	0.07	-
31	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยาน	6.7	-	0.04	-	-	-
32	โรงงานชุบโลหะ	7.4	-	0.03	-	-	-
33	โรงงานผลิตน็อต, ดอกสว่าน	6.1	-	-	-	61	-
34	โรงงานผลิตกลอนประตูชุบโครเมียม	2.7	0.04	1.81	-	0.16	-
35	โรงงานชุบโลหะ	7.8	0.11	0.14	-	0.04	-
36	โรงงานชุบโลหะ	5.8	0.87	61.2	-	-	-
37	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	6.1	0.25	3.28	-	0.13	-
38	โรงงานผลิตซีบ	2.2	-	2.53	1.43	0.32	-
39	โรงงานผลิตน็อต, สกรู	6.5	-	4.16	-	38	-
40	โรงงานเครื่องประดับชุบ	12	1.17	1.69	9.5	-	-
41	โรงงานชุบโลหะ	7.2	0.05	2.64	-	0.52	-
42	โรงงานชุบโครเมียม	11.8	0.95	0.23	0.08	-	-
43	โรงงานชุบโลหะ	11.2	0.02	4.2	-	0.04	-
44	โรงงานชุบโลหะ	5.9	9.8	9.1	-	4.36	-
45	โรงงานผลิตเครื่องเรือนจากโลหะ	8.5	4.8	11.4	-	-	-
46	โรงงานผลิตน็อต, สกรู และหมุดน้ำ	5.3	-	0.06	-	3	-
47	โรงงานผลิตรถจักรยาน	7.6	0.02	3.94	-	-	-
48	โรงงานท่อเหล็กอาบสังกะสี	6.6	-	0.16	-	0.68	-
49	โรงงานชุบโครเมียม	7.3	0.26	0.82	-	-	-
50	โรงงานชุบโลหะ	7.1	-	0.24	0.44	0.59	-
51	โรงงานชุบโครเมียม	2.4	556	324	-	-	-
52	โรงงานชุบโลหะ	5.9	128.8	90.8	-	-	-
53	โรงงานผลิตโลหะแปรรูป	6.5	21.8	1.08	-	0.18	-
54	โรงงานชุบโลหะ	6.9	1.68	1.51	0.28	-	-
55	โรงงานหลอมรีดและชุบอลูมิเนียม	6.7	0.04	18	-	-	-
56	โรงงานชุบโครเมียม	8.4	26.4	28.8	-	-	-
57	โรงงานชุบโลหะ	10.2	-	17.4	36.8	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

58	โรงงานชุบโลหะ	8.2	0.12	1.66	0.24	-	-
59	โรงงานผลิตสังกะสีลูกฟูก	4.5	-	-	-	188	-
60	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	10	23.4	1.4	0.16	0.02	0.44
61	โรงงานชุบโลหะ	6	0.88	4.05	0.79	-	-
62	โรงงานชุบโลหะ	8.6	0.09	0.96	-	1.16	-
63	โรงงานทำผลิตภัณฑ์โลหะแปรรูป	8.6	1.11	0.26	0.04	-	1.39
64	โรงงานชุบสังกะสี	8.6	-	-	-	23.5	-
65	โรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	8.8	0.21	-	-	0.051	-
66	โรงงานผลิตน็อต, สกรูและสลัก	10.6	-	0.11	-	0.18	-
67	โรงงานชุบโลหะ	11.1	3.4	2.2	3.08	-	-
68	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์	7.2	-	0.05	-	7	-
69	โรงงานชุบทอง, นาค, เงิน	6.8	-	144	0.04	-	-
70	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	2.8	6.4	18.1	4.8	-	-
71	โรงงานชุบทอง, นาค, เงิน	6.8	-	0.32	0.01	-	-
72	โรงงานชุบโลหะ	6.4	2.8	-	-	-	-
73	โรงงานชุบโลหะ	2.3	3.9	3.7	2.1	-	-
74	โรงงานผลิตรถจักรยานยนต์	8	0.19	0.14	0.1	-	-
75	โรงงานชุบโลหะ	6.2	0.06	132	5.2	-	-
76	โรงงานชุบโลหะ	2.2	1.1	55	63	-	-
77	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	8.5	0.19	0.14	0.1	-	-
78	โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	7	0.75	0.68	0.12	-	-
79	โรงงานชุบโลหะ	7	50	280	-	-	-
80	โรงงานทำเครื่องประดับ	8	-	0.32	0.12	-	-
	เฉลี่ย	6.76	26.25	41.53	5.41	39.42	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวศุทรวดี วีระพงษ์
 วัน เดือน ปีเกิด 2 สิงหาคม 2523 ที่สิงห์บุรี
 ที่อยู่ 93-95 หมู่ 6 ต.น้ำตาล อ.อินทร์บุรี จ.สิงห์บุรี 16110
 โทรศัพท์ 0-3650-3135, 0-6618-8370
 ประวัติการศึกษา 2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
 2548 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้