

การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย

Chromium Removal by Electro-Chemical and Electro-Flotation Process

คำนำ

โครเมียมเป็นโลหะหนักที่ใช้มากในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ ฟอกหนัง รถยนต์ และอุตสาหกรรมเหล็ก ในน้ำเสีย พบโครเมียมสามบวก (Cr^{+3}) และโครเมียมหกบวก (Cr^{+6}) ที่อยู่ในรูปโครเมต (CrO_4)²⁻ และ ไดโครเมต (Cr_2O_7)²⁻ Akatsuka and Fairhal, 1934 พบความเป็นพิษของโครเมียม Cr^{+6} มีความเป็นพิษมากกว่า Cr^{+3} หลายเท่า Cr^{+6} จะทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอน และเกิดการระคายเคืองที่ไต อันเป็นเหตุให้ไตอักเสบจนถึงแก่ความตาย นอกจากนี้ ยังเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งได้ โรงงานเหล่านี้จะมีระบบกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย (Wastewater Treatment) บำบัดน้ำเสียโครเมียมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักโครเมียมออกสู่สิ่งแวดล้อม

วิธีการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มีหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการทางเคมี เช่น การเติมสารเคมีเพอร์ไดออกไซด์ Cr^{+6} ที่มีความเป็นพิษไปเป็น Cr^{+3} ที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นทำการตกตะกอน (precipitation) การกรองด้วยระบบอาร์โอ (Reverse Osmosis) การดูดซับด้วยวัสดุต่าง ๆ (Adsorption) วิธีเหล่านี้กำจัดโลหะได้ดี

วิธีการหนึ่งคือ กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical) เป็นกระบวนการสร้างตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ ที่ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวให้อิเล็กตรอนผ่านทางขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และไฮโดรไลซิส ที่ทำให้น้ำเกิดแตกตัวได้ก๊าซไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน กระบวนการนี้ไม่ต้องใช้สารเคมีจึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่าการสร้างตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ด้วยสารเคมี ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี จะควบคุมที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรง กับการควบคุมการใช้สารเคมีในการบำบัด

การศึกษครั้งนี้ ใช้กระบวนการไฟฟ้า-เคมีร่วมกับการแยกตะกอนลอย (Electro-Chemical and Electro-Flotation Process) เป็นอีกวิธีที่สามารถกำจัดโครเมียมจากน้ำเสีย โดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมี มีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ทำหน้าที่ในการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าซึ่งใช้แผ่นเหล็กทำหน้าที่นำไฟฟ้าจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าผ่านลงสู่สารละลาย อิเล็กโตรไลต์ (น้ำเสียโครเมียม) แผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) จะทำหน้าที่ปล่อย อิเล็กตรอน 2 ตัวออกมา พร้อมกับอนุภาคเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{+2}) ขณะที่ขั้วคาโทด (ขั้วลบ) จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำได้ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) พร้อมทั้งเป็นตัวผ่านของกระแสไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ครบวงจร ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและคาโทด ทำให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+6}) รับอิเล็กตรอน รีดิวส์เป็นไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+3}) จากนั้น Cr^{+3} จะรวมตัวกับ Fe^{+2} เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน FeCr_2O_4 และสามารถรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เป็นตะกอน (Kongsricharoern, 1994) กระบวนการนี้เรียกว่า ไฟฟ้า-เคมี (Electro-chemical) ตะกอนอีกส่วนหนึ่งจะถูกแก๊สไฮโดรเจนพาให้ลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา และสามารถแยกตะกอนลอยออกจากน้ำเสียได้ เรียกว่า การแยกตะกอนลอย (Electro-Flotation) การศึกษาวิจัยถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมรวมทั้งหมด (Cr^{+6} และ Cr^{+3}) โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดโครเมียม

วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย (Electro-chemical and Electro-flotation, ECF) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมทั้งหมด (Cr^{+6}) ออกจากน้ำเสีย และการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำจัดโครเมียม
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม Cr^{+6} ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (ระยะเวลาทำปฏิกิริยา) โดยควบคุมที่อัตราการไหลของน้ำเสีย

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยการกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย (Electro-chemical and Electro-flotation Process, ECF) เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ มีปัจจัยที่ทำการศึกษาควคุม ดังนี้

1. ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจาก โพแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ให้มีความเข้มข้นของ Cr^{+6} เท่ากับ 20 มก/ล แทนความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสีย และ pH 4

2. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง และลักษณะขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วย

- เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า จากกระแสสลับเป็นกระแสตรงที่ใช้เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt) ปรับความต่างศักย์ 0-250 โวลต์ เพื่อควบคุมให้ได้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง คือ 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์

- การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าเป็นแบบ โมโนโพลาร์หลายเซลล์ (Monopolar Electrode Multiples cell) ต่อแบบขนาน ใช้แผ่นเหล็กขนาด 9.5 x 9.5 ซม เป็นขั้วไฟฟ้า

- ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทำการปรับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียให้มีค่าเท่ากับ 1300-1400 ไมโครซิเมนต์ต่อเซนติเมตร

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย (Electro-chemical and Electro-flotation Process, ECF) ดังนี้

- ระดับกระแสไฟฟ้าศึกษา 4 ค่า คือ 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์

- ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าศึกษาที่ระยะ 1, 1.5, และ 2 ซม (พื้นที่ผิว 722, 541.5 และ 361 ตร.ซม)

- อัตราการไหลของน้ำเสียในถังปฏิกิริยา 4 ค่า คือ 21.11, 31.67, และ 63.33 มล/นาที คิดเป็นเวลาทำปฏิกิริยา 45, 30 และ 15 นาที ตามลำดับ

4. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ที่มีการผันแปรปัจจัยต่าง ๆ นำมาวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (Cr^{+6}) ปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solid, SS) ตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th edition และวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1. กระบวนการไฟฟ้าเคมี หมายถึง ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยมีแผ่นเหล็กทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า

2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา หมายถึง ระยะเวลาทำปฏิกิริยาของน้ำเสียในถังปฏิกิริยามีหน่วยเป็นนาฬิกา โดยคิดจากอัตราการไหลของน้ำเสียที่ผ่านแผ่นขั้วไฟฟ้า โดยมีหน่วยเป็นปริมาตรของน้ำเสียลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อหน่วยเวลาเป็นนาฬิกา หาคด้วยปริมาตรของถังปฏิกิริยา

3. ระดับกระแสไฟฟ้า หมายถึง กระแสไฟฟ้ากระแสตรง ที่มาจากเครื่องแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับระดับกระแสไฟฟ้าได้ตามที่กำหนดไว้ มีหน่วยกระแสไฟฟ้าเป็น แอมแปร์

4. ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) หมายถึง กระแสไฟฟ้าจากประจุเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน

5. ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr+6 ในน้ำเสียสังเคราะห์ หมายถึง ความสามารถในการกำจัด Cr+6 ออกจากน้ำเสียของการกำจัดโครเมียมด้วย กระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบน้ำเสียไหลขึ้นด้านบนอย่างต่อเนื่อง จากน้ำเสีย คิดเป็นร้อยละการกำจัดได้

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น}} \times 100$$

ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ หมายถึง เฮกซะวาเลนต์โครเมียม + ไตรวาเลนต์โครเมียม

การตรวจเอกสาร

โครเมียม

1. ลักษณะทั่วไปโครเมียม

โครเมียม (Cr) เป็นโลหะธาตุ ในหมู่ (VI)B ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุ Transition มีเลขอะตอม 24 เลขมวล 51.996 จุดหลอมเหลว $1,900^{\circ}\text{C}$ จุดเดือด $2,642^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่น 7.19 กิโลกรัมต่อลิตร ที่ 20°C มี 4 ไอโซโทป คือ ^{50}Cr (4.31%) ^{52}Cr (83.76%) ^{53}Cr (9.55%) ^{54}Cr (2.356%) มีเลขออกซิเดชันหลายค่าตั้งแต่ +2 จนถึง +6 รูปที่เสถียร คือ +3 และ +6 ส่วนรูปอื่นสามารถเปลี่ยนเป็น +3 ได้ง่าย เพียงสัมผัสอากาศระยะเวลาเพียงเล็กน้อย (WHO, 1988)

2. แหล่งของโครเมียม

Merian (1984) สรุปว่า กำเนิดสำคัญของโครเมียม มี 3 แหล่ง คือ

- การระเบิดของภูเขาไฟ (น้อยกว่า ร้อยละ 1)
- กระบวนการทางกายภาพ (ประมาณร้อยละ 30) ซึ่งประกอบด้วย การแตกตัวของดิน หิน และ จากการชะล้างจากดินและหิน
- จากการกระทำของมนุษย์ ประมาณร้อยละ 70

โครเมียมในธรรมชาติ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+3}) แต่อุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีการปล่อยเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{+6}) ออกมา เช่น เหมืองแร่ จะปล่อยโครมไอรอน ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) และ โครไมต์ (Kimbrough, 1999) สารประกอบเหล่านี้จะปนเปื้อนสู่ธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ อย่างกว้างขวาง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบโครเมียม

ชื่อสารประกอบ	สูตรทางเคมี	น้ำหนัก โมเลกุล	คุณสมบัติการ ละลายน้ำ	ออกซิเดชัน ของโครเมียม
โครเมียม	Cr	51.996	ไม่ละลาย	0
โครเมียมอะซิเตด โมโนไฮเดรต	$\text{Cr}(\text{CH}_3\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	247.15	ละลาย	+3
โครเมียมไนเตรด โมโนไฮเดรต	$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	400.15	ละลาย	+3
โครเมียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	266.45	ละลาย	+3
โครเมียมฟอสเฟต	CrPO_4	146.97	ไม่ละลาย	+3
โครเมียมซัลเฟต	$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	392.16	ละลาย	+3
โซเดียมโครไมต์	NaCrO_2	106.98	ไม่มีข้อมูล	+3
โครเมียมออกไซด์	CrO_2	83.99	ละลาย	+6
โปแตสเซียมโครเมต	K_2CrO_4	194.2	ละลาย	+6
โปแตสเซียมโครเมต	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	294.18	ละลาย	+6
เลดโครเมต	PbCrO_4	323.18	ละลาย	+6
โซเดียมโครเมต	Na_2CrO_4	161.97	ละลาย	+6
โซเดียมไดโครเมต ไดไฮเดรต	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	298.0	ละลาย	+6
แอมโมเนียม ไดโครเมต	$(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	252.06	ละลาย	+6
โครเมียมไดออกไซด์	CrO_3	99.99	ละลาย	+6

ที่มา: Barceloux, (1999)

2.1 โครเมียมในบรรยากาศ

Cr^{+6} ในธรรมชาติ เกิดரிคักชั้นได้ดีกว่าการออกซิเดชัน สารรีดิคัล V^{+2} , Fe^{+2} , H_2S , HSO^{+3} , และสารอินทรีย์ การรีคักชั้นจะเกิดอย่างรวดเร็วในบรรยากาศ มีการประมาณว่า Cr^{+6} ในบรรยากาศมีค่าครึ่งชีวิตในการรีดิคัลเป็น Cr^{+3} อยู่ระหว่าง 16 ชั่วโมง ถึง 4.8 วัน อย่างไรก็ตาม Cr^{+3} สามารถเปลี่ยนเป็น Cr^{+6} ได้ โดยสารออกซิไดซ์ เช่น โอโซน ที่อยู่ในบรรยากาศ (WHO, 1988)

2.2 โครเมียมในดิน

ดินจะปนเปื้อนโครเมียม ได้จากการตกตะกอนของโครเมียมในบรรยากาศ หรือจากการฝังกลบสารที่มีการปนเปื้อนโครเมียม โครเมียมในดินสามารถเกิดการออกซิเดชัน รีดักชัน การดูดซับ การตกตะกอน และการละลายคืนได้ (Barceloux, 1999) สารออกซิไดซ์ในดินที่พบได้แก่ ออกซิเจนอิสระ และ MnO_2 สามารถออกซิไดซ์ Cr^{+3} ไปเป็น Cr^{+6} ได้ดี (Cary *et.al*, 1977) เหล็ก วานาเดียม ซัลไฟด์ และสารอินทรีย์ สามารถรีดิวส์ Cr^{+6} ได้ดี โดยเฉพาะ (Bloomfield, 1928)

2.3 โครเมียมในสิ่งมีชีวิต

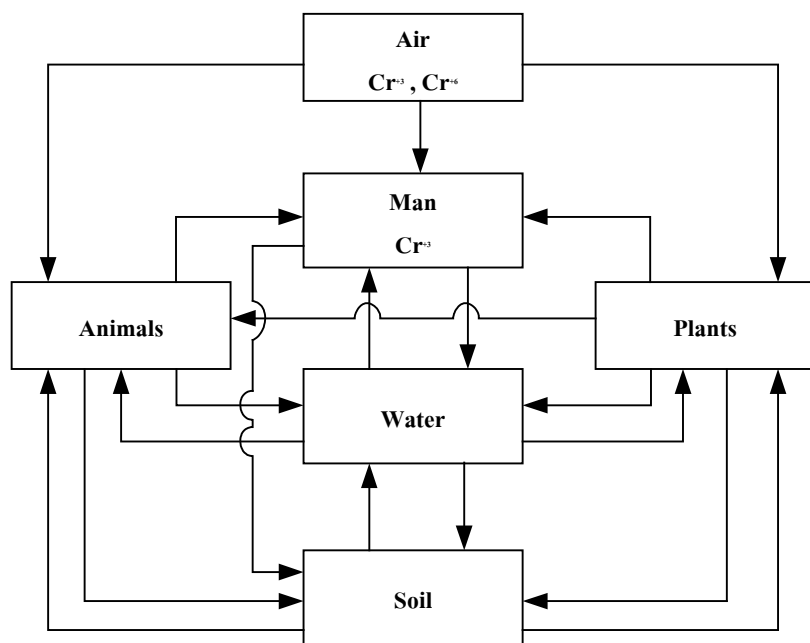
จุลินทรีย์บางประเภท เช่น โพรโตซัว สาหร่าย และแบคทีเรีย สามารถดูดซับโครเมียม ไปใช้ในเซลล์ได้ โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบขนถ่ายเซลล์ที่ชื่อ *Neurospora crassa* (Robert and Marzluf, 1971) จุลินทรีย์สามารถรีดิวส์ Cr^{+6} ไปเป็น Cr^{+3} ตั้งแต่ช่วง 0.05-5 มิลลิกรัมโครเมียม ต่อกรัมน้ำหนักตัว โดยปกติแล้วจุลินทรีย์ที่เป็นแกรมลบจะแสดงอาการเป็นพิษได้มากกว่า จุลินทรีย์แกรมลบ (Ross, 1981)

พืชดูดซับโครเมียมเข้าไปในลำต้นได้ โดยไม่ถูกรีดิวส์ Cr^{+6} (Verfaillie, 1974) และอาจพบโครเมียมในน้ำลำเลียงของท่อไซเลมของพืชบางชนิด ในดินที่มีการปนเปื้อนโครเมียม ดินที่มีพีเอชเป็นเบส หรือ กลาง จะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าในสถานะที่เป็นกรด (WHO, 1988)

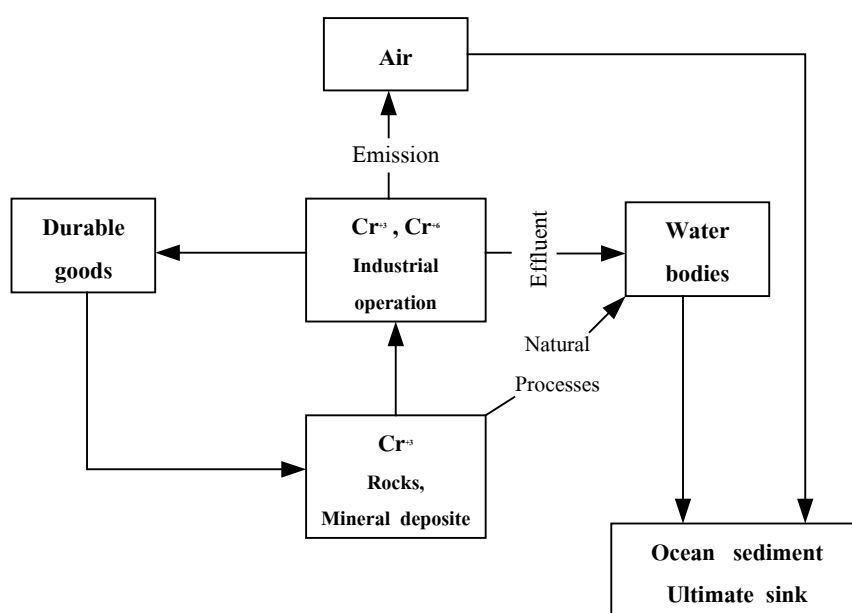
โครเมียมสามารถซึมผ่านเหงือกของปลา และสะสมที่เนื้อเยื่อต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว แต่สัตว์บกต้องการโครเมียมในกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยที่ Cr^{+3} จะจับตัวกับเหล็ก (III) เพื่อใช้ในการส่งโปรตีนชนิด transferring ในร่างกาย

3. การปนเปื้อนของโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

โครเมียมปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ปล่อยระบายออกมา กับอากาศและน้ำเสีย และเกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ภาพที่ 1 (A) วงจรการเคลื่อนย้ายโครเมียมในสิ่งแวดล้อม และ ภาพที่ 1 (B) วงจรวิธีการปนเปื้อนโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม



(A)



(B)

ภาพที่ 1 วงจรโครเมียม

ที่มา: WHO, (1988)

4. ความเป็นพิษ

WHO, 1988 สารประกอบ Cr^{+3} มีความเป็นอันตรายน้อยมากเมื่อเทียบกับ Cr^{+6} โดย Cr^{+6} เป็นสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคือง และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถซึมเข้าสู่ร่างกายได้ โดยทางเดินอาหาร ทางผิวหนัง และทางเดินหายใจ สำหรับสารโครเมตเป็นทั้งสารก่อการกลายพันธุ์ และสารก่อมะเร็ง เพราะจะไปรบกวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในเซลล์ Hunter, 1969 ศึกษาการกระจายตัวโครเมียมในสัตว์ทดลอง พบว่า อวัยวะที่มีโครเมียมที่ตกค้างมากที่สุดคือ ม้าม กระดูก ไต และตับตามลำดับ

Akatsuka and Fairhal, 1934 ศึกษาพบว่า ระดับความเป็นพิษของโครเมียมจะทำอันตรายต่อคนได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอนุมูลของโครเมียม กล่าว คือ Cr^{+6} ที่ร่างกายรับเข้าไปเล็กน้อยก็สามารถทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอนและเกิดการระคายเคืองที่ไต ไตอักเสบจนถึงแก่ความตาย นอกจากนี้ Cr^{+6} ที่ซึมผ่านทางผิวหนังเข้าสู่ร่างกาย จะถูกรีดิวส์เป็น Cr^{+3} ในชั้นคอเรียม (Corium) ของผิวหนัง ซึ่ง Cr^{+3} นี้จะทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกายเกิดเป็นสารแอนติเจน-แอนติบอดีเชิงซ้อน (antigen-antibody complex) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง โครเมียมเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งได้ แต่ยังไม่มีย่อสรุปที่แน่นอนสำหรับอันตรายที่เกิดจาก Cr^{+3} โดยตรง

- แผลจากโครเมียม (Chrome ulcers) เกิดจากการสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม ซึ่งโดยมากจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนัง พบมากที่สุดที่โคนเล็บมือ ตามข้อนิ้วมือ หรือที่หลังเท้า มีลักษณะเป็นแผลวงกลม ขอบค่อนข้างเรียบ บวมเล็กน้อย ปกติมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. หรือเล็กกว่า ซึ่งมองคล้ายถูกเจาะด้วยตะปู แผลนี้จะไม่เจ็บปวดแต่จะคันมาก อาจเกิดอาการติดเชื้อและลุกลามไปถึงข้อต่อใกล้เคียง ซึ่งอาจทำให้ต้องตัดนิ้วทิ้ง ฝุ่นของเกลือโครเมตหรือควันของกรด โครมิก อาจตกลงบนหนังตาหรือปลายจมูก ซึ่งอาจจะเกิดแผลขึ้นได้เช่นเดียวกัน

- มะเร็งที่ปอด อาจเกิดขึ้นกับผู้ที่สูดดมเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายเป็นประจำและเป็นเวลานาน ผู้ที่ได้รับเอาควันของกรด โคร-มิกหรือฝุ่น โครเมียมอยู่เป็นประจำ จะทำให้ผนังกันในจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุซึ่งการทะลุนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างใด จะรู้สึกก็ต่อเมื่อมีเสียงอู้อี้ หรือดัง จมูกแบนลง

5. การใช้ประโยชน์จากโครเมียม

5.1 ด้านโลหะกรรม

อุตสาหกรรมโลหะใช้โครเมียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น เพื่อด้านทานแรงกระแทก ด้านทานการกัดกร่อน ด้านทานการเกิดออกไซด์ ด้านทานการสึกและเพื่อความสวยงาม

5.2 ด้านเคมี

โครเมียมในรูปโครไมต์ ใช้ในการผลิตโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารเคมีโครเมียมพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเคมี เช่น ผลิตรงควัตถุสารประกอบสำหรับชุบโครเมียม สารฟอกหนังและโลหะโครเมียม ประโยชน์อื่น ๆ ของสารเคมีโครเมียม คือ เป็นสารเร่งปฏิกิริยา

5.3 ด้านวัสดุทนไฟ

โครไมต์ยังใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในเตาผลิตเหล็ก โลหะไม่ใช่อเหล็ก และเตาเผาซีเมนต์

การใช้ประโยชน์โครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียมออกไซด์	สีทาอาคาร
อุตสาหกรรมสี	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แคตาลีส
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมียม (VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	สวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต, โครเมียมอะเซเตต	ย้อมสีผ้า

ที่มา: พุทธิสาร, (2538)

6. คุณลักษณะน้ำเสียโครเมียม

Lancy, (1971) รายงานว่า โครเมียมในน้ำเสียจะมีปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำล้างที่ใช้ ปริมาณน้ำยาชุบที่ใช้ในกระบวนการชุบ การป้องกันการหยดหรือรั่ว ปริมาณของโลหะชิ้นงานที่ชุบในแต่ละวัน โดยเฉพาะโรงงานชุบโครเมียมขนาดเล็กปริมาณและลักษณะน้ำเสียเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของคนงานเป็นปัจจัยที่สำคัญ

Jan and Young, (1978) ศึกษาลักษณะน้ำเสียจากการชุบโลหะด้วยโครเมียม พบว่ารูปของโครเมียมในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโครเมียมจะมีโครเมียมในรูป Cr^{+6} 97–99% และ Cr^{+3} 3 %

กรรณิการ์ และคณะ, (2527) ศึกษารวบรวมข้อมูลคุณสมบัติ ลักษณะ ความเข้มข้น และปริมาณน้ำเสีย จากโรงงานชุบโครเมียมจำนวน 25 โรงงานในเขตกรุงเทพฯ พบว่า ปริมาณน้ำทิ้งในแต่ละวัน มีค่าอยู่ในช่วง 0.1–8 ลูกบาศก์เมตร/วัน มี Cr^{+6} อยู่ในช่วง 0–760 มก/ล โครเมียมรวม 0.13–770 มก/ล ค่าพีเอช 2.4–7.5 ของแข็งทั้งหมด 66–8,480 มก/ล ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะในเขตกรุงเทพมหานคร

ตัวอย่าง ที่	ปริมาณ น้ำทิ้ง m ³ /d	พีเอช	โครเมียม รวม mg/l	เฮกซวา เลนท์ โครเมียม mg/l	ของแข็ง ทั้งหมด mg/l	ของแข็ง ระเหย mg/l	ของแข็ง คงตัว mg/l	ไขมันและ น้ำมัน mg/l
1	2.00	7.2	41.00	40.00	1510.0	230	1280	97.7
2	8.00	7.0	0.47	0	886.0	413	473	0
3	5.00	6.9	0.13	0	2343.0	866	1477	0
4	*	6.7	0.53	0	2030.0	703	1327	0
5	*	6.1	37.00	36.00	280.0	163	117	97.3
6	1.70	6.3	34.30	32.00	1823.0	576	1247	93.3
7	1.70	6.4	770.00	760.00	2693.0	365	2337	98.7
8	1.70	5.8	107.00	100.00	8480.0	2673	5807	93.5
9	0.10	6.9	2.5	0.44	2950.0	856	2094	21.5
10	0.10	7.4	1.00	*	1980.0	373	1607	*
11	0.20	6.9	84.00	0.00	66.0	16	50	0
12	0.15	6.3	7.00	0.00	680.0	126	554	0
13	3.00	2.4	55.50	24.00	2033.0	500	1533	43.2
14	2.00	6.6	5.30	4.70	206.0	16	190	88.7
15	0.80	7.0	0.50	0.01	790.0	210	580	16.0
16	2.20	5.7	57.00	9.00	2570.0	580	1990	15.8
17	3.50	2.4	167.70	25.50	3390.0	600	2790	15.3
18	1.50	3.0	7.50	6.30	590.0	96.7	493.8	84.0
19	1.00	3.3	15.50	2.60	1002.5	70	932.5	16.8
20	1.60	4.7	24.30	10.90	476.7	149.9	326.8	44.9
21	1.50	3.6	11.00	8.00	842.5	162.5	680	72.7
22	3.50	6.2	16.80	3.80	910.0	113.3	796.7	22.6
23	2.20	5.7	8.30	6.80	280.0	87.5	192.5	81.9
24	1.80	6.8	7.00	2.30	1190.0	246.7	943.3	32.8
25	1.00	7.5	6.30	3.50	837.5	150	687.5	55.6

หมายเหตุ: * ไม่มีข้อมูล

ที่มา: กรรมการ และคณะ, (2527)

UNEP, (1983) ได้ศึกษาคุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในประเทศไทยฟิลิปปินส์ จำนวน 6 แห่ง ซึ่ง 4 แห่งเก็บตัวอย่างจากบ่อกักน้ำ 2 แห่ง เก็บตัวอย่างจากน้ำล้างชิ้นงาน พบว่า มีเฮกซะเลนที่โครเมียม อยู่ในช่วง 0.04–14 มก/ล รายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็กในประเทศไทยฟิลิปปินส์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	คุณลักษณะน้ำเสียโรงงานชุบแต่ละแห่ง						
	โรงงาน A	โรงงาน B	โรงงาน C	โรงงาน D	โรงงาน E	โรงงาน F1	โรงงาน F2
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	5	5	2	8	2	2	2
ความขุ่น (JTU)	1,500	1,100	120	430	15	55	-
พีเอช	5.58	6.3	8.1	4.8	8.5	4.0	3.6
ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)	450	800	120	530	25	-	-
ของแข็งละลาย (มก/ล)	620	1,400	620	760	600	-	-
ของแข็งรวม (มก/ล)	1,090	2,800	740	1,300	625	-	-
โครเมียม +6 (มก/ล)	14	0.83	12	0.18	-	0.11	0.04
ไซยาไนด์ (มก/ล)	1.2	6.1	2.2	0.84	15	-	-
ทองแดง (มก/ล)	37	9.9	-	2.8	0.013	0.31	6
สังกะสี (มก/ล)	25	64.5	-	6.6	-	-	-
นิกเกิล (มก/ล)	10	7.9	-	4.6	-	8.4	30
เหล็ก (มก/ล)	15	18.7	-	-	0.17	5.6	19

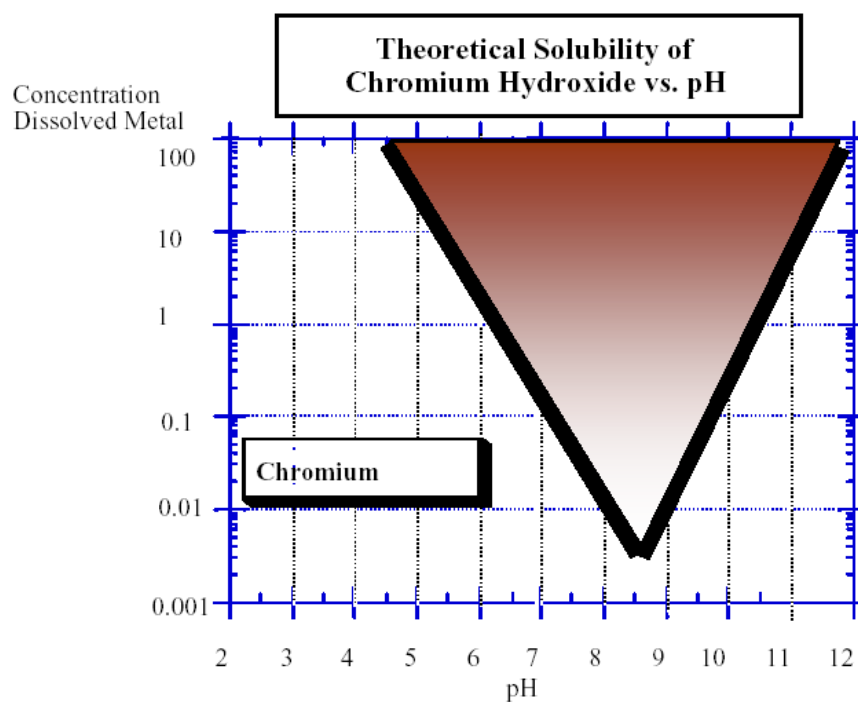
ที่มา: UNEP, (1983)

7. วิธีการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย

การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียมีอยู่หลายวิธี เช่น

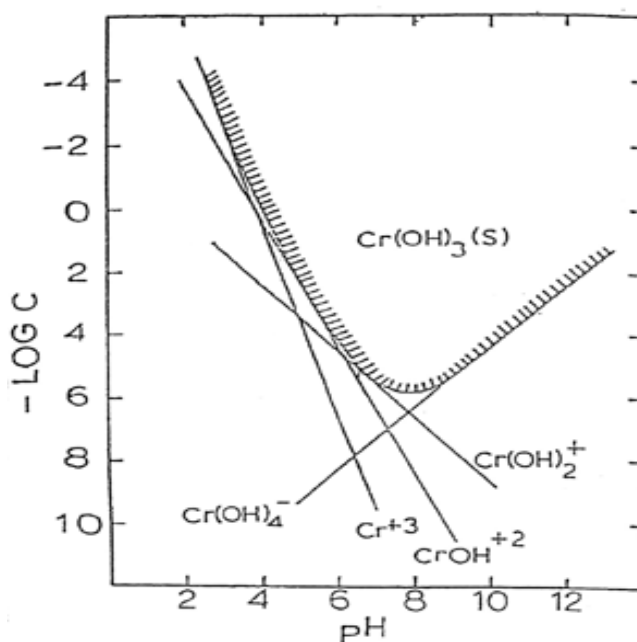
7.1 การกำจัดโครเมียมโดยวิธีโครเมียมรีดักชัน

การกำจัดโครเมียมโดยวิธีรีดักชัน Cr^{+6} จะถูกเปลี่ยนเป็น Cr^{+3} ในสภาวะพีเอช 2-3 ด้วยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) จากนั้น เติมน้ำด่างเพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วงประมาณ 8-9 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการทำให้เกิด $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ที่เป็นตะกอนแข็งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ ดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3



ภาพที่ 2 บทบาทของพีเอชที่มีต่อการสร้างตะกอนแข็งของโครเมียม (Cr^{+3})

ที่มา: David et al, (1994)



ภาพที่ 3 คุณสมบัติและรูปแบบของ Cr^{+3} ที่ละลายน้ำ

ที่มา: UNEP, (1983)

สาร Reducing agent ได้แก่ SO_2 , FeSO_4 และเกลือซัลไฟต์ในรูปแบบต่างๆ (เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_3), โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3), โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)) ในระบบบำบัดที่มีปริมาณน้ำเสียมากควรใช้ SO_2 เพราะมีการสิ้นเปลืองน้อยกว่าสารตัวอื่น ขณะที่ระบบบำบัดขนาดเล็กอาจใช้ FeSO_4 หรือ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ การใช้ FeSO_4 มีข้อเสีย ตรงที่จะเกิดตะกอนมาก และใช้ปริมาณมากกว่าทฤษฎีถึง 2.5 เท่า และ ต้องการค่าในปริมาณสูงมากเพราะต้องการทำให้ Fe^{+3} สร้างตะกอนแข็งด้วย และการสร้างตะกอนแข็งของ Fe(OH)_3 สิ้นเปลืองค่ามากกว่าที่ใช้สร้างตะกอนแข็ง Cr^{+3} ในขณะที่ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ใช้มากกว่าทฤษฎี 75 % โดยสร้างตะกอนแข็ง Cr(OH)_3 และ ปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่ต้องใช้ ดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 ปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการกำจัดโครเมียม

สารเคมี	ปฏิกิริยาเคมี
FERROUS SULFATE	
$2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 6\text{FeSO}_4 + 6\text{H}_2\text{SO}_4$	$\longrightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 8\text{H}_2\text{O}$
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\longrightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
SODIUM METABISULFITE	
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow 2\text{NaHSO}_3$
$2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 2\text{NaHSO}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$	$\longrightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{NaHSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\longrightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
SULFUR DIOXIDE	
$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$
$2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 3\text{H}_2\text{SO}_3$	$\longrightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 5\text{H}_2\text{O}$
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\longrightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$

ที่มา: มั่นสิน, (2542)

ตารางที่ 6 ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการกำจัดโครเมียม 1 มก/ล (ตามทฤษฎี)

สารเคมี	ปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎี (มก/ล)
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	16.03
H_2SO_4	6.01
Lime (90 %)	9.48
NaHSO_3	3.0
H_2SO_4	1.41
Lime (90 %)	2.38
SO_2	1.9
Lime (90 %)	2.38
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	2.81
H_2SO_4	1.52
Lime (90 %)	2.38

ที่มา: มั่นสิน, (2542)

การกำจัดโครเมียม ด้วยวิธีการรีดักชัน จะทำแบบทีละเท (Batch) หรือแบบต่อเนื่อง ก็ได้ การใช้ระบบ โออาร์พี (ORP–Oxidation Reduction Potential) อัตโนมัติใช้ในการควบคุม สารเคมี ที่เป็น รีดักแทนท์ (Reductant) ระดับ ORP ที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี ดัง ตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ระดับโออาร์พี และระดับพีเอช ที่เหมาะสมในการรีดิวส์โครเมียม

สารเคมี	ระดับพีเอช	Calomel 1 M	Ag/AgCl 4 M
FeSO ₄	2	+ 250	+ 300
NaHSO ₃	2.3	+ 250	+180
SO ₂	2.9	- 85	- 35
Na ₂ S ₂ O ₅	2.5	+ 250	+ 300

หมายเหตุ Reference Electrode ในปัจจุบันมักเป็นแบบ Ag/AgCl

ที่มา: มั่นสิน, (2542)

7.2 การกำจัดโครเมียมด้วยรีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นการควบคุมความแตกต่างของแรงดัน ที่น้ำซึมผ่านเยื่อเลือกซึมเพอมีเอเบิลเมมเบรน (Semi-permeable Membrane) การแยกโครเมียมออกจากน้ำเสียแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วย สาร เซลลูโลสอะซีเตต (Cellulose Acetate) ที่ให้เฉพาะน้ำผ่านและกักไม่ให้ Cr⁺⁶ และ Cr⁺³ ซึมผ่าน วิธีนี้ ต้องอาศัยแรงดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ และใช้พลังงานปริมาณ สูง (Eckenfelder, 1989)

7.3 การกำจัดโครเมียมด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนนิยมใช้เรซินเป็นตัวจับไอออน โดยทั่วไปเรซินจะประกอบ ด้วย Strong acid cation exchange และ Strong base anion exchange ต่อกันแบบอนุกรม เพื่อจับประจุบวกและประจุลบในน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียที่ผ่านระบบแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจะปราศจากอนุผลของ

โลหะ ระบบบำบัดวิธีนี้มีข้อเสีย ที่ต้องมีการทำการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) เพื่อป้องกันการเสื่อมประสิทธิภาพของเรซินหลังจากการถูกใช้ไป จึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพเป็นระยะ (ASCE, 1969)

7.4 การกำจัดโครเมียมด้วยการระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีและโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ เพื่อจะนำเอาสารที่ปนเปื้อนอยู่กลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง โดยการระเหยน้ำเสียบางส่วนให้กลายเป็นไอ และแยกส่วนที่เป็นไ้อผ่านเครื่องควบแน่น เพื่อทำให้น้ำกลายเป็นน้ำและนำกลับมาใช้ในการล้างโลหะได้ อีก ส่วนน้ำเสียที่เหลืออยู่จะมีความเข้มข้นของสารเคมีสูงขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในขบวนการชุบโลหะได้อีกครั้งหนึ่ง

7.5 การกำจัดโครเมียมด้วยอินโซลูเบิล สตาร์ช แซนแทท (Insoluble Starch Xanthate, ISX)

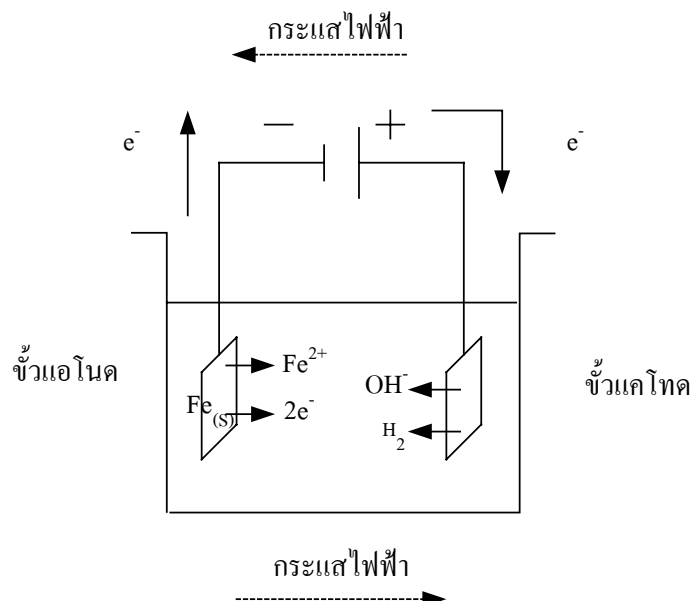
สารนี้เป็น Xanthate ของโซเดียมและแมกนีเซียม ซึ่งจะแลกเปลี่ยนโซเดียมอออนหรือแมกนีเซียมอออน กับอออนของโลหะ เกิดเป็นตะกอนของโลหะแซนแทท และตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โลหะจะถูกแยกออกโดยการสกัดด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือเฟา วิธีนี้มีความสามารถแลกเปลี่ยนประมาณ 1.1–1.5 มิลลิกรัมสมมูลของอออนโลหะ ต่อกรัม ของ ISX หรือ ใช้ ISX จำนวน 10 ปอนด์จะสามารถแยกโลหะหนักได้ประมาณ 1 ปอนด์ สามารถใช้งานในช่วงพีเอช 3–11 วิธีนี้ไม่เหมาะสม ถ้าปริมาณโลหะหนักมีปริมาณสูงกว่า 100 มก/ล (Alleman and Kavanagh, 1982)

8. หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี ใช้กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็น ปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน (หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์) และ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งเป็นสารละลายที่ให้ไฟฟ้าผ่านได้ (วรรณวรรณ, 2546)

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโตรไลต์ดิก ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาผ่านขั้วไฟฟ้าจะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนลงในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่มีอออนที่เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดสึกกร่อนและให้อิเล็กตรอนออกมาละลายอยู่ในน้ำ ที่ขั้วลบ (คาโทด)

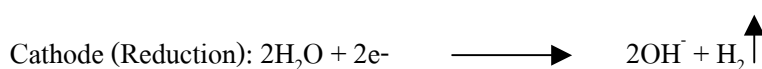
จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะทำให้น้ำเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{+2}) และ เฟอริกไอออน (Fe^{+3}) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{2(s)}$) และ เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{3(s)}$) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี

8.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอน เมื่อปฏิกิริยามีการสูญเสียอิเล็กตรอนจะเรียกปฏิกิริยานั้นว่า ออกซิเดชัน ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดการเพิ่มของอิเล็กตรอน หรือการรับอิเล็กตรอนเรียกว่า รีดักชัน ตัวอย่างของปฏิกิริยารีดอกซ์แสดงได้ดังนี้ (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2528)





8.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์

ในเซลล์ไฟฟ้าจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ ในการเคลื่อนที่ประจุ 1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ และใช้พลังงาน 1 จูล จุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ มักจะแทนโวลต์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf)

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (Welec)} = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (1)$$

งานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้น ได้มาจากการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ ถ้าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมบ์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ / โมล ดังนั้นจึงได้สมการเป็น

$$\text{Welec} = (nF) (E) = nE \times 96,487 \quad (2)$$

แต่การทำงานจะเกิดขึ้นได้ ต้องมีการลดพลังงานอิสระในเซลล์ และในกรณีที่เกิดปฏิกิริยา ในเซลล์เกิดอย่างผันกลับได้ การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (3)$$

เครื่องหมาย ΔG นั้นมีความหมายสำคัญมาก ถ้าที่อุณหภูมิและความดันใดๆ ΔG มีค่าเป็นลบ แสดงว่า ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองไม่ได้ และถ้ามีค่าเป็น ศูนย์ แสดงว่าอยู่ในสภาวะสมดุล แต่ค่าของ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf หรือ E) มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น เครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็ทำให้ทราบได้ว่า ปฏิกิริยาในเซลล์เป็นแบบใด เกิดขึ้นเองได้หรือไม่ หรืออยู่ในสภาวะสมดุล ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมาย ΔG	เครื่องหมาย ΔE
เกิดเองได้	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่สภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย, (2528)

8.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทดมาตรฐาน

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทด ในการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ วัดเทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทดไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่น $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ต้องนำอิเล็กโทดจับคู่กับอิเล็กโทดของไฮโดรเจน และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทดที่ต้องการ แต่ถ้าวิเลโทดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทดไฮโดรเจน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทดอื่น ๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 9

ศักย์ไฟฟ้า แสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใดในการเป็นตัวออกซิไดซ์ (หรือรีดิวซ์) เช่น PbO_2 กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรด พบว่า ค่า $E_{\text{cell}} \text{ Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E_{cell} ของ $\text{PbO}_2/\text{Pb}^{2+} = +1.455$ โวลต์ แสดงว่าระบบของ PbO_2 มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอน ได้ดีกว่าดังนั้นระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{O}} (\text{ขั้วบวก}) - E_{\text{O}} (\text{ขั้วลบ}) \quad (4)$$

$$E_{\text{O}} = E_{\text{O}} (\text{ขั้วบวก}) - E_{\text{O}} (\text{ขั้วลบ}) \quad (5)$$

ตารางที่ 9 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{I}^-$	0.536
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	0.5355
$\text{I}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	0.620
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	0.521
$\text{H}_2\text{SO}_3 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons \text{S}(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O}$	0.45
$\text{Ag}_2\text{CrO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Ag}(\text{s}) + \text{CrO}_4^{2-}$	0.446
$\text{VO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{V}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.361
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s})$	0.337
$\text{UO}_2^{2+} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{U}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.334
$\text{BiO}^+ + 2\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Bi}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$	0.32
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Hg}(\text{l}) + 2\text{Cl}^-$	0.368
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^-$	0.222
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0.17
$\text{BiCl}_4^- + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Bi}(\text{s}) + 4\text{Cl}^-$	0.16
$\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}$	0.154
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	0.153
$\text{S}(\text{s}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}(\text{g})$	0.141
$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ti}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$	0.1
$\text{AgBr}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{Br}^-$	0.095
$\text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.08
$\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	0.010
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$	0.000
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s})$	-0.126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}(\text{s})$	-0.136
$\text{AgI}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + \text{I}^-$	-0.151
$\text{CuI}(\text{s}) + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{s}) + \text{I}^-$	-0.185
$\text{N}_2(\text{g}) + 5\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons \text{N}_2\text{H}_5^+$	-0.23
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}(\text{s})$	-0.250
$\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{V}^{2+}$	-0.255
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Co}(\text{s})$	-0.277
$\text{Ag}(\text{CN})_2^- + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{s}) + 2\text{CN}^-$	-0.31
$\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Tl}(\text{s})$	-0.336

ตารางที่ 9 ต่อ

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{2-}$	-0.356
$\text{Ti}^{3+} + \text{e} \rightleftharpoons \text{Ti}^{2+}$	-0.37
$\text{Cd}^{+2} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{s})$	-0.403
$\text{Cr}^{+3} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cr}^{+2}$	-0.41
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{s})$	-0.440
$2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-0.49
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e} \rightleftharpoons \text{Cr}(\text{s})$	-0.74
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{s})$	-0.763
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Mn}(\text{s})$	-1.18
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{s})$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{s})$	-2.37
$\text{Na}^+ + \text{e} \rightleftharpoons \text{Na}(\text{s})$	-2.714
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{s})$	-2.87
$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Ba}(\text{s})$	-2.90
$\text{K}^+ + \text{e} \rightleftharpoons \text{K}(\text{s})$	-2.925
$\text{Li}^+ + \text{e} \rightleftharpoons \text{Li}(\text{s})$	-3.045
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{HF}(\text{aq})$	3.06
$\text{O}_3(\text{g}) + 2\text{H} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{SO}_4^{2-}$	2.01
$\text{Co}^{3+} + \text{e} \rightleftharpoons \text{Co}^{2+}$	1.842
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e} \rightleftharpoons \text{MnO}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$	1.695
$\text{HClO} + \text{H}^+ + \text{e} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	1.63
$\text{H}_5\text{IO}_6 + \text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{IO}_3^- + 3\text{H}_2\text{O}$	1.60
$\text{BrO}_3^- + 6\text{H}^+ + 5\text{e} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{Br}_2(\text{l}) + 3\text{H}_2\text{O}$	1.52
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.51
$\text{ClO}_3^- + 6\text{H}^+ + 5\text{e} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{Cl}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}$	1.47
$\text{PbO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.455
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e} \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.359
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e} \rightleftharpoons 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	1.33
$\text{Tl}^{3+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Tl}^+$	1.25
$\text{IO}_3^- + 2\text{Cl}^- + 6\text{H}^+ + 4\text{e} \rightleftharpoons \text{ICl}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	1.24
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.23

ตารางที่ 9 ต่อ

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$O_2(g) + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.229
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 3H_2O$	1.195
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(aq) + 3H_2O$	1.178
$SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2SeO_3 + H_2O$	1.15
$Br_2(l) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.065
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.087
$ICl_2^- + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 2Cl^-$	1.06
$V(OH)_4^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00
$HNO_2 + H^+ + e \rightleftharpoons NO(g) + H_2O$	1.00
$Pd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pd(s)$	0.987
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.920
$HO_2^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons 3OH^-$	0.88
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI(s)$	0.86
$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg(l)$	0.854
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag(s)$	0.799
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l)$	0.789
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.771
$H_2SeO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons Se(s) + 3H_2O$	0.740
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt(s) + 4Cl^-$	0.73
$C_6H_4O_2(quinone) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons C_6H_4(OH)_2$	0.699
$O_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.682
$PtCl_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$	0.68
$Hg_2SO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + SO_4^{2-}$	0.615
$Sb_2O_5(s) + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons 2SbO^+ + 3H_2O$	0.581
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.564
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_3AsO_3 + H_2O$	0.559

ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย, (2528)

8.4 ค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้บำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ตามกฎฟาราเดย์ถ้าประจุมากขึ้น จะทำให้ประจุหรือเหล็กออกมาจากขั้วแอโนดมากขึ้น และจากกฎของโอห์ม ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (6)

$$V = I \times R \quad (6)$$

โดยที่ V เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
I เป็นค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
R เป็นค่าความต้านทาน (โอห์ม)

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} \text{งานไฟฟ้าสุทธิ (Welec)} &= \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \\ &= nE \times 96,487 \end{aligned} \quad (7)$$

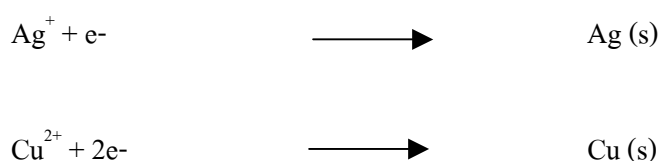
ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (8)

$$R = \frac{I}{C \times A} \quad (8)$$

โดยที่ R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หน่วยโอห์ม
I เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วยเซนติเมตร
C เป็นค่าความนำไฟฟ้าเฉพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หน่วย ซีเมน
A เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หน่วยตารางเซนติเมตร

8.5 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) เป็นคนแรกที่ค้นพบความสัมพันธ์แบบปริมาณระหว่างปริมาณไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดในกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เช่นการรีดิวซ์ไอออนของเงินและทองแดง ให้เป็นโลหะ



จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า เงิน (Ag) หนึ่งโมลไอออนรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมล ได้โลหะเงินหนึ่งโมลหนัก 107.87 กรัม ซึ่งจะไปเคลือบอิเล็กโทรดที่เป็นคาโทด ส่วนไอออนของทองแดงทำปฏิกิริยากับสองโมลของอิเล็กตรอน เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าโดยตรง ในการรีดิวซ์ไอออนของทองแดงเพื่อให้ได้โลหะหนึ่งโมล จะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึงสองเท่าของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับเงิน ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ตกเพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเรียกว่า หนึ่งฟาราเดย์ ดังนั้นต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เพื่อให้ไอออนของโลหะเงินหนัก 107.87 กรัม และต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึง 2 เท่าฟาราเดย์เพื่อให้ได้ทองแดงหนัก 63.45 กรัม ปริมาณไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_e = I \times t \quad (9)$$

เมื่อ	Q_e	เป็นประจุไฟฟ้าในหน่วยคูลอมบ์, C
	I	เป็นกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์, A
	T	เป็นเวลาในหน่วยวินาที, S

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เป็นผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล เนื่องจากประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60210×10^{-19} คูลอมบ์ ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 F &= e N_A & (10) \\
 &= (1.60210 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02252 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\
 &= 96,487 \text{ C mol}^{-1}
 \end{aligned}$$

เมื่อ F เป็นปริมาณไฟฟ้าในหน่วยฟาราเดย์
 e เป็นประจุของอิเล็กตรอนในหน่วยคูลอมบ์
 N_A เป็นเลขอาโวกาโดร

นั่นคือ 1 ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ ซึ่งปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันมีความสัมพันธ์ กับปริมาณไฟฟ้าหรือจำนวนฟาราเดย์ สรุปเป็นกฎได้เรียกว่า กฎอิเล็กโทรไลต์ซิสของฟาราเดย์ ดังนี้

ก) มวลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด หรือ ขั้วคาโทด ที่เกิดอิเล็กโทรไลต์ซิส เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์

ข) มวลของสารต่างกันที่เกิดขึ้นในระหว่างอิเล็กโทรไลต์ซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ๆ

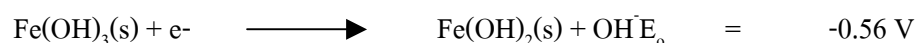
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และปริมาณโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ได้ดังนี้

$$W = \frac{I \times T \times M}{Z \times F} \quad (11)$$

โดยที่ W เป็นปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
 I เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
 M เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด
 T เป็นเวลาที่ใช้ (นาท)
 Z เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยรีดอกซ์
 F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์

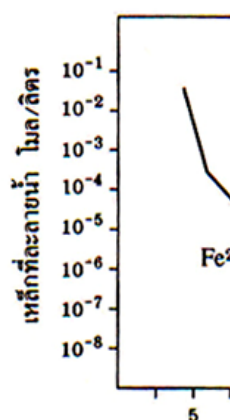
8.6 ขั้วไฟฟ้า (electrodes)

ก) เหล็ก (Fe) เป็นโลหะหนัก ที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สารประกอบธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เหล็กที่มีเลขออกซิเดชันสูงๆ จะไม่เสถียร และเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ถ้าเอาเหล็กไปวางไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่ผิว เรียกว่า “สนิมเหล็ก” เนื่องจากการเกิดออกไซด์ที่มีน้ำผลึก $(\text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ดังนั้นเครื่องมือที่เป็นเหล็กจึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิม เคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม) หรือ ผสมโลหะบางชนิดลงไป เพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ผสม $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะได้หลายชนิด เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{3+} และ Fe^{2+} ปนกัน เนื่องจาก Fe(II) ถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบส ดังจะเห็นได้จากค่า E_0



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe^{2+} ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำอยู่สารละลายมีสีเขียวอ่อน ของไฮดรอกไซด์ $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6)^{2+}$ สารประกอบ Fe^{3+} มีคุณสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในสารละลายอยู่ในรูปของ $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6)^{3+}$ มีสีม่วงจางเมื่อ pH ต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลส์เป็น $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}))^{2+}$ หรือไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนคล้าย ๆ ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ติกเซลล์ (Electrolytic cell) เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ขึ้น ที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้า Anode จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่ขั้ว Cathode จะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้า Anode ตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ Fe(OH)_2 ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้ว Cathode และค่า pH ของน้ำเสีย ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูก ยิ่งไปกว่านั้น มันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์

ที่มา: ณรงค์ วุทธเสถียร

ภาพที่ 6 ค่า pH-potential ไดอะแกรมสำหรับเหล็ก

ที่มา: ณรงค์ วุทธเสถียร, (2540)

ข) อลูมิเนียม (Al) เป็นธาตุโลหะที่มีมากเป็นอันดับ 3 ของโลก และหาได้ง่าย มีสีขาว น้ำหนักเบา แข็ง ไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถจัดรูปร่างโค้งงอได้ตามต้องการ จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในงานก่อสร้างต่าง ๆ ตามที่ต้องการ อลูมิเนียมจัดว่าเป็นธาตุที่ไวและทำปฏิกิริยาทันทีกับโลหะตัวอื่น ๆ ได้ อลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชัน +3 สารประกอบของโลหะมีเลขออกซิเดชัน +3 มักเป็นสารประกอบโควาเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{+3} เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และไฮโดรไลต์ซิส (Hydrolysis) เกิดอัลเฟต ในเตรด และไฮไลต์ของอลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมไม่ละลายในน้ำ การใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโตรไลต์ติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยา อิเล็กโตรไลต์ซิสขึ้นทำให้อลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อน และละลายในสารละลาย ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก ดังตารางที่ 10 ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุทั่วไป

ตารางที่ 10 โลหะและค่าการเป็นสื่อนำไฟฟ้า

วัสดุคืบ	การเป็นสื่อนำ(mhos/cm)
อลูมิเนียม (Al)	3.5×10^5
ทองแดง (Cu)	5.8×10^5
เหล็ก (Fe)	1.0×10^5

ที่มา: Moore, A.D., 1973

ค) ไทเทเนียม (Ti) เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และ แฮฟเนียม เป็นโลหะทรานซิชัน คือ มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง เหนียว ดึงเป็นเส้นได้ เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อย สามารถทนก๊าซโครอินแห้งได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับโลหะได้สารประกอบโควาเลนต์ เช่น TiO_2 , $TiCl_4$ เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3 และ +4 ซึ่งจะเสถียรที่ +4 ภายใต้อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ ถึงแม้ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการแต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็กเพราะว่องไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

ไทเทเนียมขาว นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ดิกเซลล์ (Electrolytic cell) จะไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์ซิส และที่ขั้วลบ พบว่า มีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพราะจุดหลอมเหลว และจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ

ง.) แพลตินัม (Pt) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะโลหะเป็นเหตุให้ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ จึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่น ๆ มักพบอยู่รวมกันหลายธาตุอื่นเป็นโลหะเจือแล้ว ยังปรากฏรวมอยู่กับธาตุทองแดง, เงิน และ ทองคำอีกด้วย แพลตินัมมีน้อยมาก จึงมีราคาแพงมาก แพลตินัมมีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงใช้ทำอิเล็กโทรด เบาทนไฟ และ ภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและงานด้านทันตการกัดกร่อนสูง

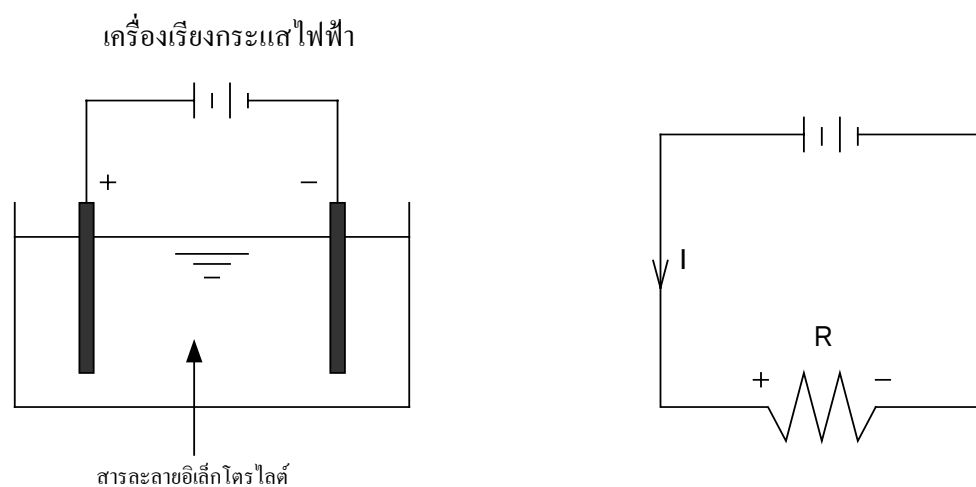
9. ระบบบำบัดโดยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนอยู่ และบำบัดสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมกับไซยาไนด์ โดยใช้ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) โดยมีแผ่นเหล็ก (iron steel) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (electrode plate) และใช้น้ำเสียที่มีโครเมียมเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ตกตะกอน แห่จ่ายไฟฟ้าเป็นแบบกระแสตรง

9.1 รูปแบบของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

มี 4 แบบ (Kongsricharoern N.and Polprasert.,1995; pretourius และคณะ, 1991) ดังนี้

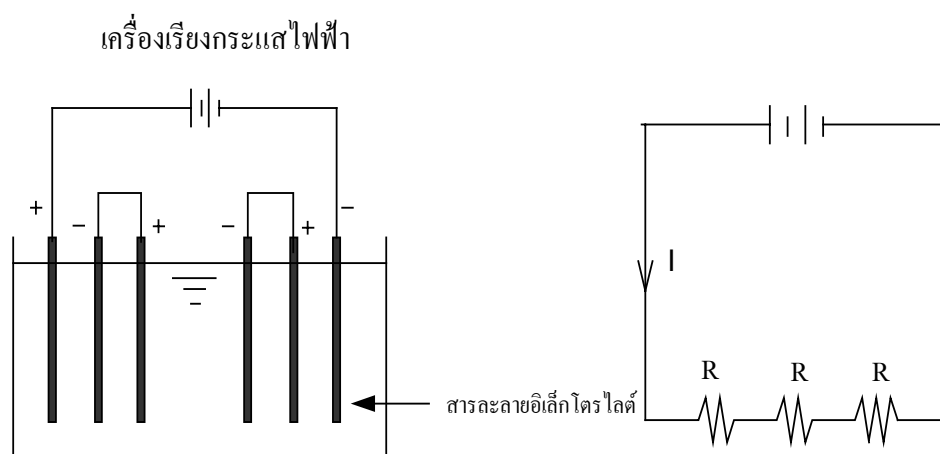
ก.) โมโน โพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell) เป็นการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ง่ายที่สุด คือ มีแผ่นอิเล็กโทรด 1 คู่โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด และ อีกขั้วหนึ่งเป็นคาโทด ดังภาพที่ 7 ซึ่งไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก



ภาพที่ 7 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์-เซลล์เดี่ยว

ที่มา: Pretourius *et al*, (1991)

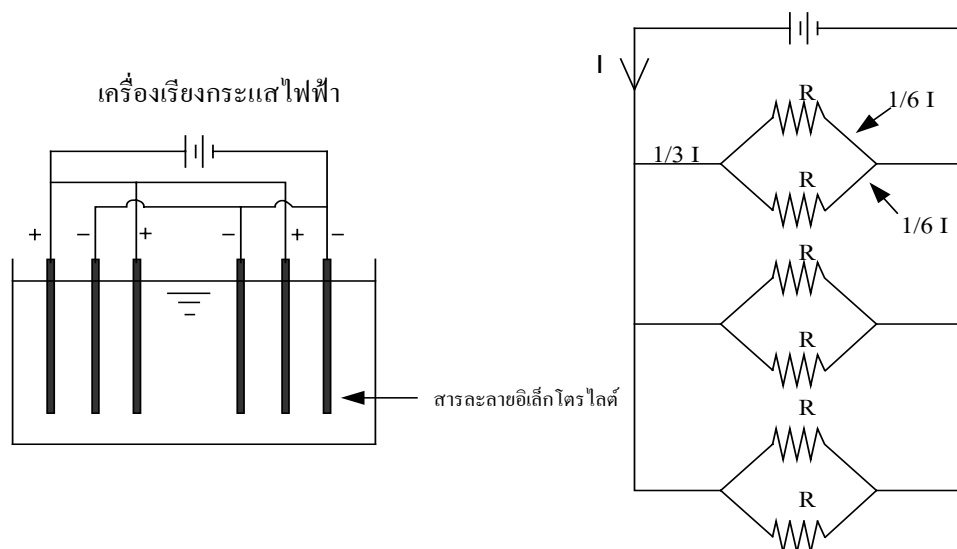
ข) โมนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series) เป็นการ จัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลาย ๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้า กระจ่ายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์-แบบต่ออนุกรม

ที่มา: Pretourius *et al*., (1991)

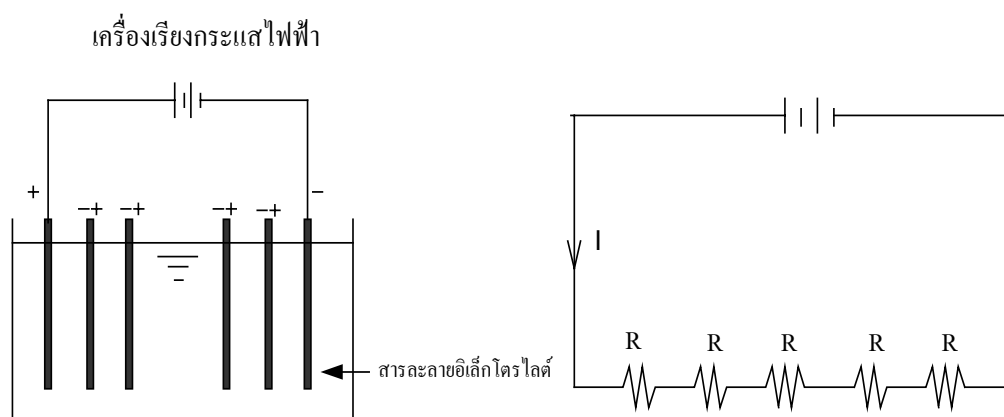
ค.) โมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน (Monopolar electrode in parallel) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนานดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบโมนโพลาร์-แบบต่อขนาน

ที่มา: Pretourius *et al.*, (1991)

ง.) แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode with multiple in series) มีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดเพียง 2 จุด เฉพาะแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ปลายนอกสุด ดังภาพที่ 10 แต่ละแผ่นของอิเล็กโทรดมีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกทำหน้าที่เป็นคาโทด ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กโทรดจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์สูงกว่า เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ต่อกันแบบอนุกรม แต่จะมีไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือ มีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านอิเล็กโทรดทั้งหมด



ภาพที่ 10 การจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบไบโพลาร์-แบบต่อขนาน

ที่มา: Pretourius *et al.*, (1991)

9.2 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

อ็อกซิเจนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ระบบ ขึ้นอยู่กับการควบคุม ดังนี้ (ปริเมธ, 2545)

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า มีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าภายนอกที่ให้ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน ที่จะนำกระแสไฟฟ้าได้ดี จะขึ้นอยู่กับประจุบนอิเล็กตรอนและขนาดอิเล็กตรอน
3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ที่มีขนาดผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเทและ รับผิดชอบ โดยที่กระแสไฟฟ้ามีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จำนวนกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

6. จำนวนประจุของไอออนจะมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

7. ความเข้มข้นสารละลายมีส่วนโดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ๆ

9.3 หลักการในการออกแบบระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า-เคมี

เครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มีหลายรูปแบบดังภาพที่ 11 ขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะประยุกต์ใช้งาน โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ (วรรณวรรณ, 2546) คือ

1. ควรออกแบบให้ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำสุด ถ้าเป็นไปได้ควรมีการหลีกเลี่ยงการออกแบบของงานที่มีการกววน หรือ การไหลของสารละลาย

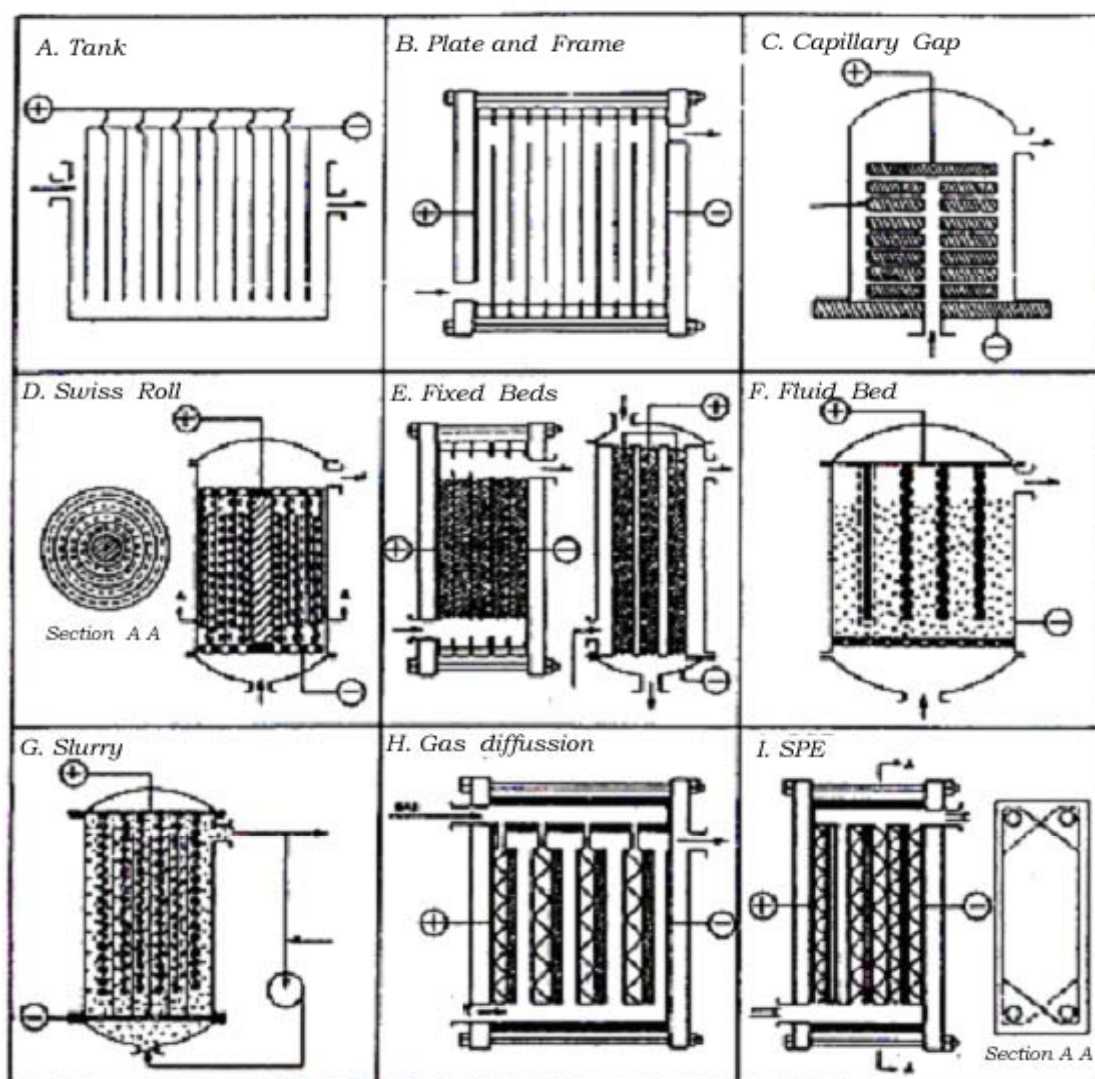
2. ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สมบูรณ์

3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกววนผสม หรือ การไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกววนผสมอาจต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัดที่ไม่นำไฟฟ้า

4. การออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ให้ทั่วพื้นที่ผิวของอิเล็กโทด

5. ควรออกแบบให้มีระยะระหว่างอิเล็กโทดน้อย เพราะระยะห่างยิ่งมากจะทำให้ต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น

6. การเลือกวัสดุทำอิเล็กโทด ต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการ



ภาพที่ 11 ตัวอย่างเครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

ที่มา: Oloma, (1985)

9.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (Yousef M. and Robert, 2000)

9.4.1) ข้อดีของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

1. เป็นเครื่องที่ใช้งานง่าย
2. สามารถบำบัด สี กลิ่น รส สารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์ ที่ออกจากระบบสามารถยอมรับได้
3. ตะกอนที่ได้มีลักษณะคล้ายตะกอนจากระบบเคมี แต่มีขนาดใหญ่กว่าตกตะกอน กรอง และ รีดน้ำออกง่าย เพราะส่วนใหญ่เป็นออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะและอัตราการเกิดตะกอนต่ำ
4. น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีมีค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) น้อยกว่าระบบเคมี
5. กำจัดอนุภาค (คอลลอยด์) ขนาดเล็กได้ เพราะกระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงง่ายต่อการตกตะกอน
6. ไม่มีการเติมสารเคมี ลงไปในระบบ
7. ก๊าซที่เกิดขึ้นจะดันตัวและขมกลืนสารให้ลอยขึ้นเหนือน้ำทำให้ง่ายต่อการกำจัดออก
8. เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการบำรุงรักษาน้อย
9. สะดวกที่นำไปใช้งาน กระแสไฟฟ้าเป็นสิ่งที่หาได้ง่าย และใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cells) ได้

9.4.2) ข้อเสียของระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า-เคมี

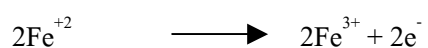
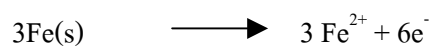
1. ขั้วอิเล็กโทดสึกกร่อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ละลายลงไปในน้ำทำให้ต้องมีการเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทดใหม่มาทดแทน
2. ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ค่าไฟฟ้าราคาสูง
3. สารบางชนิดจะเกาะที่อิเล็กโทด ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง
4. ต้องการค่าความนำไฟฟ้าในน้ำเสีย (Conductivity)
5. ไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะคล้ายวุ้นสามารถละลายในน้ำเสียได้อีก

10. ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการกำจัดโครเมียม

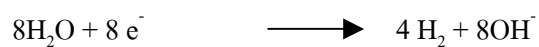
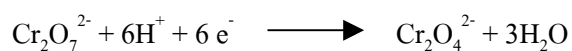
การกำจัดโครเมียมด้วยไฟฟ้า-เคมี ใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ใช้แผ่นเหล็กลงสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (น้ำเสียโครเมียม) แผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนด จะปล่อยอิเล็กตรอน 2 ตัว พร้อมกับอนุภาคเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{+2}) ขั้วคาโทดจะเกิด ปฏิกิริยาทำให้น้ำเกิดการแตกตัวได้ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กับแก๊สไฮโดรเจน ($\text{H}_{2(g)}$) พร้อมกับเป็นตัวแทนของกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจร วงจรเช่นนี้จะดำเนินต่อเนื่องทำให้น้ำมี ไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำมีค่า pH สูงขึ้น ผลของปฏิกิริยาที่ได้จากขั้วแอโนดและคาโทดที่เกิดขึ้น ทำให้ Cr^{+6} รับอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนด เพื่อรีดิวส์เป็น Cr^{+3} จากนั้น Cr^{+3} จะรวมตัวกับ Fe^{+2} เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน FeCr_2O_4 และสามารถรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เกิดเป็นตะกอน สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ สำหรับเหล็กที่ถูกปล่อยออกจากขั้วเหล็กในรูป Fe^{+2} เมื่อสัมผัสกับอากาศจะออกซิไดส์กลายเป็น Fe^{+3} ไปรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่สามารถตกตะกอนได้เช่นกัน

ปฏิกิริยารีดอกซ์ของโครเมียมกับกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

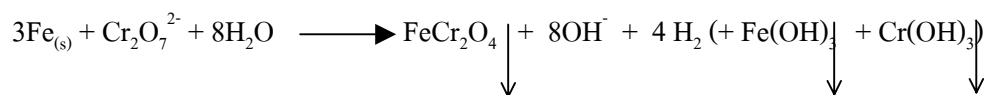
Anode (ขั้วบวก – Oxidation) :



Cathode (ขั้วลบ – Reduction) :



Redox Reaction :



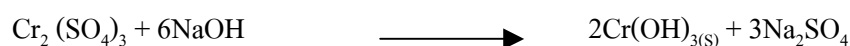
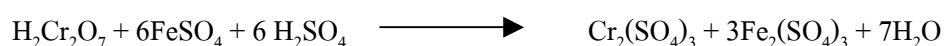
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพิ่มพงษ์, (2541) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะ โดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ที่สภาวะต่าง ๆ คือ ความเข้มข้น ระดับกระแสไฟฟ้า 1, 2 และ 4 แอมแปร์ และเวลาทำปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก/ลิ ใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ขณะที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 100 มก/ลิ ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 150 มก/ลิ ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จึงสามารถบำบัดโครเมียมผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงาน

Kongsricharoern and Polprasert, (1995) ศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ใช้เหล็กเป็นขั้วโลหะไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Monopolar) ใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง ค่าความเข้มข้นโครเมียมอยู่ระหว่าง 570–2,100 มก/ลิ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของ ECP คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 75 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 4.8 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที และค่าพีเอชสูงกว่า 3.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม ร้อยละ 99 ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ECP เทียบกับวิธีการใช้สารเคมีโดยการเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ร่วมกับโซดาไฟ และวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) พบว่า กระบวนการ ECP มีค่าใช้จ่ายถูกกว่าโดยราคาอยู่ที่ 227, 248.4 และ 230 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

Mcdonald, (1980) ศึกษาการกำจัด Cr^{+6} และทองแดงโดยวิธีไฟฟ้าเคมี เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ดิกที่ใช้ทดลองมีขนาด 30 x 30 x 30 ซม ปริมาตรใช้งาน 20 ลิตร ใช้ถ่านแกรไฟต์ 4 แผ่น เป็นอิเล็กโทรดให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบ 42 แอมแปร์จากเครื่องเรียงกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.15 แอมแปร์ต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4–6 โวลต์ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยป้อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ดิกด้วยเครื่องสูบน้ำที่อัตราการไหล 14 มล/นาที จนครบ 96 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถ กำจัด Cr^{+6} เป็น Cr^{+3} ได้ร้อยละ 86 ปริมาณทองแดงในสารละลายที่ลดลงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปคอปเปอร์ไอออน และ Cr^{+6} ถูกเปลี่ยนเป็น Cr^{+3} จากนั้นสามารถกำจัด Cr^{+6} และทองแดง ได้ง่ายโดยใช้สารเคมีในการตกตะกอน

Reussard, Benezech and Lacoste, (1990) ศึกษาการกำจัด Cr^{+6} ในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งระบบเดิมที่ใช้กำจัด Cr^{+6} นั้นมีความยุ่งยาก คือ ต้องปรับพีเอชของน้ำเสียให้เป็นประมาณ 3 เพื่อเปลี่ยน Cr^{+6} เป็น Cr^{+3} โดยใช้ SO_2 , NaHSO_3 หรือ FeSO_4 จากนั้นเติมด่าง เช่น ปูนขาว โซดาไฟ เพื่อเพิ่มพีเอช ของน้ำเสียเป็น 8.5 ในการตกตะกอนโครเมียมอออนโลหะอื่น ๆ ในรูปของไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



วิธีนี้จะเกิดตะกอนมาก ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองกำจัด Cr^{+6} ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ตก ที่มีอนุภาคแกรไฟต์ เป็นอิเล็กโทดบรรจุระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นส่วนของคาโทดและแผ่นตะกั่วเคลือบ MnO ที่เป็นส่วนแอโนด ในส่วนของคาโทดและแอโนดแยกกันด้วยแผ่นไดอะแฟรมของโพลีเอทิลีน ใช้น้ำเสียจากโรงชุบโลหะเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าความนำไฟฟ้าเริ่มต้น $39.51 \mu\text{S}/\text{cm}$ พีเอช 2.47 พบว่าในส่วนของแอโนดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าพีเอช เหลือเป็น 0.5 ในขณะที่คาโทดน้ำเสียมียค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณ Cr^{+6} และ Cr^{+3} ลดลง ซึ่งระบบนี้ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี

Dennis Jenke and frank Diebold, (1984) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เป็นกรดจากเหมืองแร่ โดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ศึกษาในห้องทดลองโดยใช้โลหะเป็นขั้วแอโนด และขั้วคาโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนอออนเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลให้พีเอชในสารละลายเพิ่มขึ้น โลหะหนักก็จะถูกกำจัดโดยการตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์ หรือโดยการดูดซับที่ขั้วโลหะซึ่งการทดลองนี้ใช้แผ่นเหล็ก เป็นขั้วโลหะไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ ไฟฟ้า 15 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2.8 เป็น 4.7 และสามารถกำจัดทองแดง และอลูมิเนียมได้ 100% กำจัดสังกะสีได้ 90% และกำจัดแมงกานีสและแมกนีเซียมได้ 25 และ 10% ตามลำดับ

Lee, (1975) ทดลองเซลล์อิเล็กโทรไลต์ตกที่ทำด้วย PVC ปริมาตรการใช้งาน 20 แกลลอน ใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทดที่มีการจัดเรียงตัวแบบโมนอโพลาร์ ใช้น้ำเสียโรงงานชุบโลหะเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5 แกลลอน/นาที ใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง 50 แอมแปร์ ความ

ต่างศักย์ 10 โวลต์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วให้ไปตกตะกอนที่ถังตกตะกอนโดยมีการเติมสารเคมี เพื่อช่วยในการตกตะกอนในระยะเวลา 2 นาที จากการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณ Cr^{+6} จากค่า เริ่มต้น 200 มก/ลเหลือเพียง 0.001 มก/ลค่าพีเอชเพิ่มจาก 6.45 เป็น 9.0

Nawa Khati wada, (1995) ได้ศึกษาวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical precipitation, ECP) มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของตะกอนจากระบบ Activated Sludge เพื่อตรวจสอบความสามารถในการตกตะกอน ความสามารถในการรีดเอาน้ำออกจากตะกอน และการลดลงของฟิคลโคลิฟอร์ม โดยใช้ระบบ ECP ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายพลังงานกระแสตรง ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า และใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความสามารถในการตกตะกอน และในการรีดน้ำออกจากตะกอนเพิ่มขึ้น และที่สภาวะกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถลดค่าฟิคลโคลิฟอร์มได้

Vik et al., (1984) ทดลองการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปา เปรียบเทียบกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 14 x 20 x 0.25 ซม เป็นขั้วโลหะไฟฟ้าจำนวน 4 แผ่น วางห่างกัน 10 มม ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 24 โวลต์ พบว่าวิธีการช่วยตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าจะช่วยลดค่าใช้จ่าย และมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี

Eric H.Wang, (1973) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ประสิทธิภาพและการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ และได้ศึกษากระบวนการแลกเปลี่ยนประจุในการกำจัดไซยาไนด์ และโลหะหนัก ได้แก่ นิเกิล ทองแดง แคดเมียมและโครเมียม ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่เจือจาง ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ว่า เรซินประจุลบสามารถกำจัดได้ทั้งไซยาไนด์ และโลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปของอนุมูลเชิงซ้อน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถระบายลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะได้

Zuranski, (1984) ทำการพัฒนาระบบบำบัดน้ำใต้ดิน ที่เดิมใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ในการกำจัด Cr^{+6} และ Cr^{+3} ที่มีปัญหาย่อยยากในวิธีการและความถี่ของการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ของเรซิน เมื่อมีการเสื่อมสภาพ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง การใช้วิธีตกตะกอน ไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำใต้ดินที่มีไอออนโลหะหนักโดยเฉพาะ Cr^{+6} โดยใช้อิเล็กโทดที่ไม่เสถียรในการผลิตสารประกอบเฟอร์รัสที่ไม่

สามารถละลายน้ำได้ เพื่อใช้ในการตกตะกอนและดูดซับ อีออน ของโลหะหนักในน้ำ เฟอร์รัสอีออนถูก ออกซิไดซ์เป็นเฟอร์ริกอีออน ในขณะที่ Cr^{+6} ถูกรีดิวส์เป็น Cr^{+3} และถูกดูดซับด้วยตะกอน Amorphous iron oxyhydroxide จากนั้นทำการกรองแยกตะกอน น้ำส่วนที่ใสถูกส่งมาที่ระบบ แลกเปลี่ยนอีออน ซึ่งระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีนี้จะช่วยยืดอายุในการ Regenerate ของเรซินและเพิ่มอัตราการบำบัด เพราะระบบนี้สามารถลดโลหะหนัก โดยเฉพาะโครเมียมที่ทำการศึกษาจาก 15–25 มก/ล เหลือเพียง 0.01 มก/ล และยังสามารถลดปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดลงได้ด้วย

สุรพล, (2524) ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโครเมียม โดยการรีดิวส์ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและการตกตะกอนด้วยปูนขาว พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการรีดิวส์ Cr^{+6} คือที่พีเอช 3 และใช้เวลารีดิวส์ 3 นาที และความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟตมากเกินพอ 2 เท่าครึ่ง จากที่คำนวณได้จากสมการเคมี ร้อยละการรีดิวส์เท่ากับ 99.52 สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอน Cr^{+3} จะเกิดขึ้นที่พีเอช 9 และเวลาในการตกตะกอน 25 นาทีและที่ความเข้มข้นของปูนขาว 1 ใน 3 ที่คำนวณได้จากสมการเคมี ซึ่งจะมีร้อยละการตกตะกอน 99.45

อุตสาหะ, (2521) ศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยใช้การแลกเปลี่ยนอีออน (Ion Exchange) โดยใช้น้ำเสียที่มี Cr^{+6} ในความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร เมื่อผ่านระบบแล้วจะมีค่าโครเมียมเหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละน้อยมากจนถึง 0.18 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

Liaw Jeen Gang, (1995) ได้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอน โดยใช้ดินขาว (Kaolinite Clay, mesh no.275, 380 และ 500) เปรียบเทียบกับ Bentonite, Diatomite และ สารส้ม โดยทำการทดลองด้วยจาร์เทส เพื่อหาปริมาณของสาร และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการรีดักชัน Cr^{+6} เป็น Cr^{+3} โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต และโซเดียมเมตตะไบซัลไฟด์ โดยปริมาณของสารสร้างตะกอนที่ใช้คือ 200, 300 และ 400 มิลลิกรัม/ลิตร จากผลการทดลอง พบว่า ดินขาวสามารถทำให้ไฮดรอกไซด์ของโลหะรวมตัวและตกตะกอนได้ดี

Jia-Qian Jing *et al.*, (2002) ศึกษากระบวนการ Electro-Coagulation Flotation โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบใช้ไฟฟ้าขนาด 500 วัตต์ (70 V./30A.) อัตราการไหลของน้ำดิบ 16 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อชั่วโมง เข้าสู่ถังปฏิกิริยาขนาด 10 ลูกบาศก์เดซิเมตร พบว่า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10-20 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะใช้พลังงาน 20 kw-hr/kg Al.

M.Murugananthan *et al.*, (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกหนังโดยใช้ Electro Flotation ใช้ถังปฏิกิริยาขนาด 15 x 15 x 15 ซม ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 มิลลิเมตร ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 แบบ คือ (1) เหล็กเป็นขั้วแอโนด และอะลูมิเนียมเป็นคาโทด (2) อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด และเหล็กเป็นคาโทด และ (3) ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดและคาโทด และศึกษาความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า พบว่า ขั้วไฟฟ้าเหล็ก และอะลูมิเนียม จะเป็นอานอร์ค หรือคาโทรคโดยใช้ความหนาแน่นของกระแส 46 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 900 วินาทีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอย 95% ไทเทเนียมมีประสิทธิภาพเพียง 52% และเมื่อแปรผันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อศึกษาการกำจัดโครเมียม ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย กระบวนการดังกล่าวจะทำให้น้ำแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน โดยที่ไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะที่ละลายน้ำ เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และโครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr^{3+}) เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ ตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกก๊าซไฮโดรเจนพาขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยา มีรางรับตะกอนลอยแยกออกจากถังปฏิกิริยาโดยการทดลองจะเป็นการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า Electro Chemical and Electro Flotation Process แบบต่อเนื่อง Continuous Process

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) – (Hanna HI 9180)
- เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conduct meter) – (Hanna HI 9180)
- Spectrophotometer – (HACH – DR/4000 U)
- เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบจานเดียว – (Precisa – 240 A)
- ตู้แช่น้ำเสียที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ
- ตู้ดูดอากาศ (Hood)
- ชุดคิดกรองหาสารแขวนลอย
- ปั๊มน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำได้ 10 ถึง 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที – (MasterFlex LX Econome Drive Model 70 18-20)

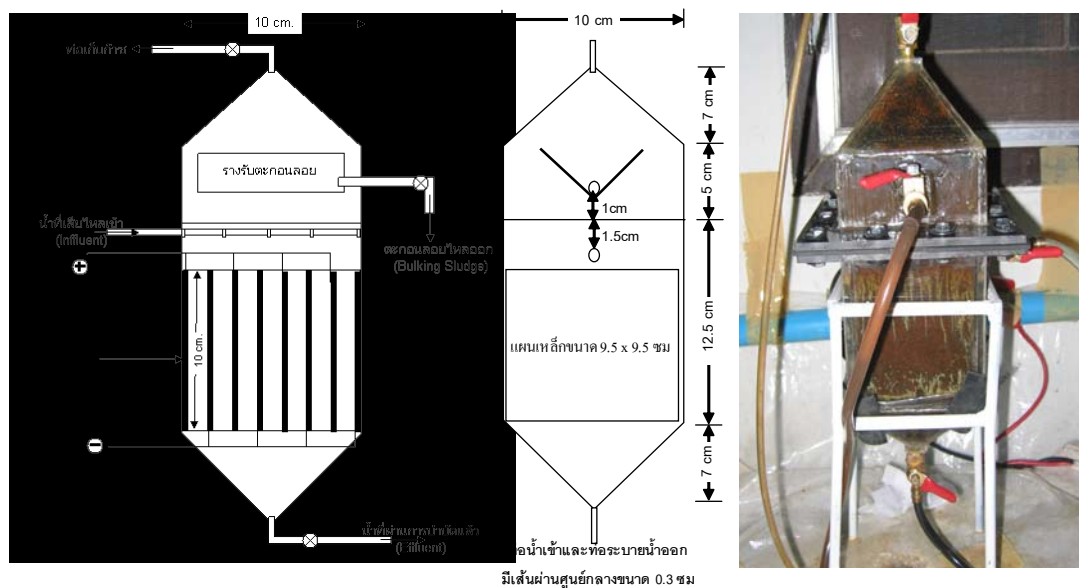
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 เครื่องแก้วสำหรับงานวิเคราะห์ ประกอบด้วย

- เครื่องแก้วสำหรับวัดปริมาตร (Volumetric) ประกอบด้วย ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ปิเปต (Pipet) กระจกบอคงวง (Volumetric Syllinder) ขนาดต่าง ๆ
- เครื่องแก้วสำหรับทำการวิเคราะห์ ประกอบด้วย บีกเกอร์ (Beger) ขนาด 250 มิลลิลิตร และ/หรือ ขวดรูปกรวย (Flash) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขวดพลาสติกสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการวิเคราะห์ขนาด 100 มิลลิลิตร

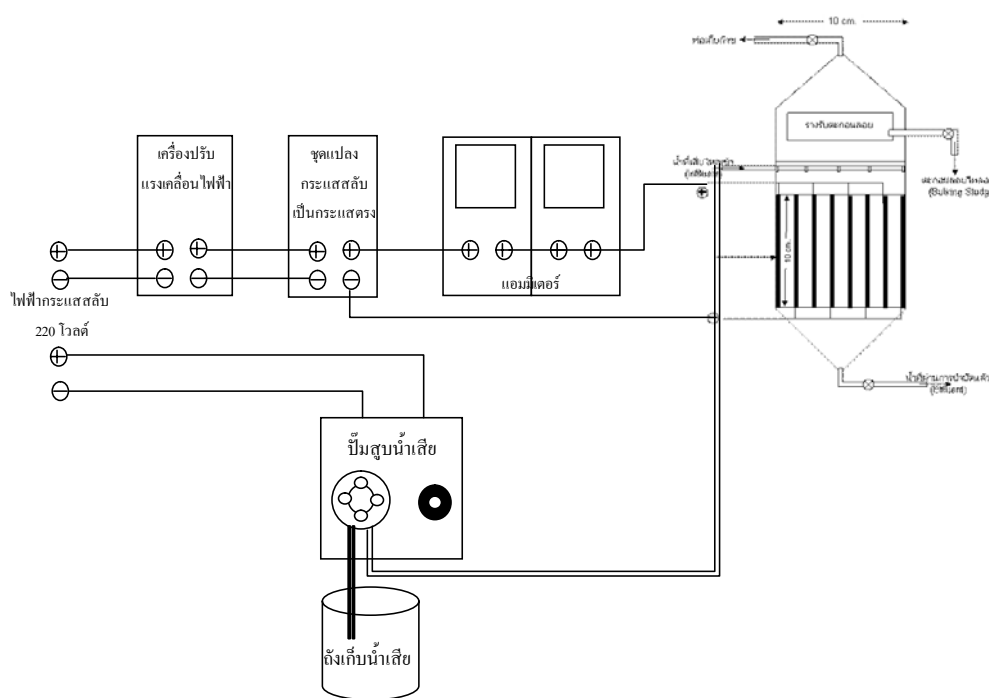
2.2 ถังปฏิกริยา ประกอบด้วย

- ถังปฏิกริยา ทำจากอคริลิกโดยมีขนาดดังภาพที่ 12



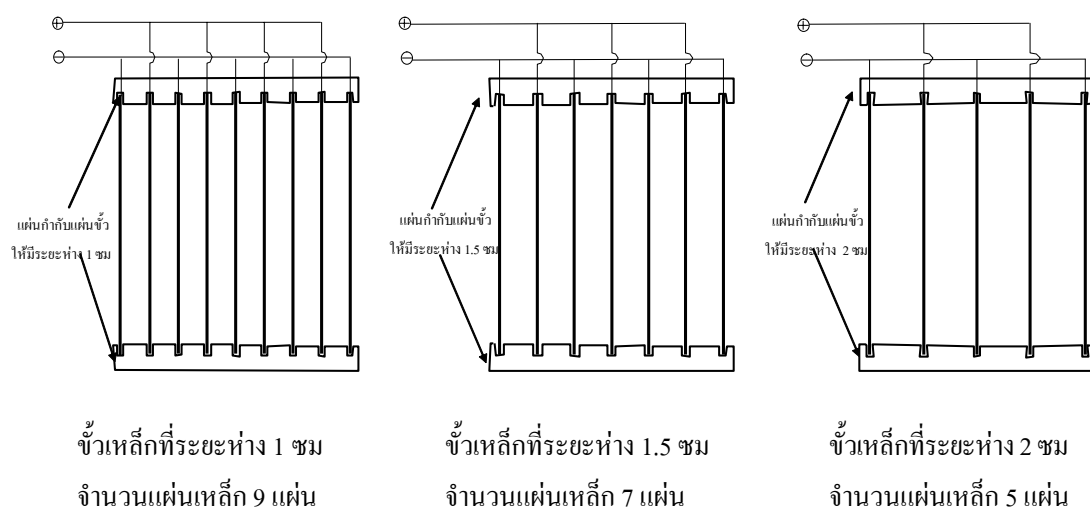
ภาพที่ 12 ถังปฏิกริยา Electro-chemical and Electro-Flotation

- วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สามารถปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 0 ถึง 250 โวลต์ (Volt Control) ต่อเข้ากับชุดแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) เข้ากับแอมมิเตอร์ และเข้าผ่านขั้วในถังปฏิกริยา แสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การต่อวงจรไฟฟ้า และปั๊มสูบน้ำเสียของถังปฏิกริยา ECF

- ขั้วเหล็กใช้แผ่นเหล็กขนาด 9.5 ซม x 9.5 ซม จัดเรียงทำเป็นขั้วโดยต่อแบบโมโนโพลาร์ หลายเซลล์แบบต่อขนานดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การจัดเรียงขั้วแบบ โมโนโพลาร์ หลายเซลล์ แบบต่อขนานที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การต่อปั๊มดูดน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิบัติการ

ดังภาพที่ 13 ระยะเวลาทำปฏิกิริยาจะควบคุมที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที โดยควบคุมที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิบัติการ โดยปริมาตรของถังปฏิบัติการจะใช้ส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีขนาด 10 ซม x 10 ซม และใช้ความสูงของแผ่นขั้วไฟฟ้าที่มีขนาด 9.5 ซม x 9.5 ซม ดังนั้นปริมาตรส่วนที่ทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการคำนวณเวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 9.5 x 10 x 10 เท่ากับ 950 มิลลิลิตร คิดเป็นอัตราการไหลของน้ำเสีย 63.33, 31.67 และ 21.11 มล/นาที

น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดโครเมียมแล้ว จะมีจุดระบายน้ำออก 2 จุด คือ จุดที่ 1 ด้านบนสำหรับการระบายตะกอนลอย และจุดที่ 2 ด้านล่างจุดระบายน้ำที่ผ่านการบำบัด ในการทดลองกำหนดอัตราการระบายตะกอนลอยเป็น 1 ใน 4 ของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิบัติการ และอัตราการไหลน้ำเสียออกจากถังปฏิบัติการมีค่าดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 อัตราการไหลของน้ำเสียเข้า และ ออก ถึงปฏิกิริยา

จุดที่เป็นน้ำเสียเข้า และออก ถึงปฏิกิริยา	อัตราการไหล (มิลลิตร/นาทึ)		
	น้ำเสียเข้าระบบ	63.33 (15 นาที)	31.67 (30 นาที) 21.11 (45 นาที)
จุดระบายตะกอนลอย (ด้านบน)		15.83	7.97 5.28
จุดระบายน้ำที่บำบัดแล้ว (ด้านล่าง)		47.50	23.75 15.83

หมายเหตุ: ตัวเลขในวงเล็บ คือ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา

3. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการปรับความนำไฟฟ้า

- NaCl

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชของน้ำ

- HCl 1 นอร์มัล
- NaOH 1 นอร์มัล

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องแก้ว

- HNO₃ 10 % V / V

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์โครเมียม

- Conc.Nitric acid (HNO₃)
- Conc.Sulfuric acid (H₂SO₄) 98 %
- Potassium dichromate (K₂Cr₂O₇)
- Conc.Phosphoric acid (H₃PO₄) 85 %
- Conc.Ammonium hydroxide (NH₄OH)
- Sodium azide (NaN₃)
- 1,5-diphenylcarbazide
- Potassium permanganate (KMnO₄)

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

สภาวะการทดลองระบบ ECF ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าที่เป็นแผ่นเหล็กโดยใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์ ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 21.11, 31.67 และ 63.33 มล/นาที่ เป็นระยะเวลาทำปฏิกิริยา 15, 30 และ 45 นาที ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1, 1.5 และ 2 ซม (พื้นที่ผิว 722, 541.5 และ 361 ตร.ซม ตามลำดับ) ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย 20 มก/ล ค่าความนำไฟฟ้าระหว่าง 1,300-1,400 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร pH 4 ทดลองในอุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ

ขั้นตอนและวิธีการ

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาวิจัยใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ แทนน้ำเสียจริงเพื่อเป็นการขจัดปัญหาดัรบกวนในการรีดิวส์ของโครเมียม โดยเตรียมจากโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ให้มีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 20 มก/ล เป็นตัวแทนความเข้มข้น Cr^{+6} โดยปริมาณของโปแตสเซียมไดโครเมต ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คำนวณจาก

$$A = \frac{294.19 \times B \times C}{104 \times 1000} \quad (12)$$

โดยที่ A = น้ำหนักของ $K_2Cr_2O_7$ ที่ใช้ในการทำน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ (กรัม)
 B = ความเข้มข้นของ Cr^{+6} ที่ต้องการ (มก/ล)
 C = ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ต้องการ (ลิตร)

ปรับค่า pH 4.0 ± 0.2 โดยใช้ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 นอร์มัลและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaCl) 1 นอร์มัล ปรับค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยใช้สารละลาย NaCl ให้อยู่ระหว่าง 1,300-1,400 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2. การเตรียมขั้วไฟฟ้าและการปรับกระแสไฟฟ้า

การประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองจะประกอบตามภาพที่ 14 นำขั้วไฟฟ้าเข้าไปประกอบในถังปฏิกิริยาส่วนล่าง ใส่กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10% ในถังปฏิกิริยาเพื่อล้างสนิมเหล็กเป็นเวลา 1-2 นาที ใช้แปรงล้างเครื่องแก้วขัดแผ่นเหล็ก และฉีดล้างด้วยน้ำประปา ประกอบฝาปิดด้านบนของถังปฏิกิริยา ควบคุมระยะห่างระหว่างขั้ว 3 ระยะ คือ 1, 1.5 และ 2 ซม แต่ละระยะห่างระหว่างขั้วมีจำนวนแผ่น และพื้นที่ผิว ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ระยะห่างระหว่างขั้ว จำนวนแผ่นและพื้นที่ผิวที่ใช้เป็นขั้วคาโทดและแอโนด

ระยะห่างขั้ว (ซม)	จำนวนแผ่น (แผ่น)		พื้นที่ผิว (ตร.ซม)	
	คาโทด (Cathode)	แอโนด (Anode)	คาโทด (Cathode)	แอโนด (Anode)
1	5	4	902.5	722
1.5	4	3	722	541.5
2	3	2	541.5	361

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า หาได้จากพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยขั้วคาโทด และขั้วแอโนดมีพื้นที่ผิวตามที่แสดงในตารางที่ 12 พื้นที่ผิวที่นำมาใช้ในการคำนวณจะใช้พื้นที่ผิวของขั้วที่น้อยที่สุดมาคำนวณ เนื่องจากพื้นที่ของขั้วที่มากกว่าจะมีด้านที่กระแสไฟฟ้าไม่ครบวงจร ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่จะหาได้ตามสมการที่ (13) และตารางที่ 13

$$J = \frac{I}{A} \quad (13)$$

โดยที่ J เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตารางเมตร)
 I เป็นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 A เป็นพื้นที่ผิวของขั้ว (ตารางเมตร)

1. ขั้นตอนการเดินระบบเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ ECF

เริ่มต้นทดลอง ECF จะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

(1) เตรียมน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 มก/ล ปริมาตร 20 ลิตร ปรับ pH 4 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกส์ ปรับค่าความนำไฟฟ้าให้อยู่ระหว่าง 1,300-1,400 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรโดยใช้โซเดียมคลอไรด์

(2) ปรับอัตราการไหลของปั๊มสูบน้ำก่อนเข้าถังปฏิกิริยาให้มีค่าเท่ากับ 21.11, 31.67 และ 63.33 มล/นาที่ ปล่อน้ำเสียให้เข้าไปในถังปฏิกิริยา ถึงระดับจุลระบายน้ำด้านบน

(3) ปรับวาล์วด้านล่างของถังเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียออกด้านล่างให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 15.83, 23.75 และ 47.5 มล/นาที่ ปรับวาล์วด้านบนของถังปฏิกิริยาให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 5.28, 7.97 และ 15.83 มล/นาที่ ทั้งนี้ต้องควบคุมให้น้ำเสียสังเคราะห์มีระดับน้ำที่สูงกว่าปลายท่อด้านบนอย่างน้อย 1 ซม เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้นไหลออกทางท่อระบายน้ำด้านบน

(4) เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำได้แล้ว จึงเปิดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าโดยปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ได้กระแสไฟฟ้าตามสถานะที่ใช้ในการทดลอง คือ 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์

(5) เก็บตัวอย่างน้ำใสที่ไหลผ่านระบบบำบัดที่เวลาผ่านไป 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ให้มีปริมาตรแต่ละครั้งประมาณ 50 มิลลิลิตร นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อหาปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด

(6) วัดปริมาณก๊าซโดยการแทนที่น้ำ โดยใช้กระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร และจับเวลาที่เก็บก๊าซ 50 มิลลิลิตร

(7) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียมรวมทั้งหมด ทำการวิเคราะห์ตาม วิธีวิเคราะห์ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th edition ตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 วิธีการตรวจวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ

ดัชนีคุณภาพ	วิธีการวิเคราะห์	เลขหมวดตาม Standard Method
Total Chromium	Spectrophotometer	3500 – Cr D.
Cr ⁺⁶	Spectrophotometer	3500 – Cr D.
pH	pH Meter	—
Conductivity	Conduct.Meter	—
Suspended Solid	Gavimetric Method	—

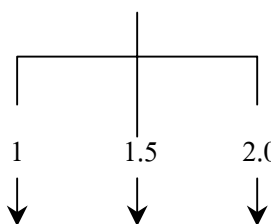
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย จะทำเช่นเดียวกับข้อ (1) ถึง (7) แต่จะผันแปรตาม ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาทำปฏิกิริยาน้ำเสีย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม โดยมีสภาวะการทดลอง ดังภาพที่ 13

น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 มก/ล เพื่อจะให้เท่ากับ 4 ให้มีความนำไฟฟ้าเท่ากับ

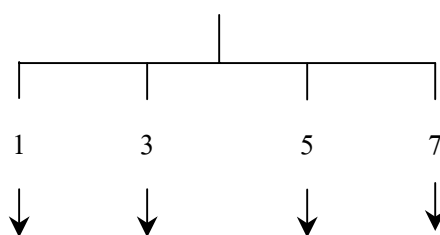
1,300-1,400 ไมโครซีเมนต์



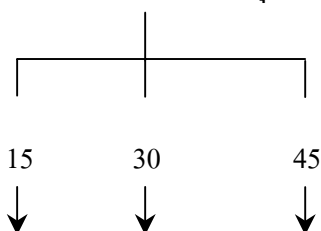
ระยะห่างระหว่างขั้ว (ซม)



ระดับกระแสไฟฟ้าในการทดลอง (แอมแปร์)



ระยะเวลาทำปฏิกิริยาน้ำเสีย (นาท) โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย



เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบที่ระยะเวลา 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

ภาพที่ 16 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยระบบ ECF