



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอดี

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาความสกปรกของน้ำเสียต่างๆ โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ของน้ำเสีย เพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลปฏิกิริยาสุดท้าย นอกจากนี้พวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดี คือปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing Agent) อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง หลักการของซีโอดีจะคล้ายกับบีโอดี คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดส์โดยตัวเติมออกซิเจนจนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เพียงแต่บีโอดีต้องใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วนซีโอดีใช้ออกซิไดซิงเอเจนต์ ซีโอดีและบีโอดีต่างเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำ แต่ซีโอดีไม่สามารถจะบอกได้ถึงความยากง่ายในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์ได้หมดหรือเกือบหมดไม่ว่าจะสามารถออกซิไดส์ได้ทางชีวภาพหรือไม่ แม้กระนั้นซีโอดีก็มีข้อดีที่ใช้เวลาในการหาเพียง 3 ชม. ในขณะที่การหาบีโอดีใช้เวลาถึง 5 วัน มีตัวแปรผันน้อยกว่า ค่าที่ได้มีความแน่นอน น่าเชื่อถือกว่า และสารมีพิษไม่ขัดขวางการหาซีโอดี ค่าซีโอดีมักมีค่าสูงกว่าบีโอดี อัตราส่วนของค่าซีโอดีและค่าบีโอดีสำหรับน้ำเสียชนิดต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน เพราะส่วนประกอบของน้ำเสียไม่เหมือนกัน อัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดี (BOD : COD) อาจเป็นไปได้ตั้งแต่ 0.1 - 0.8 แต่ไม่เกิน 1 สำหรับค่าบีโอดีอาจมีค่าสูงกว่าซีโอดีได้ แต่มีโอกาสน้อยมาก

2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของซีโอดี

ข้อดี

- 1) ถ้าใช้พิจารณาร่วมกับค่าบีโอดี ทำให้บอกได้ว่า น้ำเสียมีแนวโน้มในการย่อยสลายโดยทางชีววิทยาได้ยากหรือง่ายเพียงใด
- 2) ใช้ในการประมาณค่าบีโอดีอย่างคร่าวๆ ถ้ารู้แหล่งกำเนิดหรือที่มาของตัวอย่างน้ำ
- 3) เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณ ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย
- 4) เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย
- 5) ใช้บอกความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ หรือจากบ้านเรือนได้

- 6) ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดี เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าบีไอดี สามารถบอกได้ว่าน้ำนั้นมีสารเป็นพิษหรือไม่

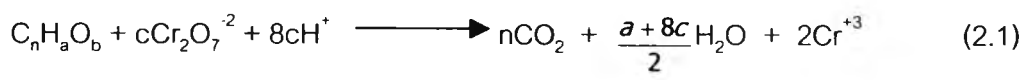
ข้อเสีย

- 1) ไม่สามารถที่จะใช้แยกค่าสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์ทางซีว่ หรือไม่ถูกออกซิไดส์ทางซีว่ออกจากกันได้
- 2) ไม่สามารถให้ข้อคิดใดๆ เกี่ยวกับอัตราที่สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายหรือออกซิไดส์ทางซีว่ภายใต้สภาวะตามธรรมชาติ

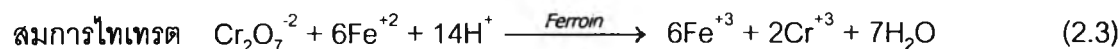
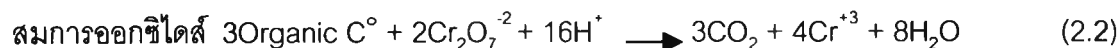
2.1.2 การวิเคราะห์ค่าซีไอดี

สารเติมออกซิเจนที่ใช้ในการหาค่าซีไอดีของน้ำโสโครกมีหลายตัว เช่น โปตัสเซียมเปอร์มันกาเนต เซริคซัลเฟต โปตัสเซียมไอโอเดต และโปตัสเซียมไดโครเมต แต่ละตัวก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป

สารเติมออกซิเจนที่นิยมใช้กันคือ โปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ซึ่งจะไปออกซิไดส์สารอินทรีย์คาร์บอนในสภาวะที่เป็นกรดอย่างแรง และปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงใช้การกลั่นกลับคืนหรือรีฟลักซ์ (Reflux) เพื่อป้องกันการสูญหายไปของสารที่ระเหยได้ซึ่งมีอยู่เดิมในตัวอย่างหรือซึ่งเกิดในระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 1.5 – 2 ชั่วโมง ซึ่งโปตัสเซียมไดโครเมตบางส่วนจะถูกใช้ไปในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ และหลังจากการทำปฏิกิริยาออกซิไดส์นี้แล้ว นำโปตัสเซียมไดโครเมตที่เกินพามาไทเทรตด้วยเฟอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ การวิเคราะห์หาค่าซีไอดีมีการเติมซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) ลงไปด้วย เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนบางตัวไม่ถูกออกซิไดส์โดยไดโครเมต ทำให้ผลที่ได้้น้อยกว่าเป็นจริง ซึ่ง Ag^+ จะทำหน้าที่เป็นคะตะลิสไปเร่งปฏิกิริยาให้โปตัสเซียมไดโครเมตสามารถออกซิไดส์พวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ (จำนวน C น้อย) อย่างไรก็ตามพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) และไพรีดีน (Pyridine) จะไม่ถูกออกซิไดส์ภายใต้สภาวะนี้ และเนื่องจากคลอไรด์ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจนและพบมากเสมอในน้ำเสีย จะไปรีดิวส์ไดโครเมต มีผลทำให้ค่าซีไอดีที่ได้สูงกว่าเป็นจริงและตกตะกอนซิลเวอร์ไอออนที่เติมลงไป ดังนั้นจึงมีการเติมเมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$) ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ เกิดเป็นเมอร์คิวรีคลอไรด์ ($HgCl_2$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.1



เมื่อ $c = \frac{2}{3}n + \frac{a}{6} - \frac{b}{3}$ หรืออาจเขียนสมการง่ายๆ ได้ดังนี้



ได้จุดยุติ (End Point) เป็นสีออกแดงน้ำตาล ซึ่งแลเห็นได้ชัดกว่าสีเขียวของเกลือโครมิกที่เกิดขึ้น และจะคำนวณหาปริมาณออกซิเจนซึ่งสมมูลกับสารอินทรีย์คาร์บอนได้ สำหรับปริมาณของสารเคมีที่ใช้และความเข้มข้นที่เหมาะสมกับขนาดตัวอย่างต่างๆ ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยวิธีฟลักซ์แบบเปิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กับขนาดตัวอย่างต่างๆ

ขนาด ตัวอย่าง (มล.)	ไดโครเมต มาตรฐาน 0.25 N (มล.)	H ₂ SO ₄ เข้มข้นผสม Ag ₂ SO ₄	HgSO ₄ (กรัม)	Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ (นอร์มัล)	ปริมาตร ก่อนไทเทรต (มล.)
10.0	5.0	15	0.2	0.05	70
20.0	10.0	30	0.4	0.10	140
30.0	15.0	45	0.6	0.15	210
40.0	20.0	60	0.8	0.20	280
50.0	25.0	75	1.0	0.25	350

ที่มา : กรรณิการ์ สิริสิงห , 2525

วิธีวิเคราะห์ซีไอดี โดยใช้ไดโครเมตเป็นออกซิไดซิงเอเจนต์ มี 2 วิธี ดังนี้

- 1) วิธีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux Method)
- 2) วิธีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux Method)

วิธีฟลักซ์แบบเปิดเหมาะสำหรับหาค่าซีไอดีในช่วงกว้างๆ ต้องการใช้ปริมาณตัวอย่างมาก ส่วนวิธีฟลักซ์แบบปิดจะใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าและจะประหยัดการใช้สารเคมี แต่ก็เหมาะกับตัวอย่างน้ำที่มีสารแขวนลอยที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีฟลักซ์ยังแบ่งออกได้ 2 แบบคือการไทเตรตและการเทียบสี แต่ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการไทเตรตเพราะเป็นวิธีที่ง่ายสะดวก รวดเร็ว และให้ผลถูกต้อง

2.1.3 ลักษณะน้ำเสียซีโอติ

จากตารางที่ 2.1 ในการวิเคราะห์ค่าซีโอติมีสารเคมีที่ใช้ คือ โปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$) และเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$) และจากสมการที่ 2.2 (สมการออกซิไดส์) และสมการที่ 2.3 (สมการไทเทรต) ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์แล้ว (ไทเทรตถึงจุดยุติ) จะได้ว่า

- โครเมียม (VI) ถูกรีดิวซ์เป็นโครเมียม (III)
- เหล็ก (II) ถูกออกซิไดส์เป็นเหล็ก (III)
- เงิน (I) และปรอท (II) ไม่ถูกรีดิวซ์หรือถูกออกซิไดส์

จึงทำให้พบไอออนโลหะหนักในน้ำเสียซีโอติ คือ Ag^+ , Hg^{2+} และ Cr^{3+} รวมทั้งมี Fe^{3+} ในปริมาณมาก สำหรับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ หลังการวิเคราะห์มีประมาณ 0.5 M (Hendrickson และคณะ, 1984) ทำให้ได้ค่าพีเอชของน้ำเสียซีโอติใกล้เคียงศูนย์

สำหรับความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ได้แสดงตัวอย่างการประมาณความเข้มข้นของเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็ก ในการวิเคราะห์ค่าซีโอติในตารางที่ 2.2 เมื่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตรและปริมาตรสุดท้ายหลังการไทเทรตเท่ากับ 70 มิลลิลิตร และแสดงความเข้มข้นของเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็กในแต่ละรูปในน้ำเสียซีโอติ เมื่อความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน $[H^+]$ และความเข้มข้นของไอออนซัลเฟต $[SO_4^{2-}]$ เท่ากับ 0.5 M ซึ่งทั้งนี้ น้ำเสียซีโอติจะมีความเข้มข้นของโลหะเท่าไร ขึ้นอยู่กับปริมาตรน้ำตัวอย่าง ห้องปฏิบัติการ และผู้วิเคราะห์ ส่วนตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะน้ำเสียซีโอติที่ศึกษาเปรียบเทียบของงานวิจัยที่ผ่านมา

2.2 เทคโนโลยีในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

โลหะหนัก หมายถึงโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสมและตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน และเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือมีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบ

ตารางที่ 2.2 การประมาณความเข้มข้นของเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็กในการวิเคราะห์ซีไอดี

โลหะ	กรัม/ตัวอย่าง 20 มล.	กรัม/ลิตร	โมล/ลิตร	รูป	โมล/ลิตร	%ของโลหะแต่ละรูป
เงิน (I)	0.21	1.2	$10^{-2.0}$	Ag^+	$10^{-2.5}$	41
				AgSO_4^-	$10^{-2.5}$	41
				$\text{Ag}(\text{SO}_4)_2^{3-}$	$10^{-3.1}$	10
				$\text{Ag}(\text{SO}_4)_3^{5-}$	$10^{-3.2}$	8
ปรอท (II)	0.27	1.6	$10^{-2.1}$	$\text{Hg}(\text{SO}_4)_2^{2-}$	$10^{-2.3}$	85
				HgSO_4^0	$10^{-3.1}$	13
โครเมียม (III)	0.043	0.25	$10^{-2.3}$	CrSO_4^+	$10^{-2.3}$	100
เหล็ก (III)	0.11	0.67	$10^{-1.9}$	FeSO_4^+	$10^{-2.1}$	74
				$\text{Fe}(\text{SO}_4)_2^-$	$10^{-2.6}$	23

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hendrickson และคณะ ,1984

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของน้ำเสียซีไอดีของงานวิจัยที่ผ่านมา

สมบัติ	งานวิจัย				
	พวงรัตน์ (2537) ^a	นฤมิต (2538) ^b	ชนิษฐา (2539) ^c	อนุวัฒน์ (2540) ^d	สุรรัตน์ (2540) ^d
พีเอช	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
ปรอท (มก./ล.)	1,804	703	1,341	2,562	1,396
โครเมียม (มก./ล.)	700	492	288	672	444
เหล็ก (มก./ล.)	670	540	153	1,083	1,041
เงิน (มก./ล.)	1,150	n.a.	921	n.a.	1,715

ที่มา : พัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร , 2545

n.a. : ไม่มีข้อมูล

a : ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ

- b : ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
- c : ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของหน่วยงานราชการและบริษัทเอกชน 10 แห่ง
- d : ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ แต่โลหะบางชนิดก็มีประโยชน์และเป็นธาตุที่จำเป็นต่อมนุษย์ เช่น เหล็ก เป็นต้น แหล่งที่มาของโลหะหนักโดยทั่วไปแล้ว แบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ แหล่งตามธรรมชาติและแหล่งที่มนุษย์เกี่ยวข้อง

อันตรายจากโลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกาย จะก่อให้เกิดพิษร้ายแรงเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของโลหะนั้นๆ เช่น ความสามารถในการละลาย และรูปแบบของสารประกอบทางเคมี
- ปริมาณที่ได้รับ
- ระยะเวลาที่ได้รับ
- ความแตกต่างของความต้านทานในแต่ละบุคคล
- อายุ
- มาตรการป้องกันในการใช้สารเคมี

โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะทางหายใจ ทางผิวหนัง หรือทางปากโดยการรับประทานไปกับอาหารหรือน้ำดื่มก็ตาม จะเข้าสู่กระแสเลือดและไปทำอันตรายอวัยวะส่วนต่างๆ จะปรากฏอาการฉับพลันหรือเรื้อรัง แล้วแต่ปริมาณที่ได้รับเข้าไปและบางส่วนอาจถูกขับถ่ายออกจากร่างกายทางปัสสาวะ อุจจาระ หรือทางเหงื่อ นอกจากนี้ก็จะสะสมอยู่ในเส้นผมและเล็บได้

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้น ขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัด และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การทำให้เป็นกลาง

โดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะไม่เป็นกลาง เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีผลิตกรดหรือด่าง ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ และจะใช้การทำให้เป็นกลางโดยการปรับพีเอชด้วยกรดหรือด่างแล้วแต่กรณี ซึ่งจะสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ โดยมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5 – 9 ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ , 2525)

น้ำเสียที่เป็นกรดจะให้ปูนขาว $[Ca(OH)_2]$, โซดาไฟ (NaOH) หรือโซดาแอช (Na_2CO_3) ในการทำให้เป็นกลาง ปูนขาวจะมีข้อดีที่ราคาถูกกว่าตัวอื่นๆ และทำให้เกิดตะกอนของสารบางชนิดด้วย แต่มีข้อเสียตรงอาจเกิดตะกอนในเส้นท่อได้ ถ้าใช้ปูนขาวในรูปของสารละลายในขณะที่ใช้งานจะต้องมีการกวนตลอดเวลา เพื่อให้ปูนขาวละลายได้ดีและไม่ตกตะกอนอยู่กันถึง น้ำเสียที่เป็นด่างจะทำให้เป็นกลางด้วยกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Freeman, 1989) ระบบของการปรับค่าพีเอชนั้นจะประกอบด้วยถังผสม (mixing tank) เพื่อทำหน้าที่ผสมกรดหรือด่างให้เข้ากับน้ำเสียอย่างสมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นผู้ควบคุมจะต้องคอยวัดค่าพีเอชเป็นระยะๆ หรือถ้าจะให้สะดวกก็ควรใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (pH monitor) ซึ่งจะควบคุมค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ , 2525)

2.2.2 การสร้างตะกอนผลึกทางเคมี

ปฏิกิริยาสร้างตะกอนแข็ง หมายถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ไอออนประจุบวกและลบรวมกันเป็นตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ยกตัวอย่างไอออนตะกั่วในน้ำเสียน้ำรวมกับ OH^- เกิดปฏิกิริยาสร้างตะกอนแข็งกลายเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์หรือ $Pb(OH)_2$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ และนอกจากการทำให้โลหะหนักเกิดตะกอนแข็งกับ OH^- กลายเป็นโลหะ ไฮดรอกไซด์ต่างๆแล้ว โลหะหนักอาจเกิดปฏิกิริยาสร้างตะกอนแข็งกับไอออนประจุลบอื่นๆ ได้ เช่น CO_3^{2-} , S^{2-} เป็นต้น

การเพิ่มพีเอชให้น้ำเสียเพื่อกำจัดโลหะหนักด้วยปฏิกิริยาสร้างตะกอนแข็ง สามารถกระทำได้โดยการเติมสารเคมีประเภทเบสหรือด่าง เช่น โซดาไฟ หรือปูนขาว ให้น้ำเสีย ปริมาณปูนขาวหรือโซดาไฟที่ต้องใช้อาจคำนวณคร่าวๆ ได้จากสมการเคมีของปฏิกิริยาสร้างตะกอนแข็ง แต่ทางที่ดีควรทำการทดสอบกำจัดโลหะหนักในห้องปฏิบัติการเพื่อหาระดับพีเอชที่เหมาะสมและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับกำจัดโลหะหนักของแต่ละงาน งานทดสอบที่มักต้องทำ ได้แก่ การหากราฟการไตเตรท ที่เกิดจากการเติมปูนขาวหรือโซดาไฟปริมาณต่างๆ และการทำจาร์เทสต์ เพื่อหาระดับพีเอชและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อพิจารณาในด้านผลกระทบที่เกิดขึ้น ปูนขาวจะทำให้เกิดสลัดจ์มากกว่าการใช้โซดาไฟมาก นั่นคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ของปูนขาวมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงเฉพาะงานการกำจัดโลหะหนัก การใช้ปูนขาวจะทำให้ได้ตะกอนแข็งหรือฟล็อกขนาดใหญ่กว่าการใช้โซดาไฟ มักมีผลทำให้การกำจัดโลหะหนักด้วยปูนขาวได้ผลดีกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากปูนขาวทำให้เกิดฟล็อกของหินปูน (CaCO_3) หรือสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ ที่ช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก

2.2.3 การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน

ในน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยขนาดใหญ่ อาจตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำ แต่อณูภาคที่มีน้ำหนักเบาไม่สามารถจมตัวได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเอง ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียต่างก็มีประจุไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นประจุชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนั้นๆ เมื่อแต่ละอนุภาคซึ่งต่างก็มีประจุที่เหมือนกันแขวนลอยอยู่ ก็จะมีแรงผลักรังที่เกิดจากประจุในน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคนั้นอยู่ ทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้เป็นอนุภาคใหญ่ จึงไม่สามารถจะแยกตัวออกจากน้ำเสียได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเองเช่นกัน การที่จะให้อนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบาและอนุภาคคอลลอยด์แยกตัวออกจากน้ำเสียได้ จะต้องมามีวิธีการที่ทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่มีน้ำหนักพอที่จะสามารถจมตัวได้ วิธีการดังกล่าวนี้ที่ใช้โดยทั่วไปคือการเติมสารเคมี เพื่อไปเป็นตัวประสานให้อนุภาคขนาดเล็กมากจับตัวกัน หรือถ้าในบางกรณีที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ สารเคมีที่เติมลงไปจะเป็นชนิดที่ทำลายประจุที่ล้อมรอบอนุภาค ทำให้แรงผลักรังหายไปแล้วสารเคมีชนิดนั้น (หรือในบางกรณีอาจใช้สารเคมีอีกชนิดหนึ่ง) จะเป็นตัวประสานให้อนุภาคคอลลอยด์นั้นจับตัวกัน การทำให้อนุภาคเล็กๆ จับตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ด้วยสารเคมีนี้เรียกว่าการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี สารเคมีที่ใช้เรียกว่าโคแอกกูแลนต์หรือฟล็อกคูแลนต์ (coagulant or flocculant) สารที่รู้จักกันดีและนิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ สารส้ม (alum) ปูนไลม์และไฮดรอกไซด์คลอไรด์

ค่าพีเอชสำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ มีค่าแตกต่างกันไป เช่น สารส้มมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5 - 6.5 ถ้าในน้ำเสียมียค่าพีเอชไม่อยู่ในพิสัยดังกล่าว ให้ปรับจนค่าได้ดังพิสัยแล้วจึงเติมสารส้มลงไป ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กมากและอนุภาคคอลลอยด์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีที่เรียกว่า จาร์เทสต์ (Jar Test) เพื่อหาค่าความเป็นต่าง พีเอช และปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน

เป็นวิธีการทางเคมีที่ใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไฮรอน (II) ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนโลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ ค่าพีเอชมีความสำคัญมากจะต้องมีความเหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์

2.2.5 การแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด จะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่าแคทไอออนเอกเซนเจอร์ และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่าแอนไอออนเอกเซนเจอร์ วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

2.2.6 รีเวอร์สออสโมซิส

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตตและโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดชั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

2.2.7 การระเหย

เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา และการระเหยภายใต้สุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.2.8 อิเล็กโทรไดอะไลซิส

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.2.9 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ชั่วคราวและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ชั่วคราวตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.2.10 การดูดติดผิว

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับไมโครกุล สารดูดติดผิวที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 \AA ถึง $20,000 \text{ \AA}$ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถ่านคาร์บอนแบบเกล็ด สามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมดและสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม โดยไอออนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าสารถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าสารดูดซับจะอิ่มตัวด้วยสารถูกดูดซับ ซึ่งการนำเอาสารถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ เพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับไปใช้ใหม่เรียกว่าการรีเจนเนอเรชั่นหรือปรากฏการณ์การย้อนกลับการดูดซับ การรีเจนเนอเรชั่นอาจกระทำได้โดยการใช้ความร้อน ความดัน หรือสารเคมี

2.2.11 การบำบัดโดยจุลินทรีย์

เป็นการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เช่น จากกระบวนการ Activated Sludge พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียมได้อย่างได้อย่างหนึ่งในเงื่อนไขที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

ไฟฟ้าเคมีเป็นเรื่องราวว่าด้วยการใช้พลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ให้พลังงานไฟฟ้า พฤติกรรมทั้งสองอย่างดังกล่าวเป็นสิ่งที่ตรงกันข้าม แต่อาศัยพื้นฐานในหลักการอันเดียวกัน ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับเคมีไฟฟ้า คือ ปฏิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และปฏิริยานี้เกิดขึ้นในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นสารละลายที่ให้ไฟฟ้าผ่านได้

ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หมายถึงปฏิริยาที่มีการเปลี่ยนค่าเลขออกซิเดชัน หรือเป็นปฏิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันหรือมีการให้อิเล็กตรอนเรียกว่าเกิดออกซิเดชัน และเมื่อมีการลดเลขออกซิเดชันหรือมีการรับอิเล็กตรอนเรียกว่ารีดักชัน ทั้งสองปฏิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันเมื่อมีออกซิเดชันก็ต้องมีรีดักชัน ปฏิริยาจึงจะสมบูรณ์

ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเมื่อเกิดขึ้นในสารละลาย ไอออนจะเป็นส่วนสำคัญที่เข้าร่วมด้วยโดยไอออนคืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เมื่ออิเล็กโทรไลต์ละลายน้ำจะให้ไอออนบวกหรือแคโทดไอออน และไอออนลบหรือแอนไอออน ไอออนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปได้ทั่วสารละลาย และถ้ามีขั้วไฟฟ้าจุ่มลงในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์นั้นแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไป ไอออนเหล่านี้ต่างก็เคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้ามกับไอออน ไฟฟ้าจะถูกนำไปโดยการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นเหตุให้เรากล่าวได้ว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์นำไฟฟ้าหรือยอมให้ไฟฟ้าผ่านได้ ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดและรับอิเล็กตรอนจากแคโทด ส่วนไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดและให้อิเล็กตรอนแก่แอโนด ดังนั้นจึงเท่ากับว่าขั้วไฟฟ้าเป็นที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนนั่นเอง ถ่ายโอน

อิเล็กตรอนจากแคโทดมาสู่อิเล็กโตรไลต์และจากอิเล็กโตรไลต์ไปสู่แอโนด กระแสไฟฟ้าจึงผ่านสารละลายของอิเล็กโตรไลต์และทำให้ไฟเดินครบวงจร

2.3.1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้า

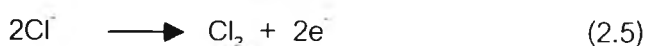
การแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโตรไลต์แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันดังได้กล่าวแล้ว โดยแยกปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน คือออกซิเดชันกับรีดักชัน ครั้งที่เป็นออกซิเดชันเกิดขึ้นที่แอโนด ส่วนครั้งที่เป็นรีดักชันเกิดขึ้นที่แคโทด แอนไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแอนไอออนให้แก่แอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนแคทไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดแล้วรับอิเล็กตรอนจากแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

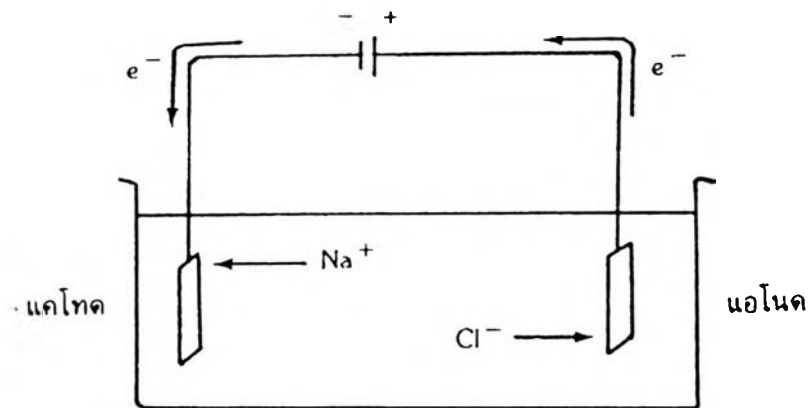
เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว ดังรูปที่ 2.1 จะได้โลหะโซเดียมเกาะที่แคโทดและแก๊สคลอรีนออกมาทางแอโนด แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้น มีการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ในสภาพของแข็งนำไฟฟ้าไม่ได้ แม้ว่าจะประกอบไปด้วยไอออนทั้งผลึกก็ตาม การที่นำไฟฟ้าไม่ได้เพราะไอออนในของแข็งเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่เมื่อให้ความร้อนจนโซเดียมคลอไรด์หลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ใส่ขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อย เช่น แท่งคาร์บอนหรือแพลทินัมลงไป แล้วผ่านกระแสไฟฟ้าโดยต่อจากแหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง เช่น แบตเตอรี่ จะพบว่าโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เพราะในสภาพของเหลวไอออนเคลื่อนที่ได้สะดวก การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นดังกระบวนการต่อไปนี้

ก) Na^+ เคลื่อนที่ไปสู่แคโทดซึ่งมีประจุลบ รับอิเล็กตรอนจากแคโทด เกิดรีดักชัน Na^+ เปลี่ยนเป็นโลหะโซเดียม



ข) Cl^- เคลื่อนที่ไปสู่แอโนดซึ่งมีประจุบวก ให้อิเล็กตรอนแก่แอโนด เกิดออกซิเดชัน Cl^- เปลี่ยนเป็นอะตอมคลอรีน แล้วอะตอมคลอรีนสองอะตอมรวมกันเป็นแก๊สคลอรีนหนึ่งโมเลกุล ได้แก๊สคลอรีนพุ่งออกมาทางแอโนด

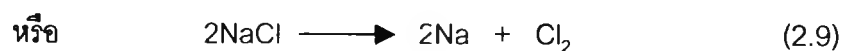
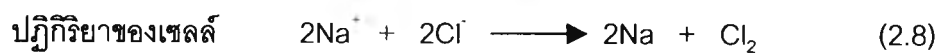
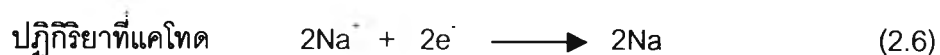




รูปที่ 2.1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของ NaCl ที่หลอมเหลว (กฤษณา ชูติมา , 2538)

กระแสไฟฟ้าเดินวนครบวงจรได้ เพราะแอโนดรับอิเล็กตรอนจากแอนไอออน Cl^- อิเล็กตรอนเดินไปตามวงจรไฟฟ้านอกของเหลวมาที่แคโทด แล้วถ่ายโอนไปสู่แคโทดไอออน Na^+ อิเล็กตรอนหายไปทางแคโทดแล้วได้อิเล็กตรอนกลับมาทางแอโนด ครบเป็นวงจร สำหรับภายในของเหลวการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าสืบเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้า

ผลที่ได้จากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน 1 โมล ทำให้เกิดโซเดียม 1 โมล และคลอรีน $\frac{1}{2}$ โมล เพื่อให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรีดักชันสมดุลกัน จึงทำจำนวนอิเล็กตรอนให้เท่ากันเสีย ดังนี้

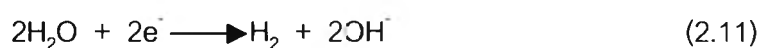


กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว ทำให้ได้โซเดียมที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด กระบวนการเช่นนี้เป็นการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า เรากล่าวว่าโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวถูกแยกสลายด้วยไฟฟ้า ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้ปฏิกิริยาที่ไม่เกิดขึ้นเองให้เกิดขึ้นได้ อุปกรณ์ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุอิเล็กโตรไลต์ มีขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่งต่อจากแหล่งทำไฟ

กระแสตรงเรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรลิติก เซลล์ชนิดนี้ใช้พลังงานจากแหล่งภายนอกไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

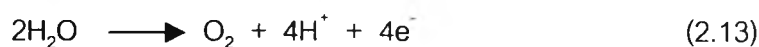
ถ้าเราทำการแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า สารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้จากการละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ ภายในสารละลายไม่ได้มีแต่เพียง Na^+ และ Cl^- เท่านั้น แต่ยังมีโมเลกุลน้ำซึ่งอาจถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์อิเล็กโทรลิติกมีดังนี้

- 1) Na^+ เคลื่อนที่ไปสู่แคโทด
- 2) ที่แคโทด มีทั้ง Na^+ และโมเลกุลน้ำ อาจเกิดรีดักชันขึ้นกับ Na^+ หรือโมเลกุลน้ำ ดังนี้



ระหว่าง Na^+ กับ H_2O H_2O จะถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่า Na^+ ปฏิกิริยาที่แคโทดจึงเป็นปฏิกิริยา (2.11) ได้แก๊สไฮโดรเจน

- 3) Cl^- เคลื่อนที่ไปสู่แอโนด
- 4) ที่แอโนดมีทั้ง Cl^- และโมเลกุลน้ำ อาจเกิดออกซิเดชันขึ้นกับ Cl^- หรือโมเลกุลน้ำ ดังนี้



แต่เนื่องจาก Cl^- ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายกว่า H_2O ปฏิกิริยา (2.12) จึงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดได้แก๊สคลอรีน

ปฏิกิริยาของเซลล์ได้จากการรวมปฏิกิริยา (2.11) และ (2.12) เข้าด้วยกัน



การแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้นพอควรด้วยไฟฟ้า ได้แก๊สไฮโดรเจนที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด ส่วน Na^+ คงอยู่ในสารละลายตามเดิม และเมื่อทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้าเรื่อยไปนานเข้าก็จะมี OH^- สะสมมากขึ้น ภายหลังการแยกสลายด้วยไฟฟ้าแล้ว ถ้าเอาสารละลายที่เหลือไประเหยจะได้ของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตกผลึกออกมา การแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าจึงเป็นวิธีเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟด้วย

2.3.2 หลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้น คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับเรื่องต่างๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.3.2.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำในการผลักดันให้ประจุ 1 คูลอมป์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรนั้น และจะต้องมีการรับหรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยเสมอ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ จะหมายความว่าจุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้นความต่างศักย์ 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมป์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์เตจด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้างกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec.}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์} \quad (2.15)$$

แต่งงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมป์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ สมมติว่า ในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมป์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมป์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ 2.15 จะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{elec.}} = (nF) (E) = nE \times 96,487 \quad (2.16)$$

แต่งงานนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีการลดพลังงานอิสระที่มีอยู่ในเซลล์ด้วย และในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (2.17)$$

สมการนี้เป็นสมการที่มีความสำคัญมาก เพราะเป็นสมการที่เชื่อมระหว่างความรู้ทางอุณหพลศาสตร์เข้ากับไฟฟ้าเคมี ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ได้ แล้วจะสามารถหาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ เช่น ΔG , ΔH , ΔS ได้ ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ เครื่องหมายของ ΔG มีความสำคัญมาก คือถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่า

ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดไม่ได้เอง ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.17 ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ในภาวะสมดุล

ตารางที่ 2.4 ความหมายของเครื่องหมายของ ΔG และ ΔE

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ ΔE
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดไม่ได้เอง	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

ที่มา : กัณทมาศ สุทธิเรืองวงศ์ , 2539

2.3.2.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัตินั้นไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือผ่านก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ ลงไปในสารละลายที่มีลดแพลทินัมจมอยู่ และสารละลายนั้นมีไฮโดรเจนไอออนที่มีแอกติวิตีเท่ากับ 1 หรือมีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรโดยประมาณ) มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น Cu/Cu^{2+} หรือ Zn/Zn^{2+} เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E_{cell}^0) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E^0) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำให้เช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ศักย์ไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโตรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น ครึ่งปฏิกิริยา Li^+/Li มีค่า E^0 เป็นลบมาก แสดงว่า Li^+ มีความสามารถน้อยในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่อ่อนมาก แต่ครึ่งปฏิกิริยา F_2/F^- มีค่า E^0 เป็นบวกมาก แสดงว่า F_2 มีความสามารถสูงในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมาก ในทางกลับกันโลหะ Li มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นโลหะ Li จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีมาก และ F^- มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ยาก จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อนมาก ส่วนอีกตัวอย่างคือ MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า จากตารางที่ 2.5 ค่า E^0 ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E^0 ของ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E_{\text{cell}}^0 = E^0 (\text{ขั้วบวก}) - E^0 (\text{ขั้วลบ}) \quad (2.18)$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ 2.18 คือ

$$E_{\text{cell}} = E (\text{ขั้วบวก}) - E (\text{ขั้วลบ}) \quad (2.19)$$



ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส
(ที่มา : ทบวงมหาวิทยาลัย , 2528)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$F_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06
$O_3(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2(g) + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.842
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.776
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2(s) + 2H_2O$	1.695
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2(g) + H_2O$	1.63
$H_5IO_6 + H^+ + 2e \rightleftharpoons IO_3^- + 3H_2O$	1.60
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Br_2(l) + 3H_2O$	1.52
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$Mn^{3+} + e \rightleftharpoons Mn^{2+}$	
$ClO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Cl_2(g) + 3H_2O$	1.47
$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.455
$Cl_2(g) + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.359
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
$Ti^{3+} + 2e \rightleftharpoons Ti^+$	1.25
$IO_3^- + 2Cl^- + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons$ $ICl_2^- + 3H_2O$	1.24
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2(g) + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	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*
$SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SeO_3 + H_2O$	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
$V(OH)_4^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + 3H_2O$	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
$PtCl_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt(s) + 4Cl^-$	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

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.536
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.5355
$I_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.620*
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu(s)$	0.521
$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons S(s) + 3H_2O$	0.45
$Ag_2CrO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Ag(s) + CrO_4^{2-}$	0.446
$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.361
$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu(s)$	0.337
$UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons U^{4+} + 2H_2O$	0.334
$BiO^+ + 2H^+ + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + H_2O$	0.32
$Hg_2Cl_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + 2Cl^-$	0.268
$AgCl(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Cl^-$	0.222
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SO_3 + H_2O$	0.17
$BiCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + 4Cl^-$	0.16
$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.154
$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	0.153
$S(s) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S(g)$	0.141
$TiO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons Ti^{3+} + H_2O$	0.1
$AgBr(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Br^-$	0.095
$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2S_2O_3^{2-}$	0.01
$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2(g)$	0.000
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb(s)$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn(s)$	-0.136
$AgI(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + I^-$	-0.151
$CuI(s) + e \rightleftharpoons Cu(s) + I^-$	-0.185
$N_2(g) + 5H^+ + 4e \rightleftharpoons N_2H_5^+$	-0.23
$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni(s)$	-0.250
$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.255
$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co(s)$	-0.277
$Ag(CN)_2^- + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2CN^-$	-0.31
$Tl^+ + e \rightleftharpoons Tl(s)$	-0.336
$PbSO_4(s) + 2e \rightleftharpoons Pb(s) + SO_4^{2-}$	-0.356
$Ti^{3+} + e \rightleftharpoons Ti^{2+}$	-0.37
$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd(s)$	-0.403
$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0.41
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe(s)$	-0.440
$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4$	-0.49
$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn(s)$	-0.763
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al(s)$	-1.66
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg(s)$	-2.37
$Na^+ + e \rightleftharpoons Na(s)$	-2.714
$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca(s)$	-2.87
$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba(s)$	-2.90
$K^+ + e \rightleftharpoons K(s)$	-2.925
$Li^+ + e \rightleftharpoons Li(s)$	-3.045

2.3.2.3 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายใน เซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือคือผลคูณของประจุไฟฟ้ากับ จำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$1 \text{ F (Faraday)} = eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ = 96487 \text{ C mol}^{-1} \quad (\text{C} = \text{coulomb})$$

$$\text{จะได้} \quad X \text{ coulomb} = I (\text{ampere}) \times t (\text{second})$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน Al^{+3} จะได้ Al(s) 1 โมล = $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{26.98}{3} = 9 \text{ กรัม}$

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน Fe^{+2} จะได้ Fe(s) 1 โมล = $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{55.85}{2} = 27.9 \text{ กรัม}$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎของฟาราเดย์ดังสมการต่อไปนี้ (ปริเมธ เจริญพคุณ, 2545)

$$W = \frac{i \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (2.20)$$

โดย W คือ ปริมาณโลหะที่ละลาย (g)

i คือ กระแสไฟฟ้า (A)

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด

t คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์

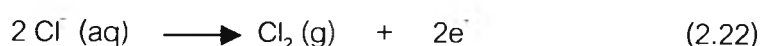
F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500

2.3.2.4 อิเล็กโทรลิซิส

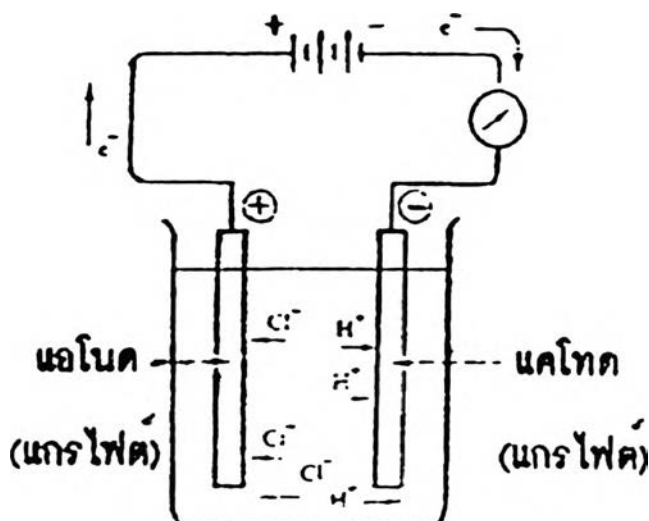
จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถบอกได้ว่า ปฏิกิริยานั้นๆ เกิดขึ้นได้เองหรือไม่ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าบวก ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองได้ แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองไม่ได้ เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวได้รับพลังงานจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกเรียกว่า อิเล็กโทรลิซิส ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสคือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้า อิเล็กโทรดสองขั้ว (Electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในส่วนของ อิเล็กโทรดสองขั้วและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วเรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรลิติก สำหรับอิเล็กโทรดสองขั้วนั้น ขั้วหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเรียกขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันว่า แอโนด (Anode) ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเรียกว่า แคโทด (Cathode) ตัวอย่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติกคือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นพอประมาณในน้ำโดยใช้แกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรด สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวออกเป็น H^+ และ Cl^- ไอออน ดังรูปที่ 2.2 จากรูปใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วมีเส้นลวดต่อไปยังอิเล็กโทรดที่ทำด้วยแกรไฟต์ พบว่ามีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในขณะเดียวกันอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นรอบๆ และผุดขึ้นมาจากสารละลาย ส่วนอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซคลอรีนเช่นกัน การเกิดฟองก๊าซที่อิเล็กโทรดทั้งสองนี้แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ เมื่อปิดวงจรอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปตามเส้นลวดจนถึงอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ไอออนบวก H^+ จะเคลื่อนที่มารับอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดนี้และถูกรีดิวซ์เป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.21



ส่วนไอออนลบ Cl^- จะให้อิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังสมการที่ 2.22



อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ทำให้ครบวงจร ปฏิกิริยาของเซลล์ จึงได้จากผลบวกของสมการที่ 2.21 และ 2.22 ดังนี้



รูปที่ 2.2 การทำงานของเซลล์อิเล็กโทรลิติก (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2528)

2.3.2.5 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้า จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active electrodes) หมายถึงขั้วที่มีส่วนในปฏิกิริยา เช่น ครึ่งเซลล์ Zn/Zn^{2+} ถ้า Zn เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนไป Zn ก็จะถูกกัดไป ถ้า Zn^{2+} รับอิเล็กตรอนมากก็จะเปลี่ยนเป็น Zn เกาะบนขั้ว
2. ขั้วที่ไม่ว่องไวในปฏิกิริยา (inert electrodes) อาทิ Pt หรือ C (แกรไฟท์ หรือ คาร์บอน) ที่จุ่มลงในสารละลายหนึ่ง ก็จะทำหน้าที่เป็นทางให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเข้าหรือออกได้ โดยไม่มีปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายนั้นๆ
3. ขั้วแก๊ส (gas electrodes) ในครึ่งเซลล์ $\text{H}^+/\text{H}_2(\text{g})$ จะมี Pt/ $\text{H}_2(\text{g})$ (1 บรรยากาศ) จุ่มในสารละลาย H^+ หรือ H_3O^+ (1 M) และเรียกว่า ขั้วแก๊สไฮโดรเจน หรือเรียกว่า ขั้วแก๊สไฮโดรเจนมาตรฐาน (standard hydrogen electrodes ; SHE) โดยที่ปลายโลหะ Pt จะมี Pt ที่เป็นผงละเอียดเคลือบอยู่ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

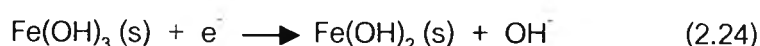
วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์ มีหลายชนิด เช่น

1) อะลูมิเนียม (aluminium)

เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม , อินเดียม และเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดในโลก อะลูมิเนียมจัดว่า ว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิด ไฮเดรชันและไฮโดรไลซิส กลือ ซัลเฟต ไนเตรต และเฮไลด์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายในน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียม มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

2) เหล็ก (steels)

เป็นโลหะแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้าง แต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้น มักจะกลายเป็นสนิมที่ผิว เรียกว่า สนิมเหล็ก ดังนั้นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็ก จึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิมเคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม) หรือผสมโลหะบางชนิดลงไป เพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศ จะได้ออกไซด์ผสม $FeO \cdot Fe_2O_3$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะได้หลายชนิด เมื่อให้ความร้อน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เนื่องจาก $Fe(II)$ ถูกออกซิไดส์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบส ดังจะเห็นจากค่า E^0



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ $Fe(II)$ ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮออน $\{Fe(H_2O)_6\}^{2+}$ สารประกอบ $Fe(III)$ มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ $Fe(II)$ ทั้งนี้ปรากฏว่า $Fe(III)$ ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $\{Fe(H_2O)_6\}^{3+}$ ซึ่งมีสีม่วงจาง เมื่อ pH ต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลส์ กลายเป็น $\{Fe(H_2O)_5(OH)\}^{2+}$ หรือไฮออนเชิงซ้อนคล้ายๆ กันนี้ ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

3) คาร์บอน (Carbon)

คาร์บอนมีคุณสมบัติผสมผสานเฉพาะตัวจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของ แบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิง คาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ ทำจากส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงาน มานานกว่าหนึ่งศตวรรษครึ่ง หนึ่งในบรรดาการใช้ประโยชน์คาร์บอนในแบตเตอรี่ทางการค้า ยุคแรกสุดอยู่ในปี 1841 เมื่อ Robert Bunsen ได้เสนอให้เปลี่ยนตัวเก็บกระแสไฟฟ้าของ Grove cell จากพลาตินัมที่มีราคาแพงไปเป็นคาร์บอนซึ่งคุ้มทุนกว่ากัน

ปัจจุบันด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอนทำให้นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในเทคโนโลยีแหล่งกำเนิดพลังงานในขณะที่โครงสร้างคาร์บอนรูปแบบใหม่มีการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่าง nanotubes หรือ fullerenes ประโยชน์ของมันต่อเทคโนโลยีต้นกำเนิดพลังงานกำลังศึกษากันอย่างเอาใจจริงเอาใจจ้ง ขณะที่คาร์บอนเป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เฉื่อยและดีพอสมควร มันมีประโยชน์ทำเป็นขั้วไฟฟ้า (electrode) หรือเพิ่มความนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่น ๆ คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่าง ๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้ก๊าซแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวกว้างใหญ่ จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิว เนื่องจากโครงสร้างของมันทำให้เกิดความพรุนได้โครงสร้างเป็นชั้น ๆ และเป็น nanotubes จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดใส่หรือเป็นตัวกลางสำหรับ การเก็บไฮโดรเจน

คาร์บอนใช้ทั้งในแบตเตอรี่ซึ่งเก็บพลังงานของมันไว้ภายใน และใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งผลิตพลังงานจากแหล่งกำเนิดเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ภายนอก

4) ไทเทเนียม

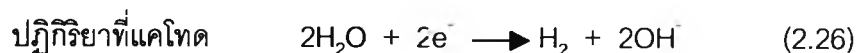
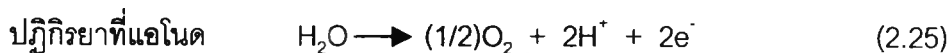
เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และแฮฟเนียม ไทเทเนียม มีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +2 , +3 และ +4 ไทเทเนียมเป็นโลหะทรานซิชัน คือ มีลักษณะขาวคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง เหนียว ดึงให้เป็นเส้นได้ เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก ทนได้แม้แต่ก๊าซคลอรีนแห้ง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับโลหะ ได้สารประกอบโคเวเลนต์ เช่น TiO_2 , $TiCl_4$ เป็นต้น สารประกอบของไทเทเนียมที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 ถึงแม้ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการ แต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็ก ทั้งนี้เพราะความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ดังได้กล่าวมาแล้ว

5) แพลทินัม

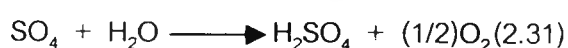
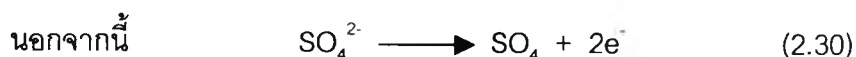
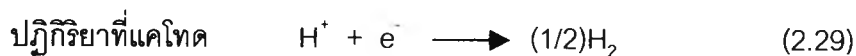
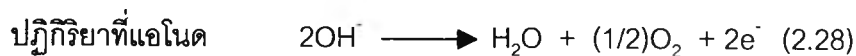
มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมาก คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะโลหะและยังเป็นเหตุให้ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียร เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ และมักจะพบอยู่รวมกันหลายธาตุเป็นโลหะเจือแล้ว และยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุทองแดง เงิน และทองคำอีกด้วย แพลทินัมนี้มีน้อยมาก จึงมีราคาแพงมาก แพลทินัมมีสีขาวและขอมมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก เจือยต่อปฏิกิริยา จึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กทรอนิกส์ เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

2.3.3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

ทบวงมหาวิทยาลัย (2528) สรุปว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดที่เสถียร เช่น แพลทินัม เป็นต้น ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย คือน้ำจะถูกออกซิไดส์ ได้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจน

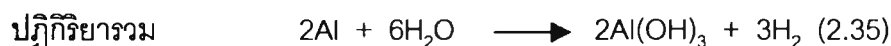
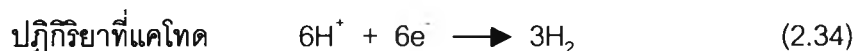


Allmand (1931) กล่าวถึง ปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซออกซิเจน อีกทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟตไอออน

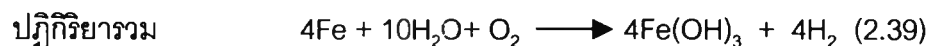
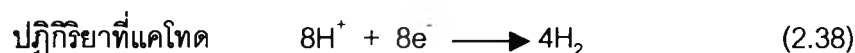
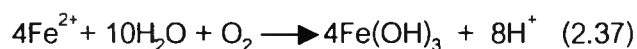


Biwyk (1991) ใช้อิเล็กโทรดที่สลายตัวได้ คือ เหล็กหรืออะลูมิเนียม บำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้ว

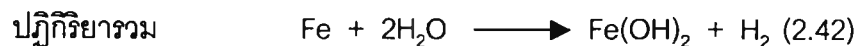
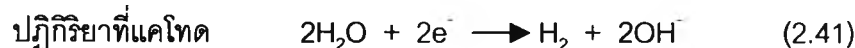
อะลูมิเนียม



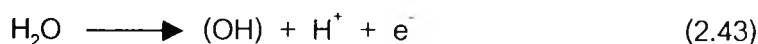
เหล็ก



Pretorius และคณะ (1991) ใช้อิเล็กโทรดแบบสลายตัวได้ คือ เหล็ก เพื่อผลิตสารช่วยในการตกตะกอนในรูปตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์



Cominellis (1992) ใช้อิเล็กโทรดแบบเสถียร คือ แพลทินัมหรือไทเทเนียมเคลือบด้วยออกไซด์ในการกำจัดฟีนอล ที่มีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์ โดย OH หรืออนุพันธ์ไฮดรอกซิล ได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเกิดบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด



ปฏิกิริยาข้างเคียง ที่จะเกิดขึ้น ได้แก่ การเกิดก๊าซออกซิเจน



สรุปว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมี จะทำให้เกิดปฏิกิริยาหลายอย่าง ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการ oxidation

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) จะได้ก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง อิออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ (วาเลนซ์ 2 ขึ้นไป) จะตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ (Organic contaminant) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความพร้อมที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex)

2) กระบวนการ Flotation

ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งเป็นฟองเล็กมาก เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดไฟฟ้าหนึ่งจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวและพองอนุภาคเล็กๆ ให้ลอยขึ้นสู่ผิว เกิดการแยกของสารแขวนลอย

3) กระบวนการรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อน

ที่ขั้วบวก ion ของ Fe^{3+} , Al^{3+} จะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็น Organometallic complex กับสารอินทรีย์พวก Aromatic และ Alkanes สารเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ จะลอยสู่ผิวน้ำเสียโดยการลอยตัว (Flotation) ซึ่งเกิดจากการพองโดยฟองก๊าซและบางส่วนจะจมลง (Precipitation)

4) กระบวนการรวมตัวทางเคมี (Chemical Coagulation)

ในกรณีที่ใช้โลหะเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสาร Coagulant และ Flocculant ช่วยทำให้สารแขวนลอยเล็กๆ รวมตัวกัน สามารถตกตะกอนและแยกตัวออกได้ดีขึ้น

2.3.4 ดัชนีที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ลักษณะสมบัติน้ำเสียมีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจดัชนีต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี

2.3.4.1 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือไฟฟ้าที่มีทิศทางการเคลื่อนที่หรือการไหลของ

อิเล็กทรอนิกส์จากแหล่งกำเนิดไปสู่เครื่องใช้ไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรไฟฟ้า โดยจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่จากจุดที่เป็นประจุลบไปสู่จุดที่เป็นประจุบวก ในวงจรไฟฟ้าใดๆ ก็ตาม จะมีสิ่งที่ต้านทานการไหลของอิเล็กทรอนิกส์หรือกระแสไฟฟ้าตลอดเวลาเรียกว่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า สิ่งที่ยับยั้งให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ไปในวงจรเรียกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กันตามกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า สามารถขึ้นอยู่ในรูปของสมการ ดังสมการที่ 2.45

$$V = I \times R \quad (2.45)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ 2.46

$$R = l / (C \times A) \quad (2.46)$$

- เมื่อ
- R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโอห์ม
 - l เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
 - C เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโมห์ หรือ ซีเมน
 - A เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยตารางเซนติเมตร

ซึ่งสามารถหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้จากเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

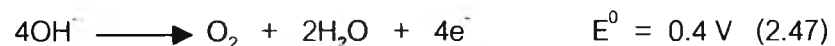
2.3.4.2 สี

สีในน้ำอาจจะเป็นผลมาจากไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น ซากพืชซากสัตว์และของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ตามมาตรฐานของการบำบัดน้ำเสีย ความหมายของ "สี" จะมีความหมายเดียวกับ "Colour" หรือ " True Colour" ซึ่งหมายถึงสีของน้ำที่กำจัดความขุ่นออกไปแล้ว ขณะที่ "Apparent Colour" หมายถึงสีของน้ำที่มีสารแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

ในกรณีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่มีสี พบว่าสีจะกระจายอยู่ทั่วไปในรูปของคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย ซึ่งกรณีนี้จะทำให้ "True Colour" ต่างจาก "Apparent Colour" ชัดเจน

2.3.4.3 สารอินทรีย์

ปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นที่แอโนด เช่น ไอออนลบถูกทำให้เป็นกลางหรืออาจจะให้อิเล็กตรอน ซึ่งในปฏิกิริยาที่มีศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาต่ำจะเกิดปฏิกิริยาก่อน (Berger , 1987) เช่น



ในทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดจะให้อนุพันธ์อิสระ ซึ่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น OH^- ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน แต่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆ สามารถทำปฏิกิริยากันเอง หรือกับไอออน หรือสารประกอบ หรืออนุพันธ์อิสระอื่นๆ บริเวณใกล้อิเล็กโทรด รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย หรืออาจจะรวมตัวกับอนุพันธ์อิสระอื่น ได้สารที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ และถ้าในน้ำเสียมีคลอไรด์ไอออน พบว่าวิธีไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและอนุพันธ์ของคลอรีนที่แอโนด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้อีกด้วย แต่การกำจัดสารอินทรีย์แบบสมบูรณ์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย จะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์บางตัวในอัตราการกำจัดต่ำและบางสภาวะเท่านั้น เช่น ในสภาวะที่ใช้แพลทินัมแพลทินัมเป็นอิเล็กโทรดในสารละลายกรดเข้มข้นหรือด่างเข้มข้น ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้น

สภาวะเช่นนี้ไม่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้ปริมาตรสารเคมีมาก วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดมีราคาแพงและต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ยิ่งไปกว่านั้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ต้องการการถ่ายเทอิเล็กตรอนจำนวนมาก จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงไปได้ ในบางครั้งเพียงการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลงจะสามารถลดความเป็นพิษได้แล้ว ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น คาร์บอน เป็นต้น

2.3.4.4 ค่าพีเอช (pH)

สารละลายในน้ำไม่ว่าจะเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลาง ย่อมประกอบด้วย H_3O^+ และ OH^- เสมอ โดยมีผลคูณของไอออนทั้งสอง เท่ากับ 10^{-14} ดังนั้นถ้าทราบ $[\text{H}_3\text{O}^+]$ เพียงอย่างเดียว สามารถบอกได้ว่าสารละลายเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลาง เนื่องจาก $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ในสารละลายมีค่าน้อย และเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างจาก 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ถึง 10^{-14} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร การเขียนความเข้มข้นด้วยเลขยกกำลังที่ติดลบย่อมไม่สะดวกและผิดพลาดได้ง่าย ขอเสนอแนะให้ใช้มาตราส่วนใหม่ที่สะดวกกว่า ซึ่งเรียกว่ามาตราส่วน pH โดยมีนิยามว่า

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (2.48)$$

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \quad (2.49)$$

โดยที่สารละลายกรดจะมี pH น้อยกว่า 7 และสารละลายเบสจะมี pH มากกว่า 7 ส่วนสารละลายที่เป็นกลางจะมี pH เท่ากับ 7 มาตราส่วนนี้ นอกจากจะใช้อธิบายความเข้มข้นของ H_3O^+ แล้ว ยังใช้อธิบายความเข้มข้นของ OH^- ในรูปของ pOH ได้อีกด้วย คือ

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] \quad (2.50)$$

2.3.4.5 คอลลอยด์

เป็นสถานะที่สารใดสารหนึ่งอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ แขนงลอยอยู่ในตัวกลางหรือตัวทำละลาย สถานะนี้เป็นประเภทเนื้อผสม อนุภาคเหล่านี้อาจจะละลายในตัวทำละลายได้บ้าง แต่ไม่สามารถละลายได้หมด จึงปรากฏในรูปแขวนลอยอยู่ซึ่งจะคงสถานะ และไม่ยอมรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 1-1,000 นาโนเมตร ถ้าพิจารณาจากเสถียรภาพ อาจจำแนกคอลลอยด์ออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพในตัวเอง ตัวอย่างระบบคอลลอยด์ประเภทนี้ ได้แก่ กาว แป้ง และสบู่ ซึ่งเกิดระบบคอลลอยด์ที่เสถียรในน้ำได้
- 2) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากสารอื่น แบ่งเป็น
 - ก) คอลลอยด์ที่สารอื่นป้องกัน เช่น หยดน้ำมันไม่อาจเกิดระบบคอลลอยด์ในน้ำได้ แต่ถ้าเติมสบู่ลงไปบ้างแล้วคนให้ทั่ว ส่วนที่ชอบน้ำของสบู่จะละลายหยดน้ำมัน ซึ่งทำให้น้ำมันกระจายไปในน้ำในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ด้วย

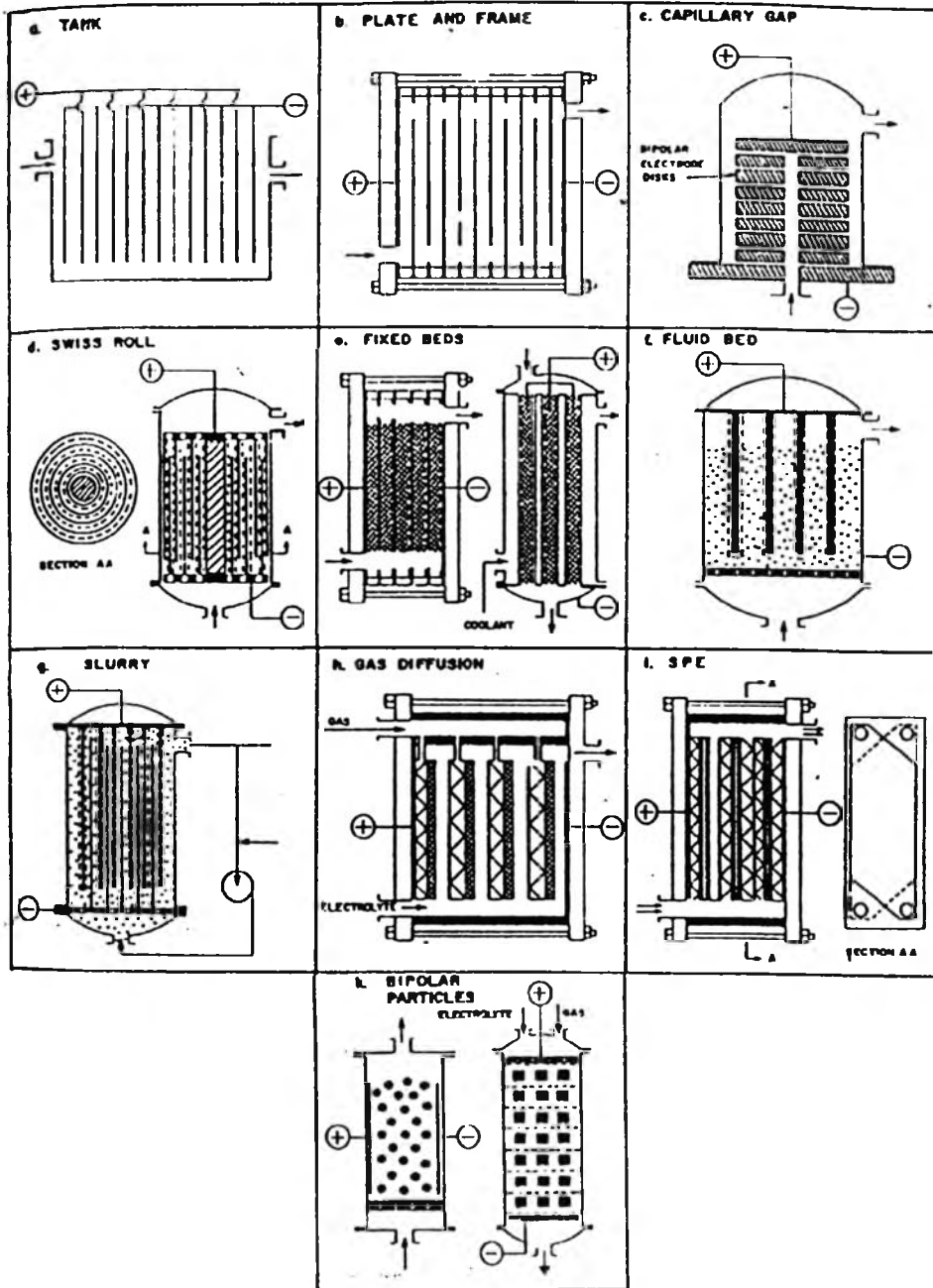
ข) คอลลอยด์ที่ดูดซับไอออน เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดูดซับ H^+ ไว้ที่ผิวของอนุภาค ทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีประจุบวก การดูดซับ H^+ ที่ผิวของอนุภาค $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่างๆ ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงอยู่ได้อย่างเสถียร อีกตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ ระบบคอลลอยด์ของ As_2S_3 ซึ่งถูกทำให้เสถียรโดย OH^- และ SH^- ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของ As_2S_3 จึงมีประจุลบ

2.3.5 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีหลายแบบดังรูปที่ 2.3 ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ ควรจะหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่มีการกวนผสม หรือการไหลของสารละลาย
2. เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาเกี่ยวข้อง ควรจะทำแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณารายการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้น หรือใบพัด
4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมากจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทน ไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้น ให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัด และปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกรไฟต์ไม่นิยมใช้ทำอิเล็กโทรด เนื่องจากจะถูกออกซิไดส์ด้วย CO_2 และมีราคาแพง เป็นต้น
8. การวางอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นกับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางอิเล็กโทรดในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นตัวพาสาร

แขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอน ควรวางอิเล็กโทรดในแนวนอนโดยให้หัวแอนโอดอยู่ด้านล่าง (Mendia , 1982)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Oloman , 1983)

121077070

2.3.6 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี และหลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมีคือการใช้อิเล็กโทรดในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน แทนการใช้สารเคมีในการเกิดปฏิกิริยา

2.3.6.1 การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเดิมจะอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงของโลกในการแยกน้ำมันในน้ำเสีย ซึ่งพบปัญหาคือ ถ้าในน้ำเสียมีปริมาณน้ำสบู่มาก โมเลกุลของสบู่จะปรากฏเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายไปทั่วระหว่างโมเลกุลของน้ำเสีย ทำให้น้ำมันแตกเป็นเซลล์เล็กเซลล์น้อย ผลที่ตามมาคือทำให้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ยากมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัดโดยจะใช้อิเล็กโทรดที่มีส่วนในการทำปฏิกิริยา เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในเซลล์อิเล็กโทรดแล้ว อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนในน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเบา ขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นการแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้านั่นเอง จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ระบบการบำบัดมี 2 ขั้นตอน คือขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย การสลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูง และระบบบำบัดมีขนาดเล็ก (Ohsasa , Nakakura และ Sambuichi , 1991)

2.3.6.2 การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีนี้ จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และต้องดำเนินการที่ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งขึ้นกับความว่องไวของสารอินทรีย์กับตัวทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ส่วนกำลังในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนดนั้น ขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของออกซิเจน เป็นต้น ตัวอย่างการเปรียบเทียบอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ ได้แก่ ไทเทเนียมเคลือบ SnO_2 กับแพลทินัม โดยใช้ฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ในการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลในแต่ละช่วงเวลาของการอิเล็กโทรลิซิสด้วยอิเล็กโทรดชนิดนั้นๆ พบว่าอัตราการกำจัดฟีนอลของอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดคล้ายกัน คือ กำจัด

ฟีนอลได้ทั้งหมดที่ 25-30 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร แต่อัตราการกำจัด TOC ด้วยไทเทเนียมเคลือบ SnO₂ จะมากกว่า คือ 90 % ที่ 50 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ขณะที่อัตราการกำจัด TOC ด้วยแพลทินัมเพียง 38 % ทั้งนี้เนื่องจาก SnO₂ มีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของออกซิเจนสูงมาก และกำลังในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้ดี (Comminellis, 1992) ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีให้มีประสิทธิภาพ ควรเลือกชนิดของอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับน้ำเสียด้วย

2.3.6.3 การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

ได้ทำการทดลองการกำจัด Cr⁶⁺ จากน้ำหล่อเย็น และ CN⁻ ด้วยวิธีนี้ จะเกิดตะกอนเบาของเหล็กที่ไม่ละลายน้ำ หรือเกิดสารเชิงซ้อนโดยใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีเหล็กเป็นอิเล็กโทรด Cr⁶⁺ ถูกเปลี่ยนให้เป็น Cr³⁺ ซึ่งอยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนปนเปื้อนต่างๆ ต้องอาศัยวิธีการบำบัดหลายขั้นตอน เช่น การปรับ pH ให้เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการ การเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี การทำให้เป็นกลางเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลายและการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดตะกอนเบาของเหล็กหรืออะลูมิเนียมในรูปออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนเบานี้จะทำหน้าที่ดูดซับสารปนเปื้อนหรือของเสียไว้ ทำให้สามารถกำจัดของเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดดังกล่าวมีข้อจำกัดคือไม่เหมาะที่จะใช้กับสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดเกลือของโลหะหนักอิเล็กโทรด จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่ต้องการปรับ pH และไม่ต้องเติมสารเคมีในการกำจัดไอออนต่างๆ หลักการของวิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดไอออนเหล่านี้คือ เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของไอออนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นไอออนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จะรวมตัวกับตะกอนเบาของเหล็กในทางกายภาพหรือทางเคมี เพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอน ส่วนระบบการบำบัดแบบเดิมนั้น ต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง จึงสามารถเปลี่ยน Cr⁶⁺ เป็น Cr³⁺ ได้ดังสมการที่ 2.51 หรือเปลี่ยน CN⁻ เป็นเฟอร์โรไซยาไนด์ และเฟอร์โรไซยาเนต (Abdo และ Sedahmed , 1991)



2.3.6.4 การกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียในน้ำเสียจากชุมชน (Krause, 1979)

ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่นั้น ปริมาณของแบคทีเรียในน้ำเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่ง ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการเติมสารเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียในน้ำ แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือ มีการใช้ปริมาณสารเคมีมากเกินไป ทำให้มีฤทธิ์ของสารเคมีตกค้างอยู่ในน้ำ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี จึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดแบคทีเรียนี้ ต้องมีการปรับสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเสียก่อนเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกด้วยไฮเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเล ให้มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 4-15 มิลลิซีเมน ใช้อิเล็กโทรดแบบเสถียร เพื่อทำให้เกิดก๊าซคลอรีน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ก๊าซคลอรีนนี้ใช้กำจัดแบคทีเรียในน้ำเสีย แต่ต้องมีปริมาณที่เหมาะสมไม่มากเกินไป เพราะอาจทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว มีปริมาณคลอรีนสูง ดังนั้นระบบจะเติมปริมาณสารละลายไฮเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเลที่เหมาะสมเท่านั้น และจะใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วบางส่วนกลับมาเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกอีก เพื่อรักษาค่าการนำไฟฟ้าของระบบไว้โดยปราศจากการเติมสารละลายไฮเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเล ส่วนก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ มีหน้าที่ในการพาสารแขวนลอยต่างๆ ขึ้นสู่ผิวหน้าในรูปของโฟม ทำให้ลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียได้อีกด้วย

2.3.6.5 การกำจัดสีของน้ำเสีย

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานผลิตสุรา โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสี และโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น มีปัญหาในการกำจัดสีของน้ำเสียซึ่งยังไม่มีวิธีบำบัดที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ก่อให้เกิดสี วิธีที่ใช้ในการกำจัดสีมีหลายวิธี ตัวอย่างคือการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น O_3 , Cl_2 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง สิ่งที่เกิดขึ้นคือความไม่ปลอดภัยในการบำบัดน้ำเสียนั่นเอง การเติมแคลเซียมออกไซด์ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ และการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะใช้กำจัดสีของน้ำเสียในแต่ละประเภทแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงมีความพยายามในการหาวิธีที่สามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้หลายประเภท และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง วิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสี โดยอาศัยการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในระบบเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไปนั่นเอง และสามารถดูด

ชั้นสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการตกตัวของอิเล็กโทรด ทำให้เกิดตกตะกอนขึ้น (Molina , Rigal และ Lacoste , 1991)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดี

Hendrickson และคณะ (1984) ได้เสนอวิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอดี โดยได้ทำการทดลองในการกำจัดปรอท ดังนี้

- 1) นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีโอดี มาเติมโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณ 30 มิลลิโมลต่อลิตร
- 2) แยกตะกอนและน้ำที่มีโลหะหนักออกจากกัน นำน้ำที่มีโลหะหนักมาบำบัดต่อ ส่วนตะกอน นำไปทำการทดลองนำเงินกลับมาใช้ใหม่
- 3) เติมผงเหล็ก 4.5 มิลลิโมลต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงไปในน้ำเสียที่มีโลหะหนักอยู่ ผงเหล็กจะเกิดการออกซิไดส์และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยปรอทจะนำอิเล็กตรอนนั้นไปใช้ในการรีดิวส์ ดังสมการ



- 4) ทำการผสมกันนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองออก นำน้ำที่ผ่านการกรองไปปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 7 ก่อนนำไปปล่อยระบายทิ้ง

จากการทดลองนี้ พบว่าปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นปรอท 0.08 ไมโครกรัมต่อลิตร โครเมียม 0.013 ไมโครกรัมต่อลิตร

การทดลองในการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ ได้ทดลองหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมในการทดลอง คือ 30 มิลลิโมลต่อลิตร โดยนำไปให้ความร้อนที่ 75-100 องศาเซลเซียส และได้เสนอแนะขั้นตอนในการทำให้เป็นซิลเวอร์ซัลเฟต ดังนี้

- 1) นำไปละลายในแอมโมเนีย มไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมโลหะทองแดงโดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1-2 วัน
- 2) นำไปกรอง เพื่อแยกทองแดง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-2 วัน
- 3) เติมเงิน 7.6 กรัม ลงในกรดซัลฟูริก 2.5 ลิตร และสามารถนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้

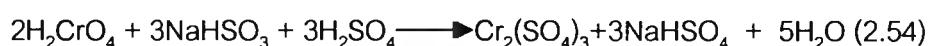
วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการนำกลับเงินมาใช้ใหม่ได้ โดยอยู่ในรูปของซิลเวอร์ซัลเฟต โดยไม่มีสารโคปนเปื้อน

Fresenius และ Schneider (1988) ได้ทำการศึกษาการกำจัดปรอทและเงินออกจากน้ำที่เหลือจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยนำเสียหลังวิเคราะห์ค่าซีไอดีแล้วจะนำมาเติมโซเดียมไฮโอซัลเฟต 30 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30 % น้ำหนักโดยปริมาตร ในปริมาตร 300 มิลลิลิตร สำหรับน้ำเสียทุกๆ 500 มิลลิลิตร ปรอทและเงินถูกกำจัดออกในรูปของซัลไฟด์ ส่วนโครเมียมจะถูกกำจัดออกในรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งค่าปรอทที่เหลือ < 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร เงินที่เหลือน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมที่เหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Yuan(1990) อ้างถึงใน พวงรัตน์ แก้วล้อม ได้ทำการทดลองในการนำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองวิเคราะห์ค่าซีไอดีมาบำบัด เพื่อให้โลหะอยู่ในรูปตะกอน จากนั้นนำตะกอนของโลหะที่ได้ไปบำบัด โดยใช้หลักการของ cementation ซึ่งทำจาก portland cement และ lime-rice husk ash

วิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีไอดี ทำได้โดย

- 1) นำน้ำเสียมาวัดปริมาณโครเมียมและปรอท
- 2) วัดพีเอช และปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการรีดักชันโครเมียมจากประจุ +6 เป็นโครเมียมประจุ +3 เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ดีในรูปของไฮดรอกไซด์
- 3) เติม NaHSO_3 อย่างช้าๆ ใช้เวลาผสมสารเคมีประมาณ 10 นาที เพื่อให้เกิดการ reduction ตามสมการ



- 4) เติม NaOH โดยใช้ commercial grade เพื่อปรับพีเอช จนมีค่าประมาณ 8.5 ซึ่งจะเกิดการตกตะกอน โลหะหนักอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ตามสมการ



- 5) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน จากนั้นแยกตะกอนโลหะหนักออกจากน้ำเสีย
- 6) วัดความเข้มข้นของโครเมียมและปรอท ในน้ำใสที่ผ่านการบำบัดและในตะกอนของโลหะ นำตะกอนที่ได้ของโลหะไปทำ cementation

ผลการทดลองพบว่าตะกอนโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ และปริมาณเมอร์คิวรีที่อยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว มีปริมาณน้อยและเป็นไปตามมาตรฐานคือน้อยกว่า 0.005 มก./ล.

ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์ (2539) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีโดยวิธีการตกตะกอนผลึก โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดและความเหมาะสมของสารเคมี 4 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ โซเดียมไฮโอซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการสำรวจและการรวบรวมข้อมูลน้ำเสียซีโอดีจากห้องปฏิบัติการจำนวน 10 แห่ง

ผลการสำรวจพบว่า น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทั้ง 10 แห่ง มีน้ำเสียเฉลี่ย 44.14 ลิตรต่อเดือน มีปริมาณปรอท 1,341.20 มก./ล. , โครเมียม 288.45 มก./ล. , เงิน 921.10 มก./ล. และเหล็ก 153.18 มก./ล. สารเคมีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย คือ การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮโอซัลเฟต 10 กรัม ที่พีเอช 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50 % น้ำหนักโดยปริมาตร ต่อน้ำเสีย 500 มิลลิลิตร และทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 1 วัน และมีปริมาณปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก เหลือในน้ำเท่ากับ 0.001 0.01 0.50 และ 1.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และคิดเป็นประสิทธิภาพของการกำจัดเท่ากับ 100 100 99.96 และ 99.80 ตามลำดับ และจากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียคิดเป็นค่าสารเคมีและค่าบำบัดกากตะกอน เท่ากับ 6,336.75 และ 58.90 บาท ตามลำดับ ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการบำบัดรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 6,395.65 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร (ประมาณ 6.50 บาท ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร หรือ 1.95 บาท ต่อตัวอย่างการวิเคราะห์ซีโอดี)

สุรรัตน์ ถมยาศิริกุล (2540) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท โครเมียม และเหล็ก ในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) การทดลองหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยแปรค่าพีเอชเป็น 9 10 11 12 และแปรค่าอุณหภูมิเป็น 55 60 65 70 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตคงที่เท่ากับ 0.025 โมล

2) การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยแปรปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเป็น 0.0125 0.025 0.05 0.1 โมล และใช้พีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 โดยกำหนดให้อัตราการเติมอากาศคงที่ 10 ลิตร/นาที

ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่ออ็อกไซด์ทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 18.65 โดยมีปริมาณปรอท โครเมียม และเหล็ก หลังบำบัดมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.097 0.329 และ 0.180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดปรอท โครเมียม และเหล็กเท่ากับ 99.86 % 97.87 %

99.53 % ตามลำดับ ปรอทยังคงเหลืออยู่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมเล็กน้อย ส่วนโครเมียมมีปริมาณเหลืออยู่ต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว ผลการทดสอบการชะละลายพบว่า ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในน้ำสกัดต่ำกว่ามาตรฐานของสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่า สารประกอบหลักของตะกอนที่ได้คือแมกนีไทต์ ในกรณีที่มีการใช้ในโตรเจนจะได้ตะกอนเฟอร์ไรต์ที่มีความเป็นสารแม่เหล็กดีกว่าการไม่ใช้ในโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ผลประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด สำหรับค่าใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยใช้ในโตรเจน มีค่าประมาณ 10.6 บาท/ลิตร (10,620 บาท/ลบ.ม. หรือ 3.18 บาท/ตัวอย่างการวิเคราะห์ไอดี) ส่วนในกรณีไม่มีการใช้ในโตรเจน มีค่าใช้จ่ายประมาณ 9.35 บาท/ลิตร (9,350 บาท/ลบ.ม. หรือ 2.80 บาท/ตัวอย่างการวิเคราะห์ไอดี)

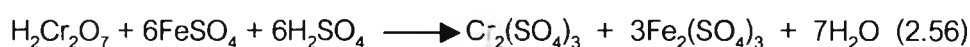
สุรัตน์ เพชรเกษม (2541) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เพื่อตกผลึกเงิน เฟอร์ซัลไฟด์เพื่อตกผลึกปรอท และโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อตกผลึกโครเมียม โดยมีความเข้มข้นของเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีไอดี คือ 1,455 940 301 และ 725 มก./ล. ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า เจือจางที่เหมาะสมคือใช้โซเดียมคลอไรด์ 4 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0 สำหรับการตกผลึกเงิน ใช้เฟอร์ซัลไฟด์ 3 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0.5 สำหรับการตกผลึกปรอท และการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเข้าไป เพื่อปรับพีเอชเป็น 9 สำหรับการตกผลึกโครเมียม

ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว คือ พีเอช 9 ปริมาณของแข็งทั้งหมด 349,067 มก./ล. ปริมาณสารแขวนลอย 25 มก./ล. ปริมาณสารละลาย 349,042 มก./ล. และเหลือปริมาณเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็ก เท่ากับ 0.13 0.001 0.1 และ 40.5 มก./ล. ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟต (ไม่พบซัลไฟด์) 195,000 มก./ล. ประสิทธิภาพของการกำจัดเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็ก คือ 99.989 % >99.999 % >99.967 % และ 94.41 % ตามลำดับ ราคาของสารเคมีที่ใช้คือ 10.25 บาท/ลิตรของน้ำเสีย

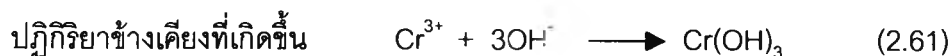
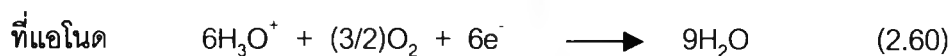
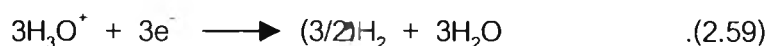
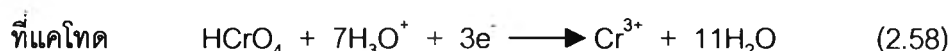
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนัก ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

Reussard , Benezech และ Lacoste (1992) ศึกษาการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งระบบเดิมที่ใช้กำจัด Cr^{6+} นั้นมีความยุ่งยาก คือ ต้องปรับ pH ของน้ำเสียเป็น 3 เพื่อเปลี่ยน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} โดยใช้ SO_2 , NaHSO_3 หรือเฟอร์รัสซัลเฟต จากนั้นเติมเบส เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่ม pH ของน้ำเสียให้เป็น 8.5 ในการตกตะกอนโครเมียมและไอออนของโลหะอื่นๆ ในรูปของไฮดรอกไซด์ ตามสมการ



ซึ่งวิธีนี้จะเกิดกากตะกอนในการบำบัดปริมาณมาก ดังนั้น Reussard และคณะจึงทดลองกำจัด Cr^{6+} ในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีอนุภาคแกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรดบรรจุระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นส่วนของแคโทด และแผ่นตะกั่วเคลือบ MnO ที่เป็นส่วนของแอโนด ในส่วนของแคโทดและแอโนดแยกกันด้วยแผ่นไดอะแฟรมของโพลีเอทิลีน ใช้น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น 39.51 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร $\text{pH} = 2.47$

ผลการทดลองพบว่า ในส่วนของแอโนดนั้น มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า pH เท่านั้น คือ ลดลงเหลือ 0.5 ในขณะที่ส่วนของแคโทด น้ำเสียมีค่า pH เพิ่มขึ้น ปริมาณ Cr^{6+} และ Cr^{3+} ลดลงเนื่องจากในส่วนของแคโทดจะเปลี่ยน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ขณะเดียวกันการ อิเล็กโทรลิซิสของน้ำ จะทำให้เกิด OH^- ซึ่งเป็นสาเหตุให้ pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงทำให้เกิดตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ตามสมการ



$\text{Cr}(\text{OH})_3$ มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกที่ pH ต่ำกว่า 7.6 ถ้า pH สูงกว่านี้ จะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบในระบบบำบัดของ Reussard และคณะนี้ไม่ต้องเติมสารเคมี ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจะเป็นเพียงค่าไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับการพัฒนาระบบนี้ให้เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียขึ้นกับรูปร่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด ระบบการแยกตะกอน กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และการปรับ pH

Zuranski (1994) ได้พัฒนาระบบบำบัดน้ำใต้ดิน ซึ่งเดิมใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัด Cr^{6+} และ Cr^{3+} ระบบนี้มีปัญหายุ่งยากในวิธีการและความถี่ของการ regenerate เรซินเมื่อใช้ไปได้ระยะเวลาหนึ่ง อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำใต้ดินที่มีไอออนของโลหะหนักโดยเฉพาะ Cr^{6+} โดยใช้อิเล็กโทรดที่ไม่เสถียรในการผลิตสารประกอบเฟอร์ริกที่ไม่ละลายน้ำได้ เพื่อใช้ตกตะกอนและดูดซับไอออนของโลหะหนักในน้ำ เฟอร์รัสไอออนถูกออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกไอออน ในขณะที่ Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} และถูกดูดซับด้วยตะกอนของ Amorphous iron oxyhydroxide จากนั้นแยกตะกอนด้วยการกรอง น้ำส่วนที่ใสถูกส่งไปที่ Air Stripper และจึงเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งระบบบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุในการ regenerate เรซินและเพิ่มอัตราการการบำบัด สรุปคือระบบการบำบัดนี้ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณโครเมียมทั้งหมดและปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด ในขณะที่วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ

ระบบบำบัดน้ำใต้ดินนี้ เรียกว่า ANDCO เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำกว่าระบบเดิมที่ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Zuranski ได้พัฒนาระบบบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในโรงงานทดลอง พบว่าสามารถลดโครเมียมไอออนทั้งหมดจาก 15-25 ppm เหลือเพียง 0.01 ppm ในขณะที่ปริมาณเหล็กในน้ำ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดลอง

Kongsricharoen และ Polprasert (1996) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียขุบโลหะ โดยการใช้กระบวนการ electro-chemical precipitation (ECP) ต่อแบบ bipolar ใช้แผ่นเหล็ก 6 แผ่น เป็นขั้วแอโนดและแคโทด ใช้เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (DC) และน้ำเสียขุบโลหะที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความเข้มข้นของโครเมียมในช่วง 570-2100 มก./ล.

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงกว่า 99 % ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำหลังผ่านการบำบัดแล้ว มีค่าน้อยกว่า 0.5 มก./ล. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือ $i=1.0$ amp (หรือ $i=6.70$ amp/m²) และค่าพีเอชเริ่มต้น 4.5 ซึ่งภายใต้สภาวะนี้จะมีพลังงานไฟฟ้า 20 kWh/m³ แผ่นเหล็กจะกำจัดโครเมียมในอัตราส่วน 1.1-2.8 kg-Fe / kg Cr ที่ถูกกำจัด

นพดล คงศรีเจริญ และจรงค์ ผลประเสริฐ (2540) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical precipitation , ECP) ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีความเข้มข้นของโลหะหนัก (โครเมียม) และสี

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (Cr^{6+}) ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียโรงชุบโลหะ หลังจากการบำบัดด้วย ECP แล้ว มีความเข้มข้นของโครเมียม (Cr^{6+}) น้อยกว่า 0.5 มก./ล. (โดยที่ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 570-2100 มก./ล.) และมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ คือ การผ่านกระแสไฟฟ้า (DC) เท่ากับ 1.0-1.5 แอมแปร์ เวลาการกักเก็บมากกว่าหรือเท่ากับ 15 นาที และอุณหภูมิประมาณ 24-45 องศาเซลเซียส และ ECP สามารถกำจัดสี (Color) และสารอินทรีย์ในรูปของ TCOD (Total Chemical Oxygen Demand) ออกจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของสี และ TCOD เริ่มต้นเท่ากับ 15200 ADMI และ 3500 มก./ล. ตามลำดับ พบว่าระบบ ECP สามารถกำจัดสีได้ประมาณร้อยละ 90-96 และกำจัด TCOD เท่ากับร้อยละ 61 ที่มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม คือ การใช้กระแสไฟฟ้า (DC) เท่ากับ 15 แอมแปร์ เวลาการกักเก็บมากกว่า หรือเท่ากับ 45 นาที และอุณหภูมิประมาณ 24-45 องศาเซลเซียส และพบว่ากลไกที่สำคัญในการกำจัดโลหะหนักและสี คือ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ของโลหะหนัก

ศรุตยา ธีระพงศ์ไพบูลย์ (2541) ได้ศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียโดยการแยกสลายด้วยไฟฟ้าร่วมกับการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งจะทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้าก่อนเพื่อนำปรอทกลับมาให้ได้มากที่สุด หลังจากนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ตกตะกอนปรอทส่วนที่เหลือในน้ำเสีย ปรอทที่ได้จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้านำมาวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์โดยเปรียบเทียบกับปรอทมาตรฐานทางทันตกรรม จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ความต่างศักย์ 0.5 - 4 โวลท์ เวลาในการทดลอง 1-5 ชั่วโมง และความเข้มข้นของน้ำเสียเมื่อเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำที่กำจัดอ็อกซิเจนแล้วด้วยสัดส่วนของน้ำเสียต่อน้ำที่กำจัดอ็อกซิเจนแล้วเป็น 1:2 1:4 1:6 1:8 และ 1:10

จากการทดลองพบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 โวลท์ และเวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายเริ่มต้น 8,385 มก./ล. ลดลงเหลือ 137 มก./ล. ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของน้ำเสีย 1:6 1:8 และ 1:10 ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 55-60 มก./ล. เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการแยกสลายด้วยไฟฟ้ามาตกตะกอนด้วย

โซเดียมซัลไฟด์ที่ระดับพีเอชและปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ต่างๆ พบว่าระดับพีเอช 8 และปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1 เท่า ของปริมาณที่คำนวณได้ตามทฤษฎี เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนปรอท ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในน้ำเสียเริ่มต้น 142 มก./ล. ลดลงเหลือ 0.003 มก./ล. ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง คือ 0.005 มก./ล.

ชยพร สงวนทรัพย์ากร และพัฒนพงษ์ สงวนรักษ์ (2542) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Method) เพื่อแยกโลหะหนักที่มีในตะกอนออกมาในรูปสารบริสุทธิ์ หรือสารประกอบที่สามารถนำมาใช้ได้อีก โดยนำกากตะกอนที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่เกินมาตรฐานมาย่อยด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 0.025 M ปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 1 บรรยากาศ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าโลหะส่วนใหญ่ที่พบในสารละลาย คือ ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล และสังกะสี ตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่ากระแสที่ใช้ในกระบวนการ พบว่ากระแสที่เหมาะสมสำหรับกำจัดทองแดง คือ 50 mA สำหรับโคโรเมียม นิกเกิล และสังกะสี มีค่าเดียวกัน คือ 1.5 A ดังนั้นจึงแยกทองแดงออกจากสารละลายก่อนด้วยกระแส 50 mA สามารถแยกได้ 99 % ในเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงปรับกระแสไฟฟ้าที่ 1.5 A เพื่อแยกโคโรเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยในเวลา 8 ชั่วโมง สามารถแยกโคโรเมียม นิกเกิล และสังกะสีได้ 93.95 % 54.71 % และ 89.95 % ตามลำดับ

นวรรตน์ พรหมจินดา , ศศิโณทัย โรจนุตมะ และ ศศิธร สว่างศรี (2543) ศึกษาการแยกสังกะสีและตะกั่วจากน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการแยกตะกั่วออกจากสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm. โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วอิเล็กโตรด คือ ค่าความหนาแน่นกระแสของแคโทด $40 A/m^2$ (กระแส 0.23 A.) โดยสามารถแยกตะกั่วได้มากกว่า 99 % ในเวลา 5 ชั่วโมง สังกะสีสามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยใช้ตะกั่วเป็นอิเล็กโตรด ให้ค่าการแยกสูงกว่าเมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็น 1.66 เท่า (91.1 % ต่อ 54.8 %) พบว่าภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ตะกั่วเป็นอิเล็กโตรด คือความหนาแน่นกระแสของแคโทด $164 A/m^2$ (กระแส 1.2 A.) สามารถแยกสังกะสีได้มากกว่า 90 % ในเวลา 6 ชั่วโมง

การแยกตะกั่วและสังกะสีออกจากสารละลายผสม โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมในการแยกโลหะแต่ละชนิด จะให้ผลเช่นเดียวกับการแยกในสารละลายโลหะชนิดเดียว ประสิทธิภาพการแยกตะกั่วและสังกะสีจากน้ำเสียมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากสารละลายสังเคราะห์เล็กน้อย คือ 97 % และ 75 % สำหรับตะกั่วและสังกะสี ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเสียมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งยังอาจจะมีไอออนอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ และมีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ