

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุในกลุ่ม 2 ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Zn มีเลขอะตอมเท่ากับ 30 และมีอยู่หลายไอโซโทปในธรรมชาติ ได้แก่ ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn และ ^{70}Zn

สังกะสีบริสุทธิ์จะมีความอ่อน ซึ่งสามารถม้วนเป็นแผ่นหรือใช้ทำเป็นแผ่นพรอยได้ ค่า Oxidation state มีค่าเท่ากับ +2 เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบ และจะคงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ได้จนถึงอุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ในสภาวะอากาศแห้ง แต่ในสภาวะที่มีความชื้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเผาในบรรยากาศจะเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น คือ ZnO ในบรรยากาศที่เย็นสังกะสีจะไม่ทำปฏิกิริยากับ คลอรีน โบรมีน และฟลูออรีน แต่ในบรรยากาศที่มีความชื้นอาจเกิดการเหนียวน้ำทำให้เกิดเป็นสารประกอบแอสไต์ขึ้นได้ ผงสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์เกิดเป็น Zinc sulfide (ZnS) แต่หากทำปฏิกิริยากับอะซิไต์จะได้ Zinc carbide (ZnC_2) สังกะสีเป็น Reducing agent ที่แรงสามารถที่จะรีดิวซ์เกลือของแมงกานีส เหล็ก นิเกิล ทองแดง และแคดเมียม เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจะรีดิวซ์ไอออน NO_3^- ให้กลายเป็นไอออน NH_4^+ และจะทำปฏิกิริยากับกรดอื่น ๆ เกิดเป็นเกลือขึ้น สังกะสีจะละลายในอัลคาไลน์และแอมโมเนีย ซึ่งเกลือของสังกะสีส่วนใหญ่จะละลายน้ำ

ดังนั้นสังกะสีจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าสังกะสีจะเป็นตัวที่นิยมถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ถ้าหากเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งสังกะสีเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา ส่วนอันตรายที่เกิดต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์

มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ ดังนั้น จึงมีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำทิ้งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย

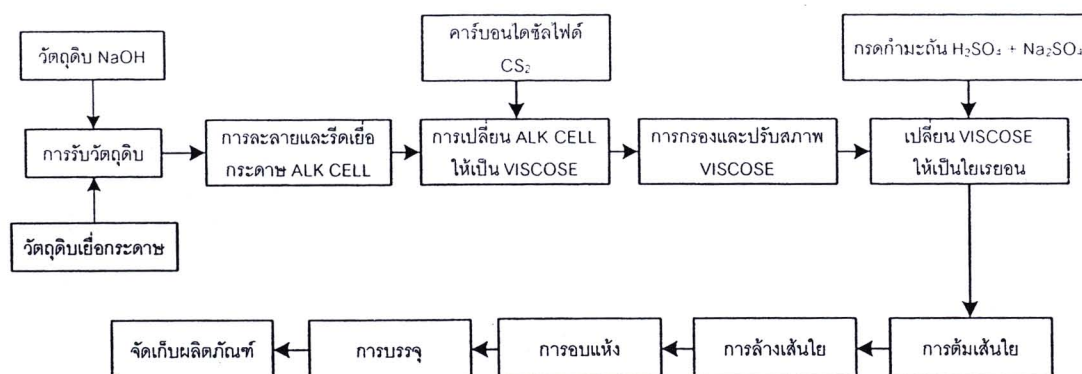
กระบวนการผลิตพอลีเอสเตอร์ของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการผลิต ดังนี้

1. กระบวนการผลิตเส้นใย จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตหลัก โดยการนำเยื่อเซลลูโลสซึ่งอยู่ในรูปแผ่นกระดาษมาผสมกับด่างโซดาไฟในถังกวน เพื่อทำเป็นเยื่อด่าง (Alkali cellulose) แล้วส่งไปยังเครื่องรีดโซดาไฟส่วนเกินออก เพื่อให้ได้เยื่อด่างที่มีอัตราส่วนของด่างโซดาไฟที่เหมาะสม เยื่อด่างจะถูกส่งต่อไปยังถังหมักเพื่อให้โมเลกุลของเซลลูโลสสั้นลงได้ตามที่ต้องการ

จากนั้นเยื่อด่างจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทต (Cellulose xanthate) และจะถูกนำไปทำละลายต่อด้วยสารละลายด่างโซดาไฟ เกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า "วิสโคส" (Viscose)

สารละลายวิสโคสนี้จะถูกนำไปกรองเพื่อนำส่วนที่ไม่ละลายออก พร้อมกับผ่านกระบวนการดูดฟองอากาศ จากนั้นสารละลายวิสโคสจะถูกสูบไปยังบ่อในสารละลายผสมที่ประกอบไปด้วย กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสังกะสีซัลเฟต (ZnSO_4)

สารละลายวิสโคสและสารละลายผสมจะถูกฉีดเป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก เส้นใยที่ได้นี้จะถูกนำไปตัดแล้วต้มให้ร้อนเพื่อให้เส้นใยเกิดการเปิดตัวได้ดี จากนั้นจะนำเส้นใยไปล้างสารเคมีก่อนที่จะเข้าสู่การอบแห้งเพื่ออัดเป็นก้อน และส่งจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2. กระบวนการผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการนำถ่านมาเผาเพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออก หลังจากนั้นนำมาเติมลงในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถ่านที่อยู่ในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยการอาร์คของขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกฉีดเข้าไปในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในถ่าน เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในถัง Sulfur separator เพื่อแยกเอาละอองไอกำมะถันออกจากก๊าซ ส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกส่งผ่านเข้าระบบควบแน่น ก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกควบแน่นเป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว และจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ Crude CS_2 ในส่วนนี้จะถูกนำมากลั่นให้เป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่บริสุทธิ์ จากนั้นถึงจะส่งไปใช้ในกระบวนการผลิต

3. กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการป้อนกำมะถันเหลวเข้าสู่เตาเผากำมะถันโดยใช้ลมจาก Blower ในการเผาไหม้ให้เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 970 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิโดยส่งผ่านหม้อน้ำ ก๊าซที่ลดอุณหภูมิแล้วจะถูกส่งเข้าไปในถัง Converter เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ออกจาก Converter จะถูกลดอุณหภูมิก่อนจะส่งเข้าหอจับก๊าซ (Absorption tower) เพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้เปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ก๊าซที่เหลือจากหอจับก๊าซจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยน้ำ (Water scrubber) เพื่อบำบัดก๊าซ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยสารละลายด่าง (Caustic scrubber) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตสามารถนำไปหลอมละลายกากมะถัน ส่วนลมร้อนและน้ำร้อนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้

2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย

การใช้วัตถุดิบของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย สามารถสรุปการใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงานผลิตเส้นใย

รายการ	ปริมาณ (ตันต่อเดือน)	ปริมาณ (ตันต่อ 1 ตันผลิตภัณฑ์)
ผลิตภัณฑ์		
เส้นใยเรยอน	11,250	1
เกลือโซเดียมซัลเฟต	8,670	0.77
วัตถุดิบ		
เยื่อกระดาษ	11,600	1.031
โซดาไฟ	6,360	0.565
สารคาร์บอนไดซัลไฟด์	1,800	0.160
กรดซัลฟิวริก	8,720	0.775
สังกะสี	35	0.003
น้ำ Soft Water	675,250	60
น้ำ Hard Water	247,600	22
ของเสีย		
น้ำเสีย	1,181,700	105
อากาศเสีย	7.3 ล้าน ลบ.ม.	650 (ลบ.ม./ตัน)
กากตะกอน Bio Sludge	410	0.037
กากตะกอน Zinc Sludge	900	0.080
กากของเสียอื่นๆ	72	0.006

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย

กระบวนการผลิตเส้นใยตามที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้เกิดน้ำเสีย 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีโลหะหนักสังกะสี กับน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกลางหรือต่างแต่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสีปนเปื้อน

1. น้ำเสียประเภทแรก มีจุดกำเนิดที่ขั้นตอนกระบวนการล้างเส้นใย ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการเกิดเส้นใย การตัดเส้นใยเป็นท่อนๆ แล้วต้มเส้นใยให้ร้อนจนเปิดตัวได้ดี น้ำที่ผ่านการล้างเส้นใยนี้จะมีสภาพเป็นกรดเพราะมีสารละลายเคมีเจือปนอยู่ คือ กรดซัลฟิวริก โซเดียมซัลเฟต และสังกะสีซัลเฟต ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น
พีเอช		1.7
ไนโตรเจน	mg/l N	5
ฟอสเฟต	mg/l P	3.2
บีโอดี	mg/l	1,900
ซีโอดี	mg/l	3,440
ไขมัน	mg/l	5.7
ของแข็งทั้งหมด	mg/l	23,700
ของแข็งละลายน้ำ	mg/l	23,600
ของแข็งแขวนลอย	mg/l	100
สังกะสี	mg/l Zn	155

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2. น้ำเสียประเภทที่สอง เป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น น้ำล้างในกระบวนการผลิตที่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสี น้ำเสียจากระบบหล่อเย็น น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรอง และน้ำเสียจากกิจกรรมอื่นๆ เป็นต้น

2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆ ได้ดังนี้

2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชื่นชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ โดยที่เรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่แต่จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งถ้าเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) แต่ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและจะต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟต โซเดียม-เมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

2.3.3 รีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวอร์ส ออสโมซิส เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่จะใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนเป็นต้น

2.3.4 การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยนํ้าออกจัดเป็นวิธีที่ง่าย ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีการบำบัดนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.3.5 อิเลคโตรไดอะไลซิส (Electro dialysis)

กระบวนการอิเลคโตรไดอะไลซิสเป็นวิธีการที่ใช้แยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้ใช้ต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการกำจัดได้

2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็น

ถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรง ภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

2.3.7 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และชนิดของสารเคมีที่ใช้เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

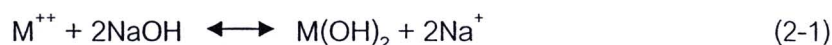
สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดตะกอนในรูปของหินปูน ซึ่งจะก่อให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะ

หนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-1 โดย M^{++} คือโลหะไอออน

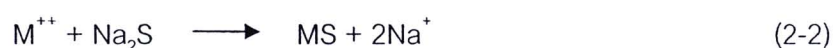


การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกจากการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ สารเคมีที่มักนิยมใช้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออน และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-2 โดย M^{++} คือ โลหะไอออน





ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการทำให้พีเอชมีค่ามากกว่า 8 ข้อเสียอีกข้อ คือจะมีปริมาณของซัลไฟด์ไอออนมากเกินไปในน้ำที่ปล่อยออก จึงต้องมีการบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำเสียออก (Freeman, 1989)

3. การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียม ตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนต ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า



4. การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ ที่สามารถใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกริยาได้ดังนี้



กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8- 11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกริยาจะลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกริยา และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกมา (ตารางที่ 2.3)



ตารางที่ 2.3 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Arsenic	Ferric Chloride	8	AsCl_2
Barium	Sodium sulfate	10	BaSO_4
Cadmium	Lime	9.5 - 12	$\text{Cd}(\text{OH})_2$
Chromic	Lime	8.0 - 9.5	$\text{Cr}(\text{OH})_3$
Cupric	Lime	9.0 - 10.0	$\text{Cu}(\text{OH})_2$
Ferric	Lime	7	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
Fluoride	Lime	12	CaF_2
Manganese	Lime	10	$\text{Mn}(\text{OH})_2$
Silver	Sodium Chloride	8	AgCl
Selenium	Sodium Sulfide	6.5	SeS_2
Mercury	Sodium Sulfide	8.5	HgS

5. ความสามารถในการละลาย

เมื่อพิจารณาสมดุลในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่าคงที่สมดุลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



$$K_{sp} = \{ \text{M}^{n+} \} \{ \text{OH}^- \}^n / \{ \text{M}(\text{OH})_{n(s)} \} \quad (2-7)$$

ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับของแข็งจะถูกเขียนโดยของแข็งเป็นสารตั้งต้น โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี ค่าคงที่สมดุลถูกแสดงด้วยตัวห้อย S แล้วตามด้วยจำนวนลิแกนด์ เขียนเป็นสัญลักษณ์ K_{si} ซึ่งจะถูกใช้แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีของแข็งเป็นสารตั้งต้น ที่

มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี และสารเชิงซ้อนที่มีจำนวน i ลิแกนด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Benjamin, 2002)

2.3.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยอิออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด ซึ่งแคโทดที่ใช้ในวัตถุประสงค์นี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ conventional metal cathode กับ high surface area cathode (HSAC) แอโนดและแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยที่แคโทดมักจะทำด้วยเหล็กกล้าหรือสแตนเลสสตีล (Stainless steel) หรือ carbon fiber ส่วนแอโนดมักจะทำด้วย platinized titanium, ruthenized titanium, ตะกั่ว และแกรไฟต์ เป็นต้น การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น ถึงที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90-95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

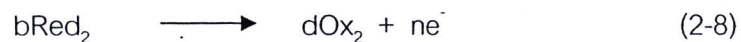
2.4 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

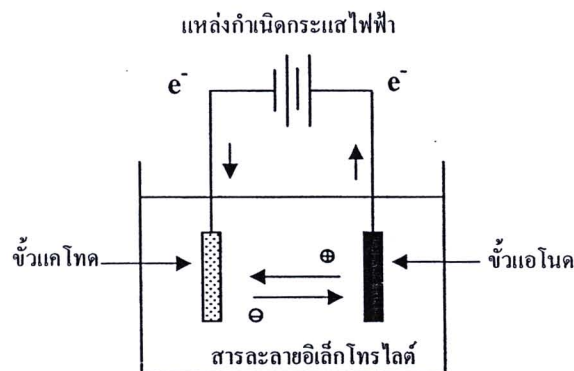
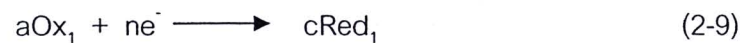
แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่

2-3 ส่วนชั่วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ชั่วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน
 ดังสมการที่ 2-4 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.2

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

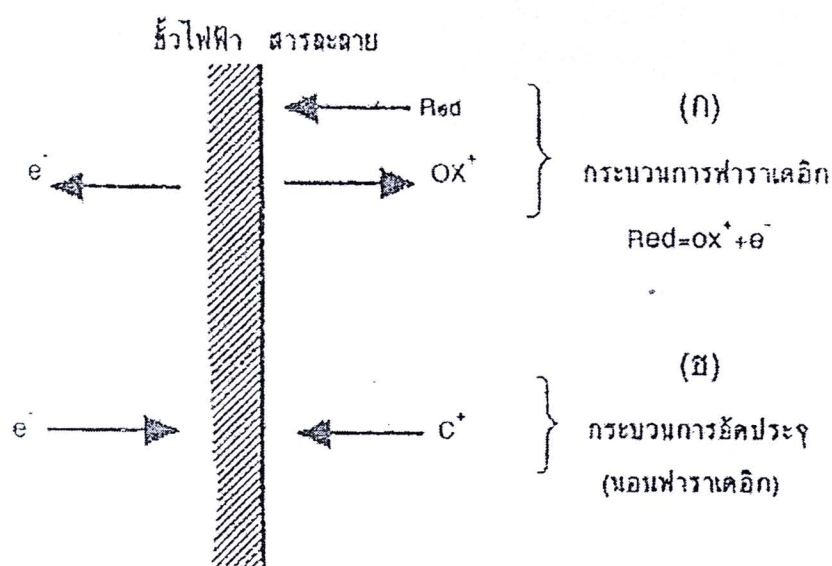


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

2.4.1 กระบวนการที่ผิวหน้าชั่วไฟฟ้า

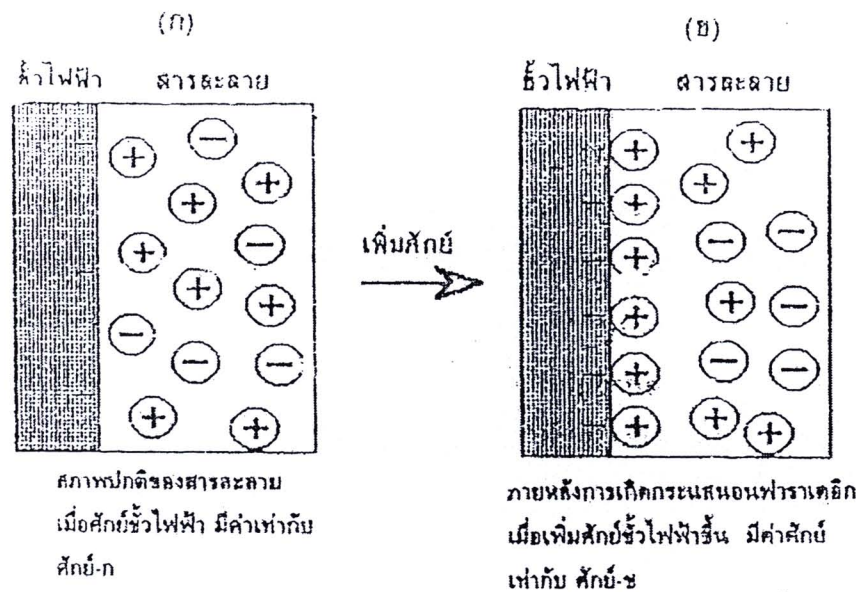
ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าชั่วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลาย กับผิวหน้าชั่วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิด กระบวนการดังกล่าวนี้ที่ชั่วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การอัดกระแสในกระบวนการอนอตาเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

ในรูปที่ 2.4 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่ว สารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่า ศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.4 (ข) สมมติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีความมากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับ สมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ที่ โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มี การไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นอนอตาเดอิก และกระแสที่ไหล ชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสอนอตาเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากอนอตาเดอิกเป็นฟาโรเดอิกในทางปฏิบัติทำ ได้โดย

- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้า ขั้วไฟฟ้าได้

- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนั้นถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยา การรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาริซ์ ทำให้กระแสในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential overvoltage)

2.4.2 สะพานเกลือ

สะพานเกลือใช้เชื่อมต่อระหว่างสองครึ่งเซลล์ ซึ่งสะพานเกลือทำจากหลอดแก้วรูปตัวยู ภายในบรรจุอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารในเซลล์และมีไอออนบวก ไอออนลบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกัน หรือทำจากกระดาษกรองชุบอิเล็กโทรไลต์ โดยสะพานเกลือทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสอง และเป็นสิ่งที่ป้องกันการเกิดการสะสมของประจุ โดยไอออนบวกจากสะพานเกลือจะเคลื่อนที่ไปยังครึ่งเซลล์ที่มีประจุลบมาก ในทางตรงกันข้ามไอออนลบก็จะเคลื่อนที่ไปยังครึ่งเซลล์ที่มีประจุมาก จึงทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ในเวลาที่ยาวนาน สะพานเกลือมีหลายชนิด ทั้งสะพานเกลือที่อยู่ในหลอดแก้ว สะพานเกลือที่เป็นกระดาษกรอง และสะพานเกลือที่เป็นแผ่นแก้วพูน

2.4.3 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลาย และขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นไม่มากนัก ซึ่งผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการ

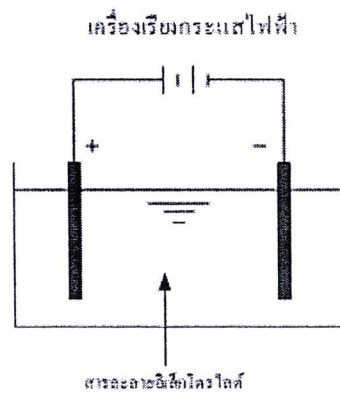
ที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

2.5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง (Mollah, 2004) สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

2.5.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

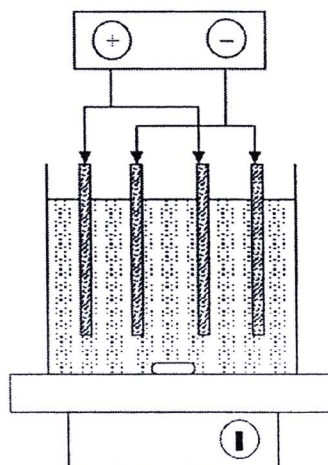
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretourius, 1991)

2.5.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel)

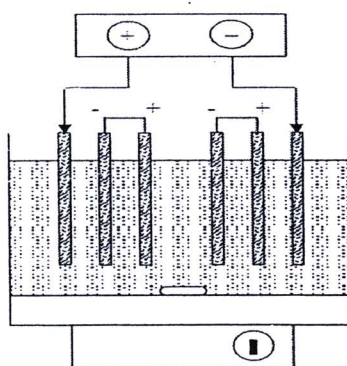
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

2.5.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

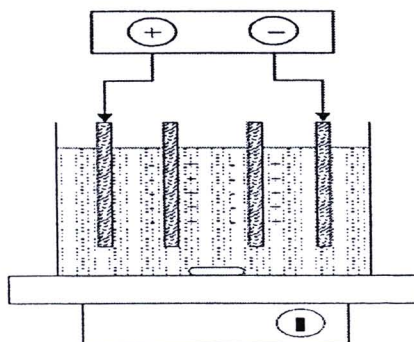
มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

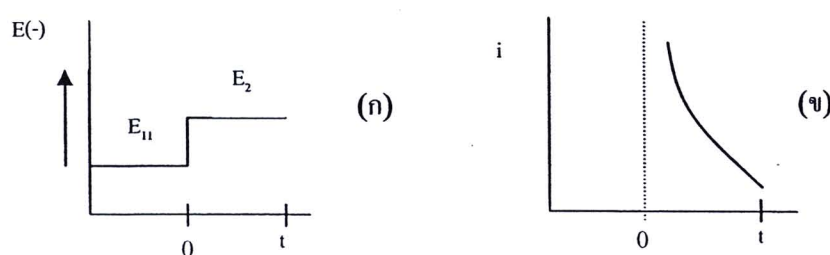
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

โดยที่ E_1 คือ ความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)



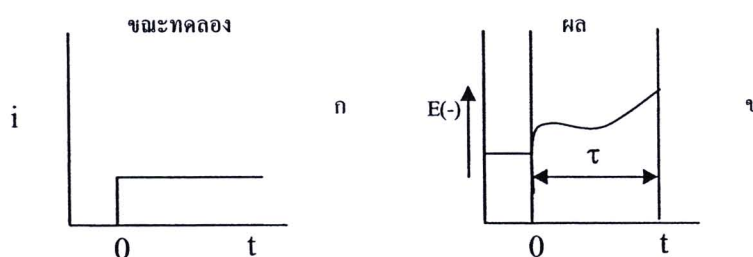
รูปที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-5



ดังนั้นความต่างศักย์จะแปรตามความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.7 ขั้วไฟฟ้า

ในแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แพลทินัม ไททาเนียม อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะและคุณสมบัติในแต่ละชนิด ดังนี้

2.7.1 แพลทินัม (Platinum)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของแพลทินัม คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งนับว่าสูงมาก เลขออกซิเดชันมีค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญ คือ +2 ถึง +4 เท่านั้น แพลทินัมเป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นเงา สีมันวาว และมีความอ่อนกว่าธาตุชนิดอื่นๆ จึงสามารถดัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ คล้ายกับเงินและทอง คุณสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก และไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงเหมาะกับการนำไปทำขั้วไฟฟ้า แบตเตอรี่ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง แต่ไม่ถูกนิยมนำมาใช้เนื่องจากมีราคาแพงมาก

2.7.2 ไททาเนียม

ไททาเนียมเป็นโลหะธาตุทรานซิชันอยู่หมู่เดียวกับเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม โดยมีลักษณะเป็นสีขาวคล้ายเงิน แข็ง และไม่เปราะ และบรรดาโลหะในหมู่ธาตุทรานซิชันทั้งหมดพบว่าไททาเนียมมีความหนาแน่นน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิปกติไททาเนียมจะไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ไททาเนียมจะทำปฏิกิริยารุนแรงกับโลหะ เกิดเป็นสารประกอบต่างๆ เช่น TiCl_4 หรือ TiO_2 เป็นต้น และยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นไดออกไซด์กับไฮโดรเจน เลขออกซิเดชันของไททาเนียมมีตั้งแต่ +2 ถึง +4 แต่ที่สำคัญและเสถียรที่สุดในสภาวะต่างๆ คือ +4

2.7.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และแข็งแรง แต่ไม่เปราะ จึงสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ใช้ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะตัวอื่นๆ ได้อย่างว่องไว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และถ้าหาก Al^{+3} อยู่ในน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสและไฮโดรไลซิสขึ้นได้

2.7.4 เหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่ในเปลือกโลกและถูกพบมากเป็นอันดับ 2 รองลงมาจาก อะลูมิเนียม โดยมีลักษณะเป็นโลหะแข็ง มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ปานกลาง เลขออกซิเดชันของเหล็กที่พบบ่อยและมีความเสถียรมีค่า +2 และ +3 อยู่ปนกันไป แต่เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นมีความเสถียรมากและมีความสามารถในการเกิดเกลือต่างๆกับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่มี Fe^{+2} เป็นส่วนประกอบนั้นเมื่ออยู่ในน้ำหรือสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6)^{+2}$ และสามารถถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศหรือออกซิเจนกลายเป็น Fe^{+3} ซึ่งแสดงสมบัติเป็นกรด เนื่องจาก Fe^{+3} มีขนาดไอออนเล็กและมีจำนวนประจุมาก ทั้ง Fe^{+2} และ Fe^{+3} สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ ส่วนค่าออกซิเดชันที่สูงกว่านี้ก็ถูกพบแต่ไม่เสถียร เหล็กสามารถทำปฏิกิริยารวมกับโลหะได้เกือบทั้งหมดเมื่อทำให้ร้อน แต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย เหล็กเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง โดยถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นจะพบว่าผิวของเหล็กจะมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นที่เรียกว่าสนิมเหล็ก

2.7.5 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อให้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้า

ตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบไปด้วยครึ่งไฟฟ้าไฮโดรเจนกับครึ่งไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้า และสารละลายที่ครึ่งไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอคติวิตีเป็นหนึ่ง ให้ถือว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ครึ่งไฟฟ้านั้นๆ

2.8.1 ศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้า (E°)

จากที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นของศักย์ครึ่งไฟฟ้า ที่เซลล์ครึ่งไฟฟ้ามีครึ่งไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นครึ่งแอโนด ครึ่งไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นครึ่งแคโทด และสารละลายที่ครึ่งไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอคติวิตีเป็นหนึ่งจะถือได้ว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ครึ่งไฟฟ้านั้นๆ โดยในความหมายของศักย์ครึ่งไฟฟ้านี้จะหมายถึงศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้าที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ โดยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์หนึ่งๆที่มีค่าแอคติวิตีเป็นหนึ่ง ไปสู่ค่าแอคติวิตีที่ในสภาวะสมดุลได้ โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้า (E°) ดังนี้

1. ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ โดยที่ครึ่งไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นครึ่งแอโนดเสมอ
2. ตามสัจนิยมของไฟฟ้าเคมี ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
3. ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ (E°) ด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือเครื่องหมายบวก จะหมายถึงครึ่งไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าครึ่งไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ครึ่งไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นครึ่งแคโทด ส่วนเครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงครึ่งไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าครึ่งไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นครึ่งแอโนด

2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R)

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ การที่กระแสจะไหลครบวงจรของเซลล์ได้นั้น ต้องมีพลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานของวงจร ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R \quad (2-11)$$

2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาไรเซชัน (E_p, π)

โพลาไรเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.2 คือ เกิดเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า 'ศักย์เกินตัว' (Overpotential, π) จึงทำให้ค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R - \pi \quad (2-12)$$

2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2-13)$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมบ์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ หรือ F คูลอมบ์ ซึ่ง F ก็คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = nF \times \text{โวลต์} \quad (2-14)$$

2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์ (Amp) โดยจำนวนของกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด จะถูกวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density, I) ส่วนการวัดกระแสที่ผ่านเข้าไปในวัสดุจะเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ซึ่งโลหะโดยส่วนใหญ่ นั้นจะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_f) ซึ่งมีหน่วยเป็น volt/cm ได้คือ

$$I = \text{ohm} \times E_f \quad (2-15)$$

$$E_f = I / \text{ohm} \quad (2-16)$$

$$V = IR \quad (2-17)$$

$$E_f = V / (R \times \text{ohm}) \quad (2-18)$$

โดย	ohm	=	ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos/cm
	V	=	ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น volt
	R	=	ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น mhos
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น amp

2.9.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะหมายถึง ความ

ต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = L / (C \times A) \quad (2-19)$$

โดย R = ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น โอห์ม
 L = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
 C = ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ซีเมน
 A = พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

2.9.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมป์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = I \times t \quad (2-20)$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = E I \times t \quad (2-21)$$

$$W = E \times Q \quad (2-22)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \quad (2-23)$$

2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ไอเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2-23

$$F \text{ (Faraday)} = e \times N \quad (2-24)$$

$$F \text{ (Faraday)} = (1.62 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \quad (2-25)$$

$$F \text{ (Faraday)} = 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-26)$$

หรือ $1 \text{ Faraday} = 96,500 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-27)$

$$X \text{ Coulomb} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \quad (2-28)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = M I t / nF \quad (2-29)$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี (กรัม)
	n	=	จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี
	M	=	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)
	t	=	เวลา (วินาที)
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อโมล)

2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 2-30

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_o - C_t) V \times 100\%}{\int_0^t I(t) dt} \quad (2-30)$$

โดย	n	=	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/โมล)
	C _o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
	C _t	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	I(t)	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ค่าประสิทธิภาพยิ่งสูงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะสูงตามไปด้วย

2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญพคุณ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ ประจุบนไอออนและขนาดไอออน

3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมขั้วไฟฟ้า

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษาครั้งนี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างกระบวนการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ตะกั่วที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททาเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ $PbSO_4$ และ SnO_2 จะถูก

ส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าการเผานั้นจะเกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

ช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและชั่วไฟฟ้าที่นิยมใช้

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ นุ่นสม (2544) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิล จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโคโรเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90 และ 190 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาถึงการแยกสังกะสีออกจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงชุบเพชรเกษมซึ่งใช้

น้ำยาชุบสังกะสีชนิดไฮยาไนต์ และน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล และตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์เป็นขั้วแอโนด จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 500 ส่วนในล้านส่วน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เท่ากับร้อยละ 96.7 และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 7.08 ในส่วนของน้ำเสียจริงที่มีความหนาแน่นของกระแส 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีเท่ากับร้อยละ 97.9 และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 8.26

Garcia-Gabaldon (2005) ได้ทำการศึกษานำกลับดีบุกและทองคำขาว โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถึงปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีมีไดอะแฟรมเซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุกมีมากขึ้น เพราะว่าที่ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทดประมาณ -1.0 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิ่มตัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลต์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่ จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุกที่ศักย์เป็นบวกมากกว่า -0.6 โวลต์ ที่ค่าศักย์ดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของพลังงานที่ใช้ และทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่ามากกว่า 70% อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุก 100% และทองคำขาวได้มากกว่า 90%

ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ทำการศึกษากำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่าง

ชั่ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถึง 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ขนาดและพื้นที่ชั่วไฟฟ้าที่นิยมใช้

อภิรดี สุนทรภา (2549) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้การตกตะกอนทางเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง เพื่อกำลั้บของดีบุก ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ พบว่าที่พีเอช 3 สามารถนำกลับดีบุกได้ 56.03% และที่พีเอช 2 สามารถนำกลับดีบุกได้ 79.68% ตามลำดับ ส่วนที่สองศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ชนิดขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์และขั้วแคโทดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถนำกลับดีบุกได้ 100% โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ชั่วไฟฟ้า 6.5×12 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร ส่วนที่สามศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริงโดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่สองมาทำการทดสอบ พบว่า ให้ค่าการนำกลับดีบุก 86.86%

รูปแบบการจัดเรียงชั่วไฟฟ้าที่เหมาะสม

Emamjomeh และ Savakumar (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อชั่วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอชเท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

สหรัฐ เชาว์รูปดี (2010) ทำการศึกษาการกำจัดสังกะสีโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชเท่ากับ 2 ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 250-4,000 มิลลิแอมแปร์ พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงกระแสที่เกิดขึ้นของการจัดเรียงชั่วไฟฟ้าแบบขนานมีรูปแบบการจัดวางชั่วไฟฟ้าที่เหมาะสมกว่าการวางชั่วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เนื่องจากการจัดเรียงชั่วไฟฟ้าแบบขนานทำให้แนวโน้มของการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดมากกว่าในตลอดของช่วงเวลาในการกักเก็บ

สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การเตรียมขั้วไฟฟ้า ควรใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างขั้วไฟฟ้า
2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่นิยมใช้คือตั้งแต่ 10 ถึง 200 แอมแปร์ต่อตาราง
เมตร
3. ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ แกรไฟต์ เหล็ก เงิน
อะลูมิเนียม สแตนเลสสตีล ตะกั่ว
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ กระแสไฟฟ้า ความหนาแน่น
กระแสไฟฟ้า พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลาย (A/V)
5. รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่นิยมคือการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน