

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทองแดง (สมชาย พวงเพิกคิก และคณะ, 2554: ออนไลน์)

2.1.1 โลหะวิทยาของทองแดง

ทองแดงเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของทองแดงบริสุทธิ์หรือสินแร่ โดยรวมตัวอยู่กับหิน ททราย ดินหรือดินเหนียว สินแร่ทองแดงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ทองแดงบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ ซึ่งมีทองแดงอยู่ถึงร้อยละ 99
2. แร่ซัลไฟด์ (Sulfide Ores) ทองแดงรวมตัวกับกำมะถันเป็นทองแดงซัลไฟด์ ในแร่บางชนิดอาจมีธาตุอื่น เช่น ดีบุกหรือเหล็กปนอยู่ด้วย สินแร่ทองแดงในรูปของซัลไฟด์ที่สำคัญๆ แร่เหล่านี้มีทองแดงอยู่ร้อยละ 40 ถึง 80
3. แร่ออกไซด์ (Oxide Ores) ทองแดงรวมตัวกับออกซิเจนอยู่ในรูปของออกไซด์ ซึ่งมีทองแดงอยู่ร้อยละ 45 ถึง 89

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมเป็นที่สองรองจากเหล็ก เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงและเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ทองแดงมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ต่ำ จึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดีและถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้า วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องจักรกล และอาวุธยุทโธปกรณ์ต่างๆ

ทองแดงเป็นโลหะที่ทนต่อการสึกกร่อนตามธรรมชาติได้ดีมาก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบสำคัญของโลหะผสม (Alloys) อีกหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Brass) หรือทองบรอนซ์ (Bronze)

2.1.2 ความเป็นพิษของทองแดง (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2554: ออนไลน์)

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูด

กลับเข้าสู่ร่างกายได้ โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่บริเวณตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ การทำงานของหัวใจผิดปกติ เกิดอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน ทำให้ตับเกิดการบวมพองและไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson Diseases คือ ร่างกายสั่งอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล และควบคุมการพูดลำบาก

2.2 โครเมียม

2.2.1 โลหะวิทยาของโครเมียม

โครเมียมมีสถานะเป็นของแข็ง เป็นธาตุในหมู่ 6 ของตารางธาตุ เป็นโลหะมันวาวสีเทา ที่สามารถขัดเป็นในได้ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถตีขึ้นรูป ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้หลายประเภท เช่น การชุบโลหะ, ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์, ผลิตเม็ดสี, ชุบเครื่องประดับ, การย้อมผ้า เป็นต้น มีสถานะออกซิเดชันหลายสถานะที่พบมากที่สุด คือ โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยที่โครเมียม (III) เป็นสถานะที่มีความเสถียรมากที่สุด ส่วนสถานะโครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงสุด

2.2.2 ความเป็นพิษของโครเมียม (สุรางค์ อนุกุล, 2542)

ความเป็นพิษของโครเมียมและสารประกอบโครเมียม สามารถแบ่งออกเป็นความเป็นพิษแบบเฉียบพลันและความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน มักพบในกรณีได้รับโดยการกินเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม เช่น กรดโครมิก ทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เป็นอันตรายต่อกระเพาะอาหารและลำไส้ ไตวายเสียชีวิตได้ ปริมาณเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมและสารประกอบโครเมียมเป็นเวลานานๆ ความเป็นพิษต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ มักมีสาเหตุจากการสัมผัสสะเกษวาเลนที่โครเมียมเป็นระยะเวลาสั้นๆ ทำให้เกิดแผลเรื้อรังได้ โดยบริเวณที่สัมผัสมักได้แก่ มือและแขน ระบบทางเดินหายใจเกิดการระคายเคืองต่อเยื่อบุโพรงจมูก ตาแดง น้ำตาไหล น้ำมูกไหล คัดและแสบจมูก ในกรณีที่รุนแรงอาจเกิดแผลเรื้อรังในเยื่อบุจมูกจนเกิดผนังกันจมูกทะลุได้ และเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogenicity) โดยหน่วยงาน The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จัดสะเกษวาเลนที่โครเมียมเป็น human carcinogen เพราะมีความสามารถในการละลายน้ำที่ดี ในคนงานที่ทำงานสัมผัสกับสะเกษวาเลนที่โครเมียมเป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไป จะมีความเสี่ยงสูงในการเกิดโรคมะเร็ง และพบว่าเป็นโรคมะเร็งปอดมากกว่าโรคมะเร็งชนิดอื่น

2.3 นิกเกิล (สุรงค์ อนุกุล, 2542)

2.3.1 โลหะวิทยาของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย มีความคล้ายกับเหล็กในด้านความเหนียวและมีความแข็งมากกว่าเหล็ก มีความคล้ายกับทองแดงในด้านการเกิดสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะไม่เกิดที่อุณหภูมิห้องแต่จะเกิดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณร้อยละ 60 ของนิกเกิลจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะนิกเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงกล จะพบว่ามีความสมบัติเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เหนือกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอะลูมิเนียม ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และอาจเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่จะไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสมและกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

2.3.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล

นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ ผิวหนัง และทางเดินอาหาร ภาวะพิษของนิกเกิลเกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก โดยความสามารถในการถูกดูดซึมขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้ไม่ดี เช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลซัลไฟด์ โดยนิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะ

การสัมผัสนิกเกิลคาร์บอนิลทางการหายใจจะทำให้เกิดอาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก และปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12 ถึง 36 ชั่วโมง อาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลว การฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบนี้ใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว

การสัมผัสนิกเกิลที่ผิวหนัง อาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบเป็นผื่นสัมผัส (Contact Dermatitis) หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆ ของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสนิกเกิลเพียงเล็กน้อย

ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนนิกเกิลอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดมวนท้อง และท้องเสีย มีรายงานอุบัติการณ์ของมะเร็งในโพรงจมูกและที่ปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสนิกเกิล

2.4 น้ำเสียอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545 และมันลิน ตันทุลเวตม์, 2542)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท น้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นน้ำล้างจากกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การล้างถัง หรือภาชนะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียมีสิ่งเจือปนจากวัตถุอันตราย

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนับว่ามีความสกปรกสูงกว่าน้ำเสียจากชุมชน ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงตั้งอยู่นอกเทศบาล เพื่อลดความเดือดร้อนรำคาญต่อชาวบ้านข้างเคียง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักสามารถบำบัดได้ง่าย เช่น โรงงานแปรรูปอาหาร เครื่องดื่ม โรงงานฟอกย้อม และโรงฆ่าสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะบำบัดได้ยาก เนื่องจากมีโลหะหนักหรือ

สารประกอบบางชนิดปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย เช่น โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานปิโตรเคมี และ โรงงานชุบโลหะ

2.5 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน ในการพิจารณาว่าจะเลือกใช้กระบวนการใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ คือ ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัดทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือกากที่ต้องกำจัด โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่

2.5.1 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยไอออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด โดยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยขั้วแคโทดมักจะทำด้วยเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นผ้าคาร์บอน ส่วนขั้วแอโนดมักจะทำด้วยแพลทินัม ไทเทเนียมเคลือบรูทิลเนียมออกไซด์ ตะกั่ว และแกรไฟต์ การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น 故ที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH Value)	5.5 - 9.0
2. ไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สังกะสี (Zn^{2+})	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium, Cr^{3+})	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Trivalent Chromium, Cr^{6+})	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. ทองแดง (Cu^{2+})	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. นิกเกิล (Ni^{2+})	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะได้ดี โดยไอออนโลหะในน้ำเสียจะถูกกำจัดอยู่ในรูปของโลหะบนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่จะใช้ในการศึกษาการกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.5.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

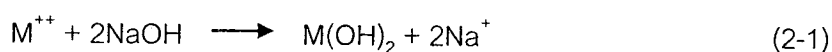
ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี และพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย

นอกจากนี้ยังทำให้ตกผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลาย น้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้น มีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson; 1985)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2-1 โดย M^{++} คือ โลหะไอออน



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

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

2.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองครึ่งเซลล์ ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนและอีกครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยครึ่งเซลล์อันหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น นำครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าโดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ

(Salt Bridge) นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้าอาจไม่ใช่สะพานเกลือ โดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน เซลล์เคมีไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ คือ

2.6.1 เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell)

ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ตัวอย่างของเซลล์กัลวานิก เช่น เซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์ปฐมภูมิ (Primary Cell)

เซลล์ปฐมภูมิ หมายถึง เซลล์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อปฏิกิริยาภายในเซลล์เกิดขึ้นและดำเนินไปข้างหน้าจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับอีกไม่ได้ เซลล์ประเภทนี้เมื่อสร้างเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้ได้ทันที เมื่อเริ่มปฏิกิริยาในเซลล์ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ ในที่สุด ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองจะเท่ากัน เรียกว่า เซลล์อยู่ในภาวะสมดุล เซลล์ประเภทนี้เมื่อใช้หมดแล้วจะนำมาอัดไฟใหม่ไม่ได้ เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ และเซลล์ปรอท ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีรูปแบบของเซลล์ต่างกันแต่มีหลักการทำงานเดียวกัน

2. เซลล์ทุติยภูมิ (Secondary Cell)

เซลล์ทุติยภูมิ หมายถึง เซลล์ที่สร้างเสร็จแล้วยังไม่มีกระแสไฟฟ้า ก่อนการนำไปใช้งานต้องทำการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปก่อน เมื่อกระแสไฟฟ้าหมดก็สามารถนำมาอัดไฟใหม่และนำกลับไปใช้ได้อีกเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตัวอย่างเซลล์ทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell)

เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือ

สังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง และการชุบโลหะ

ในการใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น โดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

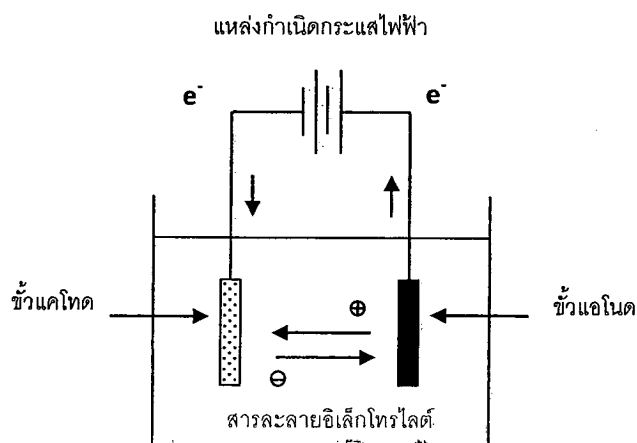
หลักการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น โดยขั้วไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนไหลลงไปที่ขั้วจะแสดงคุณสมบัติเป็นขั้วลบ (Negative Electrode) เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบมีจำนวนมากขึ้น และเรียกขั้วลบนี้อีกว่าขั้วแคโทด (Cathode) โดยขั้วแคโทดนี้จะต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วหนึ่งก็จะต้องมีการดูดอิเล็กตรอนจากขั้วตรงข้ามขึ้นมา ทำให้ขั้วเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจึงแสดงอำนาจเป็นประจุบวก (Positive Electrode) และเรียกขั้วบวกนี้ว่า ขั้วแอโนด (Anode) โดยขั้วแอโนดนี้จะต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่

การที่จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ได้ จะต้องมีการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) โดยจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดครึ่งปฏิกิริยาที่แต่ละขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2-2) ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2-3) องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้างambarkanในภาพที่ 2.1 และการเกิดครึ่งปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับจะต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่เสียไปเสมอ

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์เซลล์เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่า E^0 ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำ ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนบวกถูกรีดิวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะ
2. โมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน

ปฏิกิริยาที่แอโนด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนลบถูกออกซิไดซ์เป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
2. โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดซ์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน

ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลติกนั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและปฏิกิริยาที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยาว่าคูใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุด ปฏิกิริยาคู่นั้นจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ลักษณะรูปร่างและสภาวะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ลักษณะการถ่ายโอนมวลไปยังขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย ค่าพีเอชของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้า ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดและความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-4)

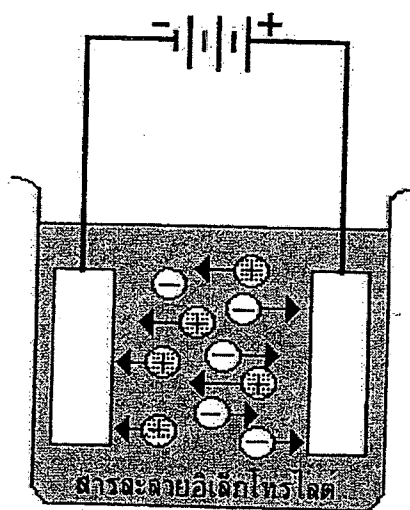
$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathod}} - E_{\text{anod}} - IR \quad (2-4)$$

2.6.3 การนำพาไอออนในสารละลาย

ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกันคือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และคอนเวกชันหรือการพา (Convection) กระบวนการนำพาไอออนทั้งสามกลไกนี้ เกิดขึ้นทั้งกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทด สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ขึ้นกับเทคนิคการวิเคราะห์นั้นๆ

1. ไมเกรชัน (Migration)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วลบและไอออนลบเคลื่อนไปทางขั้วบวก ดังภาพที่ 2.2 ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนเข้าหาหรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้นเพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการจะลดลงไปด้วย เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50 ถึง 100 เท่า ทำให้ทั้งโพแทสเซียมไอออน (K^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) แย่งเคลื่อนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าแทนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ เกิดผลดีคือ ทำให้ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันแต่เคลื่อนที่แบบการแพร่แทน

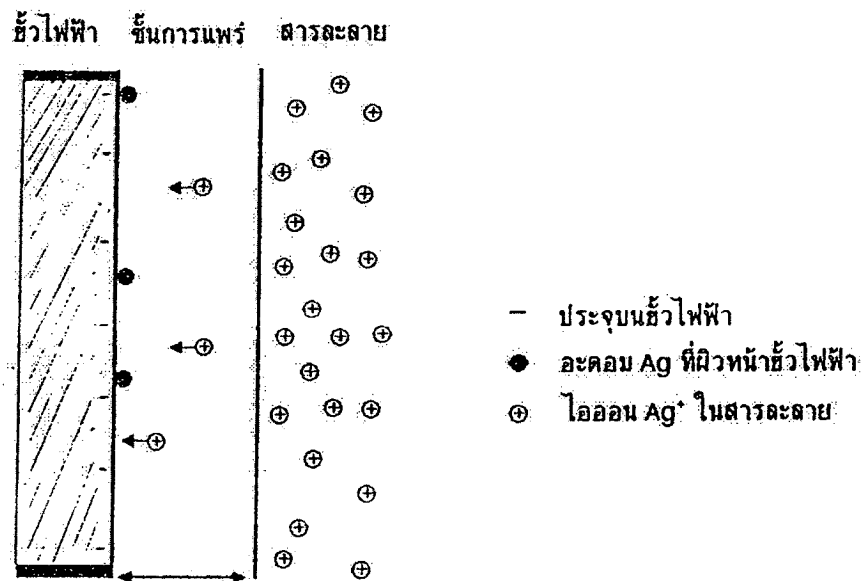


ภาพที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เช่น การพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดในสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนเงิน (Ag^+) ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่ผิวหน้าของ

ขั้วไฟฟ้าจึงเกิดการแพร่ของไอออนเงินในสารละลาย และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมากการแพร่ก็ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่
(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

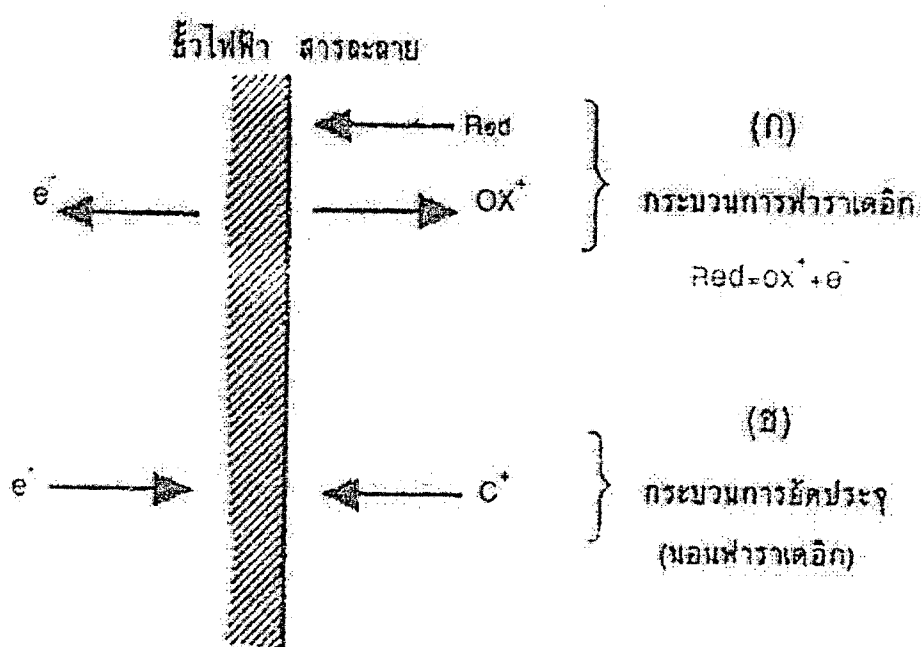
3. คอนเวกชันหรือการพา (Convection)

การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น การคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย

2.6.4 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและจ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic Process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.4 (ก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non - Faradaic Process) กระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non - Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.4 (ข)

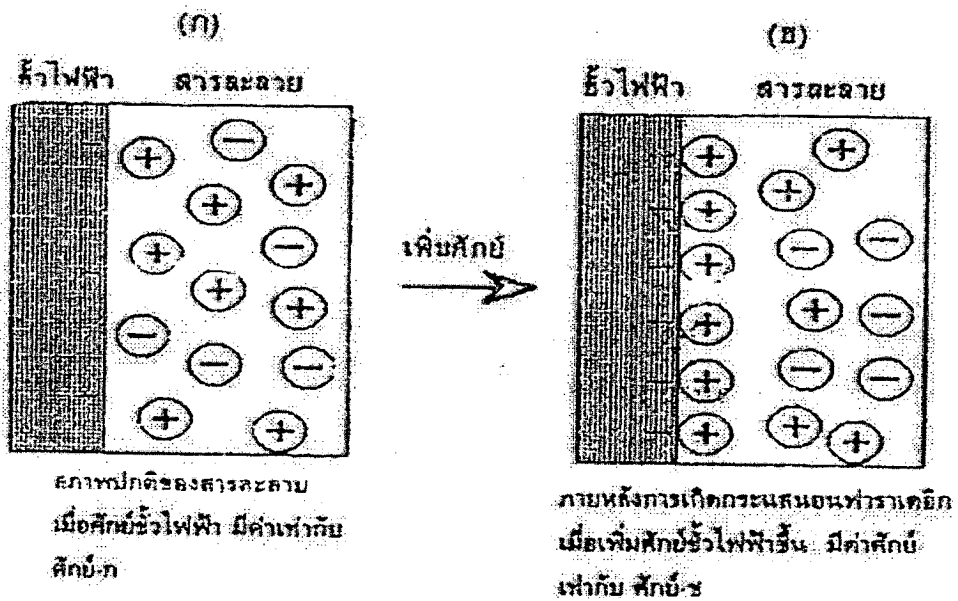


ภาพที่ 2.4 (ก) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก

(ข) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่ ตัวอย่างกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างดภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 (ก) ก่อนการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(ข) หลังการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ในภาพที่ 2.5 (ก) เดิมลวดไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์-ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของลวดไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลายมาเรียงประชิดกับลวดไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของลวดไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายตัวในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับลวดไฟฟ้าดังในภาพที่ 2.5 (ข) สมมุติให้เท่ากับ-ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์-ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ที่ โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าลวดไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสไฟฟ้าก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ลวดไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าลวดไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลชั่วขณะหนึ่งเรียกว่า กระแสไฟฟ้าจากการอัดซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

1. ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้
2. ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอย่างต่อเนื่องและสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยาการรับและจ่ายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาไรเซชัน ขณะที่เกิดโพลาไรเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาไรซ์ ทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาไรเซชันหมดไปจำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential Overvoltage)

2.6.5 โพลาไรเซชัน

โพลาไรเซชัน หมายถึง สภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ต้องการ (E_{applied}) เพื่อที่จะให้เกิดกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ ในวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้ามากผิดไปจากความต้องการ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรค่อนข้างสูง ค่า E_{applied} ที่ต้องการเพิ่มขึ้นจากค่าที่วัดได้ โดยจะเรียกค่า E ที่เพิ่มขึ้นนี้ว่า $E_{\text{overvoltage}}$ หรือ $E_{\text{overpotential}}$

โพลาไรเซชันอาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองขั้วไฟฟ้าในเซลล์เดียวกันขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

- ขนาดและรูปร่างและองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า
- องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- อุณหภูมิและอัตราเร็วในการกวนสารละลาย

- ความหนาแน่นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สมบัติทางกายภาพของสาร

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่ง สารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้นหรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลายและขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ซึ่งผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจรเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic Polarization)

เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออน จะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

2.6.6 กฎฟาราเดย์

ใน ค.ศ.1834 ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้ากับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและกล่าวว่า

1. ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิภาคกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย
2. ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยการผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเป็นปฏิภาคกับน้ำหนักสมมูลของสาร

จากกฎฟาราเดย์สามารถคำนวณหาประจุได้ดังสมการที่ 2-5)

$$Q = \int_0^t I dt = mnF \quad (2-5)$$

โดย	Q	คือ จำนวนประจุ (คูลอมบ์)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	t	คือ ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
	m	คือ จำนวนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไป (กรัมโมล)
	n	คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา (อิกวิวาเลนต์ต่อกรัมโมล)
	F	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่ออิกวิวาเลนต์)

2.6.7 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Current Efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีไฟฟ้า นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าหาได้จากมวลที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2-6)

$$\text{Current Efficiency (t)\%} = \frac{nF(C_o - C_t)V}{\int_0^t I(t) dt} \times 100 \quad (2-6)$$

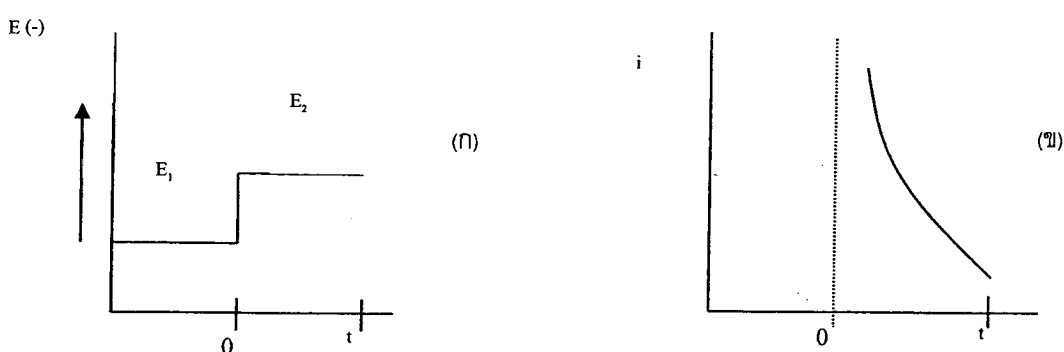
โดย	n	=	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่ออิกวิวาเลนต์)
	C _o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
	C _t	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมลต่อลิตร)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	I(t)	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

2.7 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า

จากหลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่มีความเกี่ยวข้องของหลักการทางไฟฟ้าและหลักการทางเคมี ดังนั้นการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่และการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งหลักการควบคุมในแต่ละแบบมีดังนี้

2.7.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled - Potential Method or Potentiostatic Mode)

หลักการของการควบคุมนี้คือ การควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ในกระบวนการให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดลงต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Friedrich, 1962)

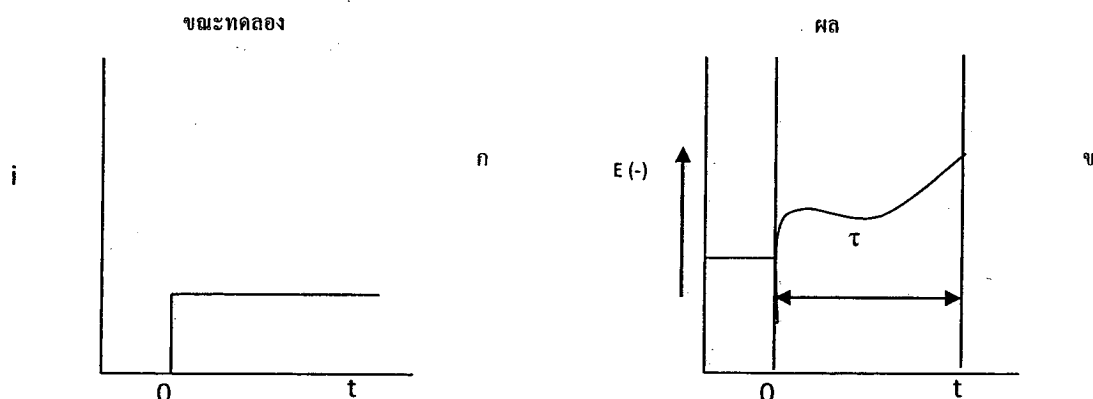
E_1 คือ ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion Limited Rate หรือ Mass Transfer Limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังภาพที่ 2.6 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)

2.7.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique โดยการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2-7)



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition Time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich, 1962)

2.8 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ในแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะต้องประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งในแต่ละขั้วนั้น จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ภายในเซลล์ ได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) มีหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงถูกต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า เพื่อใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือ กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และแกรไฟต์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า

โดยแกรไฟต์เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

ในขณะที่เดียวกันคาร์บอนเป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เฉื่อย ซึ่งมีประโยชน์ในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าหรือเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่นๆ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีราคาถูกลงและหาได้ง่ายในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแบบแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้แก๊สแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากโครงสร้างทำให้เกิดความพรุนได้โครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดไส้หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

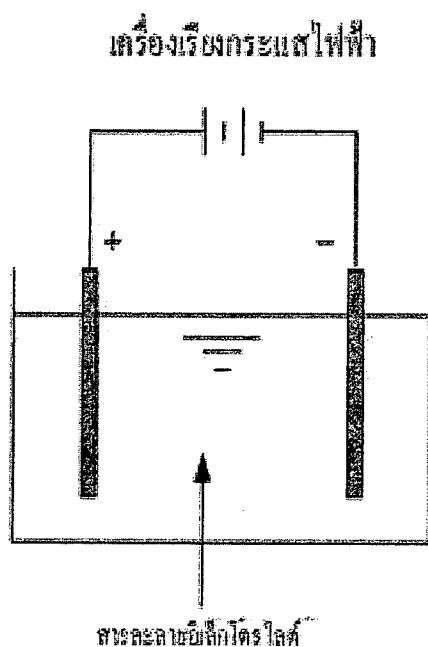
คาร์บอนเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะในรูปแบบหรือผ้าทอ โดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนจากน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งผู้ผลิตอุตสาหกรรมสามารถปรับให้มีประสิทธิภาพการทำงานได้สูงสุด โดยการปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างช่อง (Channels) ใหญ่ ซึ่งเป็นทางเข้าของไอออนต่อช่องที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งมีส่วนสำคัญกับพื้นที่ผิวและเพิ่มความจุ

2.9 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอน ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง สำหรับการกำจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้ (Mollah, 2004)

2.9.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar Electrode Single Cell)

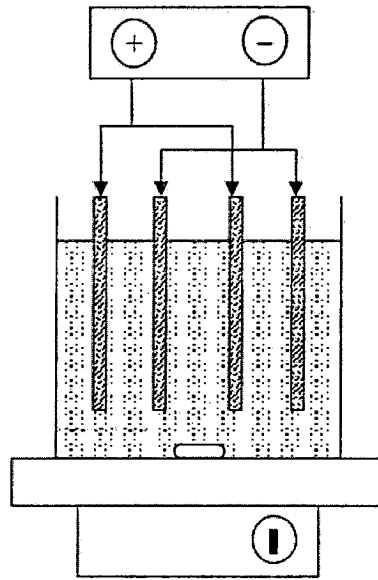
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดคือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด และอีกขั้วเป็นแคโทด ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



ภาพที่ 2.8 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretourius, 1991)

2.9.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar Electrode with Cell in Parallel)

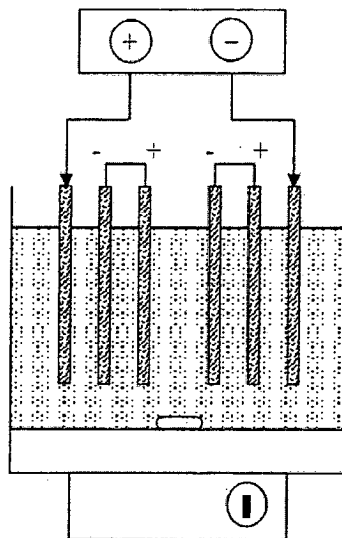
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

2.9.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar Electrode with Cell in Series)

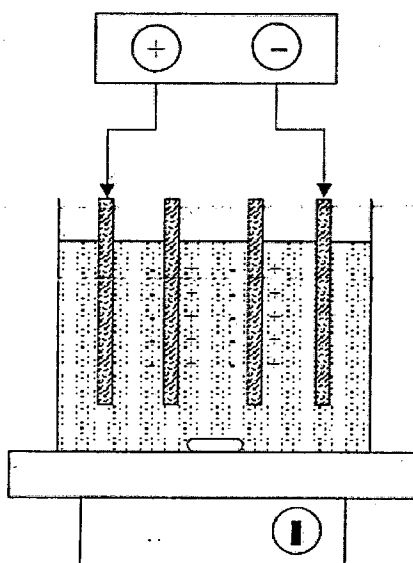
มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.9.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar Electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังภาพที่ 2.11 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



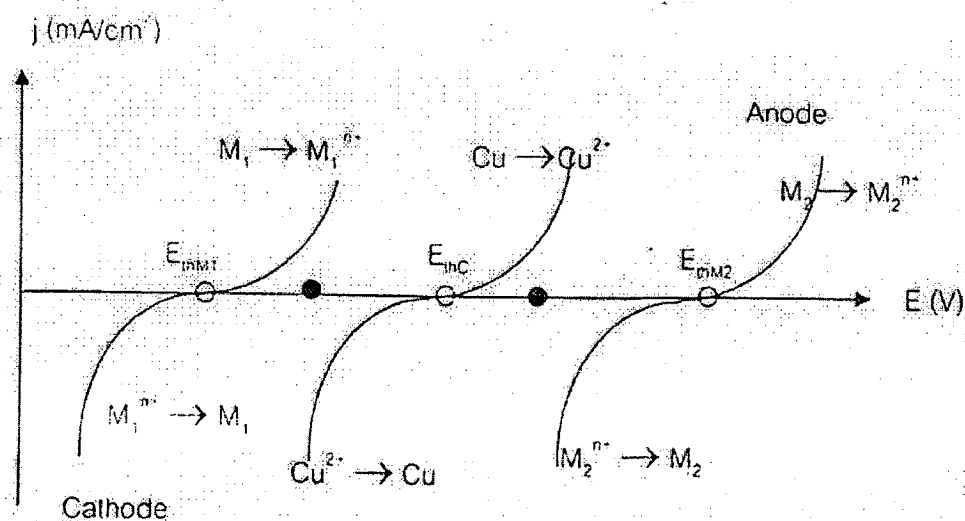
ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

2.10 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า (เก็จวลี พฤษชาทร, 2548)

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้หลักการแยกด้วยเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือ การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้าและเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนของไอออนโลหะที่ขั้ว ตัวแปรที่มีผลต่อการพอกพูน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลา และอัตราเร็วในการกวน

การแยกโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้ในรูปแบบของการแยกโลหะออกทีละชนิด (Selective Metal Deposition) หรือการแยกโลหะร่วม (Codeposition)

การแยกโลหะแต่ละชนิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำเสียจะใช้การพิจารณาค่า ศักย์ไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชันของโลหะแต่ละตัว เช่น ในสารละลายที่มีไอออนของ Cu, M₁, M₂ ซึ่งมีกราฟโพลาริเซชัน ดังภาพที่ 2.12 จะสามารถพิจารณาระบบได้ดังนี้



ภาพที่ 2.12 โพลาริเซชันของ Cu, M₁, M₂ (แก้จวลี พุกษาท, 2548)

1. ถ้าไอออน M₁ และ M₂ ไม่เป็นไอออนโลหะ พบว่า ไอออน M₁ และ M₂ จะไม่เกิดปฏิกิริยาการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า แต่อาจตกตะกอนหรือคงอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

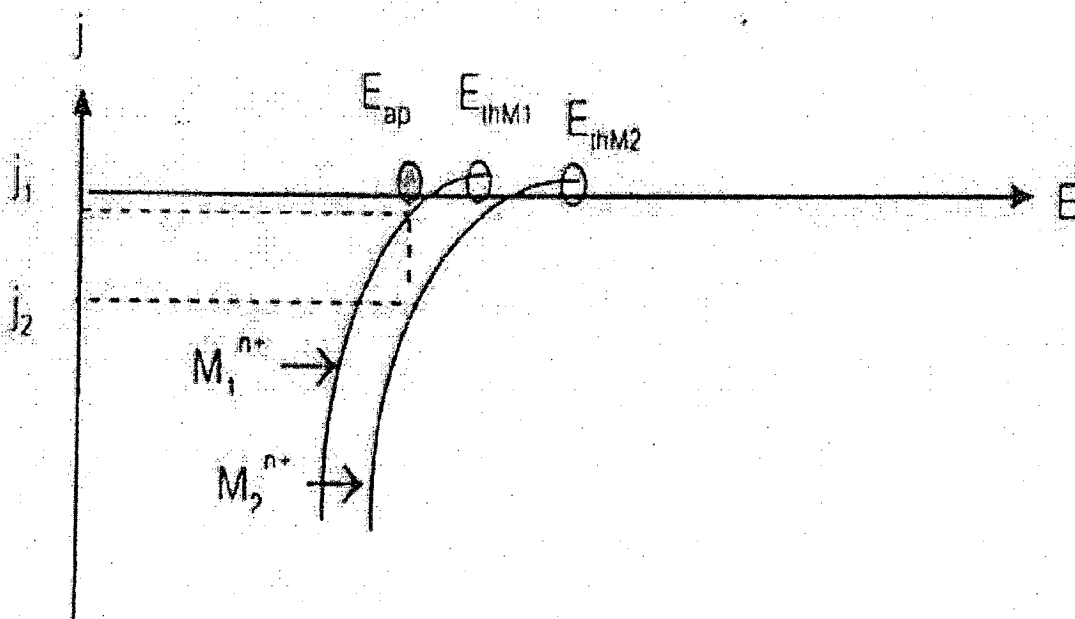
2. ถ้าไอออน M₁ และ M₂ เป็นไอออนโลหะ โดยมี $E_{M2} > E_{Cu} > E_{M1}$ การที่จะแยกโลหะแต่ละตัวออกจากกันนั้น เริ่มแรกจะต้องแยกโลหะ M₂ ก่อนเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันสูงสุด โดยต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่างค่า E_{thM2} กับ E_{thCu} ก่อนเพื่อให้ M₂ แยกออกไปจากสารละลายทั้งหมด จากนั้นจึงเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเป็นระหว่างค่า E_{thCu} กับ E_{thM1} เพื่อให้แยก Cu จนหมด จากนั้นจึงแยก M₁ต่อไป โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าค่า E_{thM1}

3. ในกรณีที่ต้องการแยกโลหะจากของแข็ง ให้ใช้ของแข็งนั้นเป็นขั้วแอโนด ซึ่งขั้วนี้จะเป็นขั้วแบบละลายได้ (Soluble Anode) ถ้าของแข็งนั้นมีองค์ประกอบเป็น Cu, M₁ และ M₂ ถ้าต้องการแยก Cu ออกจากแอโนดและแยกโดยให้ไปพอกพูนที่แคโทด ให้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่มีไอออนของ M₁, M₂ และกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดอยู่ต่ำกว่า E_{thM2} เพื่อไม่ให้ M₂ ถูกออกซิไดซ์ แต่ M₁ และ Cu จะถูกออกซิไดซ์ออกมาทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมี Cu²⁺ และ

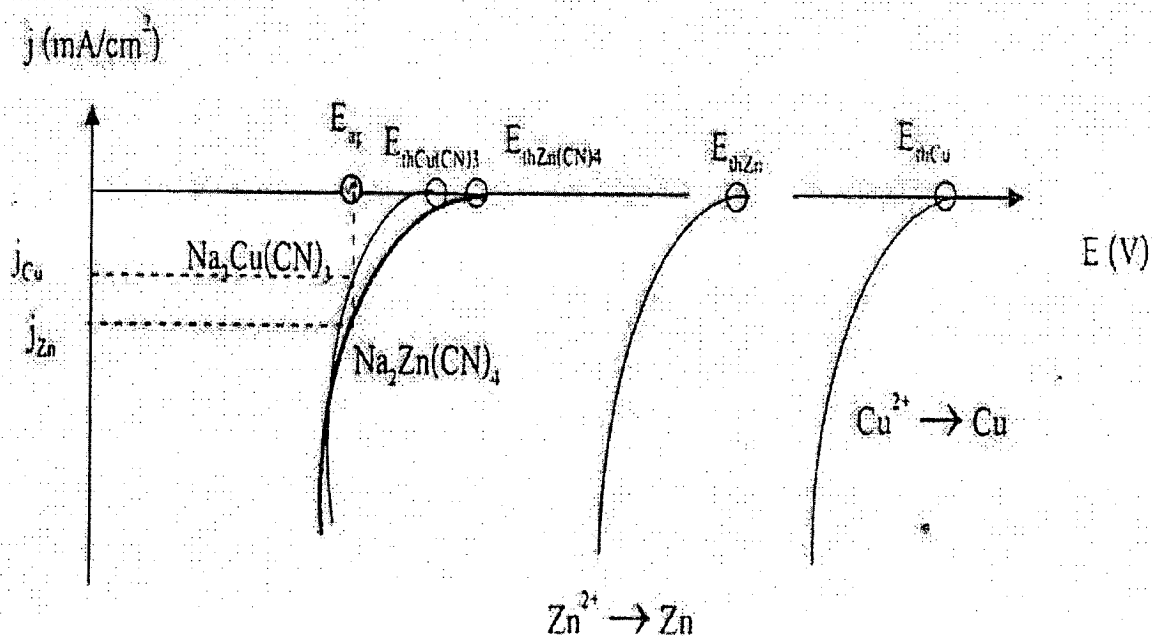
M_1^{n+} เพื่อให้ Cu ไปพอกพูนที่แคโทดอย่างเดียวจึงต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดอยู่ระหว่าง E_{Cu} กับ E_{M_1}

ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการให้มีการแยกโลหะร่วมของโลหะหลายชนิดก็สามารถทำได้ โดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ขั้วไฟฟ้า ดังตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันภาพที่ 2.13 โดยแสดงเฉพาะส่วนของเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic Curve) หรือส่วนของปฏิกิริยารีดักชันของโลหะ M_1 และ M_2 ซึ่งมีค่าศักย์เกินตัวเท่ากับศูนย์ สามารถพิจารณาได้ว่า ถ้าต้องการแยกโลหะ M_1 และ M_2 ออกมาพร้อมกันต้องกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของโลหะ M_1 ($E_{ap} < E_{M_1}$) ระบบจะเกิดการพอกพูนของทั้ง M_1 และ M_2 ร่วมกัน

การแยกโลหะร่วมเกิดขึ้นได้ยากในบางครั้งเนื่องจากค่าศักย์สมดุลที่ต่างกันมาก ดังนั้น การลดค่าศักย์สมดุลมาให้ใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการแยกโลหะร่วมได้ดียิ่งขึ้น เช่น กรณีของ ทองแดงกับสังกะสี (Cu/Zn) ดังในภาพที่ 2.14 ซึ่งมีค่าศักย์สมดุลต่างกัน แต่สามารถทำให้ค่าศักย์สมดุลมาใกล้เคียงกันได้ด้วยการใช้ไอออนที่อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน คือ $Cu(CN)_3^{2-}$ กับ $Zn(CN)_4^{2-}$ ไอออนในรูปสารเชิงซ้อนจะช่วยทำให้ค่าศักย์สมดุลของสารเปลี่ยนแปลงได้



ภาพที่ 2.13 โพลาริเซชันของ M_1 , M_2 (แก้จวลี พุกษาทร, 2548)



ภาพที่ 2.14 โพลลาไรเซชันของทองแดงกับสังกะสีและสารเชิงซ้อนของทองแดงกับสังกะสี

(แก้จวลี พฤษชาทร, 2548)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัฐบรรณ วรณรัตน์ (2542) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิกเกิลด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ใช้สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 ลิตร ขั้วแคโทดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม พื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนดทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชและปริมาณกระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยในช่วงพีเอช 3 ถึง 3.5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 32 ในการแยกนิกเกิลที่ร้อยละ 60 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟูริก และหากปรับค่าพีเอชด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุลบ โดยหากมีการปนเปื้อนเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 70

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน ศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สามเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลัก เมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโคโรเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โคโรเมียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 90 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

Rana และคณะ (2004) ได้ศึกษาการกำจัดโคโรเมียมไอออนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี ใช้ขั้วแคโทดเป็นคาร์บอนแอโรเจล (Carbon Aerogel) โดยทำการทดลองที่พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น 2 ถึง 7 ความเข้มข้นของโคโรเมียม 2 ถึง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร และกระแสไฟฟ้า 0.3 ถึง 1.3 แอมแปร์ ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้น และกระแสไฟฟ้า มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะ โดยไอออนโลหะจะเคลื่อนที่มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นลดลง และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สภาวะการกำจัดโคโรเมียมที่ดีที่สุด คือ ค่าพีเอชเริ่มต้น 2 และกระแสไฟฟ้า 0.8 แอมแปร์ สามารถกำจัดโคโรเมียมได้ร้อยละ 98.5

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย โดยศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้าที่ 1 3 5 และ 7 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้วที่ 1 1.5 และ 2 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่ผิว 722 541.5 และ 361 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 21.11 31.67 และ 63.33 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 1.59 และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 16.9 ถึง 74.9 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที (เวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที) ค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อกิโลกรัมโครเมียม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงที่สุดมากกว่าร้อยละ 99

Orinakova และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายคลอไรด์และสารละลายซัลเฟต ที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG (Paraffin Impregnated Graphite) พบว่ากลไกการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG แตกต่างกัน โดยสารละลายคลอไรด์จะเป็นกลไกของ Ni^{2+} รั่วอิเล็กตรอน เกิดเป็น NiCl^+ ขณะที่สารละลายซัลเฟตจะเป็นกลไกของ H^+ รั่วอิเล็กตรอน เกิดเป็น NiOH^+ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบด้วย SEM (Scanning Electron Micrographs) เชื่อได้ว่าคุณภาพการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG น่าจะมีผลมาจากชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

Oztekın และ Yazıcıgil (2006) ได้ศึกษาการนำโลหะกลับคืนจากสารละลายผสมคีเลต ได้แก่ EDTA NTA และซีเตรต โดยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้า จัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย กั้นสารละลายด้วยเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (commercial cation-exchange membrane; CEM) ใช้คีเลตเอเจนเป็นสารละลายฝั่งแคโทดและใช้ NaNO_3 เป็นสารละลายฝั่งแอโนด ผลการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายฝั่งแคโทดและแอโนด ความเข้มข้นของโลหะและชนิดของเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน คีเลตเอเจน และโลหะบนขั้วที่สามารถนำกลับคืนได้เป็นตัวกำหนดความสามารถในการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยสามารถนำโลหะกลับคืนได้มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายฝั่งแอโนด ความเข้มข้นและ

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการนำโลหะกลับคืนภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตติ จิตฺรุ (2550) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ร้อยละ 99 ที่ทุกสภาวะการทดลอง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลงด้วย ในระบบต่อเนื่องต้องการระยะเวลาเก็บกักประมาณ 20 120 และ 180 นาที ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อกำจัดเฮกซะวาเลนท์คงเหลือไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยระบบที่ละเทสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมได้ 0.52 0.77 และ 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร และระบบต่อเนื่องกำจัดได้ 0.38 0.31 และ 0.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอชสุดท้ายของน้ำทิ้งมีค่าประมาณ 9.5 ถึง 11 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ปทุมทิพย์ เสมอภาค (2550) ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจาง โดยใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับขั้วโลหะ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเดี่ยว นิกเกิลและสังกะสีเจือจางที่ความเข้มข้น 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าฝั่งแคโทดประมาณ 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยสามารถแยกนิกเกิลและสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 94 และ 80 ในเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 11.9 และ 14.9 สำหรับสังกะสี ในการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางผสมจะต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้ได้ร้อยละการกำจัดเท่าเดิม โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีคือ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อการขจัด พบว่าเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีมาก

Emamjomeh และ Sivakumar (2009) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลาย

เซลล์ โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสที่ 12.5 ถึง 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลที่ 150 ถึง 400 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอชเริ่มต้นที่ 4 ถึง 8 และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นที่ 5 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอชเท่ากับ 6 และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

พิชิต ลีกุล (2553) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียมีสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 30 นาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบนี้สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงลงได้มาก พร้อมกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็นร้อยละ 100 ของประสิทธิภาพเชิงกระแส

ศรัณยู ศรีธัญรัตน์ (2553) ได้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 0.5 โมลต่อลิตร จัดเป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 12 ได้ร้อยละ 99.96 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 33.89 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 25.96 และผลการทดลองในน้ำเสียจริง สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 60 ได้ร้อยละ 99.06 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 61.34 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 31.15 ส่วนเซลล์

เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 60 ได้ร้อยละ 44.52 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 23.62 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 24.09

Akbal และ Camci (2011) ได้ศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม โดยใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าฝั่งแอโนด และอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทด สามารถกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลได้ร้อยละ 100 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พีเอชเท่ากับ 3 หลังจากตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า 20 นาที่ โดยใช้พลังงาน 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ลักษณะน้ำ ตัวอย่าง	องค์ประกอบ โลหะหนักใน ตัวอย่าง	รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แอโนด	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แคโทด	ค่าความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า	ร้อยละการ กำจัด	อัตรา การไหล	เวลาที่ใช้ การกำจัด
มะลิ หุ่นสม, 2544	น้ำเสียโรงงาน ชุบโลหะ	Cu ²⁺ 283 mg/l Cr ⁶⁺ 220 mg/l Ni ²⁺ 128 mg/l	มีรอยต่อด้วยเยื่อ เลือกผ่านไอออน ลบ	แพลทินัม	เหล็กกล้าไร้ สนิม	Cu ²⁺ 10 A/m ² Cr ⁶⁺ 90 A/m ² Ni ²⁺ 90 A/m ²	Cu ²⁺ 98.9 Cr ⁶⁺ 99 Ni ²⁺ 99	420 มล./ นาที	Cu ²⁺ 5 ชม. Cr ⁶⁺ 13 ชม. Ni ²⁺ 13 ชม.
ศรายุทธ ลาภพูนผล, 2549	น้ำเสีย สังเคราะห์	Cr ⁶⁺ 20 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	เหล็ก	69 A/m ²	99	21.11 มล./นาที	2 ชม,
ตติ จิตรู, 2550	น้ำเสีย สังเคราะห์	Cr ⁶⁺ 100 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	เหล็ก	50.81 A/m ²	99	10 มล./ นาที	2 ชม.
Emamjomeh และ Sivakumar, 2009	น้ำเสีย สังเคราะห์	F ⁻ 10. mg/l	ไม่มีรอยต่อ	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	50 A/m ²	99	150 มล./นาที	53 นาที
ฉัฐบรรณ วรณรัตน์, 2542	น้ำเสีย สังเคราะห์	Ni ²⁺ 1,000 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	ไทเทเนียม เคลือบรูทริ เนียมออกไซด์	เหล็กกล้าไร้ สนิม	140 A/m ²	89.95		8.15 ชม.

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	ลักษณะน้ำ ตัวอย่าง	องค์ประกอบ โลหะหนักใน ตัวอย่าง	รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แอโนด	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แคโทด	ค่าความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า	ร้อยละการ กำจัด	อัตรา การไหล	เวลาที่ใช้ การกำจัด
ปทุมทิพย์ เสมอภาค, 2550	น้ำเสีย สังเคราะห์	Ni ²⁺ 22 mg/l Zn ²⁺ 100 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	ไทเทเนียม เคลือบรูทรี เนียมออกไซด์	ผ้าคาร์บอน	Ni ²⁺ 130 A/m ² Zn ²⁺ 150 A/m ²	Ni ²⁺ 90.7 Zn ²⁺ 79.5		6 ชม.
พิชิต ลีกุล, 2553	น้ำเสีย โรงงานผลิตเส้น ใย	Zn ²⁺ 155 mg/l	มีรอยต่อด้วยแผ่น แก้วพูน	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้ สนิม	37.5 A/m ²	98		50 นาที
ศรัณญ ศรีรัญรัตน์, 2553	น้ำเสียจาก ห้องปฏิบัติการ เคมีวิเคราะห์	Ni ²⁺ 1,281 mg/l	มีรอยต่อด้วยวุ้น อิมด้วยด้วย โซเดียมคลอไรด์	แกรไฟต์	แกรไฟต์	140 A/m ²	99.06		60 นาที
Akbal และ Camci, 2011	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	Cu ²⁺ 45 mg/l Cr ⁶⁺ 44.4 mg/l Ni ²⁺ 394 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	อะลูมิเนียม	Cu ²⁺ 100 A/m ² Cr ⁶⁺ 100 A/m ² Ni ²⁺ 100 A/m ²	Cu ²⁺ 100 % Cr ⁶⁺ 100 % Ni ²⁺ 100 %		20 นาที