

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 น้ำเสีย [3-4]

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในปริมาณสูง จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป น้ำเสียก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ แก่ลำน้ำซึ่งเป็นที่รองรับ เช่น ทำให้เกิดการเน่าเหม็นหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เป็นต้น

น้ำเสีย ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 หมายถึงของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนและปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น สิ่งเจือปนต่างๆ ที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสีย ได้แก่ สารอินทรีย์ต่างๆ กรด เบส ของแข็ง หรือสารแขวนลอย และสิ่งที่ย่อยอยู่ในน้ำ เช่น น้ำมัน ไขมัน เกลือและแร่ธาตุ ที่เป็นพิษ เช่น โลหะหนัก สารที่ทำให้เกิดฟอง ความร้อน สารพิษ ยาฆ่าแมลง สี กลิ่น และสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น

น้ำเสียสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามแหล่งที่มา คือ น้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากการเกษตร และน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากชุมชน หมายถึง น้ำเสียต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนรวมทั้งกิจกรรมที่เป็นอาชีพด้วย ตัวอย่างน้ำเสียชุมชน ได้แก่ น้ำเสียของหมู่บ้าน อำเภอ จังหวัด เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าน้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียสาธารณะ ซึ่งหน่วยราชการควรเป็นผู้รับผิดชอบในการดำเนินการบำบัดให้กลายเป็นน้ำสะอาดพอเพียงที่จะทิ้งลงลำน้ำสาธารณะได้

น้ำเสียจากเกษตรกรรม การทำการเกษตรอย่างไม่มี การวางแผนที่ดีพอ อาจก่อให้เกิดผลกระทบมากต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพราะเกษตรกรรมเกี่ยวข้องกับน้ำและสารเคมีชนิดต่างๆ จึงก่อให้เกิดปัญหาสารเคมีรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำได้ง่าย ไม่ว่าจะ เป็นทางตรง หรือการที่น้ำชะล้างจากดินสู่แม่น้ำ ซึ่งทั้งนี้จะส่งผลกระทบต่อทั้งชนิดเฉียบพลัน และเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงาน อุตสาหกรรมทุกประเภท น้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นน้ำล้างจากกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การล้างถัง หรือภาชนะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียมีสิ่งเจือปนจากวัตถุอันตรายด้วยเสมอ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนับว่ามีความสกปรกสูงกว่าน้ำเสียจากชุมชน ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงตั้งอยู่นอกเทศบาล เพื่อลดความเดือดร้อนรำคาญต่อชาวบ้านข้างเคียง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักสามารถบำบัดได้ง่าย เช่น โรงงานแปรรูปอาหาร เครื่องดื่ม กระดาษ น้ำตาล ฟอกย้อม โรงฆ่าสัตว์ ฟอกหนัง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะบำบัดได้ยากเนื่องจากมีโลหะหนักหรือสารประกอบบางชนิดปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย เช่น โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ชุบโลหะ แบตเตอรี่ ปิโตรเคมี เป็นต้น

น้ำเสียจากแหล่งต่างๆ จะมีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันออกไป รายละเอียดของลักษณะน้ำเสียเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบเพื่อให้ได้ระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง และสำหรับผู้ควบคุมระบบให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ลักษณะน้ำเสียสามารถแบ่งแยกเป็น

ลักษณะทางกายภาพ น้ำเสียที่มีองค์ประกอบและลักษณะภายนอกที่สัมผัสได้ เช่น ปนเปื้อนด้วยของแข็ง มีกลิ่น มีสีเปลี่ยนไปจากน้ำสะอาด เป็นต้น

ลักษณะทางเคมี จะบ่งบอกองค์ประกอบต่างๆที่มีในน้ำเสีย เช่น สารอินทรีย์ ส่วนประกอบที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำมัน นอกจากนี้น้ำเสียจากชุมชนอาจมีปริมาณของผงซักฟอก สารประกอบฟีนอล และยาฆ่าแมลงต่างๆ ซึ่งย่อยสลายได้ยากปนเปื้อนอยู่บ้าง สารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำต่างๆ ไป ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โลหะหนัก และแก๊สละลายน้ำ สารอนินทรีย์บางชนิดมีส่วนช่วยให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นไปได้ด้วยดี ในขณะที่สารอินทรีย์บางชนิดอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

ลักษณะทางชีวภาพ ได้แก่ แบคทีเรีย รา (Fungi) สาหร่าย (Algae) โปรโตซัว (Protozoa) และ ไวรัส (Virus)

2.2 วิธีการบำบัดน้ำเสีย [4]

วิธีบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย โดยปกติของแข็งหรือตะกอนแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำเสียมักบำบัดด้วยวิธีกายภาพ ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายในน้ำเสียต้องบำบัดออก โดยใช้วิธีเคมีหรือวิธีชีวภาพซึ่งสามารถทำให้ตกเป็นตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายกลายเป็นตะกอนแขวนลอยที่รวมกันเป็นก้อนใหญ่จนสามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้โดยวิธีกายภาพ

เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภท การเลือกใช้ระบบใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ลักษณะของน้ำเสีย
- ระดับการบำบัด
- สภาพท้องถิ่น

ไม่ว่าจะเลือกใช้ระบบใดๆ ก็ตาม จะต้องเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและต้องมีราคาประหยัด ลักษณะของน้ำเสียและระดับการบำบัดจะเป็นเครื่องกำหนดอย่างกว้างๆ ถึงระบบการบำบัดน้ำเสียที่อาจนำมาใช้ได้ น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ควรต้องใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพ ส่วนน้ำเสียที่มีสารเคมีหรือโลหะหนักก็ควรใช้ระบบเคมี ในกรณีระบบชีวภาพ ก็ต้องพิจารณาดูว่าน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงหรือต่ำด้วยเพื่อจะได้กำหนดใช้ระบบบำบัดให้เหมาะสมที่สุด

น้ำเสียจากชุมชนเป็นน้ำเสียที่บำบัดง่ายที่สุด เนื่องจากส่วนประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำ มีอาหารเสริมครบถ้วนตามความต้องการของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายน้ำเสีย นอกจากนี้ตัวน้ำเสียเองยังมีสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่เหมาะสม เช่น ค่าความเป็นกรด-เบส เป็นกลาง และมีจุลินทรีย์อยู่ในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพ เช่น ระบบเอเอส (Activated sludge) บ่อบำบัดกลางแจ้ง เป็นต้น

ในกรณีที่น้ำเสียมีความสกปรกอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์ต่างๆ เช่น โลหะหนัก หรือสารพิษ การบำบัดน้ำเสียมักใช้กระบวนการทางเคมีเสมอ กระบวนการทางชีวภาพไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหรือสารพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าการลงทุน น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะต่างๆ เป็นตัวอย่างของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก เช่น โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี

เป็นต้น ระบบการบำบัดที่ใช้จึงควรเป็นระบบบำบัดแบบเคมี ซึ่งมักแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยวิธีตกผลึกให้เกิดสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ต่างๆ และตกตะกอนออกจากน้ำ

ในกรณีโรงงานอุตสาหกรรม ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมซึ่งมีระบบบำบัดน้ำเสียรวม โรงงานอุตสาหกรรมอาจบำบัดน้ำเสียตัวเองเพียงเบื้องต้น เพื่อให้ น้ำเสียมีความเข้มข้นถึงระดับที่สามารถส่งไปบำบัดที่ระบบบำบัดรวมของนิคมอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่มีค่าบีโอดีสูงมาก ก็อาจใช้ระบบบ่อเติมอากาศหรือบ่อหมักกลดบีโอดีให้เหลือต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อส่งไปบำบัดต่อด้วยระบบบำบัดรวม เป็นต้น

กระบวนการบำบัดโดยรวมที่ใช้ส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

- ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น (Preliminary treatment) ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การกำจัดตะกอนหนัก และการทำให้ลอย เป็นต้น
- ระบบบำบัดขั้นสอง (Secondary treatment) ได้แก่ การแยกและกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ และตะกอนแขวนลอย มักใช้ในกระบวนการทางชีววิทยา
- ระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) ได้แก่ การกำจัดสารอื่นๆ ที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง โดยเฉพาะสารไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

ในแต่ละขั้นตอนการบำบัดจะใช้กระบวนการต่างๆ ที่สามารถแบ่งได้ 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การบดตัด (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Grit removal) เป็นต้น

กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามวลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สลอยขึ้นสู่อากาศ และ

ได้ จุลชีพเพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ Activated sludge, Trickle filter, Aerated lagoon, Anaerobic filter, Anaerobic pond, Stabilization pond เป็นต้น

กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ Ion exchange, Carbon adsorption, Reverse osmosis, Electrodialysis เป็นต้น

2.3 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน [5 - 8]

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งวิธีที่นิยมใช้มีดังนี้

1. การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่มีอยู่ ทำให้เกิดตะกอนของเกลือโลหะหนักที่ไม่ละลายในน้ำเสีย ก่อให้เกิดตะกอนที่สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยทั่วไปแล้วนิยมตกตะกอนโลหะหนักในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ จึงมักเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) แต่เนื่องจากราคาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว (Lime) มีราคาถูกลงกว่า จะหาได้ง่ายกว่า วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นอย่างมาก เพราะมีราคาถูก ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการ แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีกระบวนการบำบัดตะกอนมารองรับและไม่สามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หรือหากจะนำกลับมาใช้ก็ต้องมีกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนมารองรับ

2. การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation – reduction reaction) เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน กับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้โลหะหนักเหล่านั้นเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่เป็นพิษ หรือสามารถตกตะกอนได้ เช่น การเติมออกซิเจน หรือไฮโดรเจน ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้โลหะของไอออนเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นโลหะออกไซด์ ซึ่งจะสามารถทำให้ตกตะกอนออกมาจากน้ำเสียได้ วิธีการนี้จะคล้ายกับวิธีการที่ 1 แม้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า แต่ก็มีประสิทธิภาพสูงกว่า และจะมีความง่ายกว่าหากต้องการนำโลหะหนักจากตะกอนกลับมาใช้ใหม่

3. การระเหยแห้ง (Evaporation) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย แต่ต้องใช้ปริมาณพลังงานจำนวนมาก เพื่อให้ให้น้ำระเหยแห้งไปจนหมด ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณมากและมีความเข้มข้นของโลหะต่ำ

4. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นวิธีการที่ใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวแยกไอออนโลหะออกมา โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนัก กับไอออนบนผิวของเรซิน ทำให้โลหะหนักเหล่านี้เกาะอยู่ที่ผิวของเรซิน โดยเรซินที่ใช้ในการแยกโลหะหนักนั้น คือ แคทไอออนเรซิน (Cationic Resin) วิธีการนี้แม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากเรซินมีราคาแพง นอกจากนี้ ยังไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นโลหะสูง และมีการปนเปื้อนสารหลายชนิด จึงนิยมเป็นกระบวนการบำบัดขั้นสุดท้ายเพื่อให้น้ำทิ้ง (Effluent) มีความสะอาดสูง มีการปนเปื้อนของโลหะในปริมาณที่ต่ำมาก

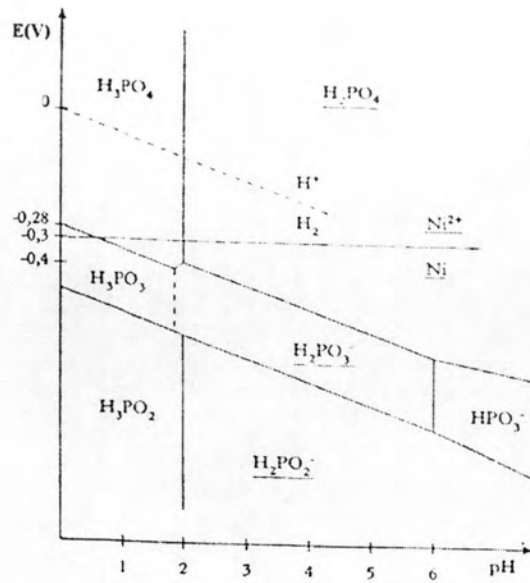
5. การแพร่ย้อนกลับ (Reverse osmosis) เป็นกระบวนการบำบัดโดยผ่านน้ำเสียที่มีความดันสูง (สูงกว่า 10 บรรยากาศ) ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งมีสมบัติที่ยอมให้ไอออนบางชนิดเท่านั้นที่สามารถแพร่ผ่านไปได้ เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีค่าใช้จ่ายสูงมากเช่นกัน เนื่องจากแผ่นเนื้อเยื่อ (Membrane) มีราคาแพง และต้องใช้ความดันสูง

6. การแยกโลหะโดยค่าความต่างศักย์ เป็นการแยกโดยการพิจารณาค่าที่แตกต่างกันของค่าศักย์ไฟฟ้า ในการที่จะทำให้อิออนของโลหะที่ต้องการแยกเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปพอกพูนบนตัวรองรับ เช่น จุ่มแท่งเหล็กลงในสารละลายทองแดงจะพบว่าทองแดงไปเกาะที่แท่งเหล็กในขณะเดียวกันมีการกัดกร่อนของเหล็กเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าศักย์สมมูลของ Fe^{2+}/Fe มีค่าน้อยกว่าของ Cu^{2+}/Cu ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันของทองแดงจึงเกิดได้ดีกว่า โดยปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นคือ



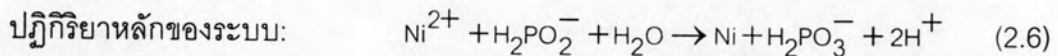
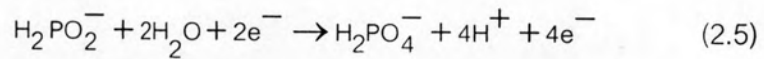
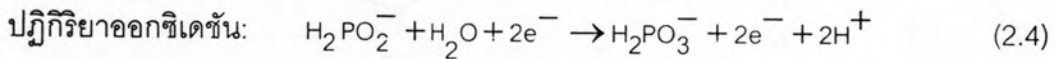
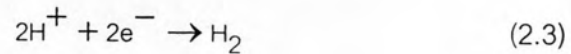
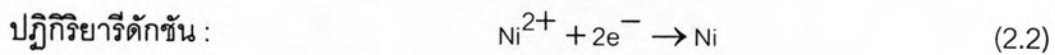
ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจนกระทั่งทองแดงจะเคลือบบนแท่งโลหะจนหมด จากนั้นปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะสมดุลหรือไม่เกิดปฏิกิริยาอีก วิธีการแยกโลหะแบบนี้จะมีข้อเสียคือ โลหะที่แยกได้เป็นแบบผงละเอียดหรือเกาะติดกับแผ่นโลหะไม่ดี เนื่องจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโดยส่วนมากจะต้องมีการเตรียมผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าก่อน

7. การแยกโลหะโดยสารรีดิวซ์ทางเคมี กระบวนการแยกโลหะโดยใช้สารเคมีเป็นตัวรีดิวซ์จะไม่ใช้ไฟฟ้า เช่น การแยกของนิกเกิล โดยไอออนของไฮโปฟอสไฟต์ (H_2PO_2) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ตามค่าศักย์และความเป็นกรด-เบส ดังแสดงในแผนภูมิ Pourbaix ของกรดฟอสฟอริก



รูปที่ 2.1 แผนภูมิ Pourbaix ของกรดฟอสฟอริก [5]

ที่ค่าความเป็นกรด - เบสน้อยกว่า 7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



ลักษณะของโลหะที่เคลือบด้วยวิธีนี้จะมีคุณภาพดีและมีความหนามาก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าการพอกพูนของโลหะโดยวิธีที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าวิธีอื่น

8. กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) เป็นกระบวนการที่ผ่านกระแสไฟฟ้าลงสู่ น้ำเสียโดยผ่านทางขั้วไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่ต้องเติมสารเคมีลงไป ทำให้โลหะที่แยกออกมาได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสม (Alloy) จึงเป็นการง่ายที่จะนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

กระบวนการเคมีไฟฟ้า เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะได้ดี โดยไอออนโลหะในน้ำเสียจะถูกกำจัดอยู่ในรูปของโลหะบนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่จะใช้ในการศึกษาแยกนิเกิลและสังกะสีในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.4 กระบวนการเคมีไฟฟ้า [5 - 11]

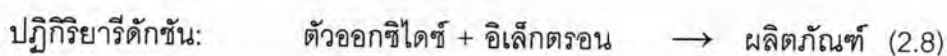
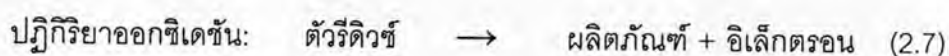
กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองครึ่งเซลล์ ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน และอีกครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยครึ่งเซลล์อันหนึ่งจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น เมื่อนำครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้า โดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ (Salt bridge) นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้าอาจไม่ใช้สะพานเกลือได้ โดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน เซลล์เคมีไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ตัวอย่างของเซลล์กัลวานิกในทางการค้า คือ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

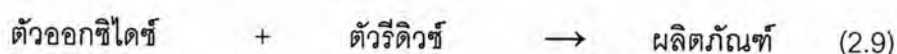
เซลล์อิเล็กโทรไลติก เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลติกในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง การชุบโลหะ เป็นต้น

ในการใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก ปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลสารและอิเล็กตรอน โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยารีดอกซ์

หรือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกสารนี้ว่าเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) และอีกสารหนึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเรียกสารนี้ว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) หากแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วน จะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้



ถ้ารวมครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกันโดยดุลจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับเท่ากันจะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนี้



เนื่องจากอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่ความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้า และ ค่า E^0 ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำด้วย ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดได้ 2 กรณี

ก) ไอออนบวกถูกรีดิวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะ

ข) โมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน

ปฏิกิริยาที่แอโนด ในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาที่แคโทด ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดขึ้นในสารละลายจากโมเลกุลของน้ำหรือจากไอออนลบ

- ก) ไอออนลบถูกออกซิไดซ์เป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
- ข) โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดซ์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจน และไฮโดรเจนไอออน

ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลติกนั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและปฏิกิริยาที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยานั้นว่า คู่ใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุดปฏิกิริยาคู่นั้นจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้ มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

- ชนิดของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะรูปร่างและสภาวะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ไปยังขั้วไฟฟ้า
- ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว
- ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย
- ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย
- ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)
- ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย (Mobility)
- ค่าศักย์ไฟฟ้า
- กระแสไฟฟ้า
- อุณหภูมิ
- ความดัน
- เวลา

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดและความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathod}} - E_{\text{anode}} - IR \quad (2.10)$$

2.4.1 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันหมายถึง สภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ต้องการ (E_{applied}) เพื่อที่จะให้เกิดกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์ในวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้ามากผิดไปจากความต้องการ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรค่อนข้างสูง ค่า E_{applied} ที่ต้องการเพิ่มขึ้นจากค่าที่วัดได้จากความสัมพันธ์

$$I = -(1/R)E_{\text{applied}} + K \quad (2.11)$$

โดยจะเรียกค่า E ที่เพิ่มขึ้นนี้ว่า $E_{\text{overvoltage}}$ หรือ $E_{\text{overpotential}}$ ดังนั้น จะได้ว่า

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathod}} - E_{\text{anode}} - IR - E_{\text{overvoltage}} \quad (2.12)$$

โพลาริเซชันอาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองขั้วไฟฟ้าในเซลล์เดียวกันขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

- ขนาดและรูปร่างและองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า
- องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- อุณหภูมิและอัตราเร็วในการกวนสารละลาย
- ความหนาแน่นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สมบัติทางกายภาพของสาร

2.4.2 กฎฟาราเดย์

ใน ค.ศ. 1834 ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้ากับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและกล่าวว่า

1. ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิภาคกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย
2. ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยการผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเป็นปฏิภาคกับน้ำหนักสมมูลของสาร

จากกฎฟาราเดย์สามารถคำนวณหาประจุดังนี้

$$Q = \int_0^t I dt = mnF \quad (2.13)$$

โดย Q คือ จำนวนประจุ (คูลอมบ์)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t	คือ	ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
m	คือ	จำนวนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไป (กรัมโมล)
n	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา (อิเล็กวาเลนซ์ต่อกรัมโมล)
F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96485 คูลอมบ์ต่ออิเล็กวาเลนซ์)

2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีไฟฟ้า นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้น กระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2.14)$$

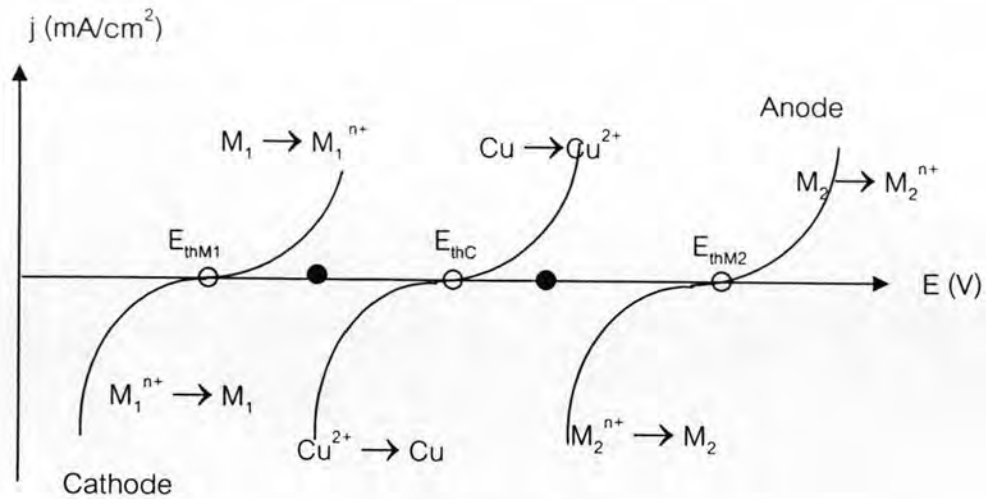
ซึ่งมวลที่ได้ตามทฤษฎีนั้นสามารถคำนวณได้ตามกฎฟาราเดย์ ดังสมการที่ 2.13

2.5 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า [5, 12]

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้หลักการแยกด้วยเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้าและเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนของไอออนโลหะที่ขั้ว ตัวแปรที่มีผลต่อการพอกพูน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลา และ อัตราเร็วในการกวน

การแยกโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้ในรูปแบบของการแยกโลหะออกทีละชนิด (Selective metal deposition) หรือการแยกโลหะร่วม (Codeposition)

การแยกโลหะแต่ละชนิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำเสียจะใช้การพิจารณาค่า ศักย์ไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชันของโลหะแต่ละตัว ยกตัวอย่างเช่น ในสารละลายที่มีไอออนของ Cu , M_1 , M_2 ซึ่งมีกราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูป 2.2 จะสามารถพิจารณาระบบได้ดังนี้

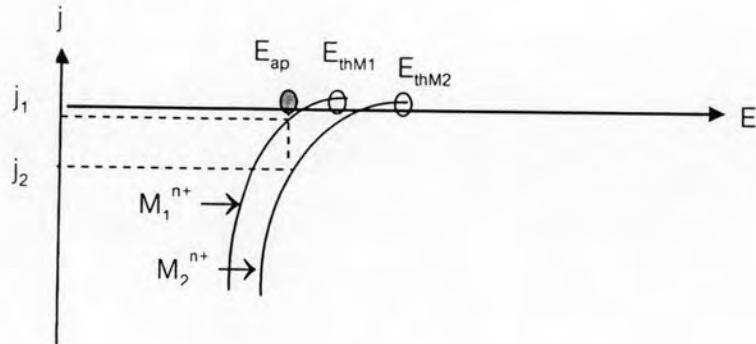


รูปที่ 2.2 โพลลาไรเซชัน ของ Cu, M₁, M₂

- ก) ถ้าไอออน M₁ และ M₂ ไม่เป็นไอออนโลหะ พบว่า ไอออน M₁ และ M₂ จะไม่เกิดปฏิกิริยาการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า แต่อาจตกตะกอนหรือคงอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- ข) ถ้าไอออน M₁ และ M₂ เป็นไอออนโลหะ โดยมี $E_{M_2} > E_{Cu} > E_{M_1}$ (ดังในรูป 2.2) การที่จะแยกโลหะแต่ละตัวออกจากกันนั้น เริ่มแรกจะต้องแยกโลหะ M₂ ก่อนเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันสูงสุด โดยต้องกำหนดให้ค่าขั้วไฟฟ้าอยู่ระหว่างค่า E_{thM_2} กับ E_{thCu} ก่อนเพื่อให้ M₂ แยกออกไปจากสารละลายทั้งหมด จากนั้นจึงเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเป็นระหว่างค่า E_{thCu} กับ E_{thM_1} เพื่อให้แยก Cu จนหมด จากนั้นจึงแยก M₁ ต่อไป โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าค่า E_{thM_1}
- ค) ในกรณีที่ต้องการแยกโลหะจากของแข็ง ให้ใช้ของแข็งนั้นเป็นขั้วแอโนด ซึ่งขั้วนี้จะเป็นขั้วแบบละลายได้ (Soluble anode) ถ้าของแข็งนั้นมีองค์ประกอบเป็น Cu, M₁ และ M₂ ถ้าต้องการแยก Cu ออกจากแอโนดและแยกโดยให้ไปพอกพูนที่แคโทด ให้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่มีไอออนของ M₁, M₂ และกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดอยู่ต่ำกว่า E_{thM_2} เพื่อไม่ให้ M₂ ถูกออกซิไดซ์ แต่ M₁ และ Cu จะถูกออกซิไดซ์ออกมาทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมี Cu²⁺ และ M₁ⁿ⁺ เพื่อให้ Cu ไปพอกพูนที่แคโทดอย่างเดียวจึงต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดอยู่ระหว่าง E_{Cu} กับ E_{M_1} (รูป 2.2)

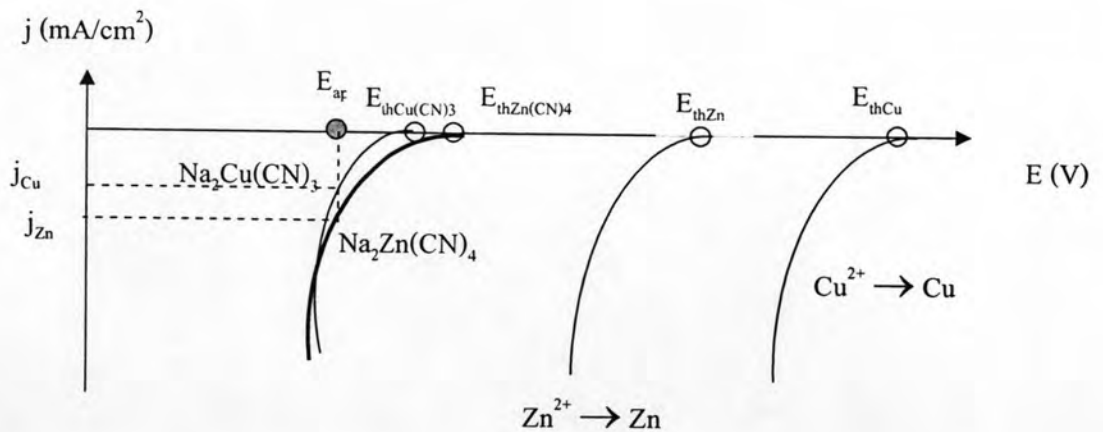
ในการทำงานเดียวกันถ้าต้องการให้มีการแยกโลหะร่วมของโลหะหลายชนิดก็สามารถทำได้ โดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ขั้วไฟฟ้า ดังตัวอย่างกราฟโพลลาไรเซชันรูปที่ 2.3 โดยแสดงเฉพาะส่วนของเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic curve) หรือส่วนของปฏิกิริยารีดักชันของโลหะ M₁

และ M_2 ซึ่งมีค่าศักย์เกินตัวเท่ากับศูนย์ สามารถพิจารณาได้ว่า ถ้าต้องการแยกโลหะ M_1 และ M_2 ออกมารวมกันต้องกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของโลหะ M_1 ($E_{ap} < E_{th1}$) ระบบจะเกิดการพอกพูนของทั้ง M_1 และ M_2 ร่วมกัน



รูปที่ 2.3 โพลลาไรเซชัน ของ M_1, M_2

การแยกโลหะร่วมเกิดขึ้นได้ยากในบางครั้งเนื่องจากค่าศักย์สมดุลที่ต่างกันมาก ดังนั้นการลดค่าศักย์สมดุลมาให้ใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการแยกโลหะร่วมได้ดียิ่งขึ้น เช่น กรณีของ Cu/Zn ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งมีค่าศักย์สมดุลต่างกัน แต่สามารถทำให้ค่าศักย์สมดุลมาใกล้เคียงกันได้ด้วยการใช้ไอออนที่อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน คือ $Cu(CN)_3^{2-}$ กับ $Zn(CN)_4^{2-}$ ไอออนในรูปสารเชิงซ้อนจะช่วยทำให้ค่าศักย์สมดุลของสารเปลี่ยนแปลงได้

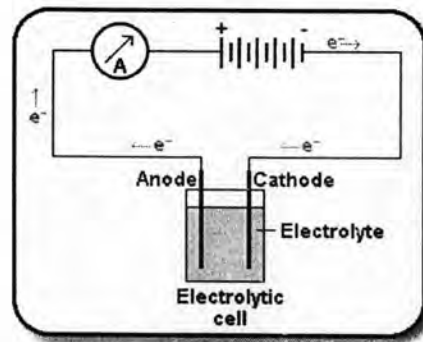


รูปที่ 2.4 โพลลาไรเซชัน ของ Cu, Zn และสารเชิงซ้อนของ Cu, Zn

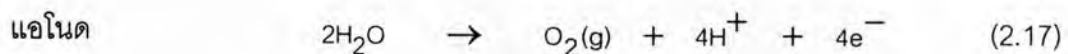
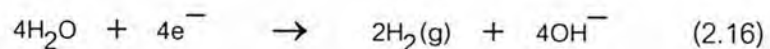
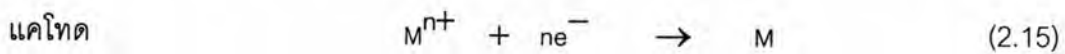
ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้ารูปแบบต่างๆในการบำบัดน้ำเสียดังนี้

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition)

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าเหมาะในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะผสมอยู่ การนำกลับโลหะด้วยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำเพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และข้อได้เปรียบในกระบวนการนี้คือไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการของการทำงานของกระบวนการคือ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ามีดังนี้



รูปที่ 2.5 ลักษณะของกระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า [13]

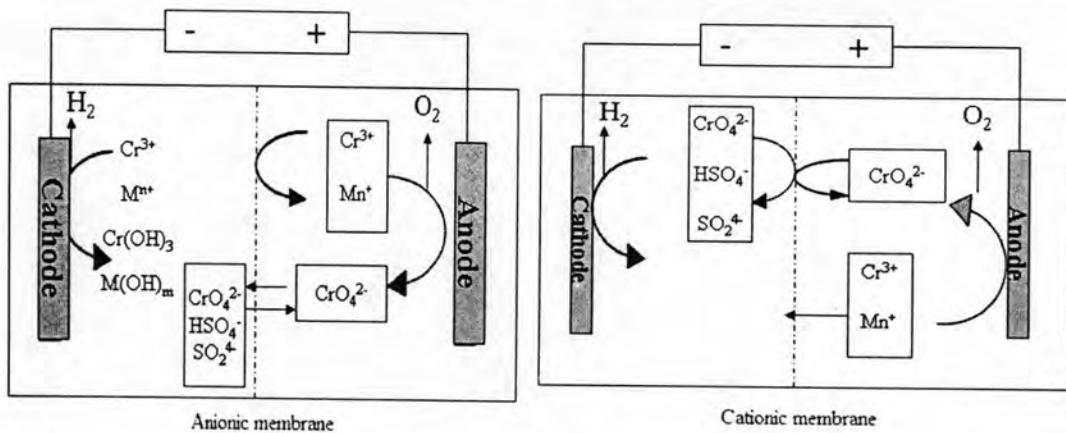


กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า (Electroprecipitation)

การกำจัดโลหะบางชนิดด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดไม่มีเยื่อเลือกผ่าน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะบางชนิดมีค่าต่ำ เช่น โครเมียม เพราะโครเมียม (+3) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นโครเมียม (+6) ตลอดเวลาที่ขั้วแอโนด จึงไม่สามารถกำจัดโครเมียมออกมาในรูปของโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) นอกจากนี้ที่สภาวะอัตราส่วนกรดซัลฟิวริกต่อโครเมียมออกไซด์

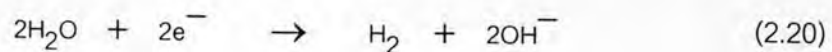
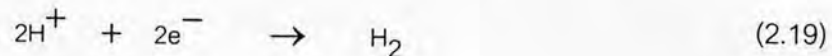
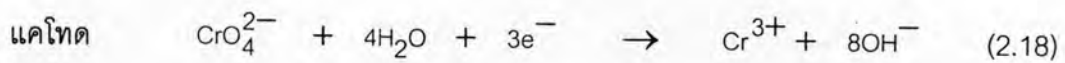
(CrO₃) เท่ากับ 1 ต่อ 100 โดยน้ำหนัก สามารถละลายตะกอนโครเมียมออกไซด์ได้ สำหรับกระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย

กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่านประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมผ่านเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือกผ่านใช้ในการบำบัดน้ำเสียมมี 2 ชนิด คือ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion-exchange membrane) และเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation-exchange membrane) ดังแสดงในรูป

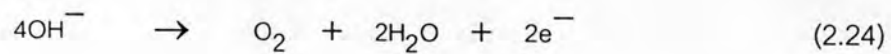
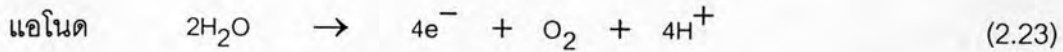
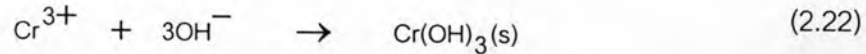
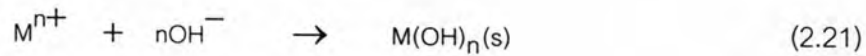


รูปที่ 2.6 ลักษณะของกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่านด้วยกระแสไฟฟ้า [12]

เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ จะยอมให้ไอออนลบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงกันข้ามคือไอออนบวกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้ โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ามีดังนี้



และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา

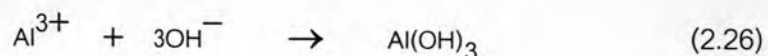


กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation)

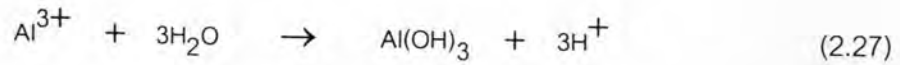
การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า หรือ EC ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสียซึ่งกระบวนการ EC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีย้อม สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆ มารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นจนหนักมากพอที่จะตกตะกอนโดยอาศัยสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนสำหรับการตกตะกอนด้วยสารเคมีนิยมใช้ใช้อลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) หรือเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) แต่สำหรับกระบวนการ EC จะใช้ขั้วไฟฟ้าที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่นเหล็กหรืออะลูมิเนียมในการสร้างสารตกตะกอน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีสมบัติเป็นสารสร้างตกตะกอน

2.6 คาร์บอน [14]

คาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ ทำจากส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงาน มานานกว่าหนึ่งศตวรรษครึ่ง หนึ่งในบรรดาการใช้ประโยชน์คาร์บอน ในแบตเตอรี่ทางการค้า ยุคแรกสุดอยู่ในปี 1841 เมื่อ Robert Bunsen ได้เสนอให้เปลี่ยนตัวเก็บกระแสไฟฟ้าของ Grove cell จากแพลทินัมที่มีราคาแพงไปเป็นคาร์บอนซึ่งคุ้มทุนกว่ากัน ปัจจุบันด้วยคุณสมบัติเฉพาะของคาร์บอนทำให้นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในเทคโนโลยีแหล่งกำเนิดพลังงาน ในขณะที่โครงสร้างคาร์บอนรูปแบบใหม่มีการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่าง เช่น Nanotubes หรือ Fullerenes ซึ่งประโยชน์ของคาร์บอนต่อเทคโนโลยีต้นกำเนิดพลังงาน กำลังมีการศึกษากันอย่างจริงจัง

ในขณะเดียวกันคาร์บอนก็เป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เฉื่อย ซึ่งมีประโยชน์ในการทำเป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) หรือเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่าง ๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้แก๊สแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยา และทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากโครงสร้างของมันทำให้เกิดความพรุนได้โครงสร้างเป็นชั้น ๆ และเป็น Nanotubes จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดใส่หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

คาร์บอนเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะในรูปแบบหรือผ้าทอ โดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,000-2,000 ตารางเมตร/กรัม และขนาดของรูพรุนจากน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งผู้ผลิตอุตสาหกรรมสามารถปรับให้มีประสิทธิภาพการทำงานได้สูงสุด โดยการปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างช่อง (Channels) ใหญ่ ซึ่งเป็นทางเข้าของไอออนต่อช่องที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งมีส่วนสำคัญกับพื้นที่ผิว และเพิ่มความจุ

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Yang และคณะ [15] ศึกษาการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าในน้ำของกรดฟูลวิก (Fulvic acid, FA) ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในกลุ่มพวกกรดฮิวมิก (Humic acid, HA) ใช้ถ่านกัมมันต์คาร์บอนไฟเบอร์ (Active Carbon Fiber, ACF) เป็นขั้วไฟฟ้า และวัดค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Light Scattering Photometer (LSP), Fluorescence Spectroscopy และ Total Organic Carbon Analyzer (TOC) ในการทดลอง เกิดการรวมตัวโมเลกุลของ FA ทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ FA เพิ่มขึ้นจาก 10 nm ไปจนถึง 100 nm ในกระบวนการบำบัด เมื่อเพิ่มเหล็กเป็นขั้วแอโนด ทำให้ FA มีประสิทธิภาพในการเกาะรวมกันมากขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการบำบัด โดยกลไกหลักของการเคลื่อนที่คือ เริ่มจากการดูดซับของ FA บน ACF และเกิดการรวมตัวของ FA จากนั้นละลายกลุ่มก้อนของ FA ที่เกาะอยู่ขั้วแอโนดโดยใช้ $n\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot m\text{Fe}(\text{OH})_3$ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจาก ACF เป็นแกรไฟต์ และ เหล็กสแตนเลสเป็นขั้วแคโทด แล้วทำการเปรียบเทียบกับ ACF จากการทดลองพบว่าการใช้แกรไฟต์และเหล็กสแตนเลสเป็นขั้วแคโทด จะไม่พบการเกาะกลุ่มและการเคลื่อนที่ของ FA จากสารละลาย แสดงให้เห็นว่าการบำบัด FA จากน้ำโดยใช้ ACF จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และจากการศึกษายังพบว่า ACF มีคุณสมบัติมากมาย เช่น สามารถนำกลับคืนมาจากสารละลายได้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ACF มีลักษณะเฉพาะของพื้นที่คือ 1000 – 3000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่า carbon active และ ACF ยังมีความสามารถในการดูดซึมสูง

- Rana และคณะ [16] ศึกษาความเป็นไปได้ของการเคลื่อนที่ของโครเมียมไอออนจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งใช้ขั้วแคโทดเป็นคาร์บอนแอโรเจล (Carbon aerogel) ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สัมพันธ์กันทางอุณหภูมิ ทางเชิงกลและทางไฟฟ้า ภายในโครงสร้างประกอบด้วยอนุภาคที่เชื่อมต่อกันภายในเป็น Microscopic interstitial pore ลักษณะเฉพาะของคาร์บอนแอโรเจล คือ มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (≤ 40 มิลลิโอมเซนติเมตร) ลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิวสูง (400-1100 ตารางเมตรต่อกรัม) และสามารถควบคุมการกระจายตัวของรูพรุน (≤ 50 ไมโครเมตร) ความสามารถในการทำงานของคาร์บอนแอโรเจล ขึ้นอยู่กับกระบวนการคัดแยก ในการทดลองตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนคือ ค่าความเป็นกรด-เบส ในช่วง 2-7 ความเข้มข้นของโครเมียม 2-8 มิลลิกรัมต่อลิตร และกระแสไฟฟ้า 0.3-1.3 แอมแปร์ ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้น และ กระแสไฟฟ้า มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะ โดยไอออนโลหะจะเคลื่อนที่มากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสลดลง และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

- Babic และคณะ [17] ศึกษาการดูดซับไอออนของสังกะสี แคลเซียมและปรอทจากสารละลายด้วยผ้าถ่านกัมมันต์ (Activated carbon cloth) โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายกับการดูดซับของโลหะ จากการศึกษาพบว่าปริมาณการดูดซับไอออนของสังกะสีและแคลเซียมเพิ่มในขณะที่ไอออนของปรอทคงที่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย

- Bertazzoli และคณะ [18] ศึกษาการเคลื่อนที่ของโลหะไอออนในน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบสามมิติ โดยใช้ตาข่ายใยแก้วคาร์บอน (Reticulated vitreous carbon, RVC) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ สามารถใช้ได้กับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงกว้าง ภายในโครงสร้างที่มีรูพรุนมีลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการยอมให้ของไหลแพร่ซึมผ่านสูง การทดลองมีการควบคุมอัตราการไหลของสารละลายผ่านขั้วไฟฟ้าซึ่งมีรูพรุน มีการป้อนไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยควบคุมการถ่ายโอนมวล วัดค่าพลังงานศักย์โดยใช้ hydronamic voltammetry ผลการทดลองพบว่าสามารถลดระดับความเข้มข้นของไอออนโลหะ (ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี) จากประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 20 – 40 นาที

- Paidar และคณะ [19] ศึกษาการเคลื่อนที่ของทองแดงและสังกะสีไอออนในสารละลายเจือจางและน้ำทิ้งจากแร่โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบสามมิติ ใช้แผ่นแกรไฟต์ (Graphite felt) เป็นขั้วไฟฟ้าในสารละลายที่ปราศจากออกซิเจน (Deoxygenated solution) ผลที่ได้คือสามารถลดความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายจาก 150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร เป็น 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ด้วยค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าร้อยละ 68 แต่สำหรับสังกะสีไอออน ต้องเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 เพื่อป้องกันการเกิดไฮโดรเจน จากการเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบส ผลการทดลองพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีลดลงจาก 200 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร เป็น 1.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าร้อยละ 65

- Alvarez-Merino และคณะ [20] ได้ศึกษาพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายและค่า Ionic strength ในการดูดซับสังกะสีไอออนจากสารละลาย ภายใต้ Static conditions เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจะเพิ่มปริมาณการดูดซับสังกะสีไอออนได้มากขึ้น แล้วไฮโดรเจนไอออน 2 ตัว จะถูกแทนที่ (บนพื้นที่ผิวที่ออกซิไดซ์แล้ว) กลายเป็นโลหะสังกะสี การเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 3-6 จะเพิ่มการดูดซับโลหะสังกะสีได้มากขึ้นขณะที่การเพิ่มของ ionic strength จะทำให้ปริมาณโลหะสังกะสีดูดซับได้ลดลงเนื่องจากมีผลกระทบจากปริมาณของเกลือที่มากเกินไป จากการศึกษาในครั้งนี้ยังบอกอีกว่า Oxidized activated carbon cloth จะมีประสิทธิภาพมากกว่า As-received carbon