

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดและชนิดของน้ำเสีย

เนื่องจากห้องปฏิบัติการเคมีอาคารพระเทพฯมีหน้าที่บริการการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเคมี สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร จำนวน 28 กลุ่มย่อย ทำให้มีของเสียทางเคมีที่เกิดจากการเรียนปฏิบัติการดังกล่าว โดยเฉพาะการทดลอง เรื่อง ปฏิกิริยาเคมีและความสัมพันธ์ทางน้ำหนัก ซึ่งในขั้นตอนการทดลอง มีการใช้ทองแดงเพื่อศึกษา ปฏิกิริยาและสารประกอบของทองแดง จึงมีทองแดงหลงเหลืออยู่ในของเสียทางเคมีในรูปสารประกอบทองแดง หลังการเรียนปฏิบัติการเคมี

เนื่องด้วยทองแดงมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต [ภาคผนวก ก] จึงทำให้ถูกกำหนดไว้ในค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [ภาคผนวก ค]

กระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีการใด ขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการพื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีบำบัดได้ดังนี้

2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

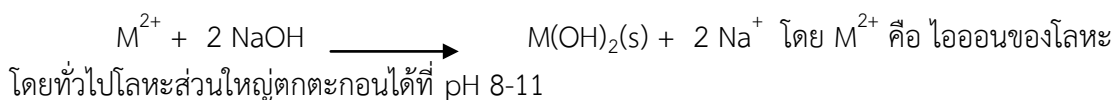
กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักอยู่นั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาเลือก ใช้วิธีการใดขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพ ของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี

วิธีนี้นิยมใช้กันมานานแล้ว ทำได้โดยเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำทิ้ง ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี มีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และ ผลึกซัลไฟด์

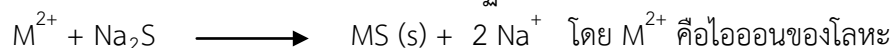
2.2.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนผลึกแบบดั้งเดิม โดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยา ดังสมการนี้



2.2.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ เฟอร์รัสซัลไฟด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

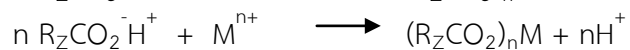
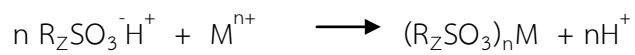


ข้อดีของการตกตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่น

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากอ็อกซิเจนของซัลไฟด์มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการบำบัดซัลไฟด์ออกไปก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน

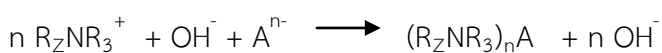
กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดย อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน เรซินที่นำมาใช้ มีทั้งที่เป็นสารจากธรรมชาติกับที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น สำหรับเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นโพลีเมอร์ สำหรับเรซินที่มีประจุบวก เรียกว่า cation exchange resin ถ้าเป็นกรดแก่จะอยู่ในรูปของ sulfonic acid ($\text{R}_Z\text{SO}_3^-\text{H}^+$) ถ้าเป็นกรดอ่อนจะอยู่ในรูปของ carboxylic acid (RCOOH) โปรตอนของกรดทั้งสองในเรซินสามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนในสารละลายได้



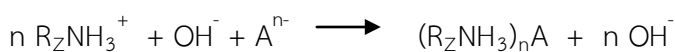
โดย $\text{R}_Z = \text{resin}$

เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบเรียกว่า anion exchange resin ซึ่งฟังก์ชันนอลกรุป คือ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนแอนไอออนดังนี้

ถ้าเป็นเรซินชนิดเบสแก่



ถ้าเป็นเรซินชนิดเบสอ่อน



R แทนด้วยกรุปสารอินทรีย์ เช่น methyl group

เมื่อเรซินถูกนำมาใช้แลกเปลี่ยนกับแคตไอออนหรือแอนไอออนแล้ว สามารถทำการเปลี่ยน สภาพของเรซินให้กลับมาอยู่ในรูปของกรด (H^+) หรือของเบส (OH^-) ได้ใหม่ โดยการใช้กรด HCl หรือ เบส NaOH ผ่านลงในคอลัมน์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง



วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการ กำจัดสูง นิยมใช้กับน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือ มีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนเข้าสู่เรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.3 การออกซิเดชันและรีดักชัน

การกำจัดโลหะและสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจากของเสียที่เป็นของเหลว โดยใช้ หลักการทางเคมีของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษเพื่อทำการกำจัดภายหลัง อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ปริมาณ สารออกซิเดชันที่ใช้ และ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน

2.2.4 รีเวอร์ส ออสโมซิส

เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยการยอมให้แรงดันอัดน้ำเสียผ่านเยื่อ Semi-permeable membrane ซึ่งเยื่อนี้มีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางอย่างผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้ น้ำ ที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานมาก และ ต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียเข้า

2.2.5 การระเหย

เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยนํ้าออกไป ทำให้ความเข้มข้นของนํ้าเสียสูงขึ้น หรือ กลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อนหรือใช้พลังงานแสงอาทิตย์

2.2.6 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากมีพื้นที่ผิวต่อนํ้าหนักสูง เมื่อสัมผัสกับนํ้าเสียทำให้โลหะหนักถูกจับไว้ในรูพรุนต่างๆ ทำให้นํ้าทิ้งสะอาด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วไม่ควรกำจัดโดยการเผา

2.2.7 การแยก

การแยกของเสียที่แตกต่างกันออกเป็น 2 กลุ่มหรือมากกว่า ขึ้นกับขนาด ความหนาแน่นและ ประเภทของวัสดุทั่วไปโดยวิธีที่ทำด้วยมือ และด้วยเครื่องจักรกล การแยกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ของการบำบัดในขั้นต่อไป และยังช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องการบำบัดด้วย

2.2.8 การเผา

การเผาเป็นขบวนการกำจัดของเสียอันตรายทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยให้ ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 800 - 1,400 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือไม่ ขึ้นกับ เวลา อุณหภูมิ และการคลุกเคล้า ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาขึ้นกับสารแต่ละชนิด และ เตาเผาควรมีระบบควบคุมสารมลพิษที่เกิดจากการเผา เช่น ระบบดักฝุ่นและก๊าซ ระบบบำบัดนํ้าเสีย

2.2.9 การปรับเสถียร/การทำแข็ง

กระบวนการการปรับเสถียรและการทำแข็งถูกออกแบบเพื่อปรับปรุงการจัดการ และคุณ ลักษณะทางกายภาพของของเสียโดย

1. ทำให้เป็นของแข็ง
2. ลดการละลายของสารปนเปื้อน และ
3. ลดพื้นที่ผิวที่สัมผัส

การทำแข็งไม่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างสารและสารทำแข็ง แต่ต้อง แสดงว่าท้ายสุดของเสียถูกยึดติดภายในก้อนแข็งนั้น ขณะที่การปรับเสถียรเป็นกระบวนการลด ความอันตรายของสาร โดยการเปลี่ยนสารปนเปื้อนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีการเคลื่อนที่หรือพิษน้อยที่สุด การทำ แข็งและปรับเสถียรสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

- Cement base technique โดยการผสมซีเมนต์กับตะกอนและเติม additive เช่น ซีเมนต์ลอย เพื่อทำให้เกิดการแข็งตัวและรวมตัวกันได้ดีขึ้น
- Encapsulation technique เป็นขบวนการที่ทำให้ของเสียถูกเคลือบด้วยสารbinder เช่น โพลีบิวทาดีน ผสมกับของเสียให้เป็นก้อน แล้วใช้โพลีเอธิลีนที่มีความหนาแน่นสูง หลอมเคลือบผิวภายนอกอีกชั้น กากตะกอนที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้ก่อนที่จะนำไปฝัง กลบควรทดสอบคุณสมบัติว่าไม่ละลายนํ้าอีก โดยค่านํ้าชะขยะจะต้องไม่เกินค่ามาตรฐาน ที่กำหนด [5]

2.2.10 การใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)

เคมีไฟฟ้า เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ จะต้องประกอบไปด้วย

1. สารที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)
2. สารที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction)

สามารถนำเคมีไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโดยวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ค่าทางไฟฟ้าที่วัด ได้แก่ กระแส ศักย์ไฟฟ้า และ ความต้านทาน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ การสร้างเซลล์เคมีไฟฟ้าที่สามารถวัดค่าต่างๆเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์หลายวิธีด้วยกัน และมีชื่อเรียกวิธีการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้านั้นๆ ตามเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ต่อไปนี้

- วิธีโพเทนทิโอเมตริก คือ วิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ประกอบขึ้นเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า ชนิดกัลวานิกเซลล์ คือ สารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาได้เองที่ผิวของขั้วไฟฟ้าโดยไม่ต้องอาศัยแหล่ง พลังงานจากภายนอก ผลการดำเนินปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง ทำให้ได้พลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าได้
- วิธีนอน-โพเทนทิโอเมตริก คือ การวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าที่อาศัยปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส หรือ ใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิดอิเล็กโทรไลติกเซลล์ แบ่งได้หลายวิธีตามเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการทดลองได้แก่ วิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรี คูลอมเมตรี โวลแทมเมตรี และ คอนดักโทเมตรี ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรี
- วิธีอิเล็กโทรกราวิเมตรีเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของ ไอออนในสารละลายภายในเซลล์ [6]

2.3 ทฤษฎีและหลักการกำจัดโลหะหนักด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

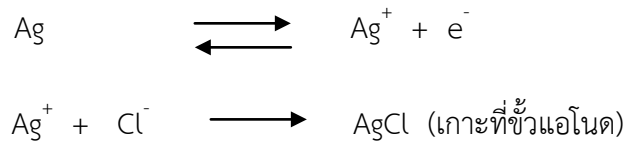
อิเล็กโทรกราวิเมตรี เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของไอออนในสารละลายภายในเซลล์

อิเล็กโทรกราวิเมตริก คือ การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์เพียงพอ ที่จะทำให้อิออนเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ อิออนเหล่านั้นจะเกิดการให้และรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นโลหะอิสระเกิดขึ้น ซึ่งโลหะที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกาะที่ขั้วแคโทดได้ ทำให้สามารถหาน้ำหนักของโลหะที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้สามารถทำได้ทั้งการหาปริมาณของแคโทดไอออนและแอนไอออน ในกรณีที่เป็นไอออนของโลหะ ไอออนเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โลหะเกาะที่ขั้วแคโทด



สำหรับขั้วที่ใช้ควรเป็นขั้วแพลทินัม เพราะแพลทินัมเป็นโลหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยากับกรดหรือเบส นอกจากนี้ยังเป็น inert electrode คือไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อให้

ศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ในการทำรีดักชันอออนของโลหะ ในกรณีที่เป็นแอนอออน เช่น คลอไรด์อออน สามารถวิเคราะห์หาปริมาณโดยวิธีนี้ได้ โดยใช้ขั้วเงินเป็นแอนออดซึ่งขั้วน้ำหนักได้เช่นเดียวกัน

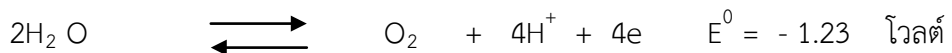
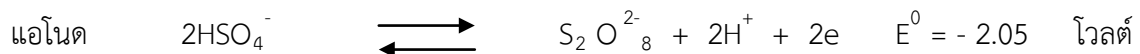


ในการทำอิเล็กโทรไลซิสสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

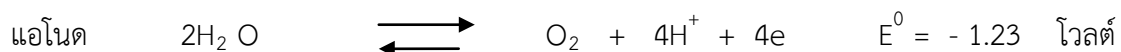
1. การควบคุมเซลล์ให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่
2. การควบคุมกระแสไฟให้คงที่ วิธีนี้ไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโดยวิธีอิเล็กโทรกราวิเมตริก จะนำไปประยุกต์ใช้ในหลักการของคูลอมบ์เมตริกมากกว่า
3. การควบคุมศักย์ไฟฟ้าแคโทดให้คงที่ สำหรับโครงการวิจัยนี้ใช้เทคนิคการควบคุมเซลล์ให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำอิเล็กโทรไลซิส ถ้าการทดลองให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากเกินไป จะทำให้ออนอื่นๆ ที่ไม่ต้องการเกิดปฏิกิริยาแล้วเข้ามาเกาะที่ขั้วได้ ทองแดงอออนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นโลหะทองแดงมาเกาะ (deposit) ที่ขั้วได้ในสารละลายกรดซัลฟิวริกหรือ กรดไนตริก โดยปกติในการทดลองจะใช้สารละลายผสมของกรดทั้งสอง

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นที่ขั้ว



ตามทฤษฎีสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่จะทำให้อออนของโลหะเกิดรีดักชันกลายเป็น โลหะเกาะที่ขั้วได้ ปฏิกิริยาของเซลล์ คือ



$$E^0_{\text{cell}} = 0.34 - 1.23 = -0.92 \text{ โวลต์}$$

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำอิเล็กโทรไลซิส ถ้าการทดลองให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากเกินไป จะทำให้ออนอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ เกิดปฏิกิริยาแล้วเข้ามาเกาะที่ขั้วได้ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีค่าเท่ากับ -0.92 โวลต์ หมายความว่า ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอก แก่เซลล์จำนวน 0.92 โวลต์ จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างบนนี้ได้ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์แล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาตามที่ต้องการได้ เรียกว่า Decomposition Potential ค่าที่คำนวณได้ -0.92 โวลต์ นี่เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่พอดีที่จะเริ่มทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านภายในเซลล์ ในทางปฏิบัติต้องการให้มีกระแสไฟฟ้าไหล

ผ่านภายในเซลล์มากขึ้น เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ จึงต้องมีการให้ศักย์ไฟฟ้ามากกว่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

ทั้งนี้เพราะภายในเซลล์ยังมีศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน การเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินสามารถเกิดได้ทั้งที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด นั่นคือการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเกาะของโลหะที่ขั้ว ต้องรวมถึงศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินนี้ด้วย

$$E_D = (E_{\text{cathode}} + E_{\text{o.c.}}) - (E_{\text{anode}} + E_{\text{o.a.}})$$

E_D = Decomposition Potential

$E_{\text{o.c.}}$ = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

$E_{\text{o.a.}}$ = ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

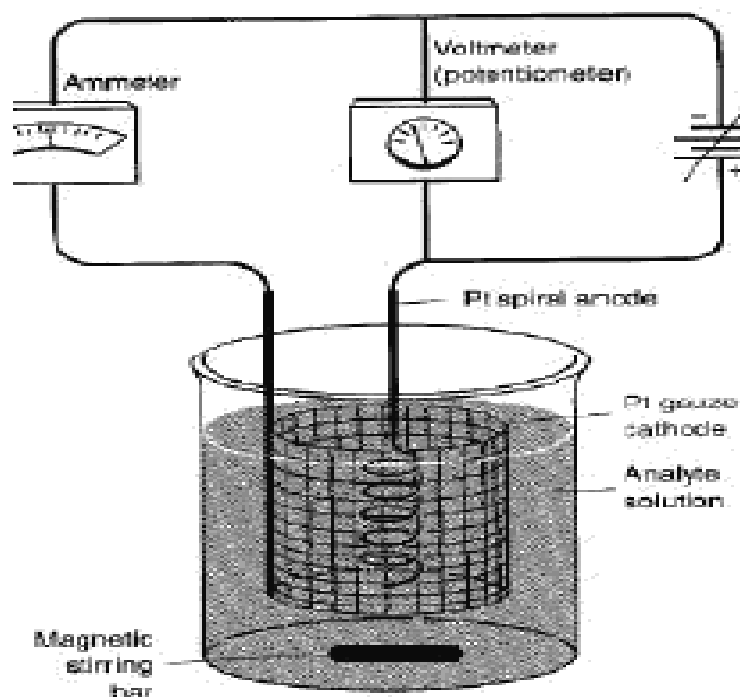
ในการทดลองจริงๆ จำเป็นต้องให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มากกว่า E_D จำนวนหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า ภายในเซลล์ยังมีความต้านทาน ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในยังคงเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ $E = IR$

$$\text{นั่นคือ } E_{\text{applied}} = E_D + IR$$

อไอออนของโลหะแต่ละชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วให้โลหะไปเกาะ (deposit) ที่ขั้วได้ ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถทำการแยกโลหะทั้งสองออกจากกัน โดยใช้หลักการอิเล็กโทรไลซิส อไอออนของโลหะสองชนิดที่ต้องการแยกต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันที่ต่างกันมากๆ อไอออนที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นค่าลบน้อยจะเกิดเกาะที่ขั้วแคโทดก่อน ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์มีค่าสูงมาก อไอออนของโลหะทั้งสองสามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วเข้าเกาะที่ขั้วได้เหมือนกัน

ดังนั้นการควบคุมศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์จึงมีความสำคัญมาก ในการแยกอไอออนของโลหะออกจากกัน นอกจากนี้การควบคุมสภาวะของสารละลายก็มีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วด้วยเช่นกัน เช่น การควบคุมค่า pH การเติม complexing agent เป็นต้น เช่น การแยกทองแดงออกจากนิกเกิล พบว่าในการทำอิเล็กโทรไลซิสในสารละลายของกรด ทองแดงสามารถเกิดการเกาะที่ขั้วได้ดี สามารถแยกออกจากนิกเกิลได้ก่อน และ เมื่อควบคุมสภาพสารละลายให้เป็นเบส นิกเกิลสามารถเกาะที่ขั้วได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากแยกทองแดงออกไปแล้ว ซึ่งสภาวะของการแยกอไอออนตัวหนึ่งๆ ออกจากอไอออนอื่นๆ นั้น เป็นเรื่องที่ต้องศึกษาหาวิธีการเฉพาะ ในการควบคุมสภาพของความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ไม่สามารถนำมากล่าวรวมๆ กันเป็นหลักเกณฑ์ได้

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีแผนภาพแสดงการทำงานและการต่อวงจรดังภาพที่ 2.1



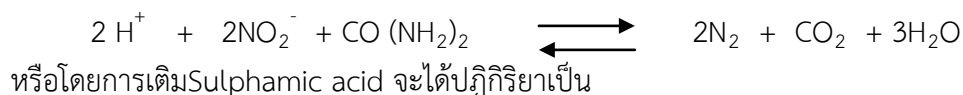
ภาพที่ 2.1 เครื่องมือและการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

โลหะที่แยกออกมาเกาะที่ขั้วแคโทด ควรมีลักษณะที่แน่นอนและเรียบ เพื่อว่าในการล้างและอบให้แห้งไม่เกิดการสูญเสียของน้ำหนักโลหะที่หลุดออกไป สิ่งสำคัญที่มีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วแคโทด คือ ความหนาแน่นของกระแส การแยกที่ดีควรใช้ความหนาแน่นของกระแสน้อยกว่า 0.1 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร

ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ไม่ควรสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้ทองแดงเกาะที่ขั้วได้ไม่หมด และเกาะได้ไม่แน่นเพราะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การแก้ไขทำได้โดยการเติมตัวDepolarizer ซึ่งคือไนตริกออกไซด์ในสารละลายจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับไนเตรตออกไซด์ ดังสมการ



ดังนั้นถ้ามีไนเตรตออกไซด์ในสารละลายมากๆจะไม่เกิด H_2 ที่ขั้วของแคโทด สารละลายกรดไนตริกที่นำมาใช้ต้องปราศจากไนตริก เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า กรดไนตริกที่มีปะปนอยู่กับกรดไนตริกสามารถกำจัดได้โดยการต้มกรดไนตริกก่อนนำมาใช้หรือโดยการเติมยูเรียลงในสารละลายก่อนนำมาใช้





ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีการตรึงไนโตรเจนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ถ้ามีเหล็กอ็อกไซด์อยู่ในสารละลายด้วย เพราะเหล็กอ็อกไซด์จะถูกรีดิวส์โดยกระแสที่ผ่านลงไปในเซลล์ ทำให้เกิดเพอร์สอ็อกไซด์ที่สามารถรีดิวส์กรดไนตริกได้ ข้อผิดพลาดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการควบคุม pH หรือแยกเอาเหล็กอ็อกไซด์ออกก่อนที่จะทำอิเล็กโทรไลซิส หรือทำให้เหล็กอ็อกไซด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับฟอสเฟต (PO_4^{3-}) หรือฟลูออไรด์ (F^-) [7]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนัก

จักรี และ ประพฤทธิ์ (2542) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนักทองแดงจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีและเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน ในการศึกษาได้นำน้ำเสียอุตสาหกรรมล้างท่อแอร์และชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ทองแดงที่มีความเข้มข้นของโลหะทองแดงเฉลี่ย 11,115 พีพีเอ็ม และ 11,413 พีพีเอ็ม มาบำบัดด้วยวิธีทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี และเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนตามลำดับ มีสถานะที่ใช้ศึกษาในเซลล์เคมีไฟฟ้าครั้งนี้ ค่าพีเอช เท่ากับ 2 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เท่ากับ 43.3 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร กระแสไฟฟ้าที่ใช้ครั้งที่ 13 แอมแปร์ ปริมาตรน้ำเสีย 0.5 ลิตร เวลาที่ใช้ศึกษา 60 นาที และสถานะที่ใช้ในการศึกษาด้วยเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุนครั้งนี้ ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ 0.12 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร กระแสไฟฟ้าครั้งที่ 19 แอมแปร์ ปริมาตรน้ำเสีย 6 ลิตร เวลาที่ใช้ศึกษา 60 และ 120 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในการบำบัดคิดเป็น 36.53 และ 28.88 เปอร์เซ็นต์ อัตราการลดลงของโลหะทองแดง เท่ากับ 427.07 และ 316.26 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง-แอมแปร์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าและเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า ตามลำดับ [8]

ชัยกฤษ (2543) ได้ทำงานวิจัยการศึกษาออกแบบ และสร้างเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบหมุน เพื่อนำมาใช้กำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสีย การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์อาศัยพื้นฐานจากเซลล์ชนิดที่มีขั้วแคโทดที่เคลื่อนที่ได้ โดยขั้วแคโทดเป็นโลหะทองแดงกลางขนาดเล็กและขั้วแอโนดเป็นท่อโลหะสแตนเลส สถานะที่ดีที่สุดในการกำจัดไอออนของทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดงคือ 60 นาที ใช้ปริมาณโลหะทองแดงกลาง 1000 ลูกที่สถานะพีเอช 0.7 โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงจรให้เท่ากับ 19.0 แอมแปร์ ในการทดสอบการกำจัดไอออนของทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 117.3 และ 1002.0 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดจะมีไอออนของทองแดงอยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.7 และ 4.3 พีพีเอ็มตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.42 และ 99.59 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 1002.0 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละ 90.20 ส่วนการทดสอบกับน้ำเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ ที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 99.97 และ 87.15 พีพีเอ็ม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัด จะมีไอออนของทองแดงเหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 0.75 และ 2.3 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของทองแดงคิดเป็นร้อยละ 99.25 และ 99.74 ตามลำดับ น้ำหนักทองแดงที่เกาะที่ขั้วแคโทดเมื่อทดสอบกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไอออนของทองแดงเริ่มต้นเฉลี่ย 871.5 พีพีเอ็ม คิดเป็นร้อยละ 67.11 [5]

หทัยทัต (2544) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่นิยมใช้กันมากคือการตกตะกอนด้วยสารเคมี ดังนั้นจึงก่อให้เกิดตะกอนโลหะจำนวนมากและจำเป็นต้องทำการบำบัดต่อไป การบำบัดตะกอนนิยมใช้วิธีการฝังกลบอันเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอน กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าความเป็นกรด - เบสที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน ปริมาณตะกอนแห้งประมาณ 0.7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริกคือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 ppm., นิกเกิล 95 ppm., สังกะสี 15 ppm. และโครเมียม 7 ppm. ขั้นตอนการกำจัดโลหะ พบว่ามากกว่า 90% ของทองแดงสามารถแยกออกมาได้ในสถานะโลหะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current Efficiency) สูงสุด และโลหะชนิดอื่น ๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electroprecipitation) พบว่าสามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบ 100% และกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 80% ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110 - 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตรโดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร [9]

มะลิ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโลหะ เนื่องจากเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรกเป็นการนำกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนสุดท้ายเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่าโลหะแต่ละชนิด มีสภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลจากสารละลายผสมได้ สภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับทองแดง โครเมียม และ นิกเกิลคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1090.90 แอมแปร์ต่อตารางเมตรตามลำดับ โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 6 มีผลต่อการนำกลับของทองแดง ในขณะที่โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 3 ไม่มีผล [10]

ณัฐศักดิ์ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารช่วยในการตกตะกอนโลหะทองแดง ในการศึกษาขั้นต้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 500 ppm. กำจัดโดยการใช้สารเคมีในการทดลอง 3 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ ในการตกตะกอนอออนทองแดง สำหรับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดทองแดงออกแล้ว ผลปรากฏว่าไม่มีสารใดให้ค่าความเข้มข้นของอออน Cu^{2+} หลังบำบัดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปัจจุบันได้มีการกำหนดค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำทิ้งที่ 2 ppm. สำหรับการทดลองจากน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นทองแดง 110.8 ppm. ทดลองใช้สารตกตะกอนร่วมกันเป็นคู่ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่ค่า pH ต่าง ๆ และผลจากค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมกับค่า pH ในการตกตะกอนอออนทองแดง ทำให้ค่าความเข้มข้นที่ต่ำสุดคือ 0.047 ppm. โดยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 4 เท่าร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ 10 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ pH 4 แต่เนื่องจากราคาต้นทุนของสารเคมีมีราคาสูง ดังนั้นในการกำจัดโลหะทองแดง เพื่อให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำ

ทั้งของโรงงานอุตสาหกรรมสามารถเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมกว่าคือ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 1 เท่า ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ 5 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ pH 5 ทำให้เหลือความเข้มข้นทองแดงคือ 1.16 ppm. โดยที่สภาวะนี้ราคาต้นทุนของสารเคมีในการกำจัดทองแดง คือ 1.6 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร [11]

จิตตกานต์ (2544) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ การทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ 1) การทดลองเบื้องต้นแบบแบตช์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงและทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงในน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ผลการทดลองเบื้องต้นแบบแบตช์พบว่าเรซินเหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนในขณะที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่เหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนแต่เหมาะสำหรับกำจัดทองแดง การดำเนินงานบำบัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ต่อรอบการทำงานด้วยเรซินพบว่าได้ผลตอบแทนประมาณ 1,119 บาท/ปี ส่วนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการเตรียมยังสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง [12]

มงคล (2549) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งมีสังกะสี (Zn) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) เป็นองค์ประกอบ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารทำปฏิกิริยาเพื่อตกตะกอน จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าการตกตะกอนทางเคมีสามารถกำจัดสังกะสี โครเมียม และทองแดงได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และทำให้คุณภาพน้ำภายหลังการบำบัดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดในการศึกษาด้วยวิธี Jar test และ Lab scale reactor โดยใช้ น้ำเสียที่มีสังกะสีปนเปื้อนซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำเสียต่างกัน พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 8.89-9.07 คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 96.4-98.2 เปอร์เซ็นต์ และ pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียมและทองแดงมีค่าเท่ากับ 7.25 คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด Cu^{2+} และ Cr^{3+} เท่ากับ 97.4 เปอร์เซ็นต์ และ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [13]

มณีนรัตน์ (2552) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ในรูปของสารละลายที่เป็นด่าง (SBH) ความเข้มข้น 1.2% ของ NaBH_4 ใน 4% ของ NaOH กำจัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากการชุบทองแดง น้ำเสียจากการชุบนิกเกิล น้ำเสียจากการชุบโครเมียมและน้ำเสียรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดงที่มีความเข้มข้น 550 ppm. ทำได้โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยเบสให้มีพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 แล้วจึงเติม NaHSO_3 5 เท่าของทองแดง และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 7 จะสามารถกำจัดทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม [14]

A. A. Al-Shammara, *et.al.* (2004) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบำบัด Cu^{2+} ion ออกจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ปลายด้านหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วบวกหรือแอโนด อีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบหรือแคโทด โดยที่ขั้วแคโทดสามารถหมุนได้ มีการทดลองกับน้ำเสียที่มี Cu^{2+} ion 100 ppm. โดยจากผลการทดลองพบว่าสามารถทำให้น้ำเสียหลังการบำบัดโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ppm. โดยให้ศักย์ไฟฟ้า 2-5 โวลต์ มีประสิทธิภาพในการนำกลับคืนของทองแดงที่ 20-53 % ใช้พลังงาน 4 -21 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อการกำจัดทองแดง 1 กิโลกรัมออกจากน้ำ

เสีย โดยมีการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรของศักย์ไฟฟ้า อัตราการหมุนของขั้วแคโทด มุมเอียงของขั้วแคโทด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ และอัตราการหมุนของขั้วแคโทดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง [15]

Tamilmani ,*et.al.* (2004) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบำบัด Cu^{2+} ion ออกจากน้ำเสียด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าวิธีCyclic voltammetry โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบ Galvanostatic เพื่อต้องการลดขั้นตอนในการบำบัดให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว โดยใช้ขั้วโบรอนที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของเพชรเป็นขั้วแคโทด ทำให้เกิดการเกาะของ Cu^{2+} ion ที่ขั้วดังกล่าว ซึ่งจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพ ในการกำจัด Cu^{2+} ion ช่วงความเข้มข้น 15-50 mg/L อยู่ระหว่าง 48 - 87 เปอร์เซ็นต์ [16]

ในโครงการวิจัยนี้เสนอแนวทางบำบัดของเสียเคมีที่มีทองแดงปนเปื้อนจากการเรียนปฏิบัติการเคมีทั่วไป โดยนำของเสียทางเคมีที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาปริมาณของทองแดงก่อนการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) หลังจากนั้นนำของเสียทางเคมีดังกล่าวมารีดิวซ์ด้วยโลหะแมกนีเซียมในสถานะเป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก [3] เนื่องจาก Cu^{2+} รั่วเล็กรอนได้ดีกว่า Mg^{2+} เกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงของโลหะทองแดง [4] แล้วบำบัดสารประกอบของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสโดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยศึกษาปัจจัยของตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนของทองแดง ได้แก่ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนของทองแดง ค่าความเป็นกรดและ ศักย์ไฟฟ้า แล้วมีการทดสอบหาปริมาณของทองแดงหลังการบำบัด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการบำบัดน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการการบำบัดค่อนข้างต่ำ