

การใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะทองแดงออกจากถ่านกัมมันต์ ที่ดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสีย

Electrochemical Treatment Process for the Recovery of Copper from Activated Carbon Adsorbed Copper in Wastewater

คำนำ

น้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน เนื่องจากโลหะหนักเช่น นิเกิล, ทองแดง, สังกะสี, โครเมียม ที่ปนอยู่ในน้ำก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) จะมีขั้นตอนหลัก ๆ 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมผิวงานก่อนชุบชิ้นงาน , การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า และการล้างชิ้นงานหลังการชุบ ส่วนใหญ่ประมาณ 90% ของน้ำทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการเป็นน้ำล้างในขั้นตอนการชุบเคลือบผิว เมื่อนำชิ้นงานออกจากถังชุบแล้ว ฟิล์มบางๆ ของสารละลายในถังชุบซึ่งประกอบด้วยโลหะหนักจะเคลือบผิวของชิ้นงาน หลังจากนำชิ้นงานไปล้างน้ำ น้ำส่วนนี้คือน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนอยู่ จึงมีความจำเป็นที่จะบำบัดน้ำล้างชิ้นงานหลังการชุบเพื่อนำน้ำสะอาดที่ได้กลับมาเป็นน้ำล้างอีก หรือเพื่อกำจัดโลหะหนักก่อนที่จะทิ้งลงสู่แหล่งน้ำในอดีได้มีความพยายามในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง โดยใช้โซดาไฟเป็นตัวตกตะกอน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งพบว่าวิธีนี้ทำให้เกิดการสูญเสียโลหะหนักบริสุทธิ์ที่มีค่าไป ปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาระบบการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยใช้หลักการดูดซับ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ซึ่งใช้เป็น Adsorbent เป็นวัสดุที่มีราคาสูง เมื่อใช้งานเสร็จสิ้นแล้ว ก็จะนำไปทำการกำจัดทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) การจะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีในการนำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะทำให้สูญเสียโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ในถ่านกัมมันต์ไป

การใช้วิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) เป็นวิธีการอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้กำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าได้ ซึ่งวิธีนี้ ทำให้สามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง แต่เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งไม่สูงมากนัก จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าในการเดินอุปกรณ์อิเล็กโทรไลซิสอยู่ตลอดเวลา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการกำจัดโลหะหนักทั้ง 2 วิธีมาประยุกต์ใช้ร่วมกันโดยการนำถ่านกัมมันต์มาดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง และใช้วิธีการอิเล็กโทรไลซิสในการนำกลับมาใช้ใหม่ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สามารถนำถ่านกัมมันต์และโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งหนึ่ง

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีความต้องการค้นหาวิธีใหม่ เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยศึกษาตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) มีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงได้เหมาะสมกับการนำมาใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ
2. ใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) แยกโลหะหนักออกจากถ่านกัมมันต์
3. ถ่านกัมมันต์ที่ถูกแยกโลหะหนักออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีแล้วแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่ และมีประสิทธิภาพเพียงพอหรือไม่

ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการนำมาใช้ใหม่ของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าที่เรียกว่า อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ซึ่งจะทำการศึกษาตามหัวข้อดังนี้

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ และการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส
3. ในส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ จะใช้การทดลองแบบ Batch เท่านั้น เพื่อตรวจวัดค่าความสามารถในการดูดซับทองแดงของถ่านกัมมันต์ โดยมีตัวแปรคือ ค่าความเข้มข้นของทองแดง ซึ่งจะทำให้การทดลองจนกระทั่งถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพ
4. ในส่วนของการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยไฟฟ้า จะทำการทดลองแบบ Batch เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยไฟฟ้าโดยศึกษาตัวแปรคือ pH, ค่าความต่างศักย์, ค่าความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่ทำการทดลอง ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดปริมาณโลหะหนักที่นำกลับมาจากการทดลอง
5. การนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองไปทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์หลังจากได้ทำการแยกโลหะออกจากถ่านกัมมันต์แล้ว

การตรวจเอกสาร

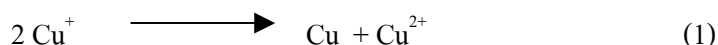
ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากที่สุดโลหะหนึ่ง มนุษย์ได้ใช้ทองแดงกันมานานกว่าโลหะทุกชนิดยกเว้นทองคำ เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในทางกายภาพและในทางโลหะผสม ทำให้ทองแดงมีประโยชน์ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะโลหะหรือโลหะผสม

เป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติในรูปของแร่ Chalcopyrite (CuFeS_2) Chalcocite (Cu_2S) Malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) Azarite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ ทั้ง Sulfide ทั้งหมด และ Sulfide mineral ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อปฏิกิริยาเอนไซม์ต่างๆ (enzymatic reaction) ในร่างกายมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Cu มีความแข็งตามสเกลมอห์ (Mohs' scale) 2.5 – 3.0 มีจุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 2,595 องศาเซลเซียส อ่อนตัวที่ 20 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 8.89 มีความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) 1.71 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ในแนวตั้งและโดยน้ำหนักที่ดีเด่นมาก เป็นรองก็แต่เงินและอลูมิเนียมเท่านั้น

สารประกอบทองแดงโดยทั่วไป ทองแดงจะมี oxidation state +1 (Cu^+) และ +2 (Cu^{2+}) ซึ่งเรียกว่า cuprous และ cupric ตามลำดับ โดย Cu^+ มีแนวโน้มจะเปลี่ยนรูปเป็น Cu^{2+} ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรกว่าเมื่อละลายน้ำดังสมการ



คุณสมบัติต่างๆที่ทำให้ทองแดงมีประโยชน์มากในทางอุตสาหกรรม คือ มีความนำไฟฟ้าและนำความร้อนสูง ทนต่อการสึกกร่อน มีความอ่อนตัว ทำให้เป็นเส้นได้ง่าย ความแข็งแรงสูง ไม่เป็นแม่เหล็ก ทองแดงและโลหะทองแดงหลายชนิดสามารถใช้เชื่อมต่อกันได้ และสามารถเคลือบด้วยไฟฟ้าหรือขั้วมันได้

ทองแดงกว่า 50% ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า อุตสาหกรรมชุบ-เคลือบโลหะ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ นอกจากนี้ยังเป็นโลหะในส่วนประกอบของยารักษาโรค ส่วนประกอบของยาฆ่าเชื้อรา ยาแก้นมแมลง อุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์เซรามิก (วรพันธุ์, 2532)

การแพร่กระจายของทองแดงลงสู่แหล่งน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบทองแดงจากแหล่งธรรมชาติ แต่เป็นเพียงส่วนน้อย โดยส่วนใหญ่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรมผสมโดยเฉพาะทองเหลือง การถูกรั่วซึ่งทำให้ทองแดงฟุ้งไปในอากาศ และถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำ การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชยาฆ่าเชื้อราในดิน การเติม CuSO_4 ลงสู่แหล่งน้ำเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายในอ่างเก็บน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของทองแดงในแหล่งน้ำ (McNeely *et al.*, 1979) โดยปริมาณทองแดง 1 mg/l. สามารถเป็นพิษต่อปลาในแหล่งน้ำนั้นได้ และระดับที่สูงกว่าจะทำให้เกิดรสขมน้ำขึ้น (Sewyer and McCarty, 1978) ดังนั้นกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมให้มีปริมาณทองแดงมากที่สุดไม่เกิน 1.0 mg/l.

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะผสม

กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย อาจแบ่งกระบวนการเป็น 2 กลุ่ม คือ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment) และกระบวนการบำบัดทางเคมี (chemical treatment) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนี้

1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

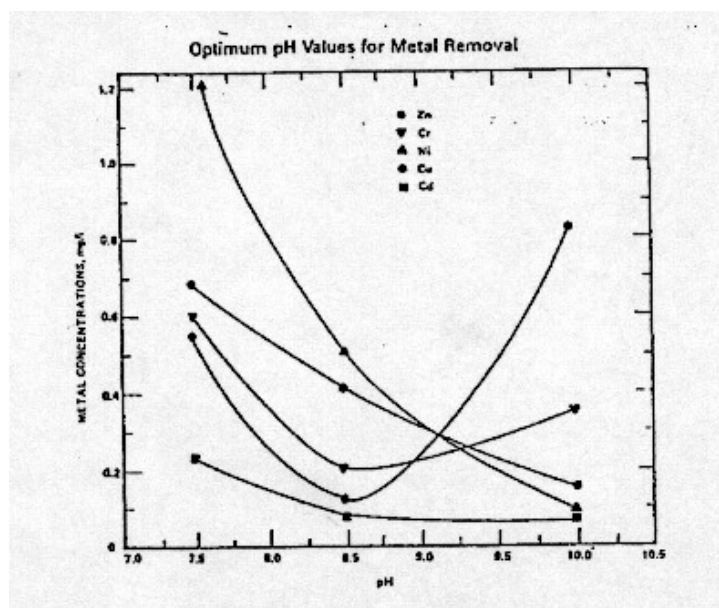
การดูดซับ คือ กระบวนการที่ใช้การเก็บสะสมสารที่ละลายอยู่ในสารละลาย ไว้ในผิวหน้าวัสดุที่เหมาะสม การดูดซับด้วยคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ชัลไฟด์ และโลหะหนัก ในการบำบัดน้ำเสียมีการพัฒนาใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากและมีขนาดเล็ก โดยมากการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นั้นมักใช้เป็นกระบวนการบำบัดต่อจากกระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นี้มีข้อดีคือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทำจากวัตถุดิบที่หาง่าย และราคาถูก เช่น กะลามะพร้าว ทะลายปาล์ม เป็นต้น แต่คุณภาพที่ได้จะแตกต่างกันไป นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง หลังจากผ่านการออกซิไดซ์สารที่ถูกเก็บกักอยู่ในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ แต่ทุกครั้งที่มีการออกซิไดซ์ 5 – 10 % ของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะถูกทำลาย ส่วนข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ถ่านกัมมันต์มีค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยา (selectivity) ต่ำ นั่นหมายความว่าถ้าในสารละลายมีสารที่ต้องการกำจัดเพียงชนิดเดียว ประสิทธิภาพในการกำจัดจะค่อนข้างสูง แต่ถ้าเมื่อไรก็ตามที่ในสารละลายมีสารอยู่หลายชนิด อยู่ปนกับสารที่ต้องการกำจัดซึ่งแต่ละชนิดมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ในกรณีนี้ประสิทธิภาพในการทำงานของถ่านกัมมันต์จะลดลงเนื่องจากเกิดความต้านทานจากสารชนิดอื่น เนื่องจากสารที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดูดซับได้ดีกว่า ซึ่งสารใดที่ถูกดูดซับได้ดีกว่านั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล adsorptive affinities และค่าความเข้มข้น ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ เครื่องปฏิกรณ์อาจเกิดการอุดตันได้ง่าย

2. กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation process)

กระบวนการนี้มักใช้เป็นกระบวนการก่อนการบำบัด (pretreatment) หรือกระบวนการบำบัด (treatment) น้ำเสียที่มาจากชุมชนและจากโรงงาน โดยใส่สารตกตะกอน เช่น alum ปูนขาว หรือเกลือของเหล็กและพอลิเมอร์ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับมวลสารซึ่งอยู่ในรูปของไอออน (ionize form) เป็นสารใหม่ที่ไม่ละลายน้ำ หรือมีความสามารถในการละลายลดลงอย่างมาก จึงทำให้สารดังกล่าวรวมตัวอยู่ในรูปของตะกอน ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารที่ละลายอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังก่อให้เกิดตะกอนจำนวนมากที่ต้องทำการบำบัดต่อไป

วิธีนี้จะแยกโลหะที่ผสมกันออกจากกัน โดยหลักการที่สารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายที่ไม่เท่ากันที่ค่าความเป็นกรด – เบสต่างกันคือ ทองแดงจะตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด – เบสสูงกว่า 5 สังกะสีตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด – เบสสูงกว่า 6 นิเกิลจะตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด – เบสสูงกว่า 7.5 ส่วนโครเมียมตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด – เบสระหว่าง 8.5 – 9



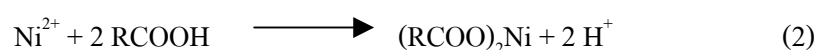
ภาพที่ 1 ค่าความเข้มข้นของโลหะที่ละลายในน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด - เบส ต่างๆ

3. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนมีความหมายโดยทั่วไปหมายถึง วัสดุที่มีไอออนเป็นส่วนประกอบไม่ว่าจะเป็นไอออนบวกหรือไอออนลบ และไอออนดังกล่าวสามารถถูกแลกเปลี่ยนด้วยไอออนชนิดเดียวกันและจำนวนเท่ากันระหว่างวัตถุและสารละลายที่วัตถุนั้นละลายอยู่ได้ด้วย โดยวัตถุที่มีไอออนลบเป็นองค์ประกอบเรียกว่า anion exchange ส่วนวัตถุที่มีไอออนบวกเป็นองค์ประกอบเรียกว่า cation exchange สารแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger) มีสมบัติพิเศษคือ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะดังนี้ โครงสร้างหลัก (frame work) จะเชื่อมกันอยู่ด้วยพันธะเคมีหรือพลังงานแลตติซ (lattice energy) โครงสร้างหลักนี้มีประจุบวกหรือประจุลบเป็นองค์ประกอบ และเมื่อมีไอออนตรงข้ามเข้ามาเป็นส่วนประกอบเพิ่มเรียกว่า ไอออนแลกเปลี่ยน (counter ion) เพื่อปรับสมดุล แต่ไอออนแลกเปลี่ยนนี้สามารถเคลื่อนที่และถูกแทนที่ด้วยไอออนชนิดเดียวกันจากสารละลายได้ต่างจากไอออนในโครงสร้างหลัก ดังนั้นเมื่อนำสารแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย ไอออนจากสารนั้นจะเคลื่อนที่ออกเข้าสู่สารละลายและไอออนที่มีประจุชนิดเดียวกันจากสารละลาย ก็จะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ไอออนที่หลุดออกไป

ในระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่ ตามปกติใช้การแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินได้ไม่เท่ากัน ประเภทของเรซินแบ่งเป็น 4 ประเภทย่อย ดังนี้

1. Weak acid cation resins เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวกโดยมีปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้



ซึ่งควรควบคุมความเป็นกรด – เบสให้อยู่สูงกว่า 7 มิฉะนั้นจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ การนำกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยล้างด้วยกรด เช่น กรดเกลือ (HCl) หรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

2. Strong acid cation resins เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวก สามารถแตกตัวได้ดีกว่า Weak acid cation resins จึงทำงานได้ในช่วงความเป็นกรด – เบสที่กว้างกว่า และการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องล้างด้วยกรดเช่นเดียวกันแต่ต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่า

3. Weak base anion resins เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนลบโดยมีปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้



ควรควบคุมความเป็นกรด – เบสให้ต่ำกว่า 7 เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ การนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยล้างด้วยเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

4. Strong base anion resins สามารถจับไอออนลบได้ทุกตัวทั้งมาจากกรดแก่หรือกรดอ่อน ควรควบคุมความเป็นกรด – เบสอยู่ต่ำกว่า 7 และการนำกลับมาใช้ใหม่สามารถล้างด้วยเบสเช่นเดียวกับ Weak base anion resins แต่ใช้ปริมาณที่มากกว่า

ข้อดีของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

- มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการกำจัดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นโลหะต่ำ ๆ เพราะความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับไอออนที่ต้องการแลกเปลี่ยนและเรซินที่เลือกใช้
- โดยหลักการแล้วสารละลายที่ผ่านกระบวนการนี้ จะมีความบริสุทธิ์สูงแม้ว่าจะมีความหลากหลายของไอออนในสารละลายขาเข้า เนื่องจากเรซินมีหลายชนิดและมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง
- มีอายุการใช้งานนานเพราะการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ทำให้เรซินที่ผ่านกระบวนการสามารถถูกรีเจนเนอเรต (regenerate) กลับมาใช้ใหม่ได้

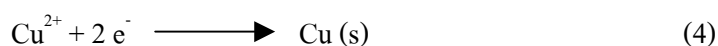
ข้อจำกัดของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

สารละลายที่ผ่านเข้ากระบวนการนี้ ต้องมีการกำจัดสารเจือปนชนิดอื่นออกไปก่อน ดังนั้นการบำบัดเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการนี้

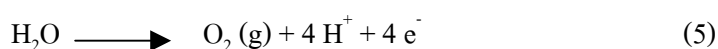
4. กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

เราสามารถแยกไอออนโลหะในสารละลายได้อย่างง่ายดาย ด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไอออนในสารละลายสามารถถูกแยกออกจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้า

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีข้อดีคือ เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่นลงในระบบ มีความว่องไวและมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง กล่าวคือ สามารถดำเนินการที่ค่าความเข้มข้นในหน่วยไมโครโมลาร์ได้ ไม่ก่อให้เกิดตะกอนหรือของเสียที่ต้องมีกระบวนการบำบัดต่อไป

5. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological process)

เป้าหมายหลักของกระบวนการทางชีวภาพคือ การกำจัดหรือลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย สารดังกล่าวเหล่านี้จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วสามารถนำไปใช้ในการเกษตรได้อีกครั้ง จุลินทรีย์ที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียคือ แบคทีเรีย เชื้อรา และโปรโตซัว โดยส่วนมากจะใช้แบคทีเรีย กระบวนการทางชีวภาพแบ่งตามลักษณะการดำรงชีวิตของแบคทีเรียได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (aerobic process) และกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic process) พื้นฐานทางทฤษฎีของระบบบำบัดทั้งสองนี้เหมือนกันคือ น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบจะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่มีแบคทีเรียอยู่ แบคทีเรียจะย่อยสลายสารดังกล่าวเพื่อใช้เป็นอาหารและใช้ในการเจริญเติบโต

ในระบบบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน เพื่อให้ระบบดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการเพิ่มการเป่าอากาศ ซึ่งจะช่วยให้มีการผสมอย่างทั่วถึงของสารในถังปฏิกรณ์ จากนั้นสารละลายจะถูกปล่อยออกจากถังปฏิกรณ์เข้าสู่ถังตกตะกอน เพื่อแยกแบคทีเรียและสารละลายที่ผ่านการบำบัดออกจากกัน โดยสารละลายอาจผ่านสู่กระบวนการบำบัดต่อไปหรืออาจถูกปล่อยทิ้งได้เลย ส่วนตะกอนที่ประกอบด้วยแบคทีเรียนั้น บางส่วนจะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบ บางส่วนจะถูกปล่อยทิ้งเพื่อรักษาปริมาณของแบคทีเรียและตะกอนทิ้งให้คงที่ ซึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบนั้น ระบบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน แต่ต้องเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักเจือปนอยู่น้อยและมีอัตราการไหลต่ำ และข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ระบบมีความไวต่อสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด – เบส ปริมาณสารที่มีพิษ และอัตราการไหลของสารละลาย

จากข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่ากระบวนการโดยส่วนมากต้องมีการบำบัดรองรับของเสียที่ออกจากกระบวนการ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและ

ยังมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณากระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะพบว่ามีความเสี่ยงน้อย และสามารถนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้และเป็นการลดปริมาณตะกอน แต่ในระบบที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงมาก การใช้ไฟฟ้าเคมีจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง จึงนำระบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาร่วมเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลง ในหัวข้อต่อไปจึงขอกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

การดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) ในเบื้องต้นใช้กับการดูดซับของก๊าซ ซึ่งถูกค้นคว้าโดย Scheele ในปี ค.ศ. 1773 ภายหลัง Lowitz ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการดูดซับของสารละลายในปี ค.ศ. 1785 ในปัจจุบัน กระบวนการดูดซับถูกใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย ซึ่งจะใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นตัวดูดซับ โดยมักใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นที่ 3 (tertiary treatment) เพื่อใช้ในการบำบัดสี กลิ่น หรือสารอินทรีย์ต่างๆที่ยังคงเหลือในน้ำนั้น โดยการดูดซับจะเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิวของสารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งจะเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ หรือ ของแข็งกับของเหลว โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาจับติดบนผิวสัมผัสจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate)

กลไกการดูดซับ

การดูดซับของสารอินทรีย์เกิดจากแรงดูระหว่างโมเลกุลของสาร และพื้นที่ผิวของการดูดซับ ซึ่งแรงทั้งหมดกำเนิดมาจากปฏิกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) กลไกการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าใกล้สารดูดซับ เมื่อแรงดึงดูดสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของสารดูดซับ กระบวนการดูดซับจึงเกิดขึ้น การดูดซับจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรงที่เกิดจากการแพร่ (dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ ซึ่งจะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้น โมเลกุลก่อนหน้า โดย

จำนวนชั้น จะขึ้นกับสัดส่วนความเข้มข้นของโมเลกุลของสารดูดซับ โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการนี้จะขึ้นกับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดูดซับน้อยก็จะเกิดการหลุดลอกของสารถูกดูดซับได้โดยง่าย

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ โดยทั่วไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปของสารถูกดูดซับ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบทางเคมี โดยรูปแบบของการเกิดสารประกอบทางเคมีจะแตกต่างจากปฏิกิริยาทางเคมีทั่วไป โดยที่อะตอมบริเวณผิวของสารดูดซับยังคงรักษาลักษณะดั้งเดิมบนผิวนั้นไว้ การดูดซับจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (single layer) และจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เอง แต่จะมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยการดูดซับทางเคมีจะเกิดที่อุณหภูมิสูง

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของสารชนิดต่างๆ ที่ไม่มีสูตร โครงสร้างแน่นอน และมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ถึงแม้ไม่บริสุทธิ์ถึง 100% พื้นฐานทั่วไปของถ่านกัมมันต์ คือ มีรูพรุนภายในสำหรับดูดซับจำนวนมาก ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะเกี่ยวพันโดยตรงกับขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่มีอยู่

แหล่งที่มาของถ่านกัมมันต์

แหล่งที่มาของคาร์บอนมาจากหลายแหล่งดังตารางที่ 1 ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีบางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวัสดุแต่ละที่มาจะมีลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติของตัวเอง เช่น กะลามะพร้าวมีความหนาแน่นสูงจะผลิตคาร์บอนที่มีการกระจายตัวของรูพรุนเล็กๆ (porous) ได้อย่างมาก และจะมีความหนาแน่นสูงกว่าคาร์บอนที่มาจากกระดาศบด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น เช่น การเผาไหม้ ซึ่งการเผาไหม้ที่แตกต่างกันจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของพื้นที่ผิว และความสามารถในการดูดซับนอกเหนือจากส่วนประกอบของธาตุและโมเลกุลของวัสดุ

ตารางที่ 1 วัสดุในการผลิตถ่านกัมมันต์

พืช	สัตว์	อื่นๆ
ชานอ้อย	เลือด	ถ่าน
Sludge ของพืชผักกาด	กระดูก	ของเสียจากโรงเหล้า
ธัญพืช	ปลา	แกรไฟต์
กะลามะพร้าว	หนัง	เขม่า
เมล็ดกาแฟ		ของเสียจากโรงงานฟอก
ซังข้าวโพด		ลิกนิน
เมล็ดฝ้าย		ลิกไนต์
ผงเลื่อย		หินน้ำมัน
ไม้		Sludge กรดปิโตรเลียม
รำข้าว		ถ่านปิโตรเลียม

ที่มา: Faust and Aly, 1987

ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามรูปร่างลักษณะ ได้แก่

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC) ส่วนใหญ่ผลิตจากไม้ มีขนาดอยู่ในช่วง 15-25 μm ในทางอุตสาหกรรมมักใช้ PAC ในกระบวนการฟอกสีอาหาร เช่น น้ำตาล กระบวนการบำบัดน้ำเสีย และการกรองน้ำดื่ม เป็นต้น เมื่อ PAC ถูกใช้แล้ว ไม่เพียงแต่หมดความสามารถในการดูดซับ แต่ประจุที่ผิวยังจับกับตะกอนจากของเหลวแข็งเป็นก้อน ซึ่งในกรณีนี้การทำให้คืนสภาพ (regeneration) เป็นไปได้ยาก จึงเป็นเหตุผลว่า เหตุใดเมื่อใช้ PAC แล้ว ส่วนใหญ่จึงทิ้งมากกว่าที่จะนำมาทำการคืนสภาพเพื่อใช้ใหม่

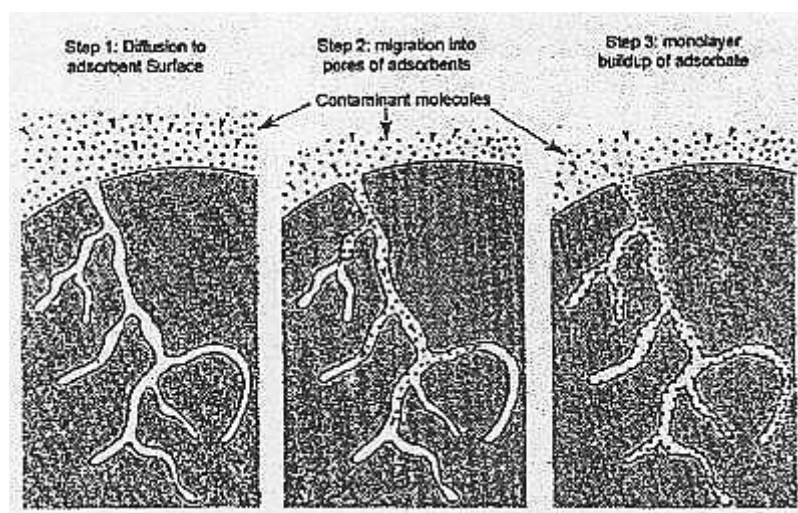
ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon, GAC) อยู่ในรูปของเม็ดที่ได้จากการบด (ถ่าน หิน หรือเปลือกไม้) หรือจากการทำให้เป็นเม็ดของผงที่บดโดยใช้ตัวยึด เช่น coal tar pitch ขนาดของเม็ดจะแตกต่างกัน ขึ้นกับการนำไปใช้งาน ในกรณีการดูดซับก๊าซ เม็ดรูป

ทรงกลมจะอยู่ในช่วง 4 - 6 มิลลิเมตร โดยนำไปใช้ในการฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ การดูดซับเฟอร์ในก๊าซร้อน และการแยกก๊าซที่รวมอยู่ แต่ในการดูดซับของเหลว มักใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กกว่า ทั้งนี้ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและวิธีการนำมาใช้งาน โดยทั่วไปจะใช้ในการฟอกสีน้ำตาล การกำจัดสารอินทรีย์ การกำจัดกลิ่นและสิ่งแปลกปลอมในน้ำดื่ม และการบำบัดน้ำเสีย

กลไกในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

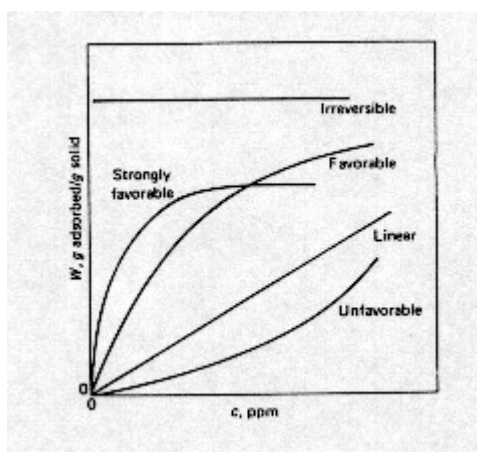
1. โมเลกุลของตัวแพร่ผ่านจากบัลค์เฟสไปยังพื้นที่ผิวด้านนอกของอนุภาคของตัวดูดซับ
2. โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอก ซึ่งมีพื้นที่น้อยไปยังรูพรุนภายในอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า และการดูดซับเกือบทั้งหมดจะเกิดภายในรูพรุนนี้
3. โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน



ภาพที่ 2 กลไกการดูดซับ

สมมูลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

โดยทั่วไปการกระจายตัวของสารระหว่างเฟสเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือไม่มีการดูดซับสุทธิเกิดขึ้น จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของสาร เมื่อเข้าสู่สมดุลของการดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยทั่วไปความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของเหลวมักแสดงในรูปของหน่วยมวล เช่นหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) ชนิดไอโซเทอมการดูดซับทั่วไปได้แก่



ภาพที่ 3 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับ

Linear isotherm จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด โดยที่ปริมาณตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

Favorable isotherm ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ตัวดูดซับมีความสามารถที่จะดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าในกรณีของ linear isotherm ดังนั้นเส้นกราฟจึงมีลักษณะดังรูปที่ 3

Unfavorable isotherm ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลื่ออยู่ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น แต่ตัวดูดซับมีความสามารถที่จะดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าในกรณีของ linear isotherm ดังนั้นเส้นกราฟจะมีลักษณะดังรูปที่ 3

Irreversible isotherm ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่เหลื่ออยู่ในสารละลาย จากรูปที่ 3 กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอน

ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอโซเทอร์มของ Langmuir, BET, Gibbs and Freundlich จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าไอโซเทอร์มที่เหมาะสมกับการดูดซับทองแดงด้วยถ่านกัมมันต์ ได้แก่ไอโซเทอร์มของ Langmuir และไอโซเทอร์มของ Freundlich

ไอโซเทอร์มของ Langmuir

สมการทางคณิตศาสตร์นี้พัฒนาจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของของแข็ง โดยสมมติฐานว่าพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิว การดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะที่และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดมากที่สุดเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว ได้ดังสมการ

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad (6)$$

โดยที่	x/m	คืออัตราส่วนระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ (mg ตัวถูกดูดซับ/g ถ่านกัมมันต์)
	a,b	คือค่าคงที่จากการทดลอง
	C _e	คือค่าความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หลังกระบวนการดูดซับ (mg/L.)

ไอโซเทอรัมของ Freundlich

Freundlich ได้เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายสมดุลของการดูดซับดังสมการ

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (7)$$

โดยที่	x/m	คืออัตราส่วนระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ (mg ตัวถูกดูดซับ/g ถ่านกัมมันต์)
	K_f	คือ Freundlich capacity factor
	C_e	คือค่าความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หลังกระบวนการดูดซับ (mg/L.)
	1/n	คือ Freundlich intensity parameter

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ชนิดผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ในส่วนของพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ (adsorptive capacity) กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ดังนั้นขนาดของถ่านกัมมันต์จึงมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเนื่องจากถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดเกล็ดมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน จึงมีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกันด้วย

ความดัน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบถ่านกัมมันต์จะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปยังถ่านกัมมันต์ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความดันสูง น้ำจะไม่สะสมตัวเป็นฟิล์มหนารอบถ่านกัมมันต์ ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้าไปใกล้ถ่านกัมมันต์ได้อย่างรวดเร็ว

พีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถถูกดูดซับได้ดีบนผิวของคาร์บอน

อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบ exothermic

การประเมินและเลือกใช้ถ่านกัมมันต์

การใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือน้ำประปา เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด จำเป็นต้องมีการคัดเลือกถ่านกัมมันต์และรูปแบบการดำเนินการที่เหมาะสม โดยทำการทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์และคุณสมบัติของน้ำเสีย ทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี คุณภาพของน้ำทั้งที่ต้องการ วิธีการบำบัด ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ ฯลฯ เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกชนิดและรูปแบบในการใช้งานของถ่านกัมมันต์

ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

พื้นที่ผิว (surface area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับ ถ่านที่มีพื้นที่ผิวมาก จะมีความสามารถในการดูดซับมาก

ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการ ปรับปรุงสภาพของถ่านกัมมันต์

ความหนาแน่นก้อน (bulk density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละงาน

ขนาดใช้งาน (effective size), เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean particle diameter), และสัมประสิทธิ์ความเสมอกัน (uniform coefficient) ใช้ในการกำหนดสถานะทางชลศาสตร์ (hydraulic condition) ของคอลัมน์หรือดูดซับ (adsorption column)

ปริมาตรรูพรุน (pore volume) เป็นตัวกำหนดการดูดติดโมเลกุลของน้ำเสีย

การหาขนาดผ่านชั้นตะแกรงของถ่าน (seive analysis) ใช้เป็นตัวตรวจสอบขนาด ของถ่านที่นำมาใช้งาน

ตัวเลขการกัดกร่อน (abrasion number) แสดงถึงค่าของถ่านกัมมันต์ว่ามีมากน้อย เพียงใด

ความชื้น (moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านที่ได้จากการผลิต และถ่านที่จะนำไป ใช้งานต่อไป

ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

โมลาสัมเบอร์ (molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ขนาดของรูพรุน (pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

Srivastava และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะหนักโดยใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตปุ๋ย ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 200 – 500 เมช และมีพื้นที่ผิวประมาณ 629 ตารางเมตรต่อกรัม โดยได้ศึกษาการดูดซับของทองแดง (Cu^{2+}) โครเมียม (Cr^{6+}) พรอท (Hg^{2+}) โมลิบดีนัม (Mo^{6+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) ทั้งระบบแบบพัชและระบบต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก

McKay และ Bino (1990) ศึกษาการดูดซับฟีนอล พรอท และ p-chlorophenol จากน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ในระบบต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงผลของความสูง Bed อัตราการไหล และความเข้มข้นของสารที่มีต่อการดูดซับ พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลอง Bed Depth Service Time (BDST)

การคืนสภาพของสารดูดซับที่ไม่ใช้แล้ว (Regeneration of spent adsorbent)

วัตถุประสงค์ของการคืนสภาพ (regenerate) มี 2 ประการ คือ

1. เพื่อรักษาสมรรถภาพของการดูดซับของสารดูดซับที่เสื่อมไป
2. เพื่อให้สารถูกดูดซับในสารดูดซับกลับคืนมา

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการวัฏจักร ประกอบด้วย ขั้นตอนการดูดซับ และขั้นตอนการคืนสภาพ โดยประสิทธิภาพและราคาของการคืนสภาพ มีบทบาทสำคัญในความเหมาะสมทั้งหมดของกระบวนการดูดซับ

ทางเลือกของการคืนสภาพสารดูดซับที่ใช้แล้ว มีหลายทางเลือกด้วยกัน ดังนี้

1. โดยไอน้ำที่มีความดันต่ำ
2. โดยอุณหภูมิสูง ซึ่ง adsorption isotherm เป็นสิ่งสำคัญต่อ desorption
3. โดยการเปลี่ยน affinity ระหว่าง adsorbate และ adsorbent โดยสารเคมี
4. โดยการสกัด adsorbate โดยสารละลายเข้มข้น
5. การเอา adsorbate ออกโดยการแตกสลายโดยใช้อุณหภูมิ หรือโดยทางชีวเคมี

วิธีที่ 1 และ 2 โดยปกติใช้กับการคืนสภาพตัวดูดซับที่เป็นก๊าซ โดยธรรมชาติแล้ว วิธีการที่ 2 สามารถประยุกต์ใช้กับของเหลว ถ้าในกรณีที่มีความสัมพันธ์ในเฉพาะกรณี

วิธีที่ 3 และ 4 เป็นแบบเฉพาะสำหรับการดูดซับที่เป็นของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีผลเมื่อบำบัดตัวดูดซับ ที่ต้องการการคายการดูดซับโดยสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งเป็นที่นิยมในการนำมาบำบัดกรดอินทรีย์ที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

การคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีการทางเคมี (Regeneration of Spent Activated Carbon by Chemical Method)

การคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยวิธีการทางเคมี มักกระทำในของเหลว ซึ่งมีหลายวิธีดังนี้

การคืนสภาพโดยสารละลายอินทรีย์ (Regeneration by an Organic Solvent)

ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสารเคมีไว้แล้ว จะนำมาสัมผัสกับสารละลายที่สามารถละลายตัวดูดซับได้ โดยขณะสัมผัสสารละลายจะละลายตัวดูดซับออกจากถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ก็สามารถละลายสารที่ถูกดูดซับออกมาได้แล้ว ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายที่เลือกใช้ จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของ activated carbon bed, อัตราการไหลระหว่างการคืนสภาพ และความสามารถในการละลายของสารเคมีที่ถูกดูดซับในตัวทำละลาย

การคืนสภาพโดยฟอร์มัลดีไฮด์ (Regeneration by Formaldehyde)

โดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว มาทำการคืนสภาพโดยสัมผัสกับฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาล้างฟอร์มัลดีไฮด์ที่คงค้างอยู่ออกไป และสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

การนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาสัมผัสกับฟอร์มัลดีไฮด์มีหลายวิธี เช่น ถ่านกัมมันต์อยู่ในคอลัมน์ เราอาจใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ผ่านคอลัมน์นี้ไปจนกระทั่งถ่านกัมมันต์กลับคืนสู่สภาพดูดซับได้ จุดที่จะคว่าได้รับการคืนสภาพเรียบร้อยแล้วหรือยัง อาจทำได้ง่ายๆ โดยการตรวจสอบของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ กรดฟอร์มิกจะออกมาจากคอลัมน์ก่อนที่จะถึงจุดที่คืนสภาพเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะไม่มีกรดฟอร์มิกออกมาอีก เราจะตรวจพบแต่ฟอร์มัลดีไฮด์ เวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์กับฟอร์มัลดีไฮด์ ขึ้นกับชนิดของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไประยะเวลาของการคืนสภาพอยู่ที่ 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง และความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 1 – 5 ทั้งนี้ขึ้นกับน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

การคืนสภาพด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว (Regeneration with liquid Carbondisulfide)

เป็นการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดซัลไฟด์ออกจากอากาศเสียในอุตสาหกรรมกาว ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะสูญเสีย เนื่องมาจากการปนเปื้อนของกำมะถัน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในอากาศเสีย

การคืนสภาพโดยสารละลายอัลคาไลน์และตัวทำละลายอินทรีย์ (Regeneration by Alkaline and ad Organic solvent)

เป็นการคืนสภาพโดยการรวมถ่านกัมมันต์กับพวกอัลคาไลน์เพื่อเปลี่ยนขั้วของคาร์บอน และทำการแยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

ในกรณีที่สารถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ประเภทกรด เช่น กรดอะซิติก ในการใช้สารละลายอัล-คาไลน์จะมีปฏิกิริยากรด-เบสเกิดขึ้น ซึ่งจะสามารถกำจัดสารดูดซับออกได้มากกว่า

สารถูกดูดซับประเภทอื่น อีกทั้งขั้นตอนการทำ reactive ถ่านกัมมันต์จะมีความจำเป็นลดลง เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นคือเกลือของโลหะ ซึ่งละลายน้ำได้ดี

การคืนสภาพโดยใช้กรดกำมะถันและแอมโมเนีย (Regeneration using Sulfuric Acid and Ammonia Scrubber)

การคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับกรดกำมะถันแล้วคืนสภาพ ในขั้นแรกให้ล้างกำมะถันออกจากถ่านกัมมันต์ โดยใช้กรดกำมะถันเจือจางหรือน้ำเป็นตัว scrubbing agent จากนั้นจึงใช้แอมโมเนีย แอมโมเนียผสมน้ำ หรือน้ำ เป็นตัว scrubbing agent สารละลายที่ได้ในขั้นนี้ จะประกอบด้วยแอมโมเนียซัลเฟตจำนวนเล็กน้อย ในขณะที่สารละลายในขั้นแรก จะประกอบด้วยกรดกำมะถันในจำนวนพอสมควร

การคืนสภาพโดยใช้สารละลายไอโอดีน (Regeneration by Iodine Solution)

เหมาะกับการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำดื่มหรือน้ำทิ้ง โดยนำไปผ่านสารละลายไอโอดีน ซึ่งเป็นเสมือนตัวดึงสิ่งที่ดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ ไอโอดีนสามารถทำให้อยู่ในสารละลายได้ไม่ว่าจะเป็นน้ำ เช่น โพแทสเซียมไอโอไดน์ หรือ อาจเป็นสารละลายที่มีสารอินทรีย์เป็นตัวทำละลายก็ได้

ไอโอดีนที่อยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์หลายๆตัว จะเป็นตัวฟอกอย่างแรงสำหรับถ่านกัมมันต์ และสามารถฟอกเอาตัวถูกดูดซับที่จับแน่นอยู่กับถ่านกัมมันต์ ซึ่งตัวทำละลายอินทรีย์ของไอโอดีน อาจใช้พวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ เบนซีน, โทลูอิน, พาราไซลีน, ออโรไซลีน, เมตะไซลีน หรือนอมอลเฮพเทน เป็นต้น

การล้างไอโอดีนออกจากถ่านกัมมันต์ จะใช้ agent จำพวก โซเดียมซัลไฟด์, โพแทสเซียมซัลไฟด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์, กรดกำมะถัน หรือ โซเดียม/โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถล้างออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำได้โดยง่าย ไอโอดีนสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับพวก oxidizing agent เช่น พวกคลอรีน และ ไอโอดีนสามารถแยกออกจากสารละลายโดยการตกตะกอนเป็นของแข็ง ซึ่งมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ อาจนำไปทิ้ง หรือนำมาทำการคืนสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

การคืนสภาพโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (Regeneration by Hydrochloric Acid)

เป็นวิธีการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกน้ำเสียให้บริสุทธิ์ กระแสไฮโดรคลอริกจะถูกเติมลงใน carbon bed ซึ่งบรรจุน้ำ กระแสไฮโดรคลอริกและน้ำจะถูกผสมให้เข้ากันอย่างดีเพื่อให้มีการกระจายอยู่ใน carbon bed ของผสมระหว่างกรดและน้ำจะถูกปล่อยให้อยู่ในเวลาที่พอเหมาะเพื่อ reactive ถ่านกัมมันต์ เมื่อได้เวลาตามที่ต้องการ กรดและน้ำจะถูกปล่อยออกมาจากถ่านกัมมันต์

การคืนสภาพโดยใช้กรดแร่ (Regeneration by Mineral Acid)

เป็นวิธีการที่ใช้ในการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว ประกอบด้วย สารประกอบไฮดรอกซีเอมีนและอนุพันธ์ ที่มีจุดเดือดสูง ตัวอย่างเช่น เฟนิลเอทานอลามีน, ไตรเอทานอล-ลามีน, ไดเอธิลามีโอเอทานอล เป็นต้น

ตัว desorbent ในกระบวนการ desorption คือ สารละลายพวกกรดแร่ ในขณะที่ตัว desorbent ผ่าน carbon bed ตัวกรดในสารละลายจะเปลี่ยนสภาพเป็นเกลือ และเกลือนี้จะละลายกรดที่ตกค้างอยู่ ทำให้สามารถนำกรดออกจาก carbon bed ได้ โดยสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก, กรดไนตริก, กรดกำมะถัน และกรดฟอสฟอริก มักเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้

Ouki และ Neufeld ศึกษาถึงการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดึงกลับ (recovery) โลหะโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้คอลัมน์ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ 1.5 นิ้ว และสูง 10 นิ้ว โดยป้อนสารละลายเข้าคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ถ่านกัมมันต์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร และพื้นที่ผิวประมาณ 1,050 – 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม จากการทดลองพบว่า ความเป็นกรดต่างมีผลต่อการดูดซับ เนื่องจากในระหว่างทำการการดูดซับจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันโครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของคาร์บอนได้เป็น active site เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 2.2 โครเมียม (VI) จะถูกรีดิวซ์ได้มากที่สุด เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ในสภาวะกรด จะได้โครเมียม (III) และหลังจากทำการฟื้นฟูสภาพแล้วจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับครั้งต่อไปสูงขึ้น ส่วนการฟื้นฟูสภาพที่สภาวะด่าง จะได้โครเมียม (VI) แต่ภายหลังจากการฟื้นฟูสภาพจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง สำหรับการฟื้นฟูสภาพในสภาวะด่างแล้วตามด้วยกรด จะทำให้สามารถนำโครเมียมกลับมาได้มากที่สุด

การแยกโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือกระบวนการที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี กระบวนการนี้ได้ถูกค้นพบเมื่อกลางศตวรรษที่ 19 การเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไป-มาระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) 2 ขั้วที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายนอก หลักการขั้นพื้นฐานสำหรับปรากฏการณ์ไฟฟ้าเคมีถูกค้นพบโดย Michael Faraday และนักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ ก่อนที่จะมีการค้นพบอิเล็กตรอนโดย J.J. Thomson ในปี 1893

ในช่วง 4 ทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษากลไกและศึกษาพลศาสตร์ (dynamic) ของกระบวนการถ่านไอออนอิเล็กตรอน โดยเน้นในเรื่องกลไกการเกิดปฏิกิริยาอันซับซ้อนของไอออนโลหะอันเชื่อมโยงไปสู่กระบวนการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าเคมีกับการศึกษาด้านสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และชีวเคมี ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆด้านรวมทั้งการบำบัดน้ำเสียด้วย

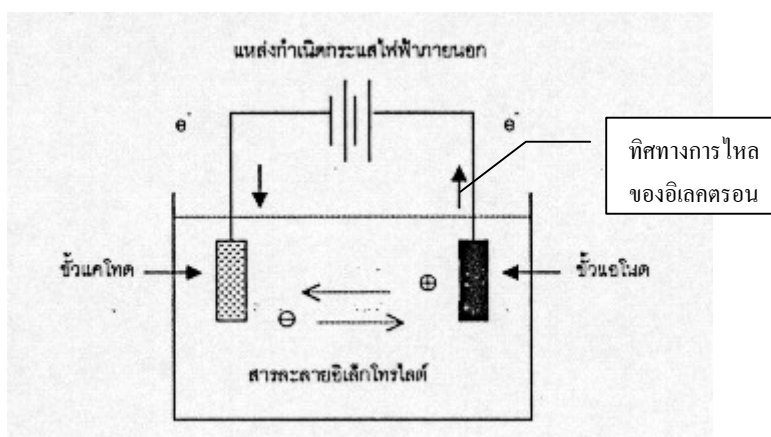
ดังที่กล่าวมาแล้ว กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและผิวหน้าขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้นโดยอาศัยพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก โดยการให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน –รีดักชันของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ไอออนโลหะทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะเกาะที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้สามารถแยกโลหะออกมาจากสารละลายได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอก เป็นส่วนที่ควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าผ่านเข้าสู่ระบบ

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในกระบวนการไฟฟ้าเคมี สมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยา

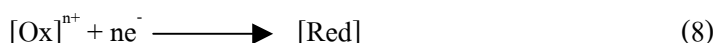
และกระบวนการอาทิจเช่น องค์ประกอบ ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด – เบส หรือแม้กระทั่ง อุณหภูมิ

พิจารณาการเดินทางของอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อต่อแหล่งกำเนิด กระแสไฟฟ้าภายนอกเข้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในอิเล็กโทรไลต์ ดิคเซลล์ แสดงดังรูปที่ 4

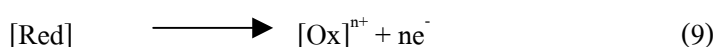


ภาพที่ 4 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ผลักดันให้อิเล็กตรอนในเส้นลวดเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามลูกศรไปยังขั้วไฟฟ้า โมเลกุลหรือไอออนของสารออกซิไดซ์ในสารละลายจะถ่ายโอนเข้าสู่ผิวหน้าของขั้วโดยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับอิเล็กตรอนดังนี้



เราเรียกขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือขั้วลบว่า “ขั้วแคโทด (cathode)” ส่วนขั้วทางขวามือในรูปที่ 4 โมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบดังสมการ



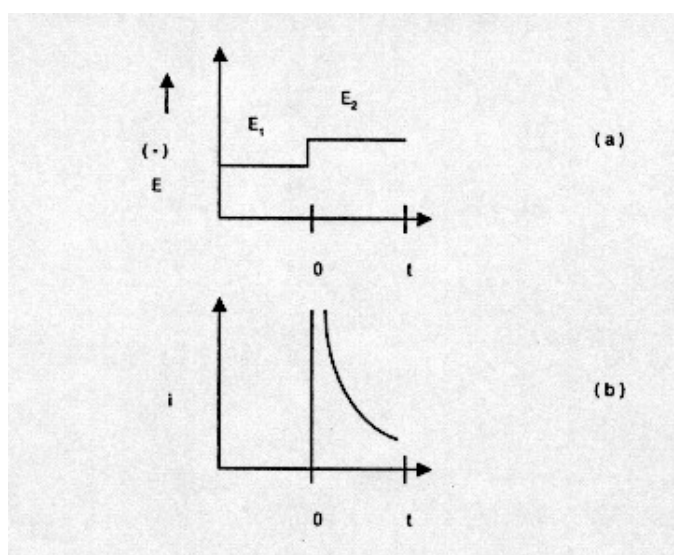
เราเรียกขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือขั้วบวกว่า “ขั้วแอโนด (anode)” ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านสายไฟของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกสู่ขั้วแคโทด

การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

1. การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่

พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ให้คงที่ อยู่ที่ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไป กับเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวหน้าของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้ามีค่าต่ำลง ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 5 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

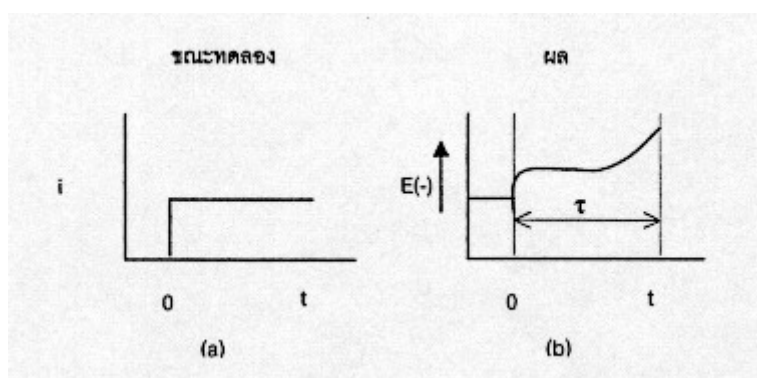
E_1 คือค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือ mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูป 5 เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)

2. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

การทำงานที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบให้คงที่ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะเปลี่ยนไป กับเวลา วิธีการนี้เรียกว่า chronopotentiometry หรือ chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ดังรูปที่ 6



ภาพที่ 6 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่

ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า

พิจารณาสมการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า $Ox + ne^- \leftrightarrow Red$ การเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยขั้นตอนที่เปลี่ยนตัวออกซิไดซ์ที่ละลายอยู่ในสารละลายให้กลายเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

1. การถ่ายโอนมวลสาร (ถ่ายโอนถ่ายโอนตัวออกซิไดซ์ในสารละลายสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า)

การถ่ายโอนมวลสารในสารละลายประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกันคือ ไมเกรชัน (migration) การแพร่ (diffusion) และการพา (convection) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการได้ดังนี้

ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดและไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด ความเร็วในการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหา หรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่มีประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกัน จะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

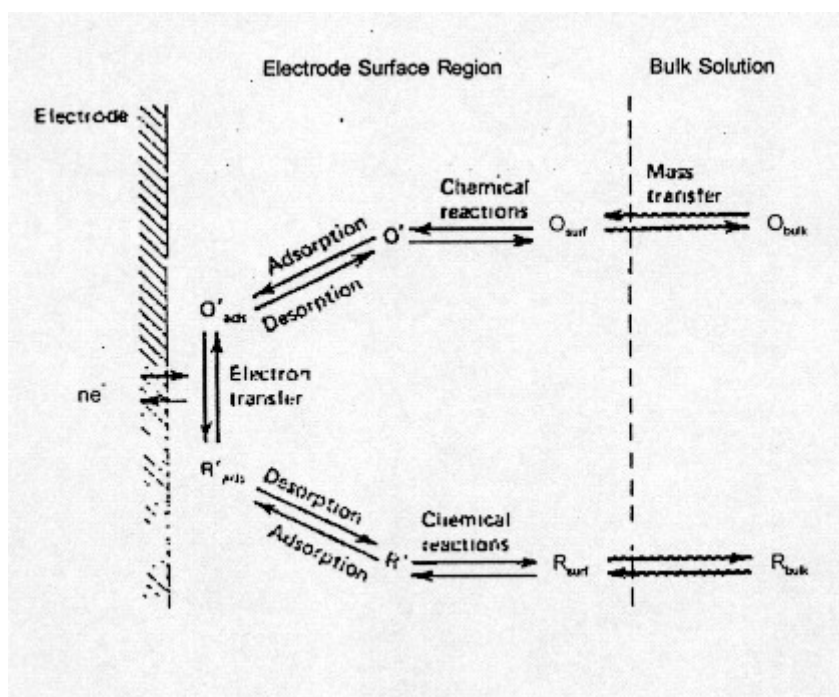
การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย อัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

การพา ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย

2. การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

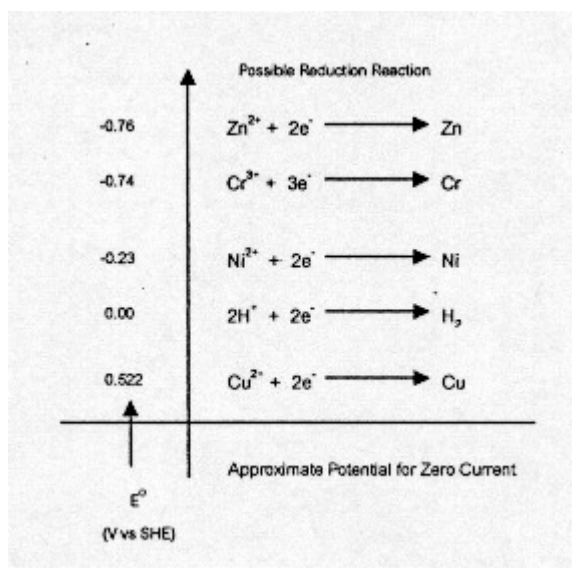
3. การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

4. ปฏิกริยาอื่นๆที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เช่น ปฏิกริยาการดูดซับ (adsorption) ปฏิกริยาการถ่าย (desorption) ปฏิกริยาอิเล็กโตรดีโพสิชัน ดังรูปที่ 7



ภาพที่ 7 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย

ในกรณีที่สารละลายมีตัวออกซิไดซ์ (ไอออนโลหะ) หลายๆชนิดละลายผสมกันอยู่ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด จะเรียงตามลำดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่ 25 องศาเซลเซียส (E^0_{rxn}) ซึ่งหมายความว่าตัวออกซิไดซ์ที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟารีดักชันมาตรฐานมากกว่า จะเกิดปฏิกิริยาได้ก่อนหรือสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวออกซิไดซ์ตัวอื่น ค่าศักย์ไฟฟารีดักชันมาตรฐานของแต่ละธาตุแสดงดังรูปที่ 8



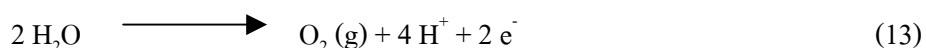
ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของแต่ละธาตุ

พบว่าไอออนของทองแดงมีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานสูงที่สุด ซึ่งก็หมายความว่าทองแดงมีความว่องไวในการรับอิเล็กตรอน หรือมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเร็วที่สุด ดังนั้นทองแดงจะถูกนำกลับด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีได้ก่อนโลหะอื่น เพราะไอออนของโลหะอื่นมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานค่อนข้างต่ำ โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันจึงมีน้อย นอกจากนี้ยังมีโมเลกุลของน้ำและไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันแข่งกับไอออนต่างๆ ได้อีกด้วย โดยโมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์หรือถูกออกซิไดซ์แล้วกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด หรือแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด ตามปฏิกิริยา

ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่ขั้วแอโนด



ดังนั้นธาตุชนิดอื่นที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานน้อยกว่าน้ำ จะเกิดการรีดิวซ์ของธาตุได้ยากกว่าการรีดักชันของน้ำ ดังนั้นจึงอาจต้องใช้กระแสสูงมากในการนำกลับโลหะอื่นที่ไม่ใช่ทองแดง

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อต้นศตวรรษที่ 19 โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในกระบวนการไฟฟ้าเคมี จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์และระยะเวลา

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้นสามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM}{nF} \quad (14)$$

เมื่อ	m	คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี (กรัม)
	s	คือ จำนวนโมลของตัวออกซิไดซ์ตามสมการเคมี
	M	คือ มวลโมเลกุล (กรัมต่อกรัมโมล)

สมการดังกล่าวจะใช้ได้เมื่อเป็นกระบวนการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ แต่ในกรณีที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองไม่คงที่ ต้องหาค่ากระแสไฟฟ้าโดยประมาณตลอดการทดลองดังสมการ

$$Q = \int_0^1 Idt \quad (15)$$

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี หมายความว่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบ ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ

ไอออนโลหะทั้งหมด ในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการทั้งหมด เนื่องจากต้องสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง อาทิเช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรือ อาจเกิดจากความต้านทานต่างๆเนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส (current efficiency, ϕ_c) ดังสมการ

$$\phi_c = \frac{\text{Actual Mass}}{\text{Theoretical Mass}} \quad (16)$$

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะผสมด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิส

การนำโลหะกลับคืนโดยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำ เพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้คือ ไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการของกระบวนการมีดังนี้

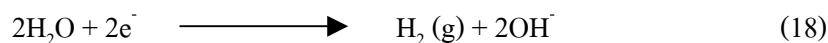
ผ่านกระแสจากแหล่งกำเนิดกระแสภายนอก ผู้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะทำให้กระแสเดินทางครบวงจร

กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสจะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

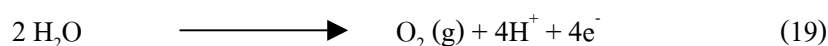
- กระบวนการรีดักชันของไอออนโลหะที่ขั้วแคโทด
- เกิดรีดักชันของน้ำได้แก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด
- เกิดออกซิเดชันของน้ำได้แก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด





ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ตัวแปรที่มีผลต่อการเกาะตัวของโลหะในกระบวนการอิเล็กโตรลิซิส

การเกาะของโลหะที่ให้ผลจะต้องไม่เกิดการสูญเสียเมื่อทำการล้างและทำให้แห้ง โลหะที่เกาะตัวอย่างหลวมๆ มีลักษณะเป็นโพรงเหมือนฟองน้ำ (spongly) และเป็นฝอยๆ (flaky) จะไม่บริสุทธิ์ มีโอกาสสูญเสียและหลุดไปขณะล้างและทำให้แห้ง การเกาะตัวของโลหะที่ขั้วจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ชนิด

1. ตัวแปรทางกายภาพ (physical variable)
2. ตัวแปรทางเคมี (chemical variable)

ตัวแปรทางกายภาพ

1. การเกิดก๊าซ

ถ้ามีก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วระหว่างทำอิเล็กโตรไลซิสจะทำให้โลหะเกาะได้ไม่แน่น มีลักษณะเป็นโพรงฟองน้ำ โดยปกติก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดคือ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) การป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำได้โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดไม่ให้มีค่าเป็นลบมาก หรือเติมสารที่ป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเรียกว่า แคโทดดิโพลไรเซอร์ (cathode depolarizer)

2. ความหนาแน่นของกระแส

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า คือปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่

$$\text{Current density} = \text{Current (A.)} / \text{Area (ft}^2 \text{ or Dm}^2\text{)} \quad (20)$$

หน่วยของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านิยมใช้เป็น แอมแปร์ / ตารางฟุต เขียนย่อว่า ASF หรือเป็นแอมแปร์ / ตารางเดซิเมตร เรียกย่อว่า ASD

ในการเกาะของโลหะที่พบว่าถ้าอัตราเร็วในการเกาะมีค่ามาก จะทำให้ขนาดของโลหะที่เกาะเป็นผงเล็กๆ เกาะไม่แน่นและเปราะ อัตราการเกาะจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสควรมีค่าสูงพอประมาณเพื่อให้โลหะเกาะที่ขั้วได้แน่นและเรียบ ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดก๊าซที่ขั้วแต่ถ้าต่ำเกินไปจะทำให้ใช้เวลานาน

3. การกวน

การกวน หรือการพาโดยอาศัยแรงภายนอก (force convection) จะมีผลมากยิ่งขึ้นในบริเวณใกล้ๆกับขั้วแคโทดทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการพาโดยธรรมชาติ (natural convention) ช่วยลดความหนาแน่นของชั้นการแพร่ (diffusion) ซึ่งจะเป็นการไปเพิ่มการแพร่ของกระแสไฟฟ้า (diffusion current) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (limiting current density) การกวนยังช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชัน ลดความเข้มข้นของก๊าซที่บริเวณขั้วแคโทด

4. อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ไอออนในสารละลายไปยังขั้วแคโทดได้เร็วขึ้น และทำให้ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวน้อยลงด้วย รวมถึงทำให้สารละลายมีความหนืดน้อยลง อุณหภูมิของสารละลายจะมีผลต่อความต้านทานกระแสไฟฟ้า

5. การถ่ายเทมวลของไอออนในสารละลาย

การถ่ายเทมวลเป็นกระบวนการที่จะให้ไอออน ไปทดแทนกับไอออนของโลหะที่ไปเกาะขั้วแคโทด เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าครบวงจรไอออนของโลหะจะเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะ ทำให้

ความเข้มข้นของไอออนบวกลดลงเกิดความไม่สมดุลของไอออนบวกและไอออนลบ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนบวกเข้ามาแทนที่ ซึ่งมี 2 วิธี คือ การพา และการแพร่ ซึ่งได้กล่าวถึงในขั้นต้นแล้ว

ตัวแปรทางเคมี

1. ผลของ pH

ไอออนที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าไฮโดรเจน เช่น Cu^{2+} , Ag^+ สามารถเกิดอิเล็กโตรไลซิสและเกาะที่ขั้วได้ในสารละลายกรดโดยไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นรบกวน

2. ผลของความเข้มข้น

ค่าศักย์ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน



$$E = E_0 - \frac{0.0591}{N} \log \frac{1}{\text{M}^{n+}} \quad (22)$$

เมื่อ M^{n+} มีค่าน้อย ค่า E จะมีค่าไปทางลบมากกว่า E_0 ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้ปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ และมีการเกาะของโลหะที่ขั้วต่อไปจนกว่าจะสมบูรณ์ แต่การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะส่งผลให้ไอออนของโลหะชนิดอื่นสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกาะที่ขั้วแคโทดได้เช่นกัน ทำให้โลหะที่ได้ไม่บริสุทธิ์

3. ผลของดีโพลาริเซอร์

สารดีโพลาริเซอร์ สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนอื่นๆที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส ดีโพลาริเซอร์เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการที่ขั้วแคโทดเรียกว่า แคโทดดีโพลาริเซอร์ (cathode depolarizer) ส่วนที่ขั้วแอโนดเรียกว่า แอโนดดีโพลาริเซอร์ (anode depolarizer)

หทัยทัต ชื้อสุวรรณ (2544) ศึกษาการนำกลับโลหะหนักคืนจากตะกอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยทำการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียแล้วจึงกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โคน้ำทิ้งมีค่าความเข้มข้นของทองแดง 70 ppm นิเกิล 95 ppm สังกะสี 15 ppm และโครเมียม 7 ppm พบว่า มากกว่า 90% ของโลหะทองแดงสามารถแยกออกได้ที่ความหนาแน่นกระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และโลหะชนิดอื่นๆจะถูกกำจัดโดยการตกตะกอนทางไฟฟ้า (electroprecipitation) พบว่า สามารถกำจัดนิเกิลและโครเมียมได้เกือบ 100% และกำจัดสังกะสีได้มากกว่า 80% ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110 – 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25 – 30 กิโลวัตต์ ชั่วโมง ต่อ ลูกบาศก์เมตร

Paul และ David (2002) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับปรอทจากท่อน้ำก๊าซและทำการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่เลือกใช้สารละลาย NaCl และ KNO_3 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าการใช้สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 1 Mole สามารถล้างปรอทออกจากถ่านกัมมันต์ได้ 100% แต่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการกัดกร่อนของคาร์บอนขึ้น สำหรับการใส่สารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0.1 mole สามารถนำกลับปรอทได้ 87.3% ที่ความต่างศักย์ 1.8 โวลต์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ regenerate แล้วมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อศึกษาหาความเป็นไปได้ในการแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดง และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะทองแดงจนอิ่มตัวแล้วโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้แบบจำลองของระบบทางไฟฟ้าเคมีแบบ batch ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็นออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ทำการทดลองแบบแบทช์โดยการนำสารละลาย CuSO_4 ละลายลงในน้ำทำการวัดค่าความเข้มข้นของทองแดงที่อยู่ภายในน้ำตัวอย่าง หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ เติมลงในน้ำตัวอย่างทำการวัดค่าความเข้มข้นทองแดงทุกวันเป็นระยะเวลา 7 วัน เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นทองแดงเบื้องต้น

2. การนำกลับมาใช้ใหม่ของถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ มาใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยเลือกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ Na_2SO_4 ทำการทดลองโดยทำการแปรผันค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าความต่างศักย์ และตรวจสอบประสิทธิภาพตามระยะเวลาที่อุณหภูมิห้อง

3. ตรวจสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์หลังการทดลอง

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมาทดสอบประสิทธิภาพเช่นเดียวกับข้างต้น โดยทำการตรวจสอบประสิทธิภาพจนกว่าถ่านจะหมดประสิทธิภาพ

รูปแบบรายละเอียดของระบบกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

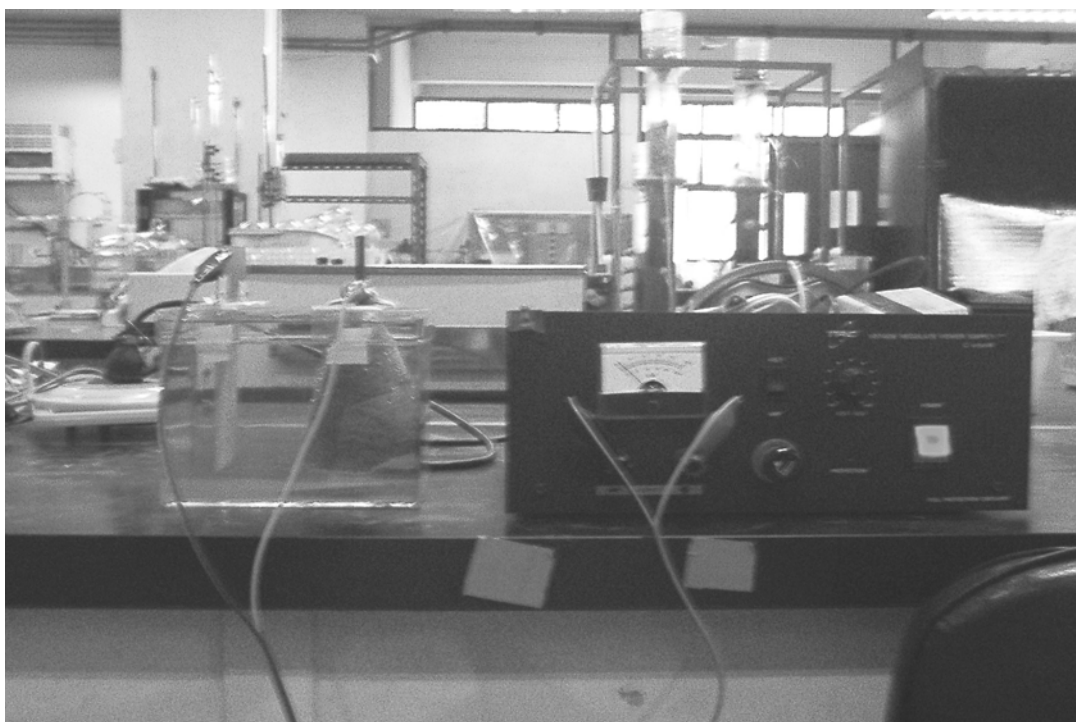
การศึกษครั้งนี้ จะใช้แบบจำลองของกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีส่วนประกอบของระบบดังรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง และสามารถปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้จาก 0 ถึง 12 volts

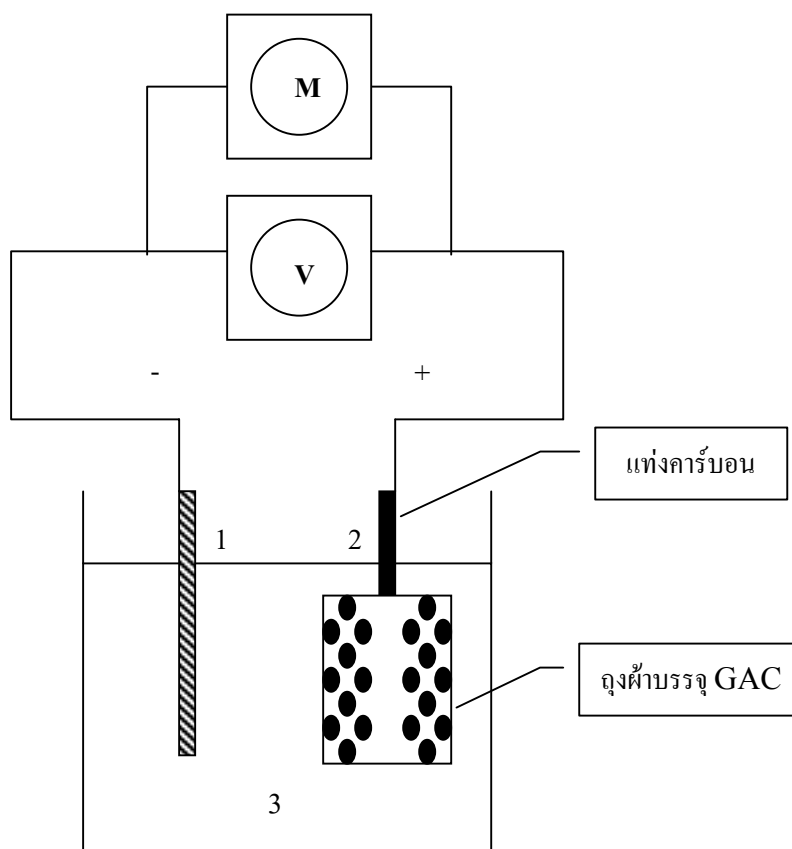
2. แผ่นขั้วไฟฟ้า ใช้แผ่นเหล็ก (steel plate) ขนาด 10 x 15 x 0.2 เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นขั้วกระแสไฟฟ้าแคโทด และถุงผ้าใส่ถ่านกัมมันต์ 50 g. โดยมีแท่งคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นแกนนำไฟฟ้าเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ เป็นขั้วแอโนด มีระยะห่างระหว่างขั้ว 8 เซนติเมตร

3. ถังปฏิกิริยา ใช้ถังอคริลิกขนาดปริมาตร 12 x 12 x 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังภาพที่ 9 และ ภาพที่ 10



ภาพที่ 9 แสดงเครื่องมือทดลองที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย

- | | |
|---|--|
| M | voltage meter ใช้วัดค่าความต่างศักย์ |
| V | เครื่องปรับกระแสไฟฟ้าให้ได้ปริมาณกระแสและความต่างศักย์ที่ต้องการ |
| 1 | ขั้วแอโนด ใช้แผ่นเหล็กเป็น electrode |
| 2 | ขั้วแคโทด ใช้ถ่านกัมมันต์โดยมีแท่งคาร์บอนเป็นแกนนำไฟฟ้า |
| 3 | สารละลาย electrolyte ในที่นี้เลือกใช้ Na_2SO_4 |

สถานที่ศึกษาวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- ตู้อบลมร้อน (oven)
- โถกั้นความชื้น (desicater)
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องปรับกระแสไฟและค่าความต่างศักย์กระแสตรง
- ถังทดลอง (reactor)
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- Atomic Absorption Spectrophotometer
- เครื่องชั่งละเอียด
- ตู้ดูดอากาศ (hood)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- บีกเกอร์ขนาด 100 250 500 1,000 และ 3,000 มิลลิลิตร
- ขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 100 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร
- ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร
- ปีเปตขนาดต่างๆ
- เติลเคเตอร์ (ตู้ดูดความชื้น)
- ถังปฏิบัติการ ทำจากอคริลิก ขนาด 12 x 12 x 15 เซนติเมตร

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH ของน้ำ

- H_2SO_4 acid 98% V/V
- NaCl 1 นอร์มัล

2. สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องแก้ว

- HNO_3 acid 10% V/V

3. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทองแดง

- copper reagent ของ Atomic Absorption Spectrophotometer

ปัจจัยที่มีผลต่อการศึกษา

ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกทองแดง ออกจากถ่านกัมมันต์โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ได้แก่ pH ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ค่าความต่างศักย์ และระยะเวลาในการทดลอง

- pH เริ่มต้น 5 ค่า คือ 1.0 1.2 1.5 1.8 และ 2.0
- ความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ 4 ค่า ที่ 0.01 0.05 0.1 และ 0.5 โมล
- ค่าความต่างศักย์ 5 ค่า คือ 1 2 3 4 และ 5 volts
- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 ค่า คือ 1 2 3 4 5 6 9 12 18 และ 24 ชั่วโมง

แสดงหมายเลขตัวอย่างและค่าตัวแปรหลักที่แปรผันและใช้ในการทดลองดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2 แสดงหมายเลขตัวอย่างและค่าตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรผันค่า pH

Sample	pH Start	Electrolyte (mole.)	ระยะขั้ว (cm.)	Voltage (V.)	Time (hr.)
P01-1	2.0	0.1	8	3	4
P01-2	2.0	0.1	8	3	4
P01-3	2.0	0.1	8	3	4
P02-1	1.8	0.1	8	3	4
P02-2	1.8	0.1	8	3	4
P02-3	1.8	0.1	8	3	4
P03-1	1.5	0.1	8	3	4
P03-2	1.5	0.1	8	3	4
P03-3	1.5	0.1	8	3	4
P04-1	1.2	0.1	8	3	4
P04-2	1.2	0.1	8	3	4
P04-3	1.2	0.1	8	3	4
P05-1	1.0	0.1	8	3	4
P05-2	1.0	0.1	8	3	4
P05-3	1.0	0.1	8	3	4

ตารางที่ 3 แสดงหมายเลขตัวอย่างและค่าตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรผันค่าความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

Sample	pH Start	Electrolyte (mole.)	ระยะขั้ว (cm.)	Voltage (V.)	Time (hr.)
E01-1	1.2	0.01	8	3	4
E01-2	1.2	0.01	8	3	4
E01-3	1.2	0.01	8	3	4
E02-1	1.2	0.05	8	3	4
E02-2	1.2	0.05	8	3	4
E02-3	1.2	0.05	8	3	4
E03-1	1.2	0.1	8	3	4
E03-2	1.2	0.1	8	3	4
E03-3	1.2	0.1	8	3	4
E04-1	1.2	0.5	8	3	4
E04-2	1.2	0.5	8	3	4
E04-3	1.2	0.5	8	3	4

ตารางที่ 4 แสดงหมายเลขตัวอย่างและค่าตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรผันค่า
ความต่างศักย์

Sample	pH Start	Electrolyte (mole.)	ระยะขั้ว (cm.)	Voltage (V.)	Time (hr.)
V01-1	1.2	0.5	8	1	4
V01-2	1.2	0.5	8	1	4
V01-3	1.2	0.5	8	1	4
V02-1	1.2	0.5	8	2	4
V02-2	1.2	0.5	8	2	4
V02-3	1.2	0.5	8	2	4
V03-1	1.2	0.5	8	3	4
V03-2	1.2	0.5	8	3	4
V03-3	1.2	0.5	8	3	4
V04-1	1.2	0.5	8	4	4
V04-2	1.2	0.5	8	4	4
V04-3	1.2	0.5	8	4	4
V05-1	1.2	0.5	8	5	4
V05-2	1.2	0.5	8	5	4
V05-3	1.2	0.5	8	5	4

ตารางที่ 5 แสดงหมายเลขตัวอย่างและค่าตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองเมื่อแปรผันระยะเวลา

Sample	pH Start	Electrolyte (mole.)	ระยะขั้ว (cm.)	Voltage (V.)	Time (hr.)
T01	1.2	0.5	8	2	1
T02	1.2	0.5	8	2	2
T03	1.2	0.5	8	2	3
T04	1.2	0.5	8	2	4
T05	1.2	0.5	8	2	5
T06	1.2	0.5	8	2	6
T07	1.2	0.5	8	2	9
T08	1.2	0.5	8	2	12
T09	1.2	0.5	8	2	18
T10	1.2	0.5	8	2	24

ขั้นตอนและวิธีการ

1. การตรวจสอบประสิทธิภาพและเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการทดลอง

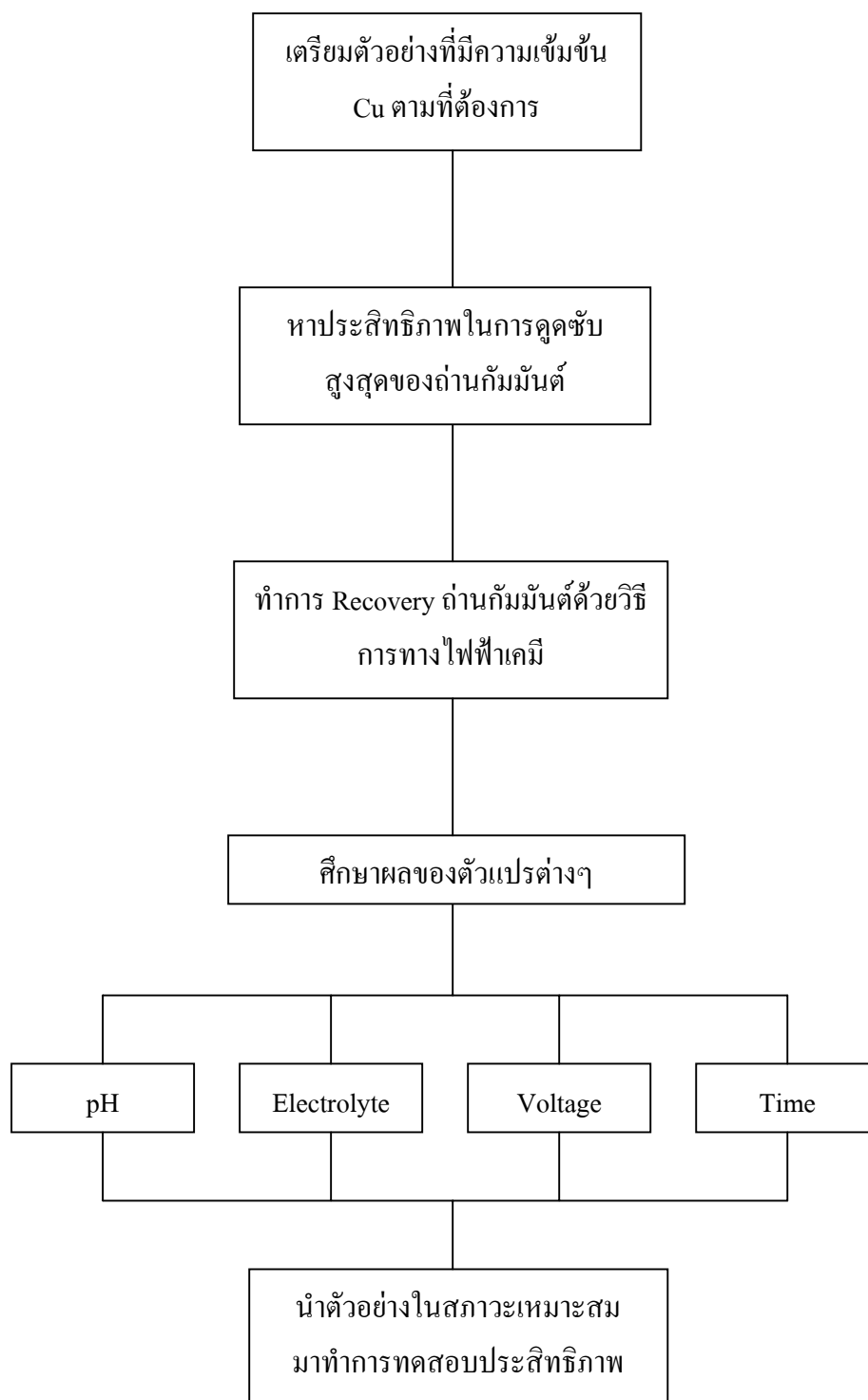
ขั้นตอนนี้จะทำการวัดประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ 2 ค่า คือค่าไอโอดีนนัมเบอร์และใช้การทดสอบการดูดซับทองแดงจริงโดยการละลาย CuSO_4 ในน้ำเพื่อใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ CuSO_4 5 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นของทองแดงอยู่ที่ 130.3 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนทองแดง หลังจากนั้น นำถ่านกัมมันต์เติมลงในน้ำตัวอย่าง 100 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของทองแดงที่เปลี่ยนไปทุก ๆ 1 วัน เป็นระยะเวลา 7 วันบันทึกค่าไว้เพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแยกทองแดงออกแล้ว หลังจากนั้น ทำการแช่ถ่านกัมมันต์ต่อไปจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพ และนำขึ้นอบแห้ง เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

นำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ มาใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 50 กรัมที่มีแท่งคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ Na_2SO_4 ทำการทดลอง โดยทำการแปรผันค่าต่างๆ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นนำค่า pH ที่เหมาะสมมาทดสอบโดยแปรผันค่าความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์หาค่าที่เหมาะสม นำค่าที่ได้จากขั้นตอนมาทดสอบแปรผันค่าความต่างศักย์ เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมทำการตรวจสอบประสิทธิภาพตามระยะเวลาเป็นค่าสุดท้ายที่อุณหภูมิห้อง

3. ตรวจสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์หลังการทดลอง

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี มาทดสอบประสิทธิภาพเช่นเดียวกับข้างต้น โดยทำการตรวจสอบประสิทธิภาพและวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพหลายๆครั้ง จนกว่าถ่านจะหมดประสิทธิภาพ



ภาพที่ 11 แสดงขั้นตอนการวิจัย

ผลและวิจารณ์

การศึกษาและวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาพที่เหมาะสม ในการนำโลหะทองแดงและ ถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจาก คอปเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ที่สภาวะต่างๆกันดังนี้ คือ pH เริ่มต้น ก่อนการทดลองที่ 5 ระดับ คือ 1 1.2 1.5 1.8 และ 2 ความเข้มข้นของสารละลาย electrolyte ที่ 4 ระดับ คือ 0.01 0.05 0.1 และ 0.5 mole ความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ 5 ระดับ คือ 1 2 3 4 และ 5 volt และ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 10 ระดับ คือ 1 2 3 4 5 6 9 12 18 และ 24 ชั่วโมง โดยทำการเก็บผลภายหลัง ระบบเสร็จสิ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ pH ปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทด น้ำหนักของขั้วแคโทดที่ เปลี่ยนไป ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย electrolyte และหาประสิทธิภาพของ ถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ก่อนการทดลอง

การทดลองขั้นต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ

ชนิดของขั้วแคโทด

ในการศึกษาขั้นต้น (pre test) ได้มีการทดสอบโดยการใช้ขั้วชนิดต่างกัน 2 ชนิดคือ ขั้วโลหะอลูมิเนียม และขั้วเหล็ก ในการนำโลหะทองแดงและถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับโลหะทองแดงไว้จนอิ่มตัว pH ที่ 2.0 ความเข้มข้นของสารละลาย electrolyte (Na_2SO_4) 0.1 mole ค่าความต่างศักย์ 6 volts ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ในตัวอย่างที่ใช้โลหะ อลูมิเนียม ทองแดง (Cu^+) ไม่เปลี่ยนสภาพเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ขั้วแคโทด และตัวโลหะ อลูมิเนียมมีการสึกกร่อน เกิดเป็นตะกอนอลูมิเนียมลอยอยู่ในสารละลาย electrolyte สำหรับ ขั้วแคโทดที่เป็นเหล็กเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนทองแดง (Cu^+) เป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ขั้วแคโทดอย่าง ชัดเจน

ช่วง pH ที่เหมาะสม

ในการศึกษาขั้นต้น ได้ทดสอบเพื่อหาค่า pH ที่เหมาะสมในการทดลอง โดยทำการทดสอบ ที่ค่า pH ต่างๆกัน ได้แก่ 2.0 3.0 4.0 7.0 และ 10.0 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte 0.1 mole ค่าความต่างศักย์ 6 volts ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ในตัวอย่างที่มีค่า pH 3.0 4.0 7.0 และ 10.0

ทองแดง (Cu^{2+}) ไม่เปลี่ยนสภาพเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ขั้วแคโทด สำหรับค่า pH ที่ 2.0 เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนทองแดง (Cu^{2+}) เป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ขั้วแคโทดอย่างชัดเจน

ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม

ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม โดยทดสอบที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ กัน คือ 3 6 9 และ 12 volts ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte 0.1 mole pH 2.0 ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ในตัวอย่างที่มีค่าความต่างศักย์ 6 9 และ 12 volts ทองแดงที่เปลี่ยนสภาพเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่ขั้วแคโทด มีการยึดเกาะที่ไม่ดี และพื้นผิวไม่เรียบ สำหรับค่าความต่างศักย์ที่ 3 volts ลักษณะผิวทองแดงมีความเรียบและยึดเกาะแน่นพอใช้

การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการวัดค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบในภายหลัง ในการทดลองนี้ ใช้การวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และตรวจวัดความสามารถในการดูดซับทองแดงของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลา 7 วัน โดยนำถ่านกัมมันต์ 100 กรัมเติมลงในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร และทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นทองแดงด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer วันละ 1 ครั้ง เพื่อดูปริมาณทองแดงที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับเข้าไป ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณทองแดงที่ดูดซับได้โดยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม

ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณทองแดงที่ดูดซับได้ (mg/g.GAC.)
1	0.671
2	0.845
3	0.886
4	0.901
5	0.914
6	0.936
7	0.959

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง

ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์อยู่ที่ 1,010 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตรวจวัดโดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ) และจากแผนภูมิพบว่า การดูดซับทองแดงของถ่านกัมมันต์ที่ระยะเวลา 7 วัน ถ่านกัมมันต์ 100 กรัมสามารถดูดซับทองแดงได้ 95.9 กรัม ซึ่งในช่วงแรกของการดูดซับจะเป็นไปอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะใน 2 วันแรก และเริ่มลดลงในวันที่ 3 ดังรูปที่ 12

ใช้สมการในการดูดซับเป็น

$$Cu_{ads} = \frac{K_1 t}{K_2 + t} \quad (23)$$

โดยที่ Cu_{ads} คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ดูดซับได้ (g/g.GAC)

K_1 คือ ค่าคงที่ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ

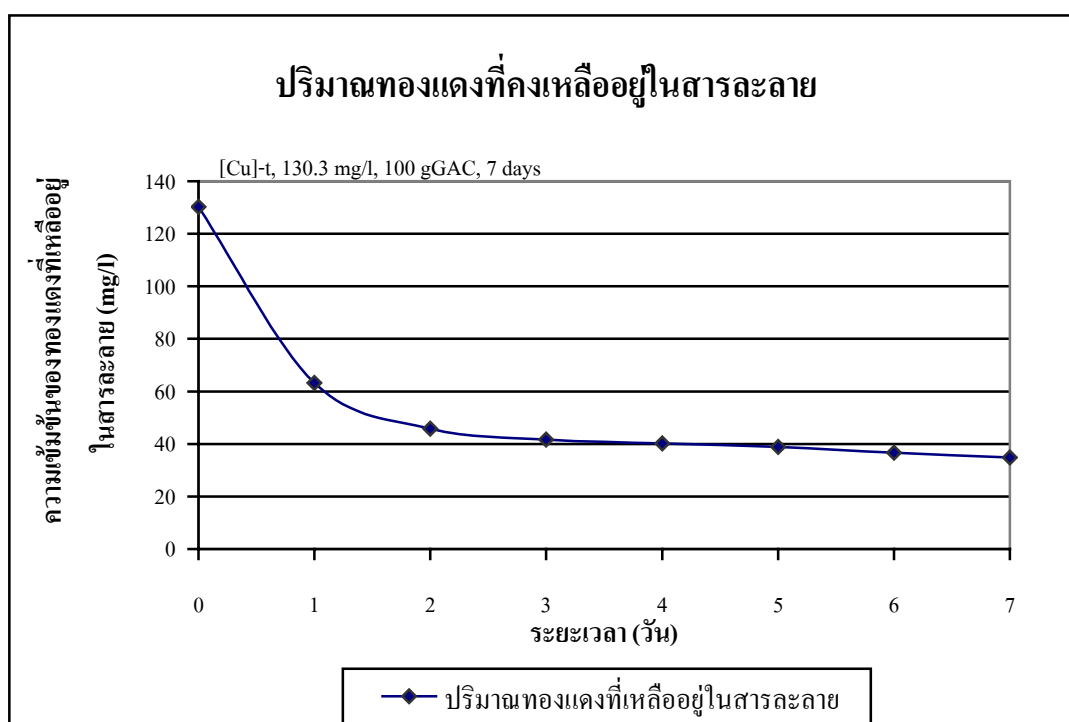
K_2 คือ ค่าคงที่ที่สารดูดซับสามารถดูดซับได้ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด

t คือ ระยะเวลาที่ทำการดูดซับ

ซึ่งในที่นี้ ค่า K_1 มีค่าเท่ากับค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ และ ค่า K_2 สามารถหาได้จากการประมาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.45 ทำให้สามารถเขียนสมการการดูดซับทองแดงของถ่านกัมมันต์ได้ดังต่อไปนี้

$$Cu_{ads} = \frac{K_1 t}{0.45 + t} \quad (24)$$

โดยที่ Cu_{ads} คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ดูดซับได้ (g/g.GAC)
 K_1 คือ ค่าไอโอดีนัมเบอร์ (g/g.)
 t คือ ระยะเวลาในการดูดซับ (วัน)



ภาพที่ 12 ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือยู่ในสารละลาย $CuSO_4$

การศึกษาการนำโลหะทองแดงกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

จากการศึกษาพบว่า pH เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำให้ทองแดง (Cu^+) เปลี่ยนสภาพเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่บริเวณขั้วแคโทด โดยจะขึ้นอยู่กับ pH ที่เหมาะสม จึงทำการทดลองโดยแปรผันค่า pH ที่แตกต่างกัน 5 ค่า คือ 1.0 1.2 1.5 1.8 และ 2.0 โดยควบคุมค่าความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole ความต่างศักย์ที่ 3 volts และระยะเวลาที่ 4 ชั่วโมง

ผลของ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย

ตารางที่ 7 ผลการทดลองปริมาณ Cu ที่บริเวณขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและ Cu^+ ที่อยู่ในสารละลาย

pH เริ่มต้น	ปริมาณทองแดงที่เกาะ ขั้วแคโทด (กรัม)	ปริมาณทองแดงใน สารละลาย (mg/l.)	ปริมาณทองแดงที่แยก ตัวจากขั้วแอโนด (กรัม)
1.0	0.2347	114.33	0.4633
1.2	0.2385	109.17	0.4568
1.5	0.2054	119.00	0.4434
1.8	0.1579	117.50	0.3929
2.0	0.1613	125.30	0.4119

ตารางที่ 8 ค่า pH น้ำหนักถ่านกัมมันต์ และน้ำหนักแท่งคาร์บอนภายหลังการทดลอง

pH เริ่มต้น	pH ภายหลังการทดลอง	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ เปลี่ยนไป (g.)	น้ำหนักแท่งคาร์บอนที่ ลดลง
1.0	1.017	+0.420	-0.264
1.2	1.210	+1.323	-0.135
1.5	1.552	+0.430	-0.089
1.8	1.928	+0.480	-0.036
2.0	2.287	-0.165	-0.025

สภาพการทดลองที่มีค่าความต่างศักย์ ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte และระยะเวลาเดียวกัน pH เริ่มต้นน้ำเสียที่ 1.2 มีปริมาณโลหะทองแดงที่ขั้วแคโทดสูงสุด เมื่อเทียบกับ pH เริ่มต้นที่ 1.0 1.5 1.8 และ 2.0 แต่ค่า pH ที่ 1.0 มีปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (GAC) มากที่สุด (รูปที่ 13) เนื่องจากค่า pH ที่ต่ำกว่าทำให้มีปริมาณ H^+ ที่มากกว่า ทำให้ระบบสามารถนำอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ดีกว่า จึงมีปริมาณทองแดงออกมาจากขั้วแอโนดมากที่สุด และคาดว่าปริมาณ H^+ ที่สูงกว่าส่งผลให้มีปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดต่ำกว่า เพราะมีปริมาณ H^+ เข้าไปปรับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นทำให้ Cu^+ รับอิเล็กตรอนได้น้อยลง ทำให้ปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดที่ pH 1.0 มีน้อยกว่าที่ pH 1.2 สำหรับ pH 2.0 ที่มีปริมาณทองแดงบริเวณขั้วแคโทดที่สูงกว่า pH 1.8 แต่ความสามารถในการยึดเกาะกับขั้วแคโทดน้อยกว่า pH 1.8 และมีการหลุดลอกได้ง่าย ในการศึกษาี้ต้องการปริมาณการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงบริเวณขั้วแคโทดที่สูงสุดจึงเลือกค่า pH 1.2 เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลอง

ค่า pH ที่เปลี่ยนไปของระบบ

เมื่อทำการวัดค่า pH ภายหลังการทดลอง พบว่า ระบบจะมีค่า pH ที่สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่บริเวณขั้วแคโทดดังสมการ



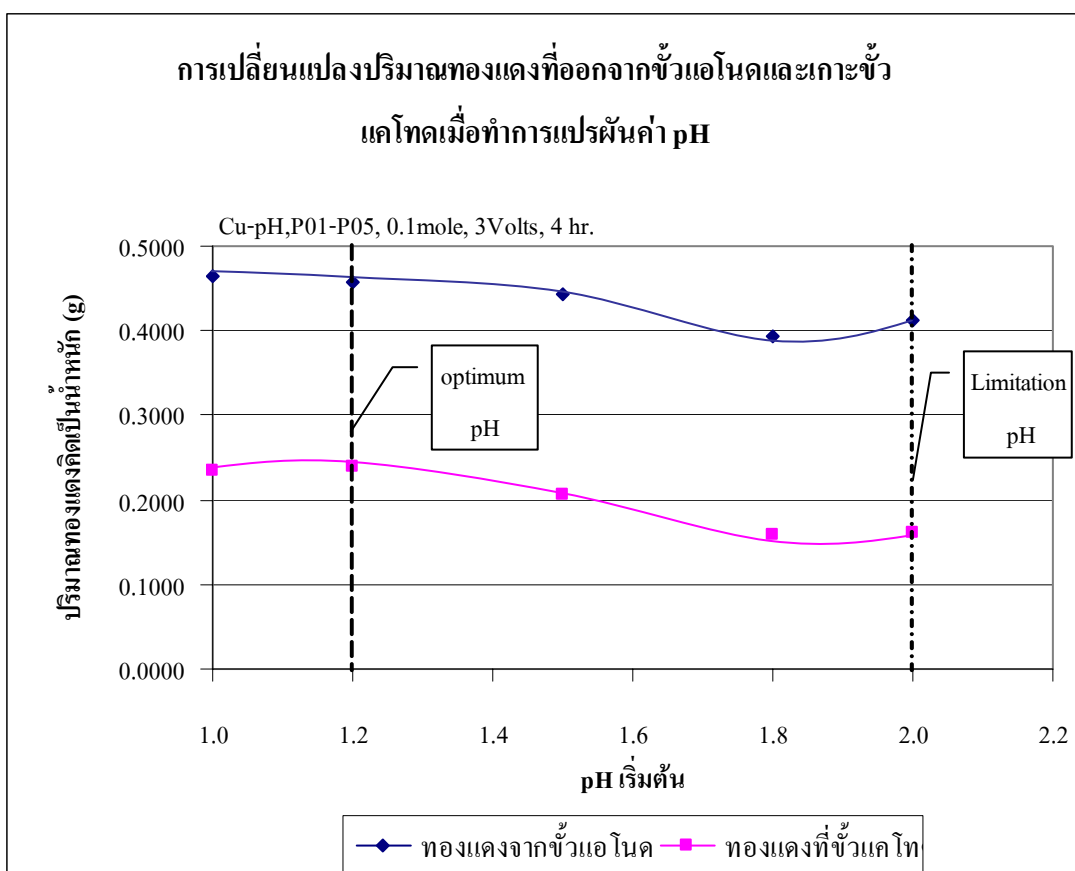
ทำให้ H^+ เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่บริเวณขั้วแคโทด ส่งผลให้ค่า pH ของระบบสูงขึ้น (รูปที่ 15)

น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของถ่านกัมมันต์

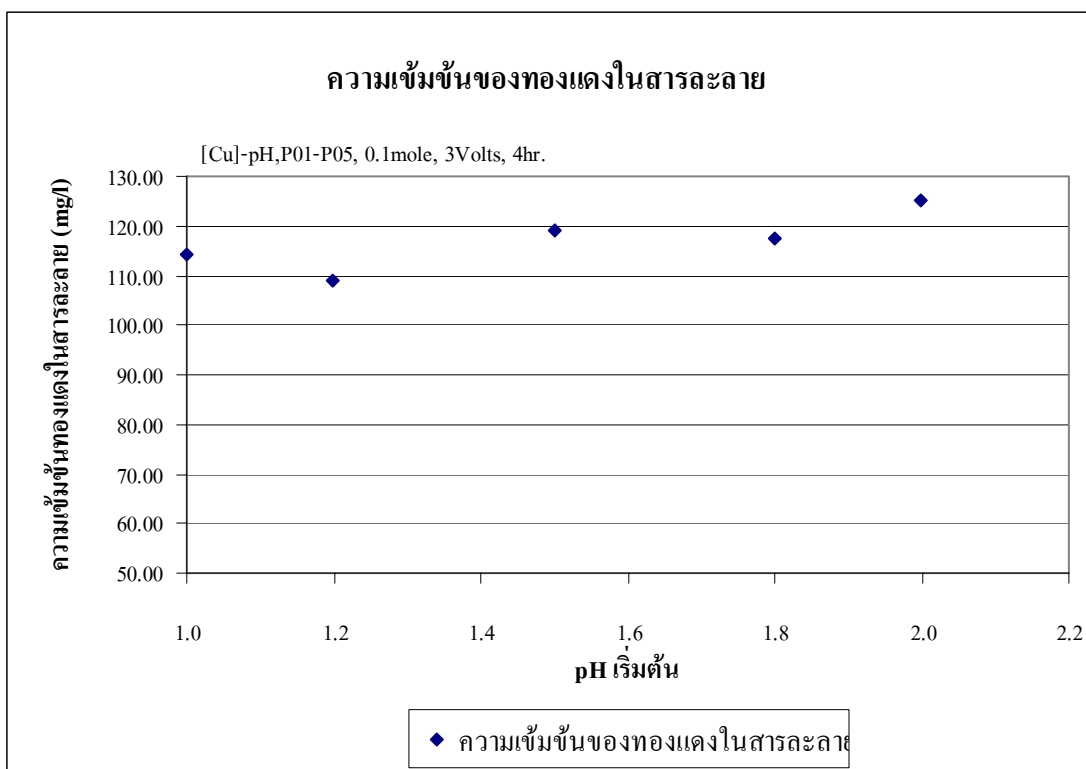
กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้ส่งผลให้ Cu^+ ที่อยู่ในถ่านกัมมันต์แยกตัวออกและเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดซึ่งจะทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่ในความเป็นจริงถ่านกัมมันต์กลับมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น คาดว่าเกิดจากการที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารชนิดอื่นเข้าไปแทนที่ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าสารที่เป็นไปได้ในการถูกดูดซับเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ที่ต่ออยู่กับขั้วแอโนดคือ OH^- และ SO_4^{2-} เนื่องจากมีประจุลบทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าได้ดี ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น

น้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแท่งคาร์บอน

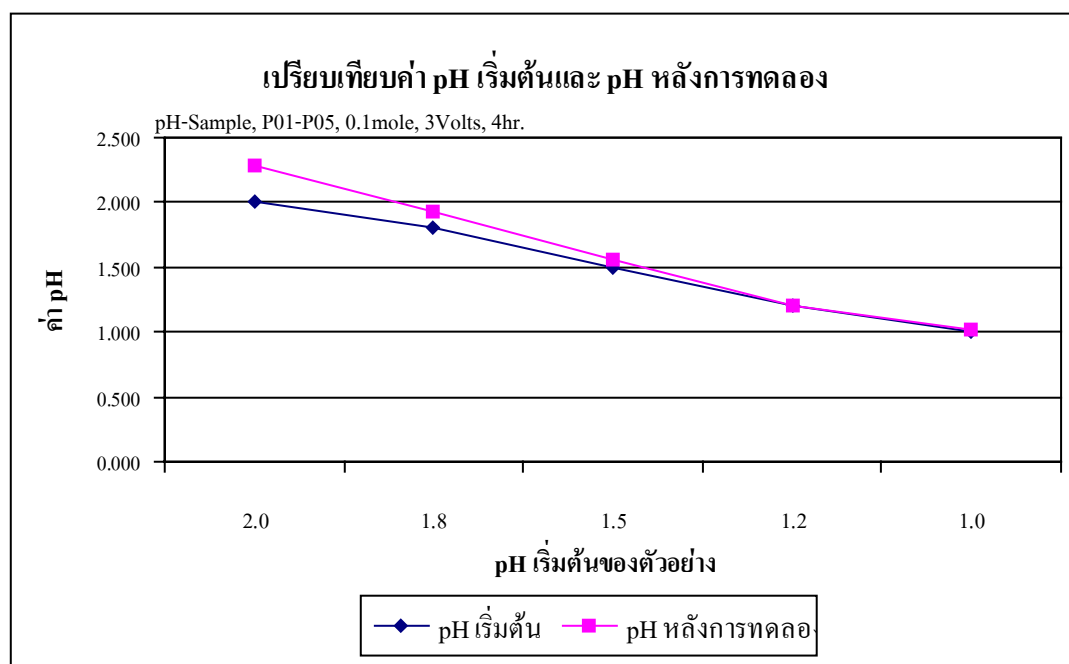
แท่งคาร์บอนที่นำมาเป็นสื่อไฟฟ้าเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและถ่านเทอิลেকตรอน ส่งผลให้คาร์บอนบางส่วนหลุดออกมาจากตัวแท่งคาร์บอน สังเกตได้ว่า เมื่อ pH มีค่าต่ำจะเกิดการแตกตัวของคาร์บอนมากกว่าที่ pH สูง เนื่องจากการที่ pH ต่ำระบบมีการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า จึงทำให้เกิดการแตกตัวของแท่งคาร์บอนที่มากกว่า



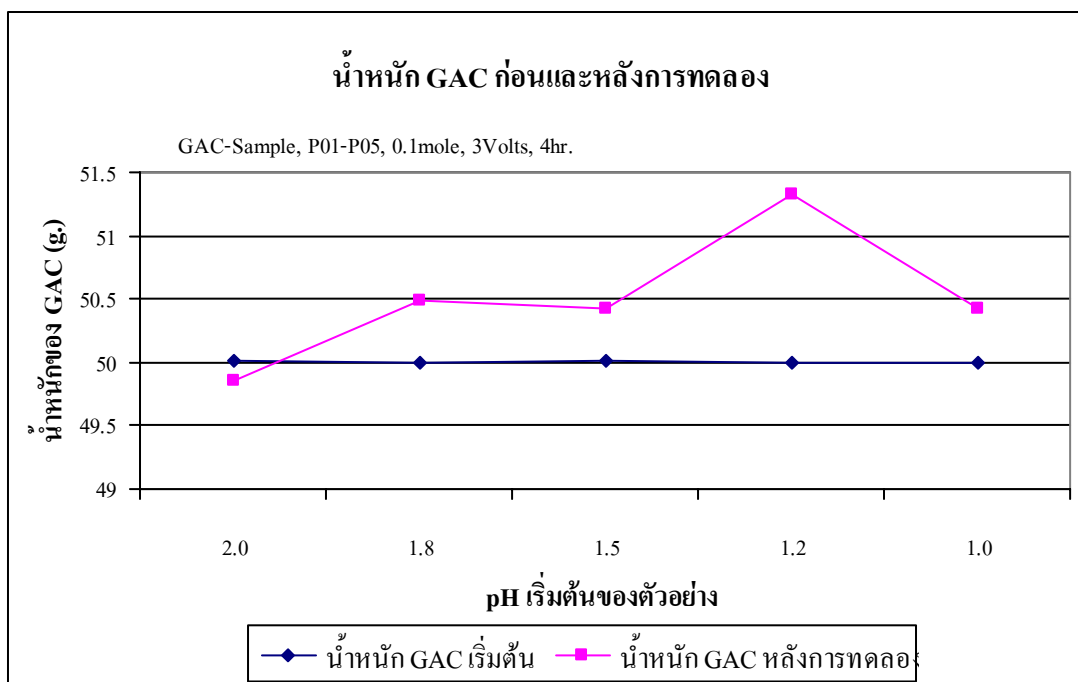
ภาพที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด และที่เกาะขั้วแคโทดเมื่อแปรผันค่า pH



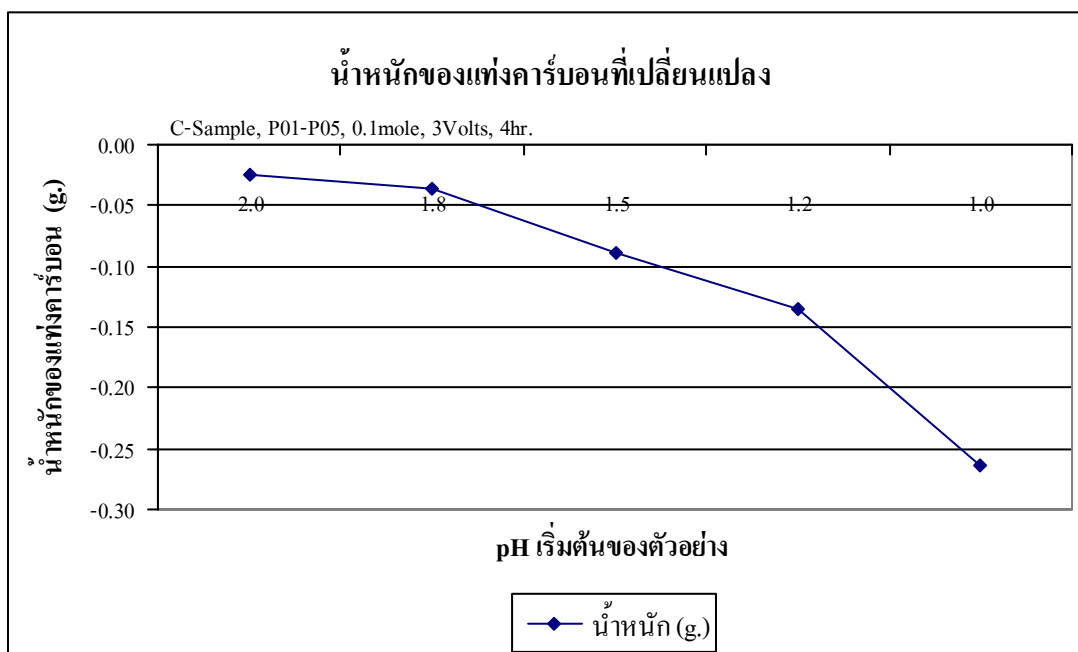
ภาพที่ 14 ความเข้มข้นของทองแดงที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแปรผันค่า pH



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบค่า pH ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 17 น้ำหนักของแท่งคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ผลของความเข้มข้นสารละลาย Electrolyte

ตารางที่ 9 ผลการทดลองปริมาณ Cu ที่บริเวณขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและ Cu^{+} ที่อยู่ในสารละลาย

ความเข้มข้น Electrolyte	ปริมาณทองแดงที่เกาะ ขั้วแคโทด (กรัม)	ปริมาณทองแดงใน สารละลาย (mg/L.)	ปริมาณทองแดงที่แยก ตัวจากขั้วแอโนด (กรัม)
0.01	0.1754	126.93	0.4293
0.05	0.1588	135.90	0.4306
0.1	0.2385	109.17	0.4568
0.5	0.2491	115.27	0.4796

ตารางที่ 10 ค่า pH น้ำหนักถ่านกัมมันต์ และน้ำหนักแท่งคาร์บอนภายหลังการทดลอง

ความเข้มข้น Electrolyte	pH ภายหลังการทดลอง	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ เปลี่ยนไป (g.)	น้ำหนักแท่งคาร์บอน ที่ลดลง
0.01	1.265	-0.67	-0.0262
0.05	1.253	-0.27	-0.0592
0.1	1.210	+1.32	-0.1352
0.5	1.140	+3.09	-0.1597

ในสภาพการทดลองที่มีค่าความต่างศักย์ ค่า pH ที่ 1.2 และระยะเวลาเดียวกัน ค่าความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดเป็น 0.2491 กรัม ซึ่งมากกว่าที่ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.01 0.05 และ 0.1 mole ที่มีค่าความเข้มข้นทองแดงที่ขั้วแคโทดเป็น 0.1754 0.1588 และ 0.2385 กรัม ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลาย electrolyte ที่สูงจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ดีกว่า

พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนดกับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นความสัมพันธ์แบบลอการิทึมที่สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Cu_r = A \ln ([EI]) + B \quad (26)$$

โดย Cu_r คือความเข้มข้นทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (mg/l.)
 A คือค่าความชันของสมการ
 B คือค่าคงที่ของสมการ
 $[EI]$ คือความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (mole)

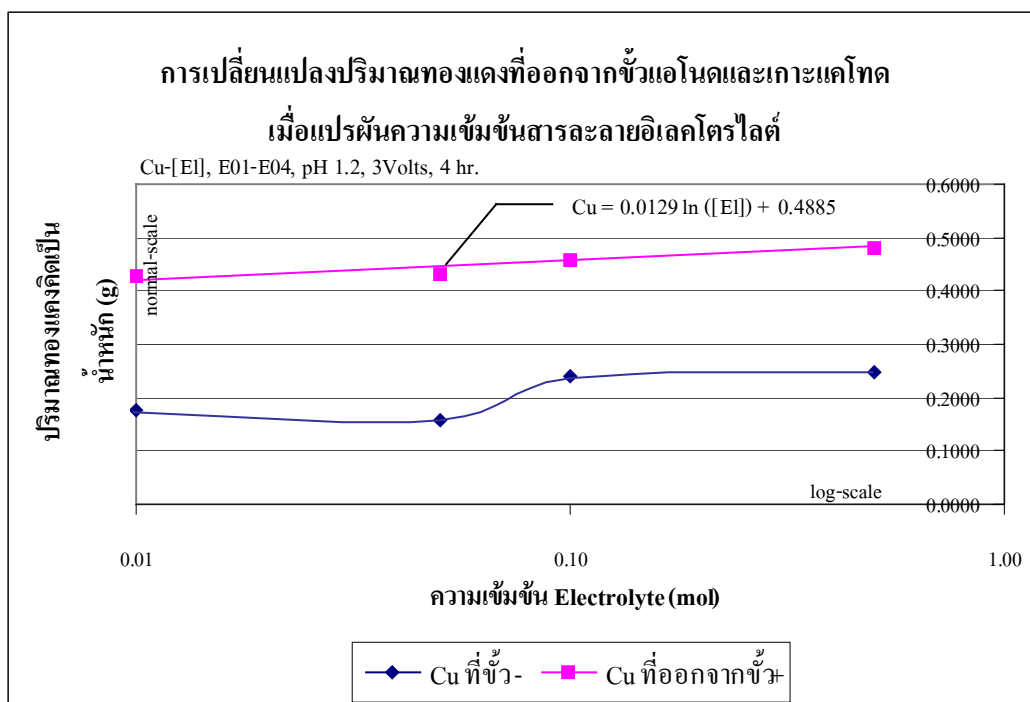
เมื่อแทนค่า A และ B ซึ่งได้จากผลการทดลองจะได้สมการ

$$Cu_r = 0.0129 \ln ([EI]) + 0.4885 \quad (27)$$

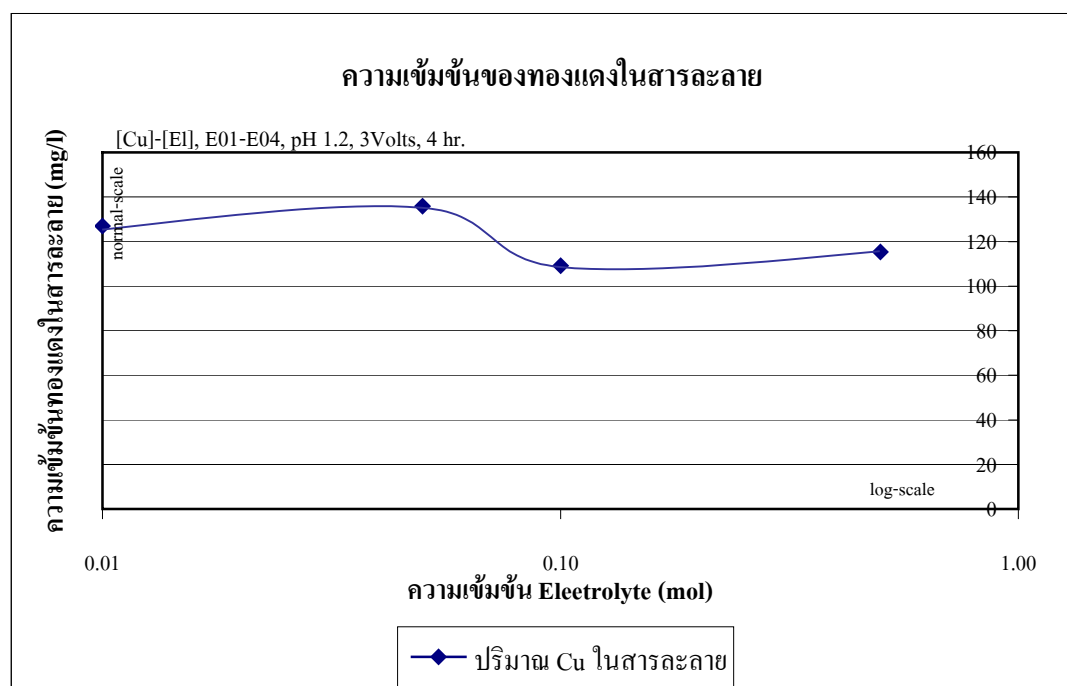
โดย Cu_r คือความเข้มข้นของทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (mg/l.)
 $[EI]$ คือความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ (mole)

pH ที่เปลี่ยนไปของระบบ

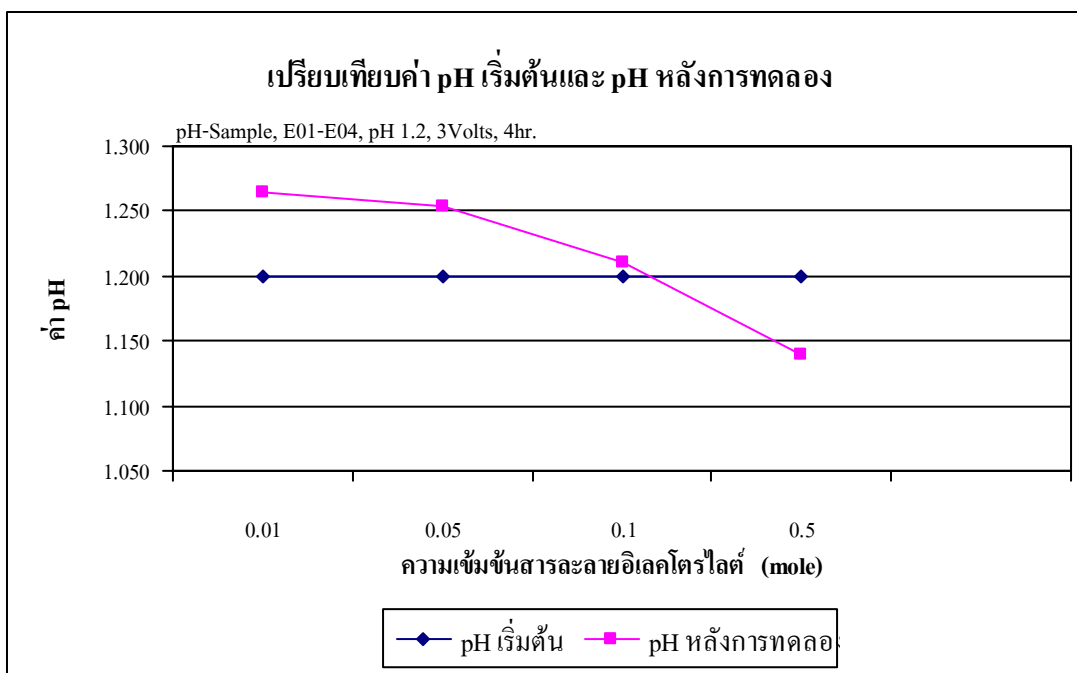
ที่ค่าความเข้มข้น electrolyte 0.5 mole pH ของระบบมีค่าลดลง คาดว่า เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กได้ดี เช่น โมเลกุล H^+ แต่ในระบบนี้ ถ่านกัมมันต์อยู่บริเวณขั้วแอโนดซึ่งมีประจุบวก ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้าผลัก H^+ ออกจากถ่านกัมมันต์ และในขณะเดียวกันก็เกิดแรงทางไฟฟ้าดึงดูดประจุลบ ซึ่งในระบบมีอยู่ 2 ชนิดคือ OH^- และ SO_4^{2-} เข้าหาขั้วแอโนด และเนื่องจากโมเลกุลของ OH^- มีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้ OH^- ถูกดูดซับเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่า เมื่อปฏิกิริยาทางขั้วแอโนด มากกว่าการปฏิกิริยาการเกิดก๊าซ H_2 ที่ขั้วแคโทดจึงส่งผลให้ค่า pH ของระบบมีค่าลดลง



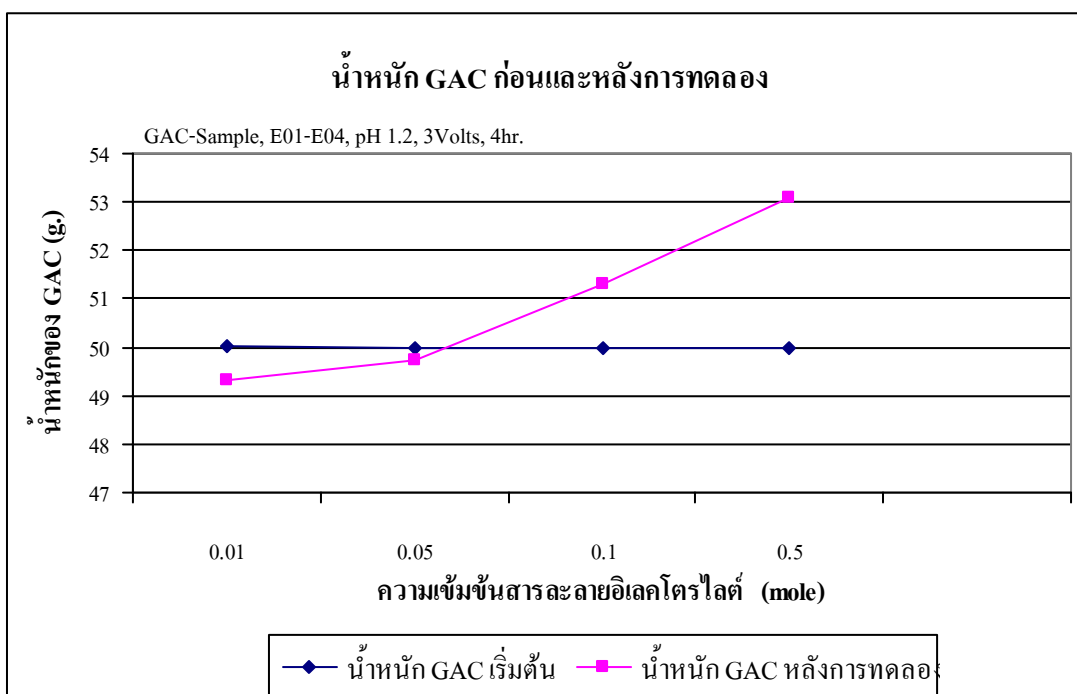
ภาพที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด และที่เกาะขั้วแคโทด เมื่อแปรผันความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



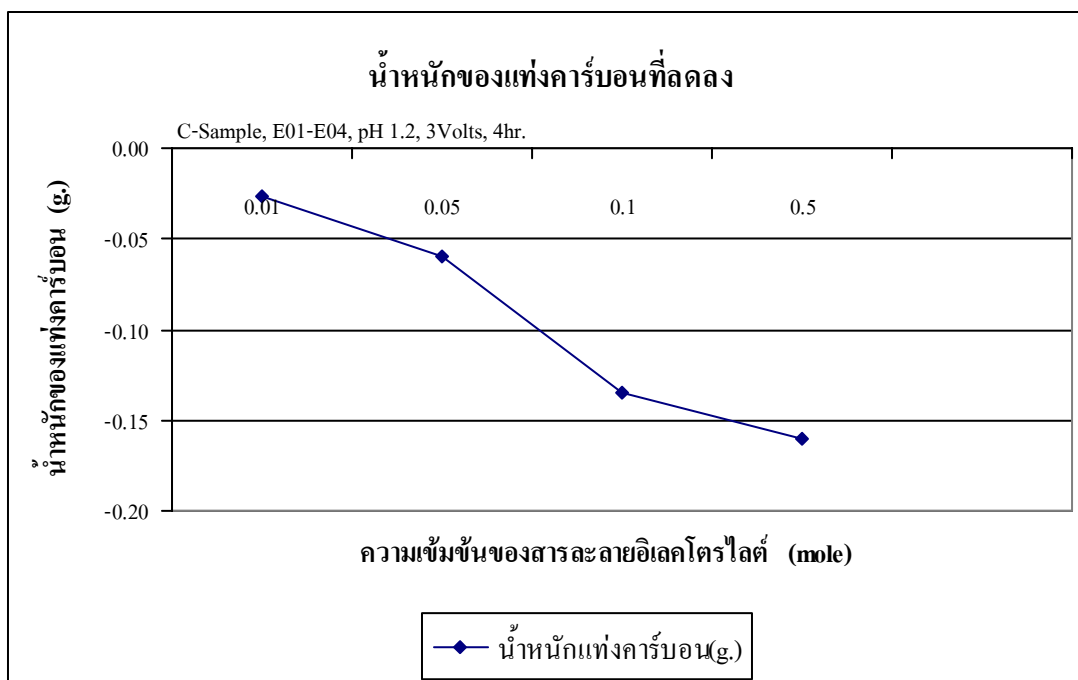
ภาพที่ 19 ความเข้มข้นของทองแดงที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแปรผันความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



ภาพที่ 20 เปรียบเทียบค่า pH ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 21 เปรียบเทียบน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 22 น้ำหนักของแท่งคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ผลของความต่างศักย์

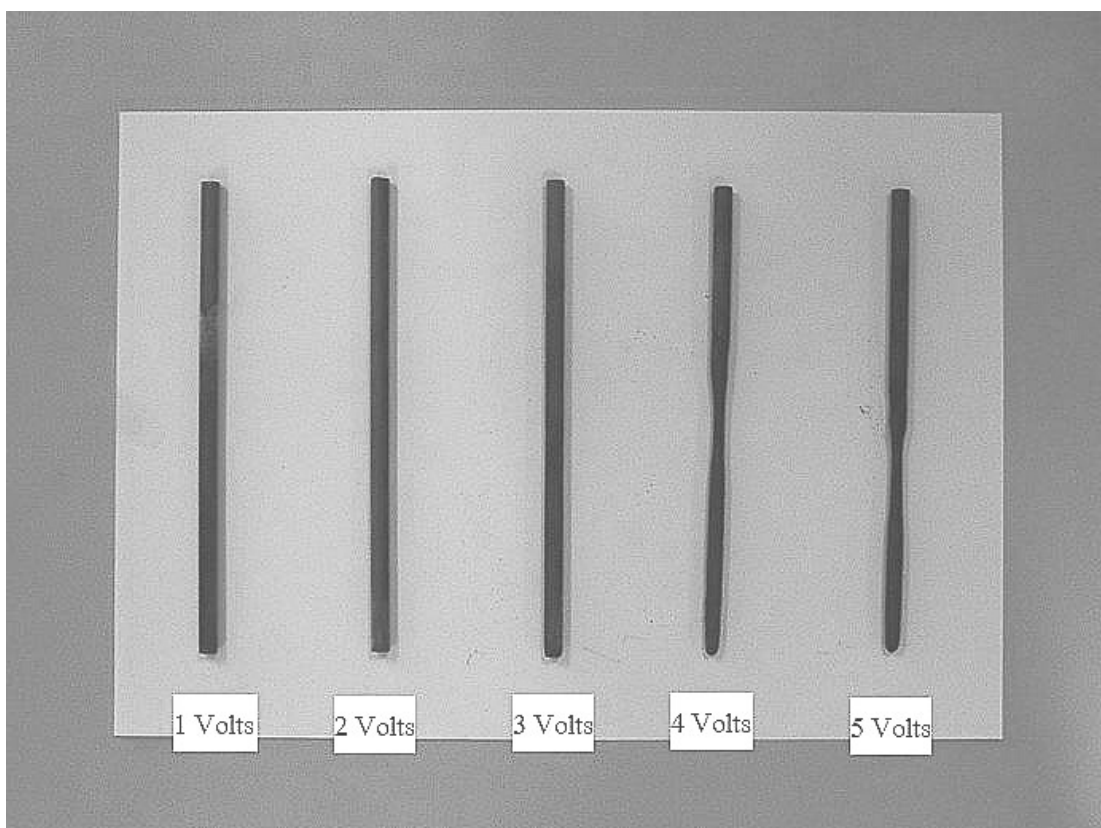
ตารางที่ 11 ผลการทดลองปริมาณ Cu ที่บริเวณขั้วแคโทด ขั้วแอโนดและ Cu^+ ที่อยู่ในสารละลาย

ความต่างศักย์ (Volts)	ปริมาณทองแดงที่เกาะ ขั้วแคโทด (กรัม)	ปริมาณทองแดงใน สารละลาย (mg/L.)	ปริมาณทองแดงที่แยก ตัวจากขั้วแอโนด (กรัม)
1	0.000	162.5	0.3249
2	+0.1476	155.9	0.4594
3	+0.2491	115.3	0.4796
4	+0.3269	90.0	0.5069
5	+0.4008	57.7	0.5162

ตารางที่ 12 ค่า pH น้ำหนักถ่านกัมมันต์ และน้ำหนักแท่งคาร์บอนภายหลังการทดลอง

ความต่างศักย์ (Volts)	pH หลังการทดลอง	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ เปลี่ยนไป (g.)	น้ำหนักแท่งคาร์บอน ที่ลดลง
1	1.213	2.39	-0.0119
2	1.199	2.73	-0.0665
3	1.150	3.09	-0.1597
4	1.146	3.12	-1.6107
5	1.139	3.48	-2.0739

ในการทดลองที่มีค่า pH ที่ 1.2 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole และระยะเวลาเดียวกัน เมื่อทำการแปรผันค่าความต่างศักย์ พบว่าที่ความต่างศักย์ 5 volts มีปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดสูงที่สุด รองมาเป็น 4 3 2 และ 1 volts ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาที่บริเวณขั้วแอโนด บริเวณแท่งคาร์บอนซึ่งเป็นตัวสื่อกลางไฟฟ้าเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ จะพบว่าแท่งคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 3 4 และ 5 volts เกิดการแตกตัวและหลุดลงสู่สารละลาย electrolyte เป็นจำนวนมาก (รูปที่ 23) และเมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ที่ 4 และ 5 volts การเกิดตัวที่ขั้วแคโทดของโลหะทองแดงเป็นลักษณะไม่สม่ำเสมอ จึงพิจารณาค่าความต่างศักย์ที่ 1 และ 2 volts เท่านั้น



ภาพที่ 23 แท่งคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ความต่างศักย์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ที่ 1 volts พบว่า ปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดมีน้อยมากและเมื่อพิจารณาจากน้ำหนักขั้วแคโทดซึ่งเป็นเหล็ก พบว่าเหล็กที่นำมาใช้เป็นขั้วแคโทดมีลักษณะลดลงเนื่องจากสภาพของระบบมีความเป็นกรด เมื่อการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของทองแดงไม่ดีเพียงพอทำให้โลหะทองแดงไม่สามารถเคลือบอยู่บริเวณผิวทั้งหมดของแผ่นเหล็ก ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นบริเวณผิวของแผ่นเหล็ก น้ำหนักของแผ่นเหล็กที่นำมาเป็นขั้วแคโทดจึงลดลง

เมื่อพิจารณาจากเหตุผลข้างต้นทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมกับระบบเป็น 2 volts ซึ่งได้ปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดเป็น 0.1476 g. และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดกับความต่างศักย์ได้ดังนี้

$$Cu_a = 0.0844 v - 0.0212 \quad ; v \geq 2 \quad (28)$$

โดยที่ Cu_a คือ ปริมาณทองแดงที่ขั้วแอโนด (g.)
 v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)

สมการทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด

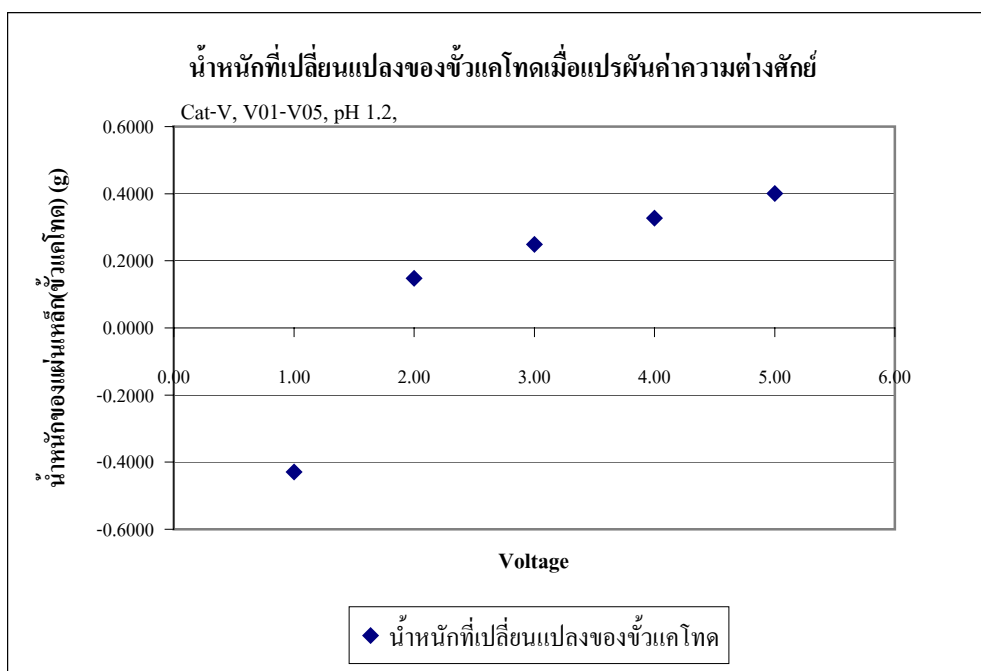
$$Cu_r = 0.0189 v + 0.4215 \quad ; v \geq 2 \quad (29)$$

โดยที่ Cu_r คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (g.)
 v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)

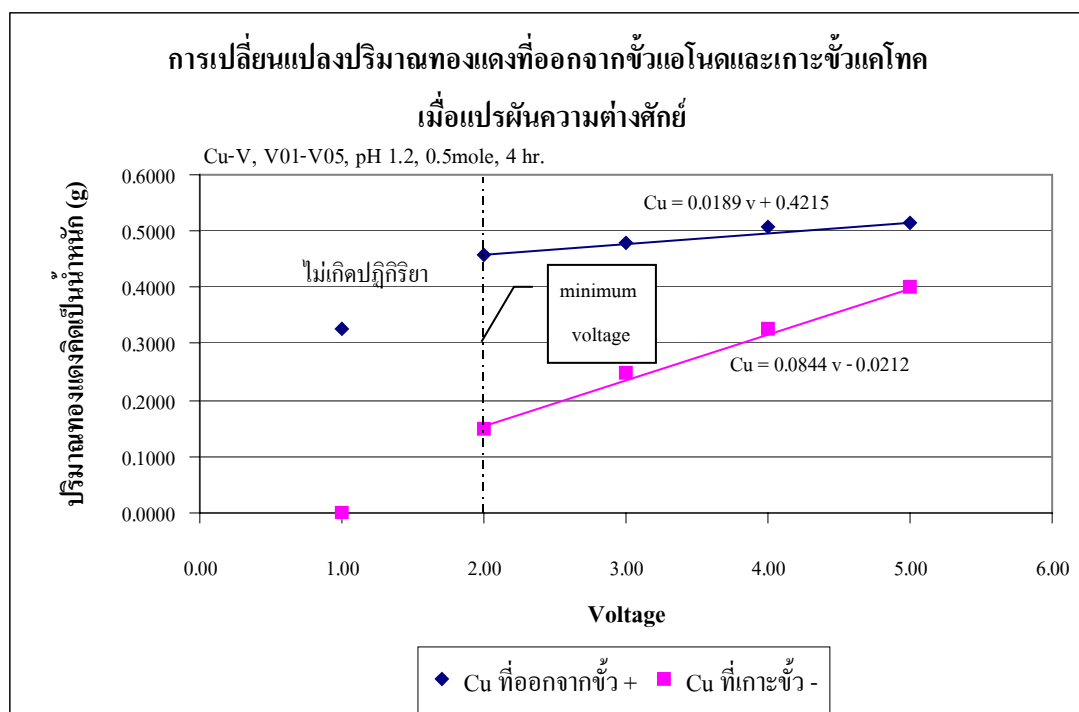
สมการของทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็น

$$[Cu] = -32.967 v + 221.83 \quad ; v \geq 2 \quad (30)$$

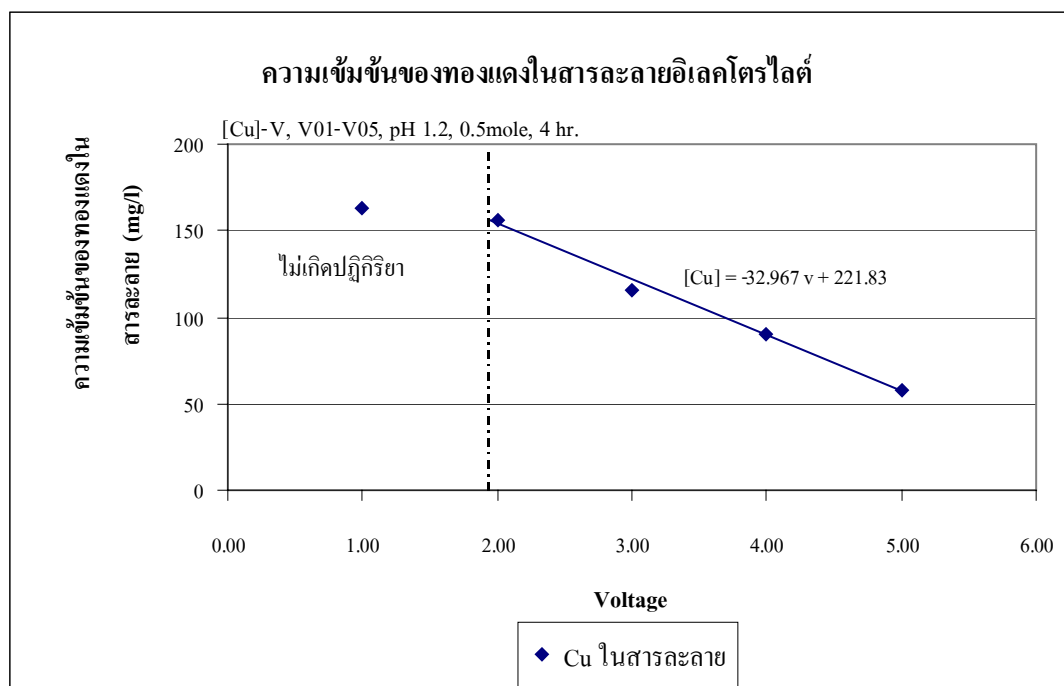
โดยที่ $[Cu]$ คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่อยู่ในสารละลาย (g.)
 v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)



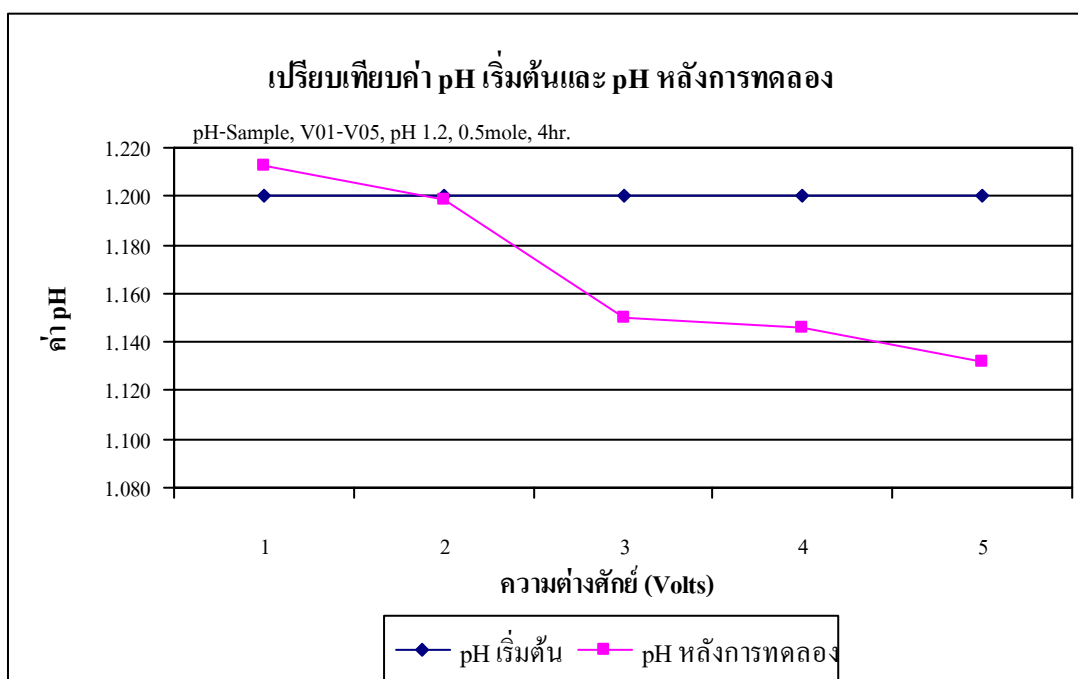
ภาพที่ 24 น้ำหนักของขั้วแคโทดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแปรผันค่าความต่างศักย์



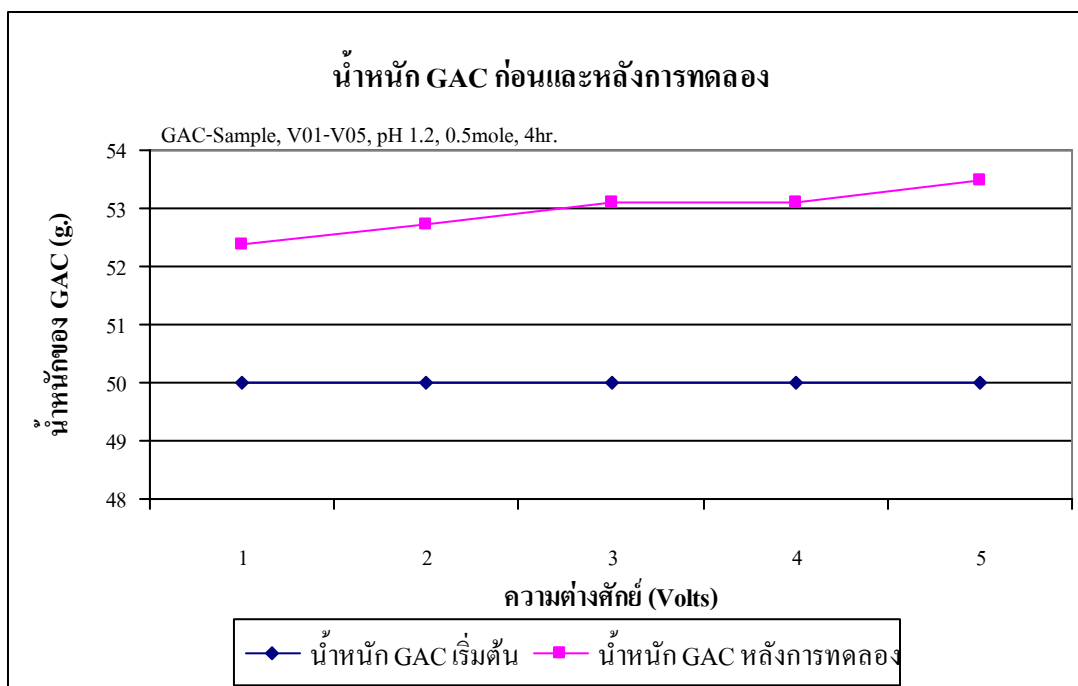
ภาพที่ 25 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด และเกาะที่ขั้วแคโทด เมื่อแปรผันค่าความต่างศักย์



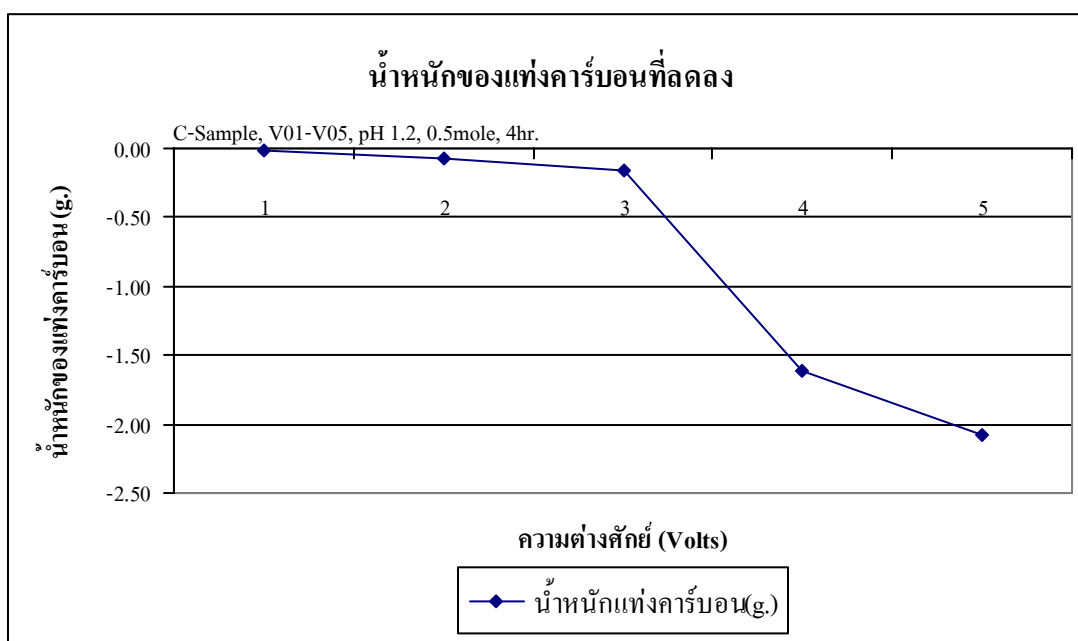
ภาพที่ 26 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อแปรผันค่าความต่างศักย์



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบค่า pH ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 28 เปรียบเทียบน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 29 น้ำหนักของแท่งคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

ผลของระยะเวลา

ตารางที่ 13 ผลการทดลองปริมาณ Cu ที่บริเวณข้าวแคโทด ข้าวแอโนดและ Cu^+ ที่อยู่ในสารละลาย

ระยะเวลา (Hour)	ปริมาณทองแดงที่ เกาะข้าวแคโทด (กรัม)	ปริมาณทองแดงใน สารละลาย (mg/l.)	ปริมาณทองแดงที่แยก ตัวจากข้าวแอโนด (กรัม)
1	0.0303	159.8	0.3499
2	0.1115	170.2	0.4659
3	0.1344	165.4	0.4751
4	0.1476	155.9	0.4594
5	0.2205	126.0	0.4725
6	0.2626	106.2	0.4750
9	0.3104	79.8	0.4700
12	0.3484	64.7	0.4778
18	0.3906	37.0	0.4646
24	0.4178	25.0	0.4678

ตารางที่ 14 ค่า pH น้ำหนักถ่านกัมมันต์ และน้ำหนักแท่งคาร์บอนภายหลังการทดลอง

ระยะเวลา (Hour)	pH หลังการทดลอง	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ เปลี่ยนไป (g.)	น้ำหนักแท่งคาร์บอน ที่ลดลง
1	1.220	1.70	-0.0078
2	1.236	1.80	-0.0128
3	1.232	1.89	-0.0155
4	1.119	2.73	-0.016
5	1.220	3.14	-0.0224
6	1.238	3.31	-0.0400
9	1.209	3.41	-0.0729
12	1.211	3.89	-0.1290
18	1.233	4.17	-0.1806
24	1.224	4.57	-0.2235

เมื่อทำการทดลองหาความเหมาะสมของค่า pH ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte และค่าความต่างศักย์ ได้ค่าที่เหมาะสมเป็น pH 1.2 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte 0.5 mole และความต่างศักย์ที่ 2 volts ซึ่งนำค่าเหล่านี้มาใช้ในการทดลองเพื่อหาระยะเวลาของระบบที่เหมาะสมในที่นี้ เมื่อทำการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีความสามารถในการนำโลหะทองแดงมายังบริเวณขั้วแคโทดได้ 89.31% และ เมื่อพิจารณาจากปริมาณทองแดงรวมในระบบแล้ว จะพบว่าทองแดง (Cu^{+}) ที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ออกมาจากถ่านกัมมันต์เกือบจะหมดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแผนภูมิภาพ (รูปที่ 31) จะเห็นได้ว่า มีปริมาณทองแดงในสารละลาย electrolyte สูงสุดที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงเช่นกัน หลังจากนั้นปฏิกิริยาของทองแดงจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเพื่อดึงดูดโลหะทองแดงให้เกาะที่ขั้วแคโทดเพียงอย่างเดียว

ปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนดใช้สมการดังนี้

$$Cu_r = \frac{K_1 t}{K_2 + t} \quad (31)$$

โดยที่	Cu_r	คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (g.)
	K_1	คือ ปริมาณทองแดงสูงสุด
	K_2	คือระยะเวลาที่ทองแดงแยกตัวจากถ่านกัมมันต์ได้ครั้งหนึ่งของปริมาณสูงสุด
	t	คือ ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)

ซึ่งในที่นี้ ค่า K_1 มีค่าเท่ากับ 0.4795 และ ค่า K_2 สามารถหาได้จากการประมาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35 ทำให้สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Cu_r = \frac{0.4795t}{0.35 + t} \quad (32)$$

โดยที่	Cu_r	คือ ปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (g.)
	t	คือ ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)

พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่บริเวณขั้วแคโทด กับระยะ เวลาเป็นความสัมพันธ์แบบลอการิทึมสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

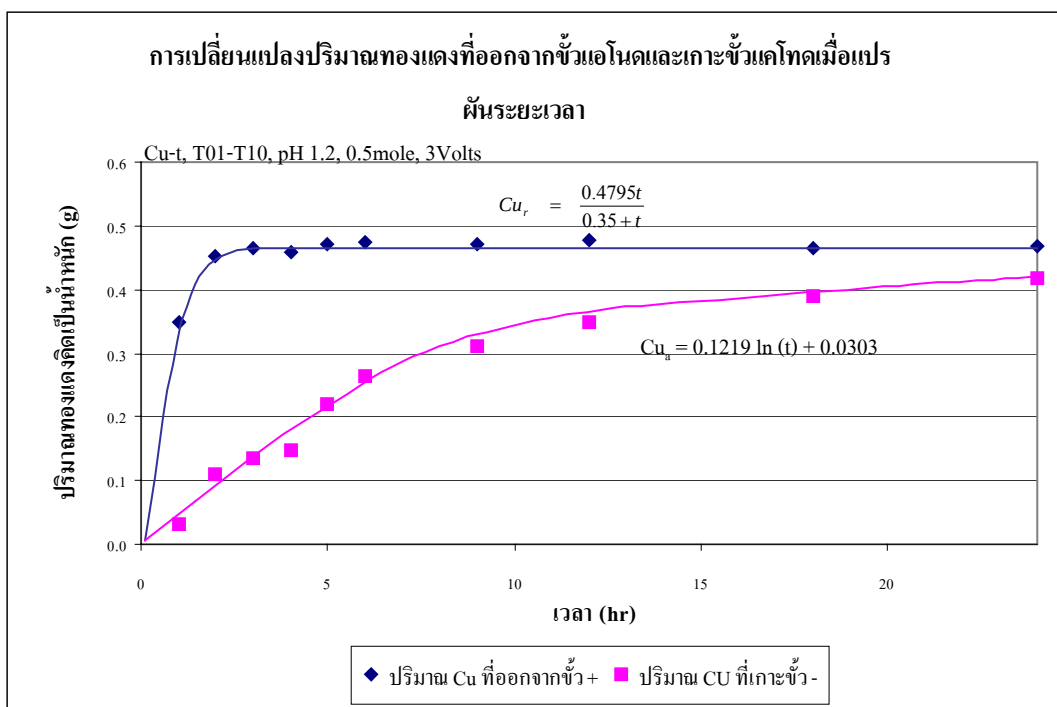
$$Cu_r = A \ln(t) + B \quad (33)$$

โดย	Cu_r	คือปริมาณทองแดงที่บริเวณขั้วแคโทด (g.)
	A	คือค่าความชันของสมการ
	B	คือค่าคงที่ของสมการ
	t	คือระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)

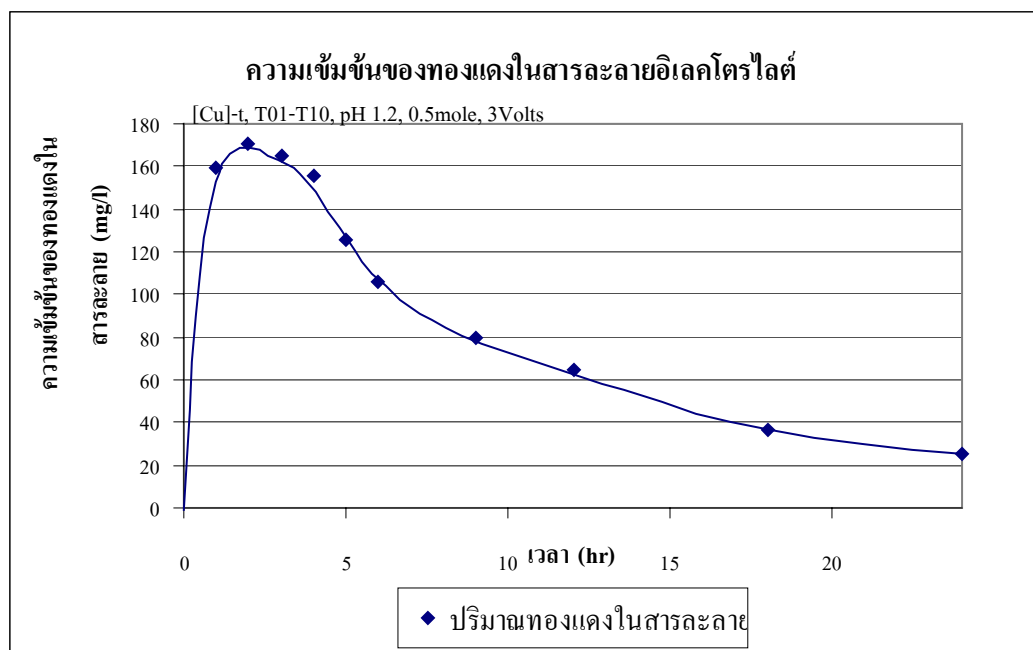
เมื่อแทนค่า A และ B ซึ่งได้จากผลการทดลองจะได้สมการ

$$Cu_a = 0.1219 \ln(t) + 0.0303 \quad (34)$$

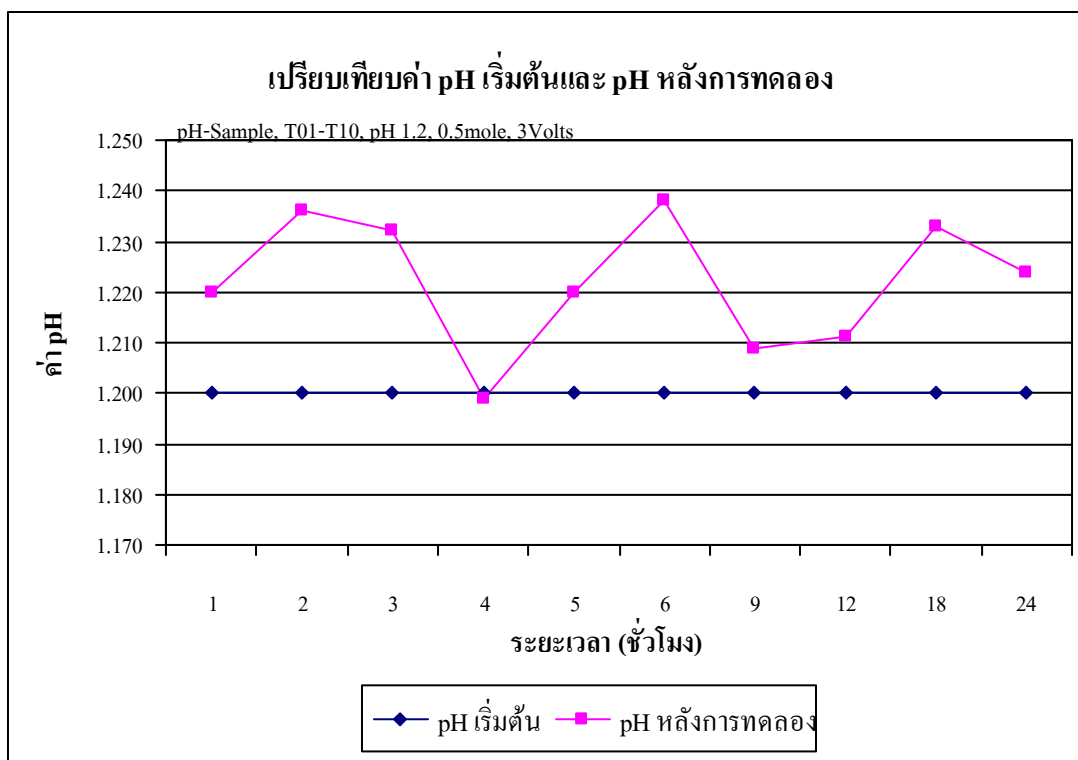
โดยที่	Cu_a	คือ ปริมาณทองแดงที่บริเวณขั้วแคโทด (g.)
	t	คือ ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)



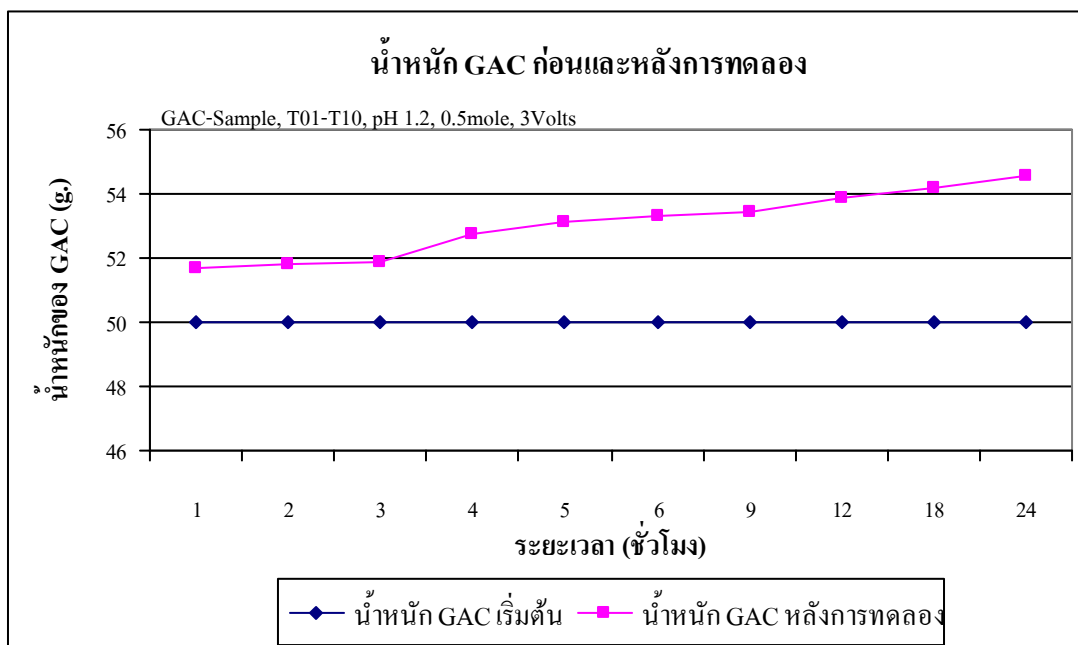
ภาพที่ 30 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด และที่เกาะขั้วแคโทดเมื่อแปรผันระยะเวลา



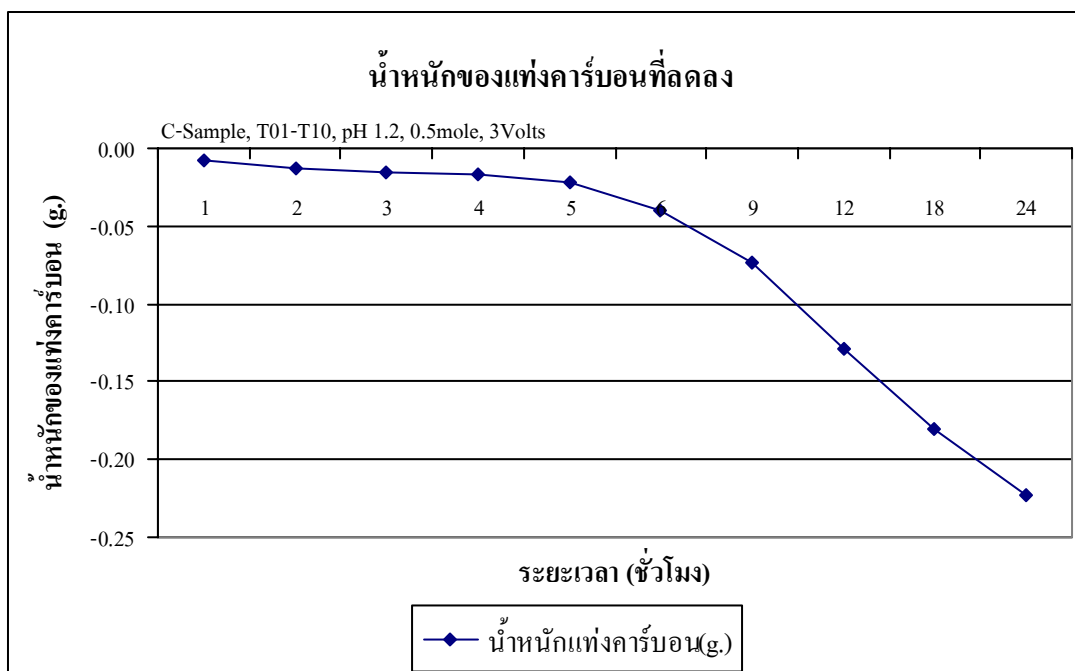
ภาพที่ 31 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแปรผันระยะเวลา



ภาพที่ 32 เปรียบเทียบค่า pH ก่อนและหลังการทดลอง



ภาพที่ 33 เปรียบเทียบน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการทดลอง

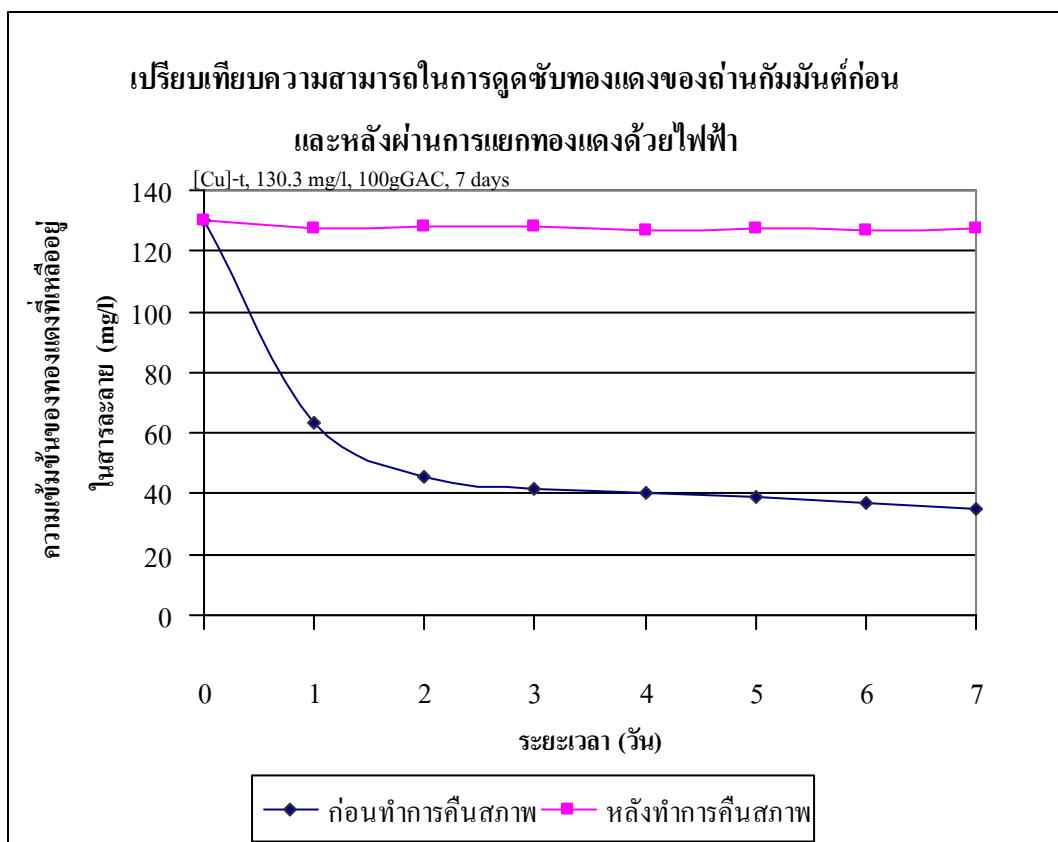


ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลง pH และน้ำหนักของ GAC น้ำหนักของแท่งคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลง

การทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการนำกลับด้วยไฟฟ้าแล้ว

เมื่อทำการตรวจวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์แล้ว พบว่า ค่าของไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์หลังการทดลองมีค่าที่ลดลงเหลือ 877 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งคิดเป็น 86.83% ของค่าไอโอดีนนัมเบอร์เดิม เนื่องจากเห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีถึง 86.83% จึงได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารละลายที่มีทองแดงเจือปนอยู่ (CuSO_4) ได้อีกหรือไม่

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการนำกลับมาใช้ใหม่ สามารถดูดซับสารละลายทองแดงได้เพียง 3 mg/100g.GAC เนื่องจากถ่านกัมมันต์ได้ดูดซับ OH^- และ SO_4^{2-} ไปจนหมดความสามารถในการดูดซับแล้ว (รูปที่ 35) จึงไม่สามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ได้อีก



ภาพที่ 35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ GAC ในสภาวะเดิมกับสภาวะที่นำโลหะทองแดงออกจาก GAC แล้ว

การประยุกต์ใช้งานจริงของระบบ

จากการทดลองพบว่าค่า pH ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte และ ความต่างศักย์ที่เหมาะสมของระบบอยู่ที่ pH 1.2 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole และ ค่าความต่างศักย์ 2 volts ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในระบบจริงได้ทันที สำหรับค่าแปรผันอื่นๆ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วแคโทด และขนาดของระบบ ควรจะเป็น 0.5 watts/g.GAC 4 cm²/g.GAC และ 40 cm³/g.GAC ตามลำดับ

ความคุ้มค่าของระบบ

เนื่องจากการทดลองนี้เทียบเสมือนข้าวแคโทด เป็นชิ้นงานที่ต้องการนำมาชุบโลหะทองแดง เมื่อวิเคราะห์จะพบว่า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะมีอยู่ 2 ส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในส่วนของ สารละลาย electrolyte และ ค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งค่าไฟฟ้าที่ใช้อยู่ที่ยูนิตละ 2.86 บาท และ ค่าสารละลายอิเล็กโตรไลต์อยู่ที่ 503.33 บาทต่อกิโลกรัม (มีนาคม 2549) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C = (0.0715 t + 1.430)Y \quad (35)$$

โดยที่ C	คือ ค่าใช้จ่าย (บาท)
t	คือ ระยะเวลาที่ใช้เดินระบบ (ชั่วโมง)
Y	คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในระบบ

ซึ่งทองแดงที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ 1 กรัมมีปริมาณ 0.959 g แต่ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่สามารถนำกลับมาได้ 89.31% หรือ 0.856 กรัม ซึ่งราคาทองแดงอยู่ที่ 2.111 \$/lb. หรือ 222.92 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 0.223 บาทต่อกรัม ทำให้ทองแดงส่วนนี้มีมูลค่า 0.191 บาทต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ ซึ่งน้อยกว่ามูลค่าของสารละลายอิเล็กโตรไลต์เพียงอย่างเดียวซึ่งมีมูลค่า 1.430 บาทต่อกรัมถ่านกัมมันต์ จึงไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ

สรุปและข้อเสนอแนะ

ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับทองแดง

ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์อยู่ที่ 1,010 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อนำมาใช้ในการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) ถ่านกัมมันต์ 100 กรัมสามารถดูดซับทองแดงได้ 95.9 กรัม หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับทองแดงได้ 0.959 กรัมต่อ 1 กรัม ถ่านกัมมันต์

เขียนสมการการดูดซับทองแดงของถ่านกัมมันต์ได้ดังต่อไปนี้

$$Cu_{ads} = \frac{Cu_0 t}{0.45 + t} \quad (36)$$

โดยที่ Cu_{ads} คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ดูดซับได้ (g/g.GAC)
 Cu_0 คือ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (g/g.)
 t คือ ระยะเวลาในการดูดซับ (วัน)

ผลของค่า pH ก่อนการทดลองต่อประสิทธิภาพ

ค่า pH ที่เหมาะสมกับการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอยู่ที่ค่า pH สูงกว่า 2.0 ซึ่งหากค่า pH มีค่าต่ำกว่านี้ ทองแดงจะไม่เกาะบนขั้วแคโทดแต่จะเปลี่ยนเป็นตกตะกอนแทน ในขณะที่ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่อยู่ที่ pH 1.2 ซึ่งจะมีปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดที่สามารถนำกลับไปใช้ได้สูงสุด และเมื่อทำการปรับค่า pH ให้ต่ำลงส่งผลให้ทองแดงที่อยู่ในถ่านกัมมันต์แยกตัวออกจากถ่านกัมมันต์ได้ดีขึ้นแต่เมื่อค่า pH ต่ำกว่า 1.2 จะทำให้ความสามารถในการเกาะขั้วแคโทดของทองแดงลดลง

ผลของความเข้มข้นสารละลาย Electrolyte

เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย electrolyte มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการแยกตัวของทองแดงออกจากถ่านกัมมันต์ดีขึ้น และความสามารถในการเกาะขั้วแคโทดของโลหะทองแดงก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งค่าความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.5 mole

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนดกับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Cu_r = 0.0129 \ln ([EI]) + 0.4885 \quad (37)$$

โดย Cu_r คือความเข้มข้นของทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (mg/l.)
 $[EI]$ คือความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (mole)

ผลของค่าความต่างศักย์

ค่าความต่างศักย์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ทองแดงสามารถแยกตัวออกจากถ่านกัมมันต์ดีขึ้น และความสามารถในการเกาะขั้วแคโทดของโลหะทองแดงก็สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ที่มีค่าสูงเกินกว่า 2 volts พบว่า แท่งคาร์บอนซึ่งเป็นแกนนำไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแอโนดเกิดการแตกตัวและหลุดลงสู่สารละลาย electrolyte นอกจากนี้ ค่าความต่างศักย์ที่ 4 และ 5 volts ยังทำให้การเกาะตัวของโลหะทองแดงที่ขั้วแคโทดไม่สม่ำเสมออีกด้วย ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมคือ 2 volts

สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทดกับความต่างศักย์ได้ดังนี้

$$Cu_a = 0.0844 v - 0.0212 \quad ; v \geq 2 \quad (38)$$

โดยที่ Cu_a คือ ปริมาณทองแดงที่ขั้วแคโทด (g.)
 v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)

สมการทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด

$$Cu_r = 0.0189 v + 0.4215 \quad ; v \geq 2 \quad (39)$$

โดยที่ Cu_r คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (g.)

v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)

สมการของทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็น

$$[Cu] = -32.967 v + 221.83 \quad ; v \geq 2 \quad (40)$$

โดยที่ $[Cu]$ คือ ความเข้มข้นของทองแดงที่อยู่ในสารละลาย (g.)

v คือ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ (volt)

ผลของระยะเวลา

ในช่วงระยะเวลา 6 ชั่วโมงแรก การเกาะขั้วแคโทดของทองแดงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ ลดลงในช่วงระยะเวลาที่เหลือ เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ทองแดงสามารถเกาะขั้วแคโทดได้ 89.31 % สำหรับปริมาณทองแดงรวมนั้นพบว่า ในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ทองแดงจะแยกตัวออกมาจากขั้วแคโทดจนหมด ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่อยู่ที่ 24 ชั่วโมง สามารถนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ได้ 89.31 % และ คงเหลือในสารละลายอยู่ 10.69 %

สภาวะที่เหมาะสมในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ค่า pH 1.20 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole ค่าความต่างศักย์ที่ 2 volts เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนดใช้สมการดังนี้

$$Cu_r = \frac{0.4795t}{0.35 + t} \quad (41)$$

โดยที่ Cu_r คือ ปริมาณทองแดงที่ออกจากขั้วแอโนด (g.)
 t คือ ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่บริเวณขั้วแคโทดกับระยะเวลาสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Cu_a = 0.1219 \ln(t) + 0.0303 \quad (42)$$

โดยที่ Cu_a คือ ปริมาณทองแดงที่บริเวณขั้วแคโทด (g.)
 t คือ ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)

ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ภายหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแล้วมีค่าไอโอไดน์นัมเบอร์อยู่ที่ 877 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงจากค่าไอโอไดน์นัมเบอร์เบื้องต้นคือ 1,010 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็น 86.83 % แต่เมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปทดสอบเพื่อดูดซับโลหะทองแดง พบว่าถ่านกัมมันต์นี้ไม่สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้อีก

การประยุกต์ใช้งานจริงของระบบ

ค่า pH ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte และ ความต่างศักย์ที่เหมาะสมของระบบอยู่ที่ pH 1.2 ความเข้มข้นสารละลาย electrolyte ที่ 0.5 mole และ ค่าความต่างศักย์ 2 volts ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในระบบจริงได้ทันที สำหรับค่าแปรผันอื่นๆ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วแคโทด และขนาดของระบบ ควรจะเป็น 0.5 watts/g.GAC 4 cm²/g.GAC และ 40 cm³/g.GAC ตามลำดับ

ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

เมื่อคิดถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจพบว่า ปริมาณทองแดงที่ได้ออกมามีราคาเพียง 0.191 บาทต่อกรัมถ่านกัมมันต์เท่านั้น ซึ่งราคาค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะมีราคาสูงกว่า ทำให้ไม่คุ้มค่าในการคิดค่าตอบแทนเป็นจำนวนเงิน

สามารถเขียนสมการของต้นทุนของระบบ (มีนาคม 2549) ได้ดังนี้

$$C = (0.0715 t + 1.430)Y \quad (43)$$

โดยที่	C	คือ ค่าใช้จ่าย (บาท)
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้เดินระบบ (ชั่วโมง)
	Y	คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในระบบ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงค่าตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลเช่น พื้นที่ผิวของขั้วแคโทด ระยะระหว่างขั้วปริมาณของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ชนิดของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้
2. ควรมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรอื่นๆ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งหนึ่ง
3. ควรมีการศึกษาวิจัยโดยใช้ระบบนี้กับโลหะหนักชนิดอื่นที่มีราคาสูงกว่าทองแดง
4. ควรมีการทดลองระบบกับน้ำเสียจริง
5. ควรมีการเปรียบเทียบกับ การ regenerate ถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีอื่น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ฉลองชัย แก้วภูผา. 2535. การประยุกต์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในการชุบโลหะบนผิวพลาสติก.

วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2539. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลง

กรณ์มหาวิทยาลัย

มันสิน ดันทุลเวสน์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรุงเทพฯ : 321น.

รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ลัดดาวัลย์ วิระมิตรชัย. 2537. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าเพื่อลดปริมาณ

ทองแดงและเหล็กโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัย

เกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วรพันธ์ แก้วอุดม. 2532. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำ ดินตะกอน และผักตบชวาในบึง

มักกะสัน. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สุเมธ ขวเดช. 2535. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ :

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรัช รักสมบัติ. 2545. การแยกเงินจากสารละลายที่เหลือจากการแยกเงินด้วยวิธีอิเล็กโตรไลซิสโดย

ใช้กระบวนการอิเล็กโตรไลซิสแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กรุงเทพฯ.

สุวิรัช สัมปิตะวนิช และ งามพิศ อังคทะวานิช. เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่ม 11.

กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ.

เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2518. **การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : 317 น.

หทัยทัต ชื้อสุวรรณ. 2544. **การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี**. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ : 70 น.

Bard A. J. And Faulker L.R.. 1980. **Electrochemical methods fundamentals and applications**. New york : John Wiely & Sons Inc..

Cheremisinoff P.U.. 1995. **Handbook of water and wastewater treatment technology**. 1st edition. New york : Marcel Dekker, Inc..

Donal S., Harry H. And Soupilas A. October 1980. **Extraction of metal from sewage sludge**. The Canadian journal of chemical engineering Vol 58 : 673 – 677

Donal T. Sawyer, Andrzej Sobkowiak and Julian L. Roberts. 1995. **Electrochemistry for chemists. 2nd edition**. New york : John Wiely & Sons Inc..

Fane, A. G.. April 15 – 25. **An introduction to membrane process**. Proceeding of the fourth ASEAN Workshop on membrane technology. UNM Bangi Malaysia 1987.

Faust, S.D., and Aly, O.M. 1987. **Adsorption process for water treatment**. MA. : Butterwort.

Friedrich H.. 1962. **Ion exchange**. New york : McGraw – Hill.

McKay, G. and Bino, M.J. 1990. **Fixed bed adsorption for the removal of pollutants from water**. Environmental pollution Vol. 66 : 33 – 35

McNeely, R.N., V.P. Neimanis and L. Pwyer. 1979. **Water quality sourcebook a guide to water quality parameter.** Inland water directorate, Water quality branch, Ottawa. 89 p.

Metcalf & Eddy Inc. 1991. **Wastewater engineering. 3rd edition.** New york : McGraw – Hill international edition.

Ouki, S.K. and Neufeld, R.D. 1997. **Use of activated carbon for the recovery of chromium from industrial wastewaters.** Journal of chemical technology and biotechnology Vol. 70 : 3 – 8

Paul, T.B. and David, C.S. 2002. **An electrochemical system for removing and recovering elemental mercury from a gas stream.** Environmental science & technology Vol. 36 No. 20 : 4430 – 4435

Samuel Field. 1949. **The principle of electrodeposition. 2nd edition.** London : Sir Isacc Pitman & Sons Inc..

Srivastava, T.R. and Pant, N. 1989. **Adsorption of heavy metal ions on carbonaceous material developed from the waste slurry generated in local fertilized plants.** Water research Vol. 23 No. 9 : 1161 – 1165

Sawyer, C.N. and P.L. McCarty. 1978. **Chemistry for environmental engineering.** 3d ed., McGraw – Hill, Inc., Singapore. 532 p.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์

