

การนำทองแดงกลับคืนจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้

Recovering of Copper from Synthetic Solution in 3PE Reactor

มะลิ หุ่นสม¹, เกียรติ พงกษาทร¹, สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ^{1*}, Vergnes H.², Duverneuil P.²

¹ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

² INPT^a, ENSIACET^b, 18, Chemin de la Loge, 31078 Toulouse Cedex, France.

a. Institut National Polytechnique de Toulouse, Place des Hauts-Murats, 31006, Toulouse cedex, France,

b. Ecole Nationale Supérieure des ingénieurs en Arts Chimiques et Technologies, Chemin de la Loge, 31078 Toulouse France

*Corresponding author, E-mail: dsomsak@sc.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการนำกลับทองแดงทำการทดลองจากสารละลายสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสประมาณ 1 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้ เครื่องปฏิกรณ์ออกแบบในแนวตั้ง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เมตร สูง 0.35 เมตร ขั้วคาโทดคืออนุภาคกราไฟต์ แอโนดคือแผ่นไทเทเนียมเคลือบผิวด้วยรูทีเนียมออกไซด์ วางอยู่เหนือแนวอนุภาคกราไฟต์ประมาณ 0.04-0.05 เมตร ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือความเข้มกระแสไฟฟ้าประมาณ 9 แอมแปร์ ค่าต้นทุนการทำงานประมาณ 1.40 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรสารละลาย ที่ภาวะนี้ร้อยละ 90 ของทองแดงจะนำกลับภายในเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของการนำกลับทองแดงจะลดลงเมื่อความถี่ของพัลส์อากาศเพิ่มขึ้นและการถ่ายเทมวลสารของอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารละลายสูงขึ้น ชนิดของคาโทดซึ่งประกอบด้วยกราไฟต์และกราไฟต์ที่เคลือบผิวด้วยทองแดงให้ร้อยละของการนำกลับไม่แตกต่างกัน

Abstract

Recovery of copper from a synthetic solution with an initial copper concentration of 1 g/l, pH 1 was investigated in a Pulsed Porous Percolated Electrode reactor (3PE). This reactor was constructed in the axial field configuration with 0.2 m diameter and 0.35 m height. Graphite particles were used as a voluminal cathode and a counter electrode made of titanium coated with ruthenium oxide was placed 0.04-0.05 m above the upper level of carbon particles. The optimum current intensity was obtained at 9 A and operating cost was about 1.4 US\$/m³. At the optimum point, more than 90 % of copper was recovered within 4 hours. The recovery rate of copper decreased when the pulse frequency of air increased. Increasing flow rate of electrolyte led to increasing mass transfer of active species. Typed of cathode,

graphite and graphite covered by copper, had no effect on copper recovery.

1. บทนำและวัตถุประสงค์

การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมควรมีการบำบัดให้ได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนดไว้เสียก่อน ในปัจจุบันหน่วยงานทั้งภาครัฐบาลและเอกชนได้ให้ความสนใจการนำโลหะกลับคืนจากน้ำทิ้งเหล่านี้ โดยโลหะที่นำกลับคืนนั้นสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ น้ำที่ออกจากกระบวนการจึงมีปริมาณโลหะหนักลดลงจนถึงระดับที่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำได้

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาแนวทางเกี่ยวกับการแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง กระบวนการที่มีความเป็นไปได้สูงคือกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical technique) ข้อดีคือราคาต่ำ ไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำที่ผ่านกระบวนการและสามารถนำโลหะและวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้

การนำกลับคืนโลหะทองแดง นิกเกิลและโครเมียมจากการตะกอนได้ศึกษาโดยวิธีการต่อเนื่องของกระบวนการชีวภาพและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า [1-2] โลหะในน้ำทิ้งจะแยกได้โดยเชื้อจุลินทรีย์ในรูปของตะกอน จากนั้นจึงนำตะกอนมาชะล้างโลหะหนักด้วยสารละลายกรด และนำสารละลายกรดซึ่งมีองค์ประกอบของโลหะนี้เข้าสู่กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า Armstrong [3] ศึกษาการแยกโลหะแคดเมียม โคบอลต์และนิกเกิลจากสารละลายโลหะผสม พบว่าโลหะแคดเมียมสามารถแยกออกจากสารละลายโดยไม่มีการปนเปื้อนของโลหะโคบอลต์และนิกเกิล Panizza [4] ศึกษาการแยกทองแดงจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทองแดง พบว่าร้อยละ 98 ของทองแดงสามารถแยกออกจากน้ำทิ้ง ที่อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยป้อนกระแสประมาณ 750 แอมแปร์ ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการไหลย้อนกลับ (Recirculating batch reactor) แยก

RECEIVED 11 MARCH, 2002

ACCEPTED 14 OCTOBER, 2002

โลหะออกจากร้าน้ำทิ้ง [5] ร้อยละ 90 ของปรอทสามารถแยกออกโดยการเกาะติดที่ขั้วคาโทดด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ความเข้มข้นของทองแดงลดลงจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ (คิดเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปรอท) คิดเป็นร้อยละ 42 ของประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) ส่วนความเข้มข้นของตะกั่วลดลงจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ศักย์ไฟฟ้า -600 มิลลิโวลต์ (คิดเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปรอท) คิดเป็นร้อยละ 25 ของประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า

เครื่องปฏิกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนและน้ำซึมผ่านได้ (Pulsed Porous Percolated Electrode or 3PE) ได้พัฒนาขึ้นและติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรม [6-7] Fenouillet [8] ใช้เครื่องมือชนิดนี้ซึ่งออกแบบให้ใช้งานในแนวตั้งเพื่อนำกลับโลหะทองแดงจากร้าน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าน้ำที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เครื่องมือชนิดเดียวกันนี้ได้ออกแบบจัดวางในแนวนอนเพื่อใช้แยกโลหะโครเมียมจากสารละลาย [9] พบว่าในระบบมีการเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-เบสตลอดเวลาและระบบที่มีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสจะให้ผลของการแยกโครเมียมที่สมบูรณ์กว่าระบบที่ไม่มีกรควบคุมความเป็นกรด-เบส Aguirre [10] อภิปรายผลของการแยกโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE ร้อย 99, 93 และ 80 ของทองแดงสังกะสีและนิกเกิลจะสามารถนำกลับในเวลา 9, 13 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรต่อร้อยละการนำกลับของทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า ความถี่ของพัลส์อากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ชนิดของคาโทดซึ่งประกอบด้วยกราไฟต์และกราไฟต์ที่ผิวถูกปกคลุมด้วยทองแดง และอัตราการไหลของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE โดยมีการจำลองสมการไร้มวลของระบบเพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำงานกับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

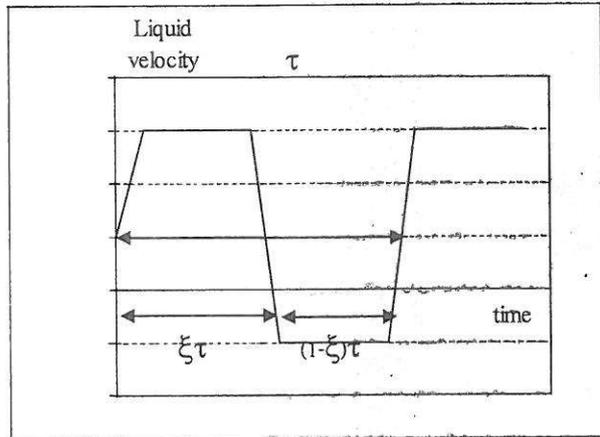
2. ทฤษฎี

2.1 สมบัติทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE

เครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE เป็นเครื่องมือที่มีการทำงานร่วมกันของเบดนิ่ง (Fixed bed) และเบดเคลื่อนที่ (Fluidized bed) องค์ประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

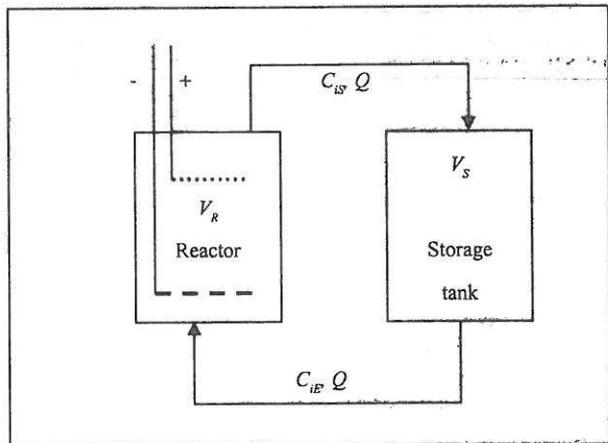
1. คาโทดเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากซึ่งจะสัมผัสกับแกนนำไฟฟ้า
2. แอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวน้อย ทนทานต่อภาวะการกัดกร่อนเช่นแพลทินัมหรือไทเทเนียมเคลือบผิวด้วยรูทีเนียมออกไซด์

3. ป้อนทำหน้าที่จะช่วยให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดของโลหะที่ผิวของคาโทด
4. ระบบพัลส์เป็นระบบที่ใช้อากาศทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคาโทดและการหมุนเวียนของอนุภาคในระบบ ช่วยป้องกันปัญหาการอุดตันที่กั้นเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 1. การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเครื่องปฏิกรณ์

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบก็เกิดความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง อิออนของโลหะในสารละลายได้รับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนไปเป็นโลหะเกาะอยู่ที่ขั้วคาโทดเรียกว่าเกิดการรีดักชัน (Reduction) ในช่วงเวลานี้คล้ายกับเบดนิ่ง เมื่อระบบมีการป้อนพัลส์อากาศจะทำให้เกิดการยกตัวของอนุภาคในช่วงเวลา $\xi\tau$ หรือเรียกว่าเบดเคลื่อนที่ อนุภาคที่ถูกปกคลุมด้วยโลหะซึ่งมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนอนุภาคที่ยังไม่มีการเกาะติดและมีน้ำหนักเบาที่ถูกดันให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน



รูปที่ 2. รูปแบบของการติดตั้งเครื่องมือ

2.2 การถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE

คุณวลที่เกิดขึ้นในภาวะที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ของอนุภาค *i* ในรูปที่ 2 สามารถแสดงด้วยสมการต่อไปนี้ [11]

$$QC_{iE} = QC_{iS} + \gamma A \tag{1}$$

$$Q(C_{iE} - C_{iS}) = \gamma A = \frac{j}{nF} \eta A \tag{2}$$

ให้ $\eta = 1$ และ $j = nFk_L C_{iS}$ ดังนั้น

$$Q(C_{iE} - C_{iS}) = \frac{j}{nF} A = k_L A_e V_e C_{iS} \tag{3}$$

ถ้าพิจารณาถังใส่สารละลายเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นภายในถังแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการทดลอง คุณวลในถังใส่สารละลายสามารถแสดงได้โดยสมการต่อไปนี้

$$Q(C_{iS} - C_{iE}) = V_S \frac{dC_{iS}}{dt} \tag{4}$$

หรือ

$$Q(C_{iE} - C_{iS}) = -V_S \frac{dC_{iS}}{dt} = k_L A_e V_e C_{iS} \tag{5}$$

จัดรูปสมการที่ 5 จะได้

$$\frac{dC_{iS}}{C_{iS}} = -\left(\frac{k_L A_e V_e}{V_S}\right) dt \tag{6}$$

อินทิเกรตสมการที่ 7 จะได้สมการที่ 8

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dC_{iS}}{C_{iS}} = -\left(\frac{k_L A_e V_e}{V_S}\right) \int_0^t dt \tag{7}$$

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -\left(\frac{k_L A_e V_e}{V_S}\right) t \tag{8}$$

จากสมการที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารหรือ k_L สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่างความเข้มข้น ($\ln(C_t/C_0)$) กับเวลา

2.3 กลุ่มตัวแปรไร้มิติ

กลุ่มตัวแปรไร้มิติซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลาย สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร และสมบัติทางกายภาพของสารละลาย สามารถแสดงได้ในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เรโนลด์ (Re_p) เซอร์วูด (Sh) และชมิด (Sc)

$$Re_p = \frac{\rho d_p v}{\mu} \tag{9}$$

$$Sh = \frac{k_L d_p}{D} \tag{10}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \tag{11}$$

กลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้ดังกล่าวสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้โดยสมการที่ 12

$$Sh = a Re_p^b Sc^c \tag{12}$$

เมื่อค่า *a*, *b* และ *c* เป็นค่าคงที่ ในระบบขั้วไฟฟ้าแบบสามมิติค่าของ *c* จะสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.25 ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละของการนำกลับ} (\%R) = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100 \tag{13}$$

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า} (\phi) = \frac{nFW_i}{MW(it)} \times (\%R) \tag{14}$$

$$\text{ต้นทุนในการทำงาน} = \frac{itVC_u}{V_T} \tag{15}$$

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองทำที่อุณหภูมิห้อง ใช้สารละลายสังเคราะห์ของทองแดงที่เตรียมโดยละลายสาร $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98) ในน้ำกลั่น ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายปรับด้วยกรดซัลฟูริกตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของสารละลาย [12]

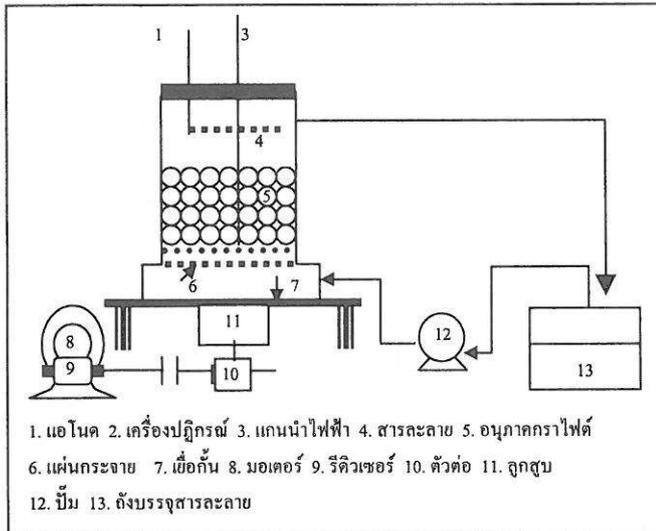
รูปที่ 3 แสดงรูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบในแนวตั้ง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เมตร สูง 0.35 เมตร ขั้วคาโทดคืออนุภาคกราไฟต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.0035 เมตร ความหนาแน่น 1,690 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าประมาณ 1,000 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคกราไฟต์จะสัมผัสกับแกนนำไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้า แอนโอดทำจากแผ่นไทเทเนียมเคลือบผิวด้วยรูทีเนียมออกไซด์ โดยจะวางอยู่เหนือแนวอนุภาคกราไฟต์ประมาณ 0.04-0.05 เมตร ที่ปลายขั้วแกนนำไฟฟ้าและแอนโอดจะต่อกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงรุ่น PNT 32-40 (Heizinger) บั๊มรุ่น MD-20R (Iwaki) ใช้ทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย การเกิดฟลัสอากาศทำโดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (เครื่องมือเลขที่ 8-11)

สมบัติทางกายภาพ	ค่า
สัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตรต่อวินาที)	5.89×10^{-10}
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1005.6
ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)	9.29×10^{-4}
เลขชมิด	1568

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของสารละลาย

การทดลองแต่ละครั้งใช้สารละลายประมาณ 15 ลิตร ความเข้มข้นประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 1 เพื่อป้องกันการตกตะกอนที่ผิวของคาโทด การทดลองได้ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic mode) เข้าสู่ระบบ เก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมงจนกระทั่งร้อยละของการนำกลับมากกว่า 99 ความเข้มข้นของ

ทองแดงในสารละลายจะวัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AA-275 Varian

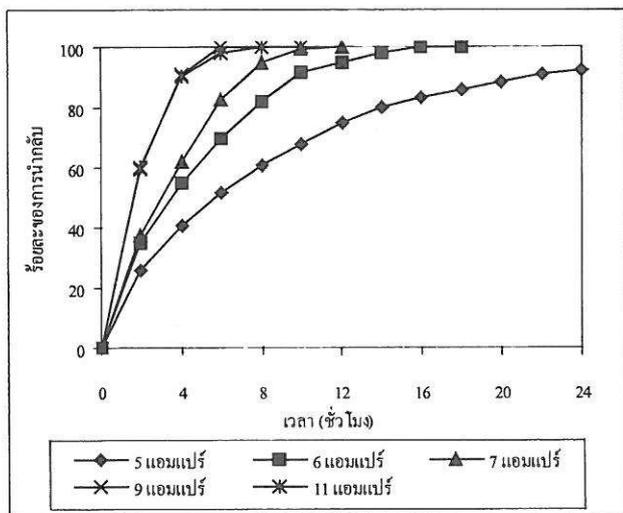


รูปที่ 3 เครื่องมือแบบ 3PE

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

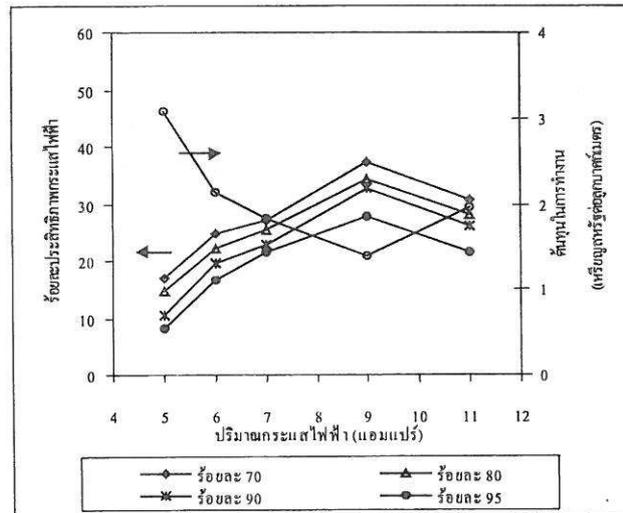
4.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

ป้อนกระแสไฟฟ้าในช่วง 5-11 แอมแปร์ที่อัตราการไหลของสารละลายคงที่ 8.4 ลิตรต่อนาที รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละการนำกลับที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนมากขึ้น ร้อยละของการนำกลับเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าประมาณ 9 แอมแปร์ ปริมาณกระแสที่มากขึ้นให้ผลเช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากการป้อนกระแสไฟฟ้า 9 แอมแปร์



รูปที่ 4. ร้อยละการนำกลับของทองแดงและเวลาที่ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่างๆ

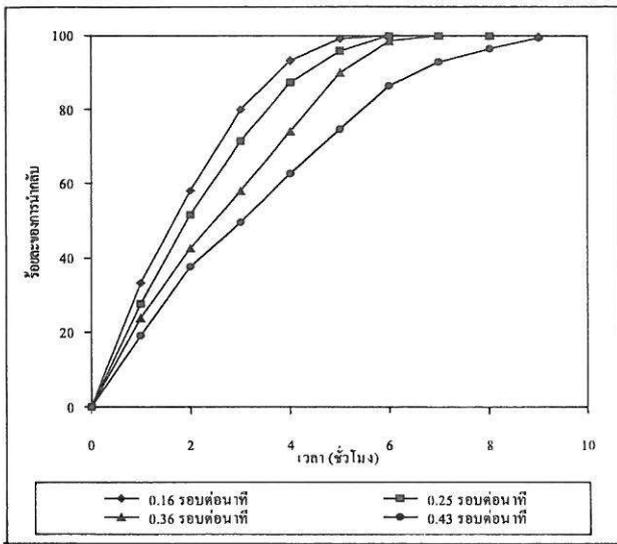
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า ต้นทุนในการทำงานที่ร้อยละการนำกลับมากกว่า 99 และปริมาณกระแสไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในการนำกลับทองแดงคือ 9 แอมแปร์ ที่ภาวะนี้มากกว่าร้อยละ 90 ของทองแดงสามารถนำกลับภายใน 4 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 35 ต้นทุนในการทำงานที่ต่ำที่สุดประมาณ 1.40 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรของสารละลาย



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าและต้นทุนในการทำงานที่ร้อยละการนำกลับต่างๆ

4.2 ความถี่ของฟิล์มอากาศ

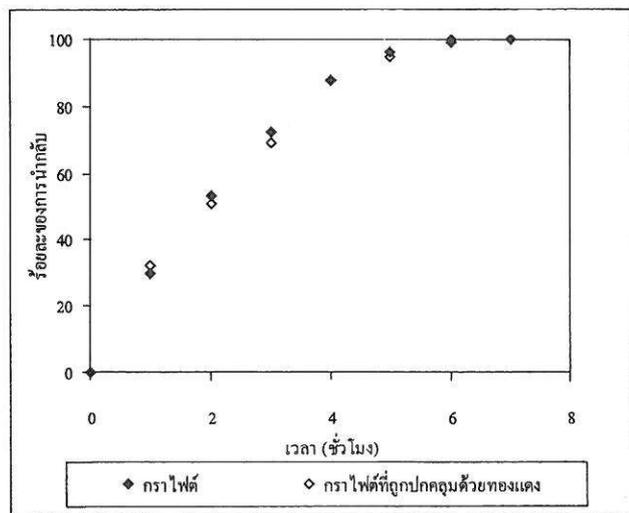
การทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของความถี่ของฟิล์มอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยใช้ความถี่ประมาณ 0.16-0.43 รอบต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายคงที่ 8 ลิตรต่อนาทีและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 9 แอมแปร์ รูปที่ 6 แสดง ร้อยละของการนำกลับของทองแดงและเวลาที่ความถี่ของฟิล์มอากาศต่างๆ พบว่าร้อยละของการนำกลับของทองแดงลดลงเมื่อความถี่ของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าในขณะที่มีการป้อนฟิล์มอากาศจะเกิดแรงทำให้อนุภาคกราฟต์ให้ขยับตัวขึ้น ในช่วงเวลาดังกล่าวอนุภาคกราฟต์จะไม่สัมผัสกับแกนนำไฟฟ้าและอนุภาคใกล้เคียง กระแสไฟฟ้าจึงไม่ต่อเนื่องเป็นผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองแดง ทองแดงจึงไม่สามารถนำกลับในช่วงเวลาดังกล่าว ความถี่ของฟิล์มของอากาศที่ต่ำส่งผลให้อนุภาคกราฟต์สัมผัสกับแกนนำไฟฟ้าและอนุภาคใกล้เคียง ทำให้เกิดปฏิกิริยาการนำกลับของทองแดงได้มาก แต่ที่ความถี่ประมาณ 0.16 รอบต่อนาที พบว่าอนุภาคกราฟต์ที่อยู่ใกล้ๆ กันจะติดกัน เนื่องจากการเกาะติดของทองแดง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันได้ ดังนั้นการทดลองจึงไม่ควรทำที่ความถี่ของฟิล์มอากาศต่ำกว่า 0.16 รอบต่อนาที



รูปที่ 6 ร้อยละของการนำกลับของแรงดันและเวลาที่ความถี่ของพัลส์อากาศต่างๆ

4.3 ชนิดของคาโทด

ศึกษาผลกระทบของชนิดของขั้วไฟฟ้าคือกราไฟต์และกราไฟต์ที่ถูกปกคลุมด้วยทองแดงต่อร้อยละของการนำกลับของแรงดัน โดยเมื่อกาโทดเหล่านี้จะมีทองแดงเคลือบอยู่ทำให้มีภาวะของขั้วเป็นขั้วทองแดง เมื่อนำมาใช้ในการแยกทองแดงจึงเสมือนการแยกทองแดงด้วยขั้วทองแดงบนเมื่อกาโทด



รูปที่ 7 ร้อยละของการนำกลับของแรงดันและเวลาโดยใช้กราไฟต์และกราไฟต์ที่ถูกปกคลุมด้วยทองแดง

รูปที่ 7 แสดงร้อยละของการนำกลับของแรงดันโดยขั้วกราไฟต์และกราไฟต์ที่ถูกปกคลุมด้วยทองแดง พบว่าร้อยละของการนำกลับของแรงดัน

โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้ผลเหมือนกัน โดยมากกว่าร้อยละ 99 ของทองแดงถูกนำกลับใน 7 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการเกาะติดของทองแดงบนกราไฟต์และกราไฟต์ที่ถูกปกคลุมด้วยทองแดงให้ผลเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเกาะติดของทองแดงบนผิวกราไฟต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงให้ผลที่เหมือนกับการทดลองที่เริ่มต้นด้วยการใช้ กราไฟต์ที่ถูกปกคลุมด้วยทองแดง

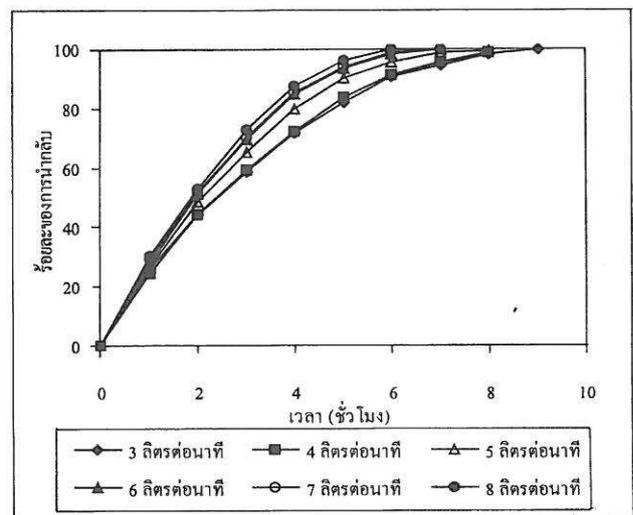
4.4 อัตราการไหลของสารละลาย

รูปที่ 8 แสดงร้อยละของการนำกลับของแรงดันและเวลาที่อัตราการไหลของสารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ประมาณ 3-8 ลิตรต่อนาทีที่กระแสไฟฟ้า 9 แอมแปร์ ความถี่ของพัลส์อากาศประมาณ 0.25 รอบต่อนาที พบว่าร้อยละของการนำกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารละลายในระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าอัตราการไหลที่สูงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารของระบบสูงเป็นผลให้ร้อยละการนำกลับมาก

จากการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายทำให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่อัตราการไหลต่างๆโดยสมการที่ 8 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารละลายสูงขึ้นสามารถแสดงได้ในรูปของกุ่มตัวแปรไร้มิติดังสมการต่อไปนี้

$$Sh = 1.20 Re_p^{0.411} Sc^{0.25} \quad (16)$$

สมการที่ 16 เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในรูปของค่าเชอร์วูด อัตราการไหลของสารละลายในรูปของค่าเรโนลด์ และสมบัติทางกายภาพของสารละลายในรูปของค่าชมิค สมการนี้จะสามารถใช้ได้ในช่วง $6 < Re_p < 16$

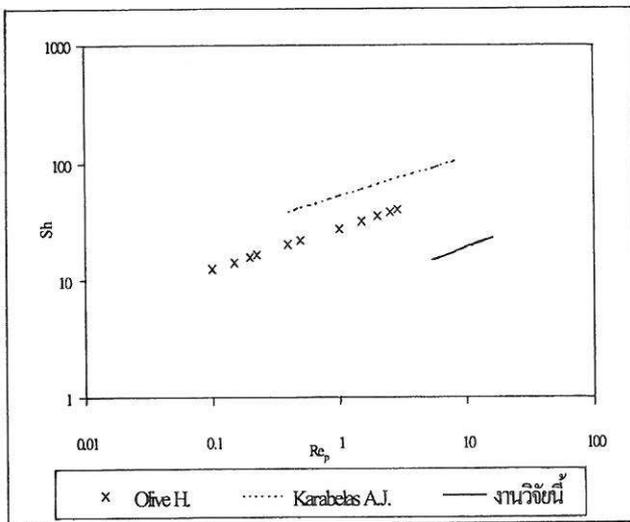


รูปที่ 8 ร้อยละของการนำกลับของแรงดันและเวลาที่อัตราการไหลของสารละลายต่างๆ

4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเชอร์วูดและค่าเรโนลด์ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่ทำในเครื่องปฏิกรณ์ระบบเคมีไฟฟ้า

จากการเปรียบเทียบพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของงานวิจัยนี้ให้ผลสอดคล้องอย่างคึกกับงานวิจัยของ Olive และ Lacost [13] ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นอนุภาคที่มีรูพรุนเพื่อนำกลับของแดงจากสารละลายกรด และ Karabelas [14] ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (Packed bed reactor) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารโดยใช้สารละลายโปสตัดเซียมเพอริกโซชาไนต์และโปสตัดเซียมเพอโรโซชาไนต์ ความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยนี้อาจเนื่องมาจากชนิดสารละลายและขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์และระบบการทำงาน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเชอร์วูด (Sh) และค่าเรโนลด์ (Re_p)

5. สรุป

จากงานวิจัยนี้พบว่า การนำกลับของแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ 3PE มีความเป็นไปได้และให้ร้อยละของประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าที่ดี ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าประมาณ 9 แอมแปร์ ที่ภาวะนี้มากกว่าร้อยละ 90 ของทองแดงสามารถนำกลับภายใน 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 35 และต้นทุนในการทำงานประมาณ 1.40 เหรียญสหรัฐต่อลูกบาศก์เมตรสารละลาย

ความถี่ของพัลส์อากาศและอัตราการไหลของสารละลายมีผลต่อร้อยละการนำกลับของทองแดง ในขณะที่ชนิดของขั้วคาโทดคือกราไฟต์และกราไฟต์ที่ถูกปกคลุมโดยทองแดงไม่มีผล

ข้อแตกต่างของงานวิจัยนี้ต่องานวิจัยที่ผ่านมาคือการป้องกันพัลส์อากาศเพื่อป้องกันการอุดตันของอนุภาคกราไฟต์ที่กั้นเครื่องปฏิกรณ์

และการใช้อุณหภูมิเป็นขั้วไฟฟ้าเพราะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ราคาถูก พื้นที่ผิวมากและสามารถแยกทองแดงที่เกาะติดได้ง่ายโดยความร้อน นอกจากนี้กลุ่มตัวแปรไร้นหน่วยที่สร้างขึ้นจากการทดลองนี้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการประยุกต์กับสารละลายที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมและใช้เพื่อการขยายส่วนเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก และสถานทูตฝรั่งเศสประจำประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวของคาโทด (ตารางเมตร) เท่ากับ $A_c V_c$
A_c	พื้นที่ผิวของคาโทดต่อปริมาตร (ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)
$C_{i,e}, C_{i,s}$	ความเข้มข้นขาเข้าและขาออกของอนุภาค i (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
$C_{i,t}$	ความเข้มข้นที่เวลาใดๆของอนุภาค i (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
$C_{i,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของอนุภาค i (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
C_u	ราคากระแสไฟฟ้า (= 0.066 เหรียญสหรัฐต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที)
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96500 แอมแปร์-วินาที)
i	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
j	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
k_L	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (เมตรต่อวินาที)
n	จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง
Q	อัตราการไหลของสารละลาย (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
t	เวลาในการทำงาน (วินาที)
v	ความเร็วของสารละลาย (เมตรต่อวินาที)
V	ความต่างศักย์ (โวลต์)
V_c	ปริมาตรของคาโทด (ลูกบาศก์เมตร)
V_R	ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (ลูกบาศก์เมตร)
V_S	ปริมาตรของถังบรรจุสารละลาย (ลูกบาศก์เมตร)
V_T	ปริมาตรของสารละลายทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร) เท่ากับ $V_S + V_R$

W_i	น้ำหนักเริ่มต้นของโลหะ (กรัม)
MW	น้ำหนักโมเลกุลของโลหะ (กรัม)
W_i	น้ำหนักของโลหะที่เวลาใดๆ (กรัม)
ξt	ช่วงเวลาที่เกิดการขกตัวของเบด (วินาที)
$(1-\xi)t$	ช่วงเวลาที่เกิดการยุบตัวของเบด (วินาที)
γ	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (โมลต่อวินาที)
η	ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้า
μ	ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
ρ	ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เอกสารอ้างอิง

1. K. Pruksathorn, H. Vergnes, J. Cantet J. and Duverneuil P., "Recovery of Metals in sludge of Publicly Owned Treatment Works and Industrial Effluents", Franco-Thai Symposium on New Advance in Water and Wastewater Treatment, 1997, pp. 281-295
2. K. Pruksathorn, H. Vergnes, J. Cantet and P. Duverneuil, "Removal of Metals in sludge of wastewater treatment", AIDIC Conference Series, Vol. 4, 1999, pp. 147-152.
3. R.D. Armstrong, "Selective Electrodeposition of Metals from Simulated Waste Solution", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 26, 1996, pp. 379-384.
4. M. Panizza, C. Solisio and G. Cerisola, "Electrochemical Remediation of Copper (II) from an industrial Effluent Part II: Three-Dimension Foam Electrode. Resources", Conservation and Recycling, Vol. 27, 1999, pp. 299-307.
5. A.M. Polcaro and S. Palmas, "Flow-By Porous Electrode for Removal and Recovery of Heavy Metals Pollutants", ICHEME SYMPOIUM SEIES, Vol. 127, 1992, pp. 85-96.
6. G. Lacost, "Procédé et installation d'électrolyte par percolation à travers une ou des électrodes volumiques poreuses", French patent Fr 86 08331, Toulouse, France, 1986.
7. G. Lacost and P. Duverneuil, "Nouveau type de réacteur à fonctionnement continu, complémentaire des procédés à Electrode Pulsée Poreuse Percolée (E3P)", French patent Fr 96 03036, Toulouse, France, 1996.
8. B. Fenouillet, P. Duverneuil, G. Lacoste and K. Pruksathorn, "Metal Recovery in Surface Treatment Units by Using the 3PE Reactor", Environmental Engineering and Policy, Vol. 1, 1999, pp. 191-194.
9. S. Reussard, J.F. Benezech and G. Lacoste, "Removal of Hexavalent Chromium Converting to Chromium Hydroxide by Treatment in a Electrochemical Reactor", ICHEME SYMPOIUM SEIES, Vol. 127, 1992, pp. 97-109.
10. P. Aguirre, I. Gaballah, B. Fenouillet, S. Ivanaj, G. Lacoste and R. Solozabal, "Recovery of Zinc, Copper and Nickel from Industrial Effluents Generated by the Electroplating Using The "3PE" Technology", Separation Processes: The Minerals, Metals & Materials Society, 1994, pp. 257-268.
11. G. Lacost, "Development of The Periodically Pulsed Porous Electrode. Electrochemical Cell Design and Optimization Procedures", Dechema Monogr, Vol. 123, 1991, pp. 411-425.
12. Department of Chemistry: University of Coimbra, "Handbook of Electrolyte Solution", Part A, V.M.M. lobo, Elsevier, Vol. 14, 1989.
13. H. Olive and G. Lacost, "Application of volumetric electrodes to the recuperation of metals in industrial effluents-I)", Electrochimica Acta, Vol. 24, 1979, pp. 1109-1114.
14. A.J. Karabelas, T.H. Wegner and T.J. Hanratty, "Use of asymptotic relations to correlate mass transfer data in packed beds", Chemical Engineering Science, Vol. 26, 1971, pp. 1581-1589.