

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง



การศึกษาการแยกโลหะออกจากตะกอนได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนละลายและขั้นตอนการแยกโลหะออกจากสารละลาย ผลและการวิเคราะห์ผลแสดงได้ต่อไปนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพของตะกอน

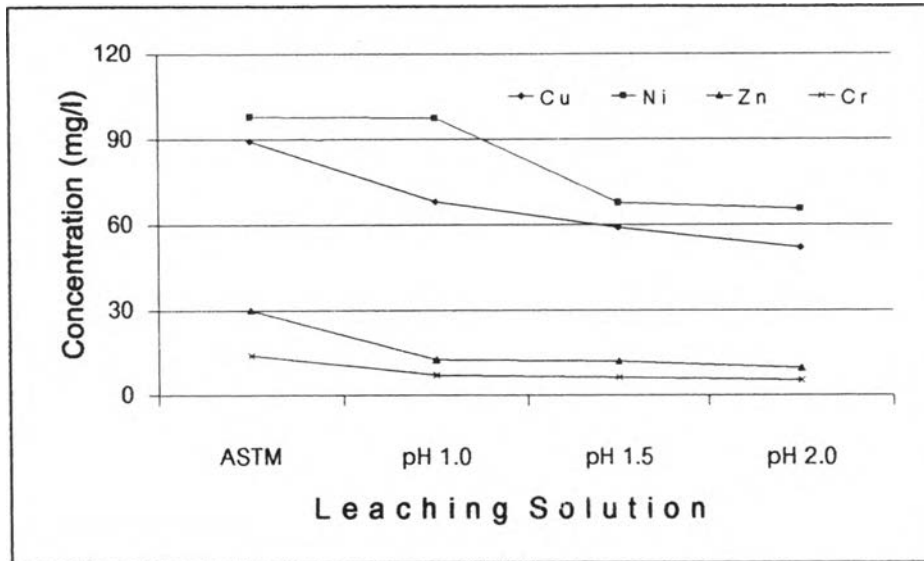
ตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียของโรงชุบโลหะด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีของโรงบำบัดน้ำเสียแสมดำ มีสีน้ำตาลไม่มีกลิ่น และผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของตะกอน

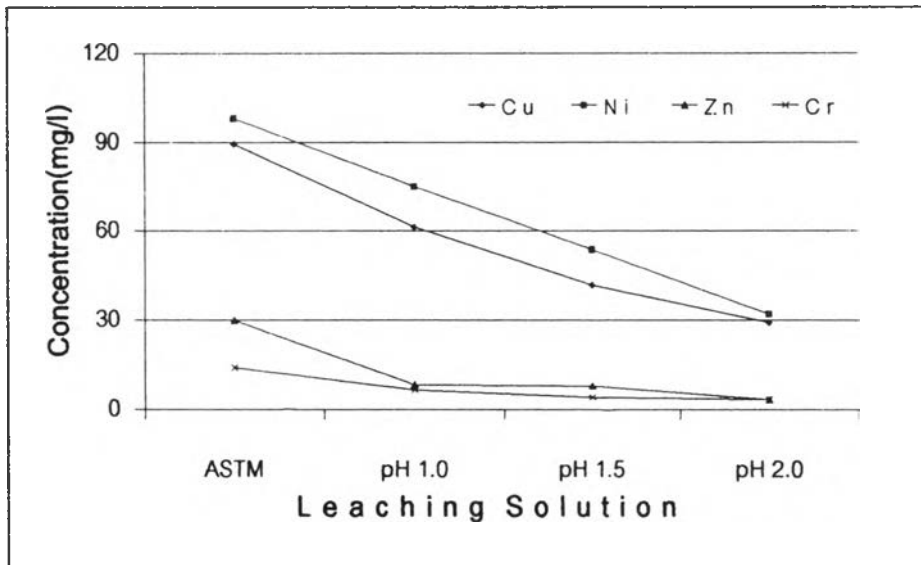
	สมบัติ
ปริมาณตะกอนแห้ง	30-40 % โดยน้ำหนัก
ปริมาณความชื้นในตะกอน	60-70 % โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด - ต่าง	9.8 – 10.3

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน

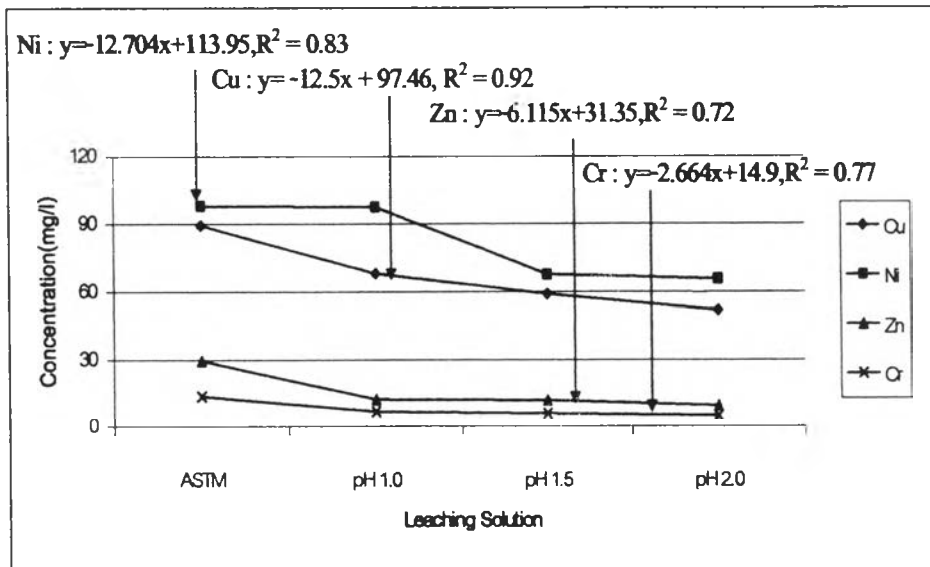
การทดลองได้กระทำเป็น 2 ตอน คือการใช้ตะกอนที่ผ่านการอบแห้งและไม่ผ่านการอบแห้งทำการละลายในสารละลายกรดซัลฟูริกที่ได้ปรับค่าความเป็นกรด - เบสให้มีค่า 1.0, 1.5 และ 2.0 จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้กับปริมาณโลหะในตะกอนที่ได้จากการละลายตะกอนตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5198 – 92 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งแสดงค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิด (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่าง ๆ



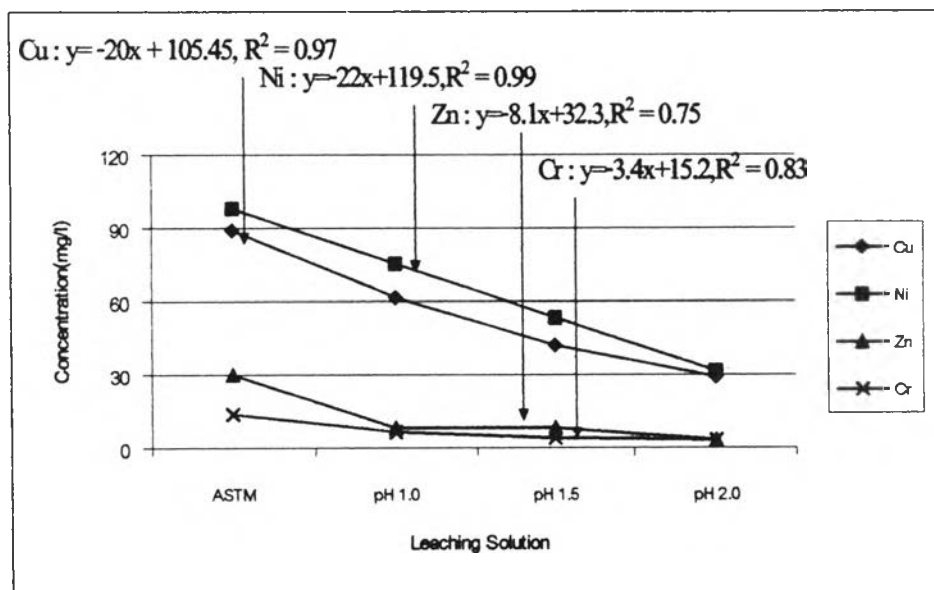
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลาย เมื่อใช้ตะกอนที่ไม่ผ่านการอบแห้ง



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลาย เมื่อใช้ตะกอนที่ผ่านการอบแห้ง



รูปที่ 4.3 สมการแสดงความสามารถในการละลายของโลหะแต่ละชนิดเมื่อใช้ตะกอนที่ไม่ผ่านการอบแห้ง



รูปที่ 4.4 สมการแสดงความสามารถในการละลายของโลหะแต่ละชนิดเมื่อใช้ตะกอนที่ผ่านการอบแห้ง

เมื่อทดลองโดยใช้ตะกอนที่ไม่ผ่านการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด - เบสเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายของโลหะแต่ละชนิดลดลงเมื่อเทียบกับทุก ๆ 50% ที่เพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด - เบสดังนี้ ทองแดง 6.3 %, นิกเกิล 6.4 %, สังกะสี 3.0 % และโครเมียม 1.3 % ส่วนเมื่อทดลองโดยใช้ตะกอนที่ผ่านการอบแห้ง พบว่า ความสามารถในการละลายของทองแดง, นิกเกิล, สังกะสี และโครเมียมลดลง 10 %, 11 %, 4% และ 1.75 % ตามลำดับ ซึ่งจากความสามารถในการละลายที่ลดลงนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ตะกอนที่ไม่ผ่านการอบแห้ง โลหะทุกชนิดสามารถละลายออกมาได้มากกว่าเมื่อใช้ตะกอนที่ผ่านการอบแห้ง โดยที่ในการทดลองทุกครั้งมีน้ำหนักตะกอนแห้งต่อปริมาตรสารละลายเท่ากัน

นอกจากนี้เมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น(ความเป็นกรด - เบสลดลง) โลหะสามารถละลายได้มากขึ้น อธิบายได้ว่าโดยทั่วไปโลหะหนักในตะกอนจะอยู่ในรูปของไอออนบวก ซึ่งไอออนเหล่านี้ถูกดูดซับบนผิวหน้าของตะกอน ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุลบที่พื้นที่ผิวตะกอน ดังนั้นในการละลายไอออนของโลหะหนักออกจากตะกอนจึงเป็นไปตามหลักการของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กล่าวคือ เพื่อให้พื้นผิวของตะกอนมีความสมดุลเชิงประจุประจุบวกของไอออนโลหะจะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออนในสารละลายที่มีจำนวนประจุเท่ากัน การที่ไฮโดรเจนไอออนสามารถเข้าแทนที่ไอออนบวกที่อยู่ในตะกอนได้เกือบทุกชนิดเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนสามารถเกิดพันธะกับไอออนลบที่ผิวหน้าตะกอนแข็งแรงกว่าไอออนบวกอื่น โดยที่ค่าการเลือกเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนของประจุบวกที่ผิวตะกอนและไฮโดรเจนไอออนในสารละลายขึ้นกับจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนบวกเหล่านั้น หมายความว่า ถ้าไอออนที่มีขนาดใหญ่จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าของตะกอนได้ดีกว่าไอออนที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ความสามารถในการละลายยังขึ้นกับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration reaction) $M^{2+} + H_2O \rightleftharpoons MOH^+ + H^+$ กล่าวคือโอกาสที่ไฮโดรเจนไอออนจะเข้าแทนที่ไอออนบวกเหล่านั้นให้ละลายออกจากตะกอนในรูปไอออนจะเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของไอออนแต่ละชนิดจะต่างกันไป ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant, pK) ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง Cd (pK=10.1) < Ni (pK=9.9) < Co (pK=9.7) < Zn (pK=9.0) << Cu (pK=7.7) หมายความว่า ความสามารถในการละลายของโลหะจากตะกอนสู่สารละลายเรียงตามค่า pK เป็นลำดับดังนี้ Cd>Ni>Co>Zn>Cu แต่เนื่องจากน้ำหนักไอออนของสังกะสีเบาว่าทองแดงดังนั้นในทางทฤษฎี ความว่องไวในการละลายของโลหะจึงเรียงได้ดังนี้ Cd>Ni>Co>Cu>Zn [34,35] ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง คือโลหะละลายออกมาได้มากที่สุดที่ค่าความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 1.0 และให้ค่าความเข้มข้นของโลหะในสารละลายใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ASTM D5198 - 92 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ ความว่องไวในการละลายของโลหะเรียงลำดับได้ดังนี้ นิกเกิล>ทองแดง>สังกะสี>โครเมียม

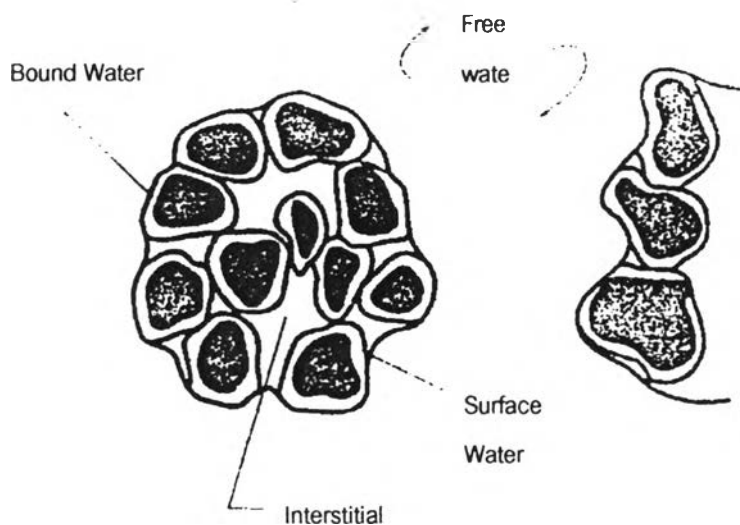
ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายต่างชนิดกันที่ความเป็นกรด - เบส 1.0

โลหะ	ความเข้มข้นของโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ASTM D5198-92	ตะกอนไม่อบแห้ง	ตะกอนอบแห้ง
ทองแดง	89.39	68.05	61.38
นิกเกิล	97.95	97.56	75.09
สังกะสี	29.89	12.61	8.26
โครเมียม	13.98	7.16	6.42

ผลของค่าความเป็นกรด - เบสนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งในกรณีของตะกอนที่อบแห้งและไม่ผ่านการอบแห้ง แต่ตะกอนที่ผ่านการอบแห้ง การละลายของโลหะจะน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความชื้นของตะกอนลดลงโครงสร้างของกากตะกอนมีโอกาสใกล้ชิดและยึดติดกันมากขึ้น จึงเกิดความเสถียรของอนุภาคในตะกอนส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง อีกทั้งอนุภาคนี้อาจยังมีผลต่อความชื้นในตะกอน โดยที่ความชื้นในตะกอนสามารถแบ่งได้ดังนี้ [27]

- ความชื้นอิสระ (Free water) : ความชื้นนี้เป็นความชื้นที่ไม่รวมกับอนุภาคของของแข็งและไม่รวมอยู่ในช่องว่างของอนุภาค แต่จะอยู่บริเวณรอบนอกของอนุภาค
- ความชื้นที่อยู่ในช่องว่าง (Interstitial water) : คือความชื้นที่เกิดขึ้นเมื่อกากตะกอนอยู่ในสารแขวนลอยและอยู่ในช่องว่างเมื่อเกิด cake
- ความชื้นที่พื้นผิว (Surface water) : ความชื้นนี้ถูกยึดติดอยู่บนผิวน้ำของอนุภาคของแข็ง โดยการดูดซับและยึดเกาะ
- ความชื้นที่ขอบ (Bound water) : ความชื้นนี้จะไม่ถูกกำจัดโดยการอบแห้งแต่สามารถกำจัดออกได้โดยใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า เพราะเป็นความชื้นที่เป็นพันธะเคมีกับอนุภาคของของแข็ง

ดังนั้นเมื่อทำการอบแห้งความชื้นอิสระจะถูกกำจัดออกก่อนโดยการระเหยออก และความชื้นตามช่องว่างก็จะระเหยตามออกมาซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส จากนั้นความชื้นที่พื้นผิวจะเริ่มถูกกำจัดออกตามลำดับ ส่วนความชื้นที่ขอบนั้นสามารถกำจัดออกโดยใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า ระหว่างที่ความชื้นระเหยออกจากตะกอนจะยึดตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้ความเสถียรของกากตะกอนมีมากขึ้น ดังนั้นค่าการละลายจึงลดลงเมื่อความชื้นลดลง ประเภทของความชื้นแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ประเภทความชื้นในตะกอน [27]

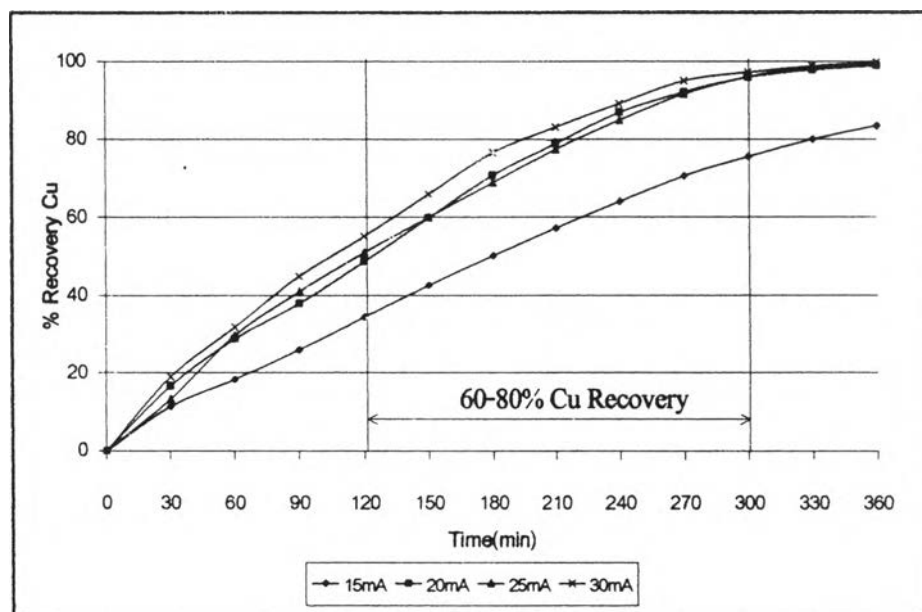
นอกจากการอบไล่ความชื้นจะทำให้ความสามารถในการละลายตะกอนลดลงแล้วการอบเพื่อไล่ความชื้นยังเป็นการเพิ่มขั้นตอนการทำงานและสิ้นเปลืองงบประมาณอีกด้วย ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Wozniak และ Huang J.Y.C.[30] และ Scott [13] ซึ่งใช้กรดซัลฟูริกในการละลายโลหะออกจากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพพบว่า ภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรด - เบสที่ 1.0 -1.5 ระยะเวลา 20 นาที สามารถละลายโลหะออกมาได้ถึง 50 -80%

4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนโลหะจากสารละลายสังเคราะห์

4.3.1 การนำกลับคืนโลหะโดยวิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน (Electrodeposition)

4.3.1.1 การนำกลับคืนทองแดงโดยวิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน

การทดลองเบื้องต้นได้ใช้สารละลายสังเคราะห์ที่เตรียมให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอนไม่บ่มแห้งที่ภาวะค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 1.0 และปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายสังเคราะห์ให้มีค่าประมาณ 1.0 ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น ทำการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 15 - 30 มิลลิแอมป์ เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนแปลงแล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับคืนทองแดงของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ร้อยละการนำกลับคืนทองแดงของแต่ละค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทำกรทดลอง

จากข้อมูลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแส หรือค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ร้อยละการนำกลับทองแดงจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน สามารถอธิบายจากกฎฟาราเดย์ได้ดังนี้ :

$$m = \frac{sMt}{nF}$$

เมื่อ m คือ มวลที่ควรเกิดปฏิกิริยาเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่จำนวนหนึ่งในเชิงทฤษฎี ส่วน l คือ กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ผ่านระบบ และ t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ส่วนตัวแปรที่เหลือ คือ s , M , n , และ F ถือว่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองแดง ดังนั้นมวลที่ควรเกิดปฏิกิริยาเชิงทฤษฎีจะแปรผันตาม เวลา และค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

$$m \propto It$$

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับที่เพิ่มขึ้นกับกระแสไฟฟ้า ที่เวลาเพิ่มขึ้นทุก ๆ 30 นาที ซึ่งสามารถกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการทดลองคงที่ หมายความว่า มวลที่เกิดปฏิกิริยาเชิงทฤษฎีนั้นแปรตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเพียงอย่างเดียว

$$m \propto I$$

กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถนำกลับทองแดงได้มากขึ้น จึงมีร้อยละในการนำกลับทองแดงสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่อย่างไรก็ดีในการที่จะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงในช่วงการนำกลับที่ ร้อยละ 60-80 พิจารณาตามสมการดังต่อไปนี้

$$15 \text{ มิลลิแอมแปร์ : (\%recovery)} = 0.22 t + 10 \quad R^2 = 0.99 \quad (4.1)$$

$$20 \text{ มิลลิแอมแปร์ : (\%recovery)} = 0.36 t + 25.6 \quad R^2 = 0.95 \quad (4.2)$$

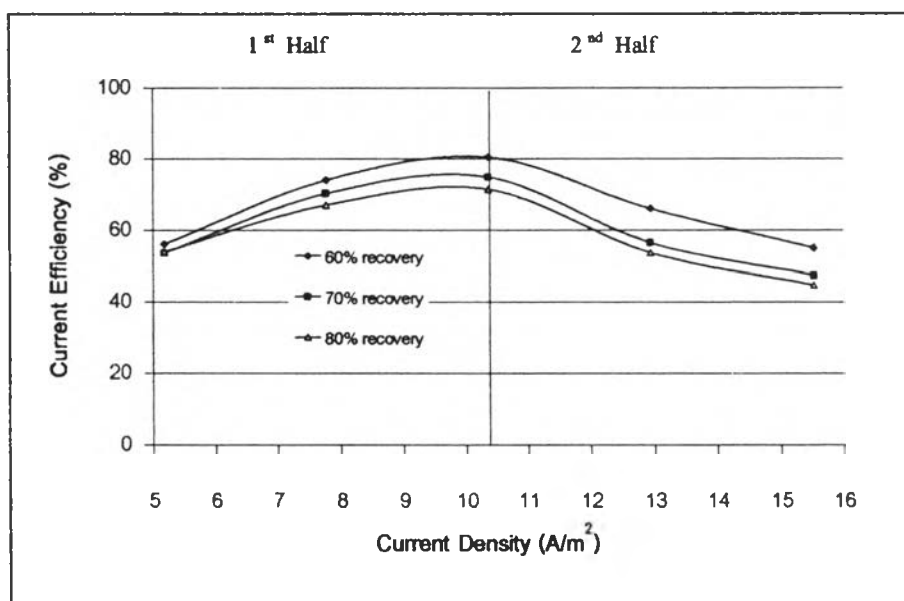
$$25 \text{ มิลลิแอมแปร์ : (\%recovery)} = 0.33 t + 26 \quad R^2 = 0.98 \quad (4.3)$$

$$30 \text{ มิลลิแอมแปร์ : (\%recovery)} = 0.21 t + 35.8 \quad R^2 = 0.94 \quad (4.4)$$

จากสมการดังแสดงข้างบนพบว่าในช่วงร้อยละการนำกลับที่สนใจ กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ คือค่าที่ให้ร้อยละการนำกลับที่ดีที่สุด เนื่องจากสมการที่ 4.2 มีค่าความชันมากที่สุด นั่นคือในช่วงเวลาที่เท่ากัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ จะมีร้อยละการนำกลับของแดงมากกว่ากระแสไฟฟ้าอื่น ๆ ดังนั้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนของแดงจากสารละลายสังเคราะห์ด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลต์โพสิชันจึงต้องมีการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแสของแต่ละกระแสไฟฟ้า ผลแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแสของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการนำกลับคืนต่าง ๆ ของการทดลองนำกลับของแดงด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน

กระแส mA	ความหนาแน่นกระแส $j, A/m^2$	ประสิทธิภาพเชิงกระแส		
		60%การนำกลับคืน	70%การนำกลับคืน	80%การนำกลับคืน
10	5	56.14	53.70	54.01
15	8	74.00	70.89	68.57
20	10	80.50	72.35	69.17
25	13	66.13	56.59	53.79
30	16	55.09	47.53	44.72



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการนำกลับคืนต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.7 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงกระแส (ϕ_c) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (j) ที่แต่ละร้อยละการนำกลับคืนของแดงต่าง ๆ สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นกราฟถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการทดลองต่ำ (ประมาณ 5 – 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และในช่วงที่สองเป็นช่วงที่ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการทดลองสูง (ประมาณ 10 – 15 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) เมื่อพิจารณาที่ร้อยละการนำกลับคืนเดียวกัน ช่วงแรกประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลงเมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่ม

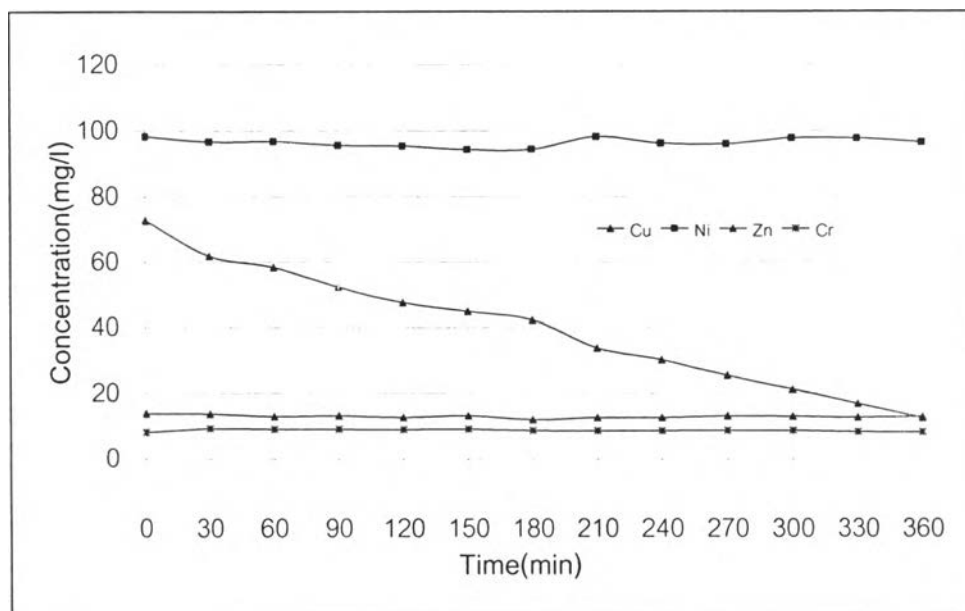
อาจกล่าวได้ว่าการนำกลับคืนของแดงที่ร้อยละ 60 ของทุก ๆ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดและสามารถแยกทองแดงได้มากที่สุด จากรูปที่ 4.7 หรือพิจารณาความชันพบว่าที่ร้อยละการนำกลับ 60 ในสมการที่ 4.5 สมการมีความชันสูงที่สุดหมายความว่าในช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน ร้อยละการนำกลับ 60 มีประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มขึ้นสูงที่สุด ส่วนจากสมการที่ 4.8 ร้อยละการนำกลับ 60 มีค่าความชันน้อยที่สุดหมายความว่าในช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน ประสิทธิภาพเชิงกระแสของร้อยละการนำกลับ 60 ลดลงน้อยกว่าที่ร้อยละการนำกลับค่าอื่น สามารถอธิบายได้ดังนี้

ในการทดลองที่ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อย ๆ เกิดเพราะมีปริมาณไอออนถ่ายเทไปทั่วทั้งขั้วไฟฟ้าได้เพียงพอกับปริมาณอิเล็กตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้ระบบเป็นการควบคุมแบบถ่ายเทประจุ (charge transfer control) เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วขึ้น

เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นหรือปริมาณอิเล็กตรอนมีมากกว่าปริมาณไอออนที่แพร่มายังขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาจึงเกิดได้จำกัดเท่าปริมาณไอออนที่แพร่นั้น ทำให้ระบบเป็นการควบคุมแบบถ่ายเทมวล (mass transfer control) และมีกระแสจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการทำให้เกิดการสูญเสียไปของกระแสสำหรับปฏิกิริยาข้างเคียง [1] จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงการควบคุมแบบถ่ายเทประจุและลดลงเมื่อเพิ่มค่ากระแสในช่วงการควบคุมแบบถ่ายเทมวล

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากขึ้นจนเกินค่ากระแสขีดจำกัดของการเกิดปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าส่วนเกินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด หมายความว่ากระแสไฟฟ้าที่ใส่สู่ระบบทั้งหมดไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของทองแดงเพียงอย่างเดียวจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลง

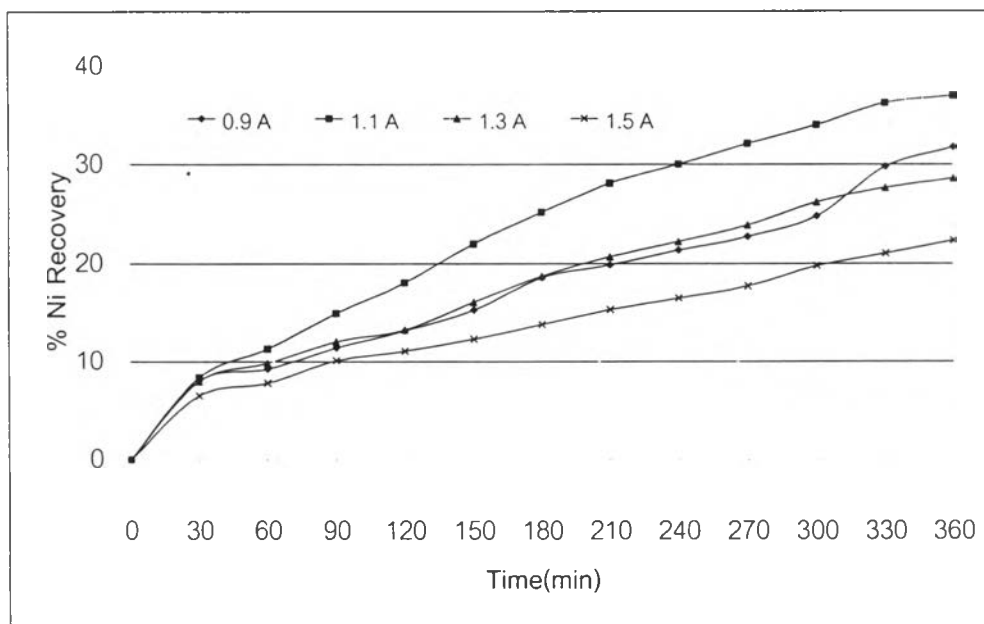
ดังนั้นสรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ที่มีโลหะหลายชนิดผสมกันอยู่ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 1.0 ด้วยวิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน คือที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์หรือมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลา 6 ชั่วโมง สามารถนำกลับคืนทองแดงได้มากกว่า 90% ในขณะที่โลหะชนิดอื่นไม่มีการนำกลับคืนจากสารละลายในช่วงของค่ากระแสที่ใช้ในการนำกลับคืนทองแดง ความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในสารละลายที่ภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนทองแดงแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในสารละลายขณะทำการนำกลับคืนทองแดงที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

4.3.1.2 การนำกลับนิกเกิลโดยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน

หลังจากการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชันเรียบร้อยแล้วแต่ยังคงเหลือโลหะอีก 3 ชนิดในสารละลายคือ นิกเกิล, สังกะสี, และโครเมียม แต่เนื่องจากโลหะบางชนิดเช่นนิกเกิลและสังกะสี มีร้อยละการนำกลับคืนและประสิทธิภาพเชิงกระแสในปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลต์โพสิชันต่ำมากแม้ว่าจะใช้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น ในการทดลองการนำกลับคืนนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน โดยทำการทดลองผ่านไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 0.9 – 1.6 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง นำข้อมูลมาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับคืนนิกเกิลที่แต่ละค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทำการทดลองผลแสดงดังรูปที่ 4.9 และแสดงค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสใน ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ร้อยละการนำกลับคืนนิกเกิลที่แต่ละค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทำการทดลองแยกด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละการนำกลับนิกเกิลกลับลดลง เนื่องจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไอออนช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองส่วนใหญ่จึงถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยารีดักชันของน้ำมากกว่าปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไอออน ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้นเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าในปริมาณมากขึ้น แก๊สที่เกิดขึ้นนี้เป็นเสมือนตัวป้องกันการถ่ายโอนไอออนไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้การเกิดแก๊สที่ขั้วไฟฟ้าอาจทำให้ปฏิกิริยารีดักชันของ ไอออนโลหะเป็นไปได้อย่างช้าลงกล่าวคือฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจเคลือบที่ผิวขั้วไฟฟ้าทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง

จากกราฟแสดงข้อมูลเชิงสมการได้ดังนี้

$$0.9 \text{ แอมแปร์} : (\% \text{recovery}) = 0.07(\text{time}) + 5.01 \quad R^2 = 0.98 \quad (4.5)$$

$$1.1 \text{ แอมแปร์} : (\% \text{recovery}) = 0.09(\text{time}) + 7.28 \quad R^2 = 0.98 \quad (4.6)$$

$$1.3 \text{ แอมแปร์} : (\% \text{recovery}) = 0.07(\text{time}) + 6.19 \quad R^2 = 0.99 \quad (4.7)$$

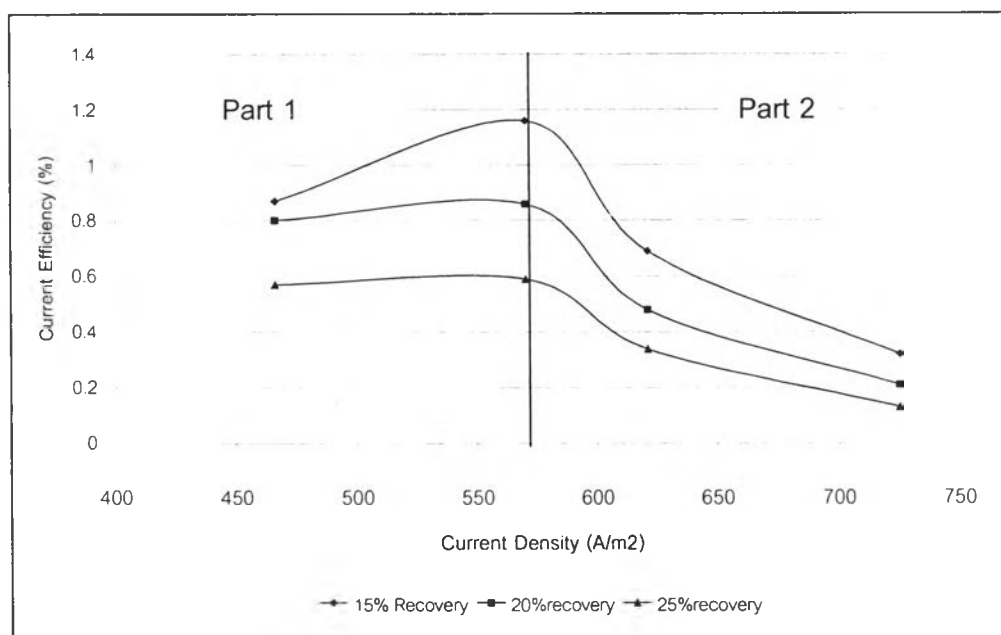
$$1.5 \text{ แอมแปร์} : (\% \text{recovery}) = 0.05(\text{time}) + 5.23 \quad R^2 = 0.99 \quad (4.8)$$

จากสมการ 4.5 – 4.8 พบว่า ที่กระแส 0.9, 1.1, 1.3 และ 1.5 แอมแปร์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง ร้อยละการนำกลับนิกเกิลจะเพิ่มขึ้น 7%, 9%, 7% และ 5% ตามลำดับ พบว่ากระแส 1.1 แอมแปร์มีอัตราการนำกลับนิกเกิลเร็วที่สุด หรือถ้าพิจารณาจากค่าความชันของสมการจะพบว่าสมการที่ 4.6 มีค่าความชันสูงที่สุด หมายความว่าในช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน กระแส 1.1 แอมแปร์สามารถนำกลับนิกเกิลได้มากกว่ากระแสไฟฟ้าค่าอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาจะสังเกตได้ว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้ามากกว่า 1.1 แอมแปร์ ร้อยละการนำกลับนิกเกิลมีแนวโน้มที่จะลดลง ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ว่าที่กระแสไฟฟ้า 1.1 แอมแปร์ อาจเป็นค่ากระแสไฟฟ้าลิมิต (Limiting Current) ในการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน โดยค่ากระแสไฟฟ้าลิมิตคือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไอออนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้มากที่สุด [1] ดังนั้นถ้าผ่านกระแสไฟฟ้ามากกว่ากระแสไฟฟ้าลิมิตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้มากขึ้น เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าในระบบมากเกินไปจนเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะ

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพเชิงกระแสของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการนำกลับคืนต่าง ๆ ของการทดลองนำกลับคืนที่เกิดด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน

กระแส (A)	ความหนาแน่นกระแส (A/m ²)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)		
		15%การนำกลับคืน	20%การนำกลับคืน	25%การนำกลับคืน
0.9	466	0.87	0.80	0.57
1.1	570	1.16	0.86	0.59
1.3	621	0.69	0.48	0.34
1.5	725	0.32	0.21	0.13



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการนำกลับคืนต่าง ๆ กัน

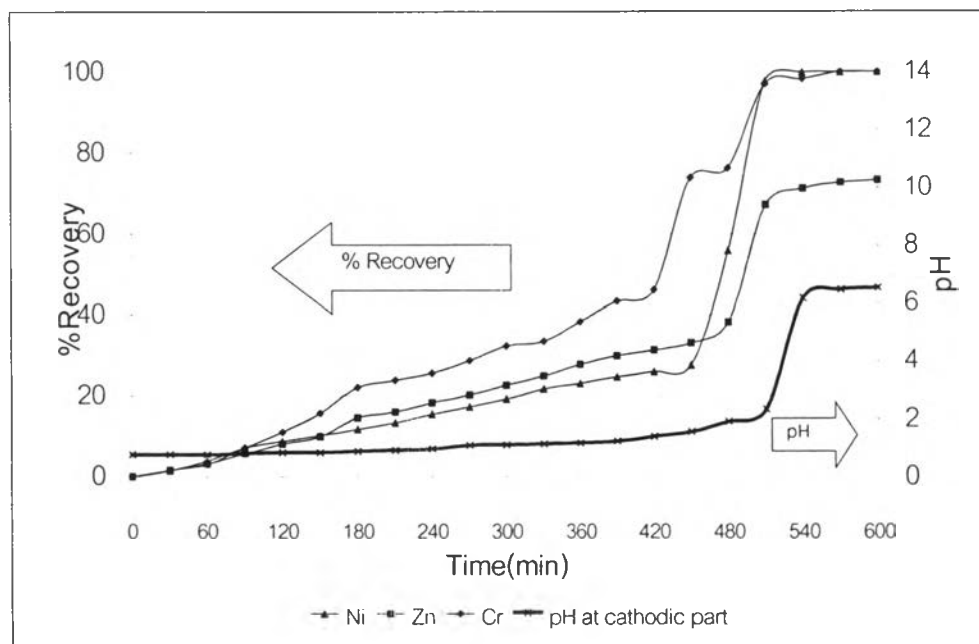
จากรูปที่ 4.10 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงขึ้น ส่วนที่สองคือเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสกลับทำให้ค่าประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าต่ำลง

จากผลการทดลองพบว่าการนำกลับคืนเกิดด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน จะให้ร้อยละการนำกลับค่อนข้างต่ำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าในแต่ละค่าร้อยละการนำกลับนั้นมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน

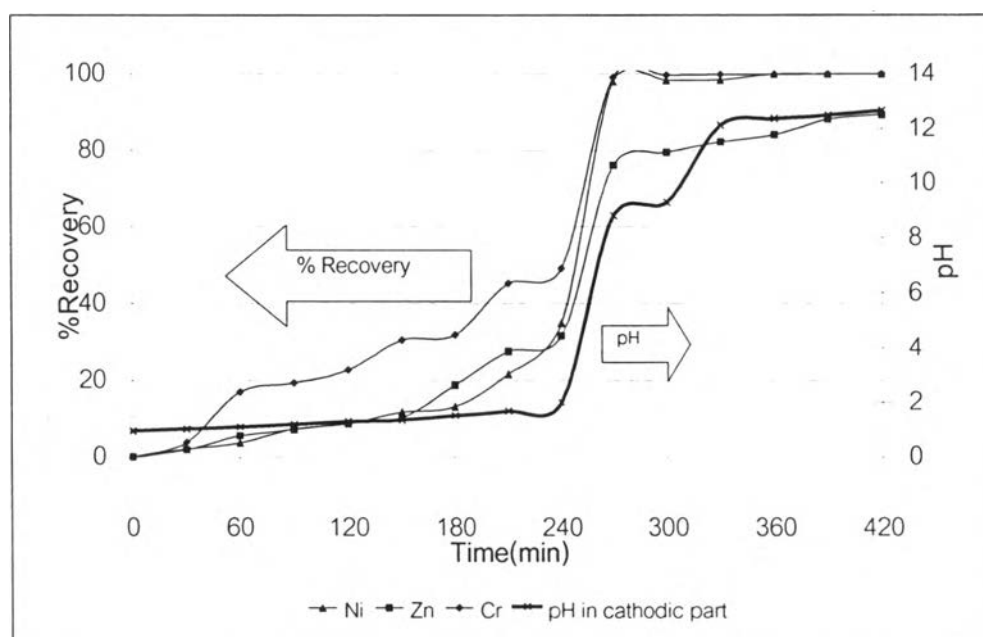
เพราะนิเกิลมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่ำกว่าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ทำให้การนำกลับคืนเกิดด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชันให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสต่ำซึ่งสังกะสีก็เช่นเดียวกัน ส่วนโครเมียมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองตลอดเวลาอันจะทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Reuassard [28] ซึ่งพบว่าการกำจัดโลหะบางชนิดด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน เช่น โครเมียม จะให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสต่ำ ดังนั้นจึงต้องเลือกวิธีอื่นเข้ามาช่วย เช่น ใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า หรือ วิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน วิธีการนี้จะก่อให้เกิดตะกอนปริมาณต่ำ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Kongsricharoen [23] ศึกษาการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนส์ออกจากน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกับวิธีแลกเปลี่ยนไอออนและวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี พบว่าวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่า และยังเป็นกระบวนการที่ง่ายกว่า 2 วิธีดังกล่าว

4.3.2 การนำกลับคืนโลหะโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electroprecipitation)

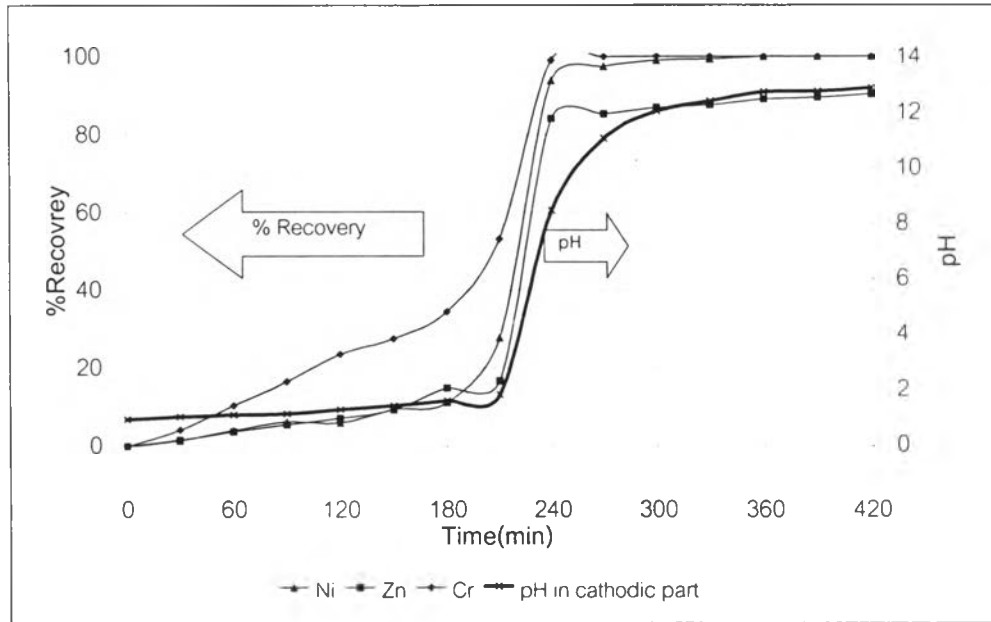
กระบวนการที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการกำจัดโลหะที่เหลือคือ วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และเพื่อป้องกันปฏิกิริยารีดอกซ์ของโครเมียมไอออนที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจึงติดตั้งเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบทำให้เครื่องปฏิกรณ์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแคโทดและส่วนแอโนด ผลการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะที่เหลือโดยทดลองผ่านกระแสไฟฟ้าในช่วง 1.0 – 2.0 แอมแปร์ เป็นระยะเวลามากกว่า 6 ชั่วโมง ความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 เก็บสารละลายตัวอย่างจากทั้งสองส่วนทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13, และ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับคืนของโลหะแต่ละชนิดและ ความเป็นกรด - เบสของสารละลายด้านแคโทดในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1.1, 1.3, 1.5, และ 1.7 แอมแปร์ หรือที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 94, 110, 130, และ 145 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ



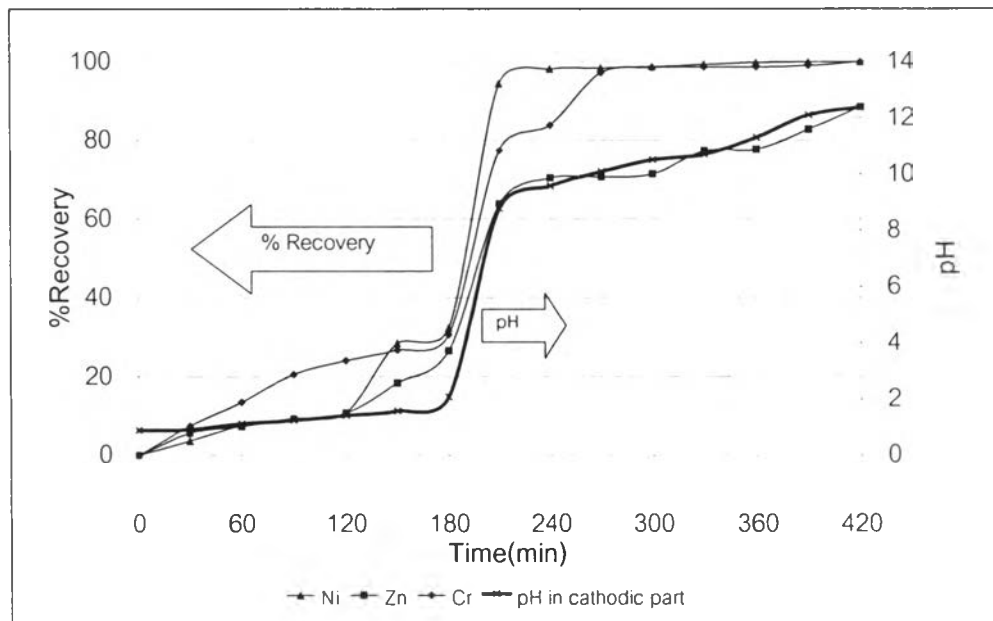
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับคืนโลหะและ ความเป็นกรด - เบส กับเวลาเมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1.1 แอมแปร์ ($j = 94 \text{ A/m}^2$) แก่ระบบ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับคืนโลหะและ ความเป็นกรดเป็นด่าง กับเวลาเมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1.3 แอมแปร์ ($j = 110 \text{ A/m}^2$) แก่ระบบ



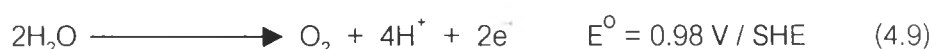
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับคืนโลหะและ ความเป็นกรด - เบส กับเวลาเมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ ($j = 130\text{A/m}^2$) แก่ระบบ



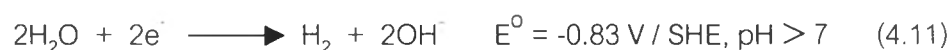
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับคืนโลหะและ ความเป็นกรดเป็นด่าง กับเวลาเมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้า 1.7 แอมแปร์ ($j = 145\text{A/m}^2$) แก่ระบบ

จากรูปที่ 4.11 – 4.14 ที่แสดงไว้ข้างต้นต่างให้ผลในการทำงานเดียวกัน คือร้อยละการนำกลับคืนโลหะและค่าความเป็นกรดเป็นด่างจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ระบบจะมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในส่วนแอโนดและส่วนแคโทดเป็นดังนี้

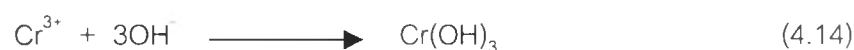
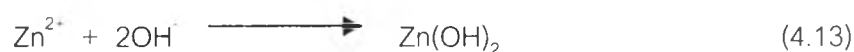
ส่วนแอโนด :



ส่วนแคโทด :

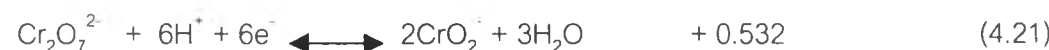
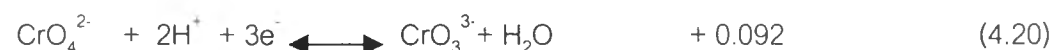
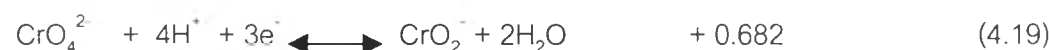
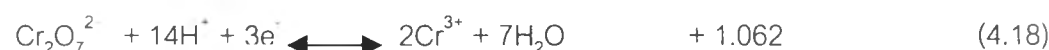
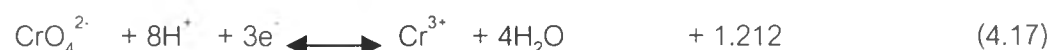
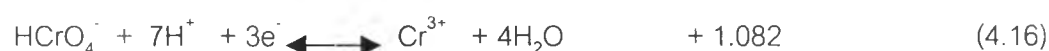
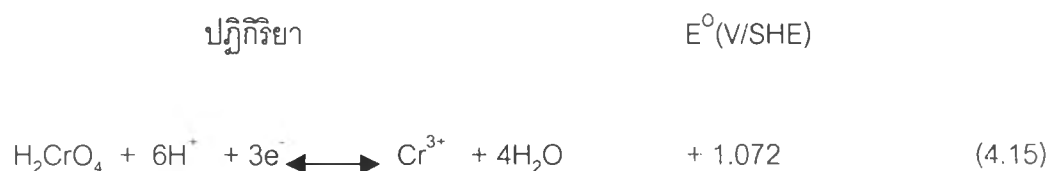


เนื่องจากสารละลายสังเคราะห์ที่ใช้มีความเป็นกรดมาก เป็นเหตุให้ในระบบมีไฮโดรเจนไอออนมาก ดังนั้นช่วงแรกในส่วนแคโทดปฏิกิริยาที่ 4.10 จะเกิดได้มากกว่าปฏิกิริยาที่ 4.11 ที่มีไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในช่วงแรกของการทดลองที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าค่าความเป็นกรด - เบสจะค่อย ๆ สูงกว่าในสารละลาย แต่เมื่อเวลาผ่านไปไฮโดรเจนไอออนในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปจนหมดในขณะที่ปฏิกิริยาที่ 4.11 ยังดำเนินไปเรื่อย ๆ ทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมากขึ้น โดยที่ไฮดรอกไซด์ไอออนจำนวนหนึ่งทำให้ค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้น ขณะเดียวกันไฮดรอกไซด์ไอออนบางส่วนจะเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะทำให้โลหะตกตะกอน อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 4.12 – 4.14



ส่วนในช่วงแรกที่มีการนำกลับคืนโลหะได้แม้ว่าค่าความเป็นกรด - เบสต่ำอาจเนื่องมาจากปรากฏการณ์การเกิดการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เกิดจาก 2 ปฏิกริยาร่วมกัน คือการดีโพซิชั่นของไอออนโลหะในช่วงที่มี ความเป็นกรด - เบสต่ำ ๆ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ให้สู่ระบบมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกริยารีดักชันของไอออน และการตกตะกอนของไอออนโลหะในรูปของเมทัลไฮดรอกไซด์ (Metal Hydroxide Form) ในช่วงที่ค่าความเป็นกรด - เบสเพิ่มขึ้น [29]

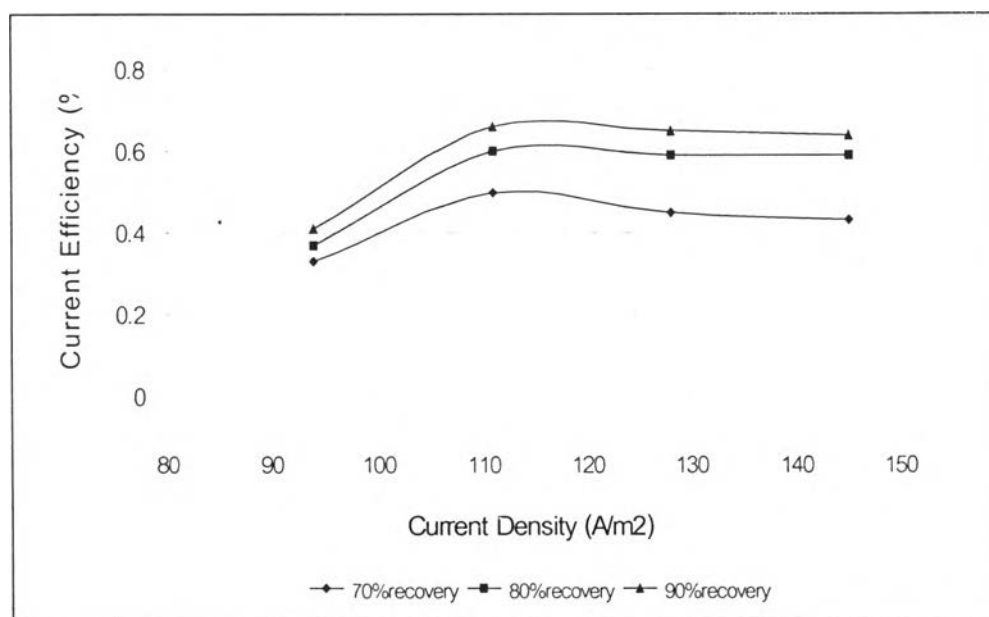
แต่สำหรับโครเมียมที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกริยารีดักชันของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ที่ขั้วแคโทดและเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของโครเมียมไตรวาเลนซ์ที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา ซึ่งปฏิกริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ในสารละลายเป็นดังนี้ [32]



จากปฏิกริยาด้านบน จะพบว่าโครเมียมบางส่วนสามารถเดินทางผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบโดยอยู่ในรูปของสารลิแกนด์ (Ligand) ดังนั้นในระหว่างการทดลองจึงดูเหมือนว่าโครเมียมถูกนำกลับในช่วงแรก

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการที่โครเมียมสามารถนำกลับได้ก่อนโลหะอื่นในช่วงที่ค่าความเป็นกรด - เบสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปฏิกิริยาตกตะกอนเพราะ โครเมียมสามารถตกตะกอนได้ที่ค่าความเป็นกรด - เบสมากกว่า 5.5 ส่วนนิกเกิลและสังกะสีสามารถตกตะกอนได้ที่ค่าความเป็นกรด - เบสประมาณ 8.0 [36]

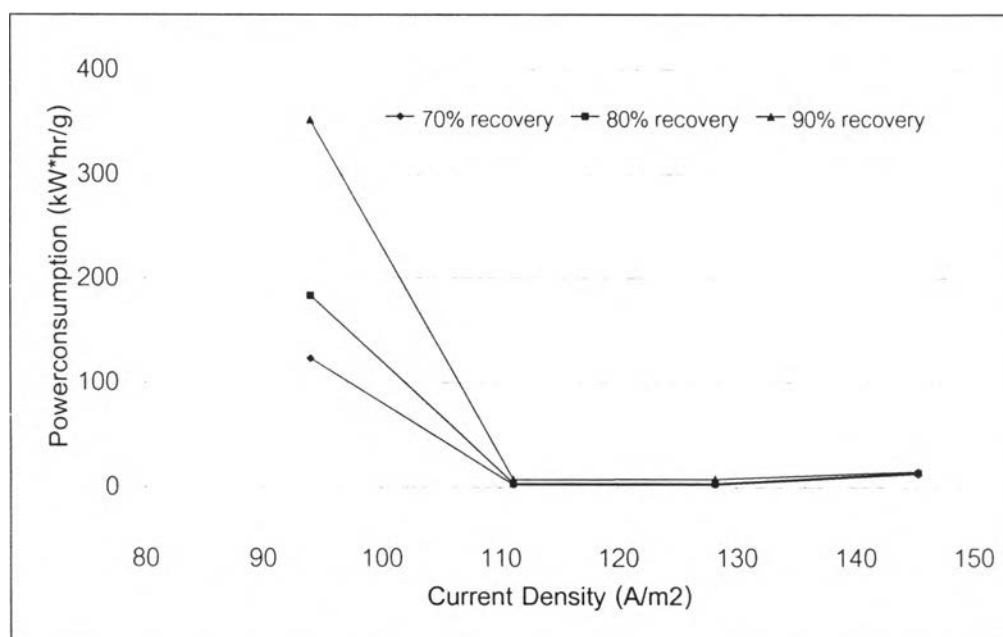
การหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้นใช้การเปรียบเทียบจากประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของแต่ละกระแสที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.15 และการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ไปในการกำจัดโลหะ (Power consumption) ของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโลหะ ที่แต่ละร้อยละการนำกลับคืนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ปริมาณการใช้พลังงานของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการนำกลับคืนต่าง ๆ ในการทดลองกำจัดโลหะหนักจากสารละลายสังเคราะห์ โดยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

Current (A)	Current Density (A/m ²)	Power consumption (kW*hr/g)		
		70%recovery	80%recovery	90%recovery
1.1	94	123.3	183.5	352.5
1.3	111	2.5	3.8	7.7
1.5	128	2.6	3.9	7.9
1.7	145	12.5	13.7	15.1

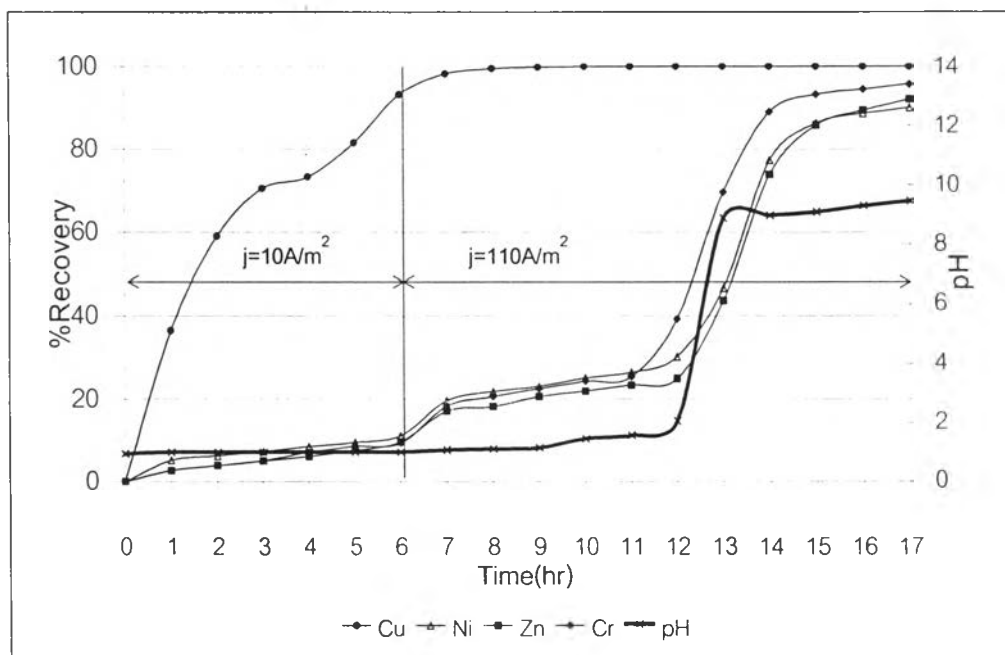


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ไปในการกำจัดโลหะ (Power consumption) ของแต่ละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

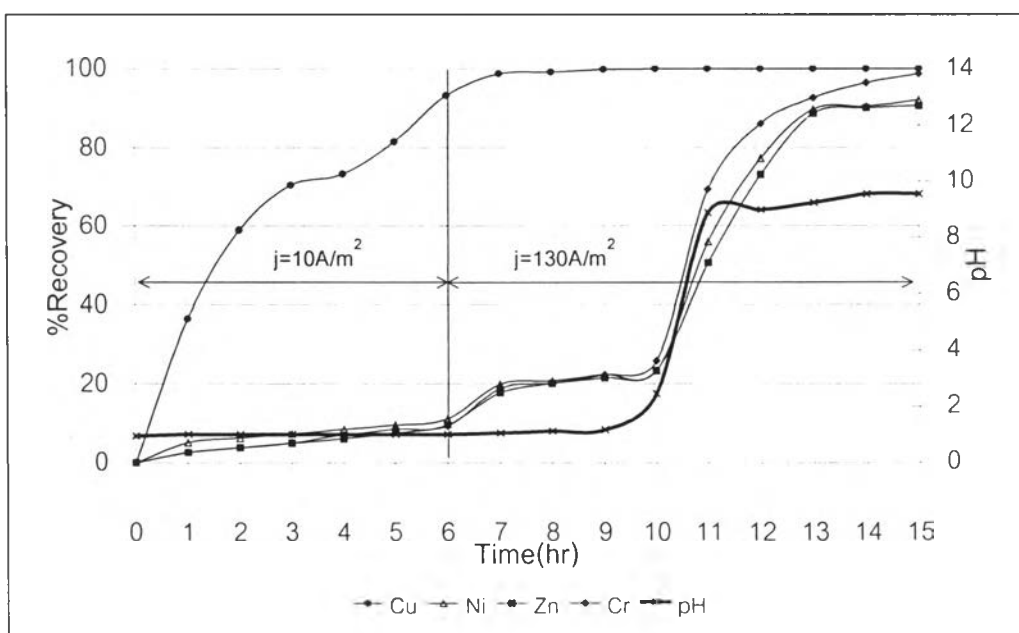
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.16 ซึ่งเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการกำจัดโลหะของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับคืนโลหะจากสารละลายสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอยู่ในช่วงกระแสไฟฟ้า 1.3 – 1.5 แอมแปร์ หรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 110 - 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมและนิกเกิลได้ถึง 100% และสามารถกำจัดสังกะสีได้ประมาณ 80% ในระยะเวลาประมาณ 4.5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

4.4 การนำโลหะหนักกลับคืนจากสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอน

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะแต่ละชนิดจากการทดลองโดยใช้สารละลายสังเคราะห์ดังผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1 ศึกษาการนำกลับทองแดงในสารละลายสังเคราะห์ที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 1.0 ด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิสพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลา 6 ชั่วโมงสามารถนำกลับคืนทองแดงได้มากกว่า 90% ส่วนในการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิสขั้นนั้นให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสต่ำเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอีกทั้งในสารละลายยังมีโครเมียมซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ที่ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ที่เป็นอุปสรรคในการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีนี้อีกด้วย และจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.2 ประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเพื่อกำจัดไอออนโลหะที่เหลือออกจากสารละลาย เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกแบ่งออกเป็นด้านแคโทดและด้านแอโนดด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบเพื่อป้องกันปฏิกิริยารีดอกซ์ของโครเมียม ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะจากสารละลายสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 แอมแปร์หรือความหนาแน่นไฟฟ้า 110 - 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลามากกว่า 6 ชั่วโมง เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองกับสารละลายสังเคราะห์ มาประยุกต์ใช้กับสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอนโดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การนำทองแดงกลับคืนโดยวิธีอิเล็กโทรลิซิสที่ค่ากระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์หรือความหนาแน่นกระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และการกำจัดนิกเกิล, สังกะสี, และโครเมียมโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ 110 และ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 11 และ 9 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลการทดลองการนำกลับโลหะจากสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอน



รูปที่ 4.18 ผลการทดลองการนำกลับโลหะจากสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอน

เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในสารละลายสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้กับสารละลายที่ได้จากการละลายตะกอนปรากฏว่าได้ผลใกล้เคียงกัน นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบหาค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดโลหะ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดโลหะของแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง ในการทดลองกำจัดโลหะหนักโดยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้า จากสารละลายตะกอน

Current (A)	Current Density (A/m ²)	Power Consumption (kW * hr/g)		
		70%recovery	80%recovery	90%recovery
1.3	110	5.53	9.92	27.28
1.5	128	5.79	11.68	29.69

ตารางที่ 4.6 พบว่าที่กระแสทั้งสองใช้ค่าพลังงานไม่ห่างกันมากนัก แต่เนื่องจากที่กระแส 1.5 แอมแปร์ ใช้เวลาน้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าภาวะในการนำทองแดงกลับจากสารละลายจากการละลายตะกอนด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิสใช้ค่าความหนาแน่นกระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนโลหะชนิดอื่น ทำการกำจัดโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ค่าความหนาแน่นกระแส 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง จึงจะได้ประสิทธิภาพในการนำกลับโลหะสูงที่สุด