

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง มีการต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล และ 2) ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล จากนั้นทำการวิเคราะห์กระบวนการกำจัดโลหะไอออนออกจากน้ำเสียผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลา ประเมินประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการกำจัด

วิเคราะห์พารามิเตอร์ในน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช ปริมาณทองแดง ปริมาณโครเมียม ปริมาณนิกเกิล ปริมาณซัลเฟต ปริมาณไนเตรท และของแข็งละลายทั้งหมด

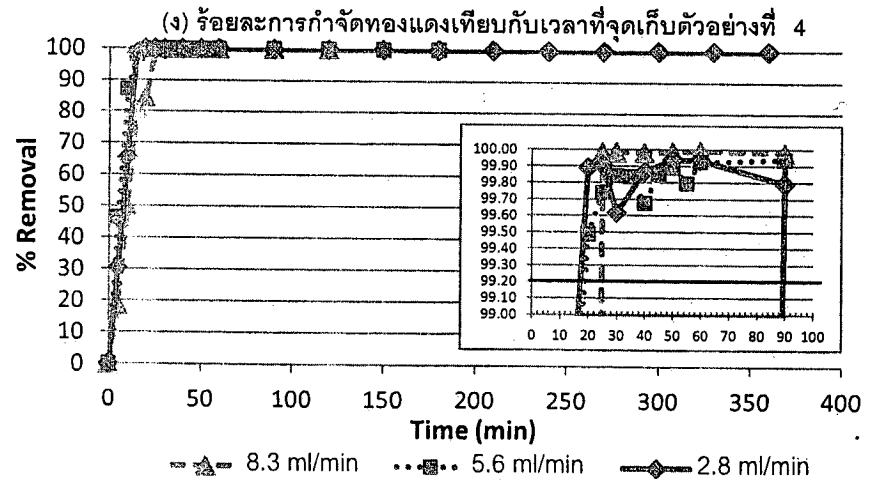
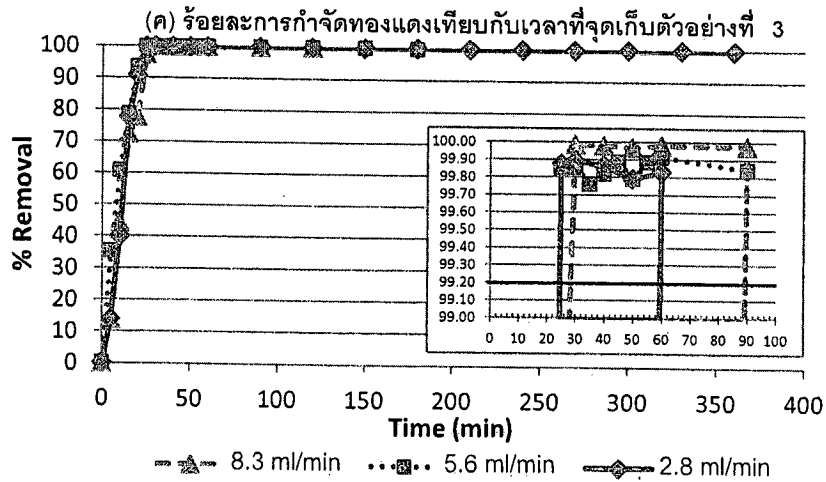
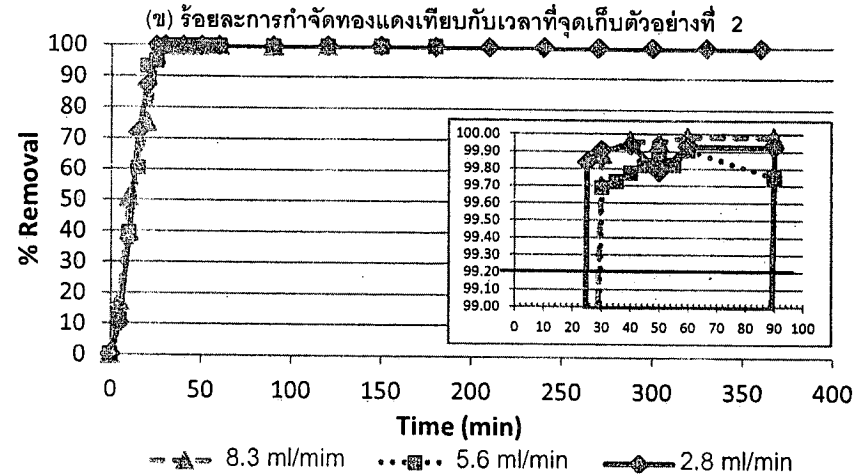
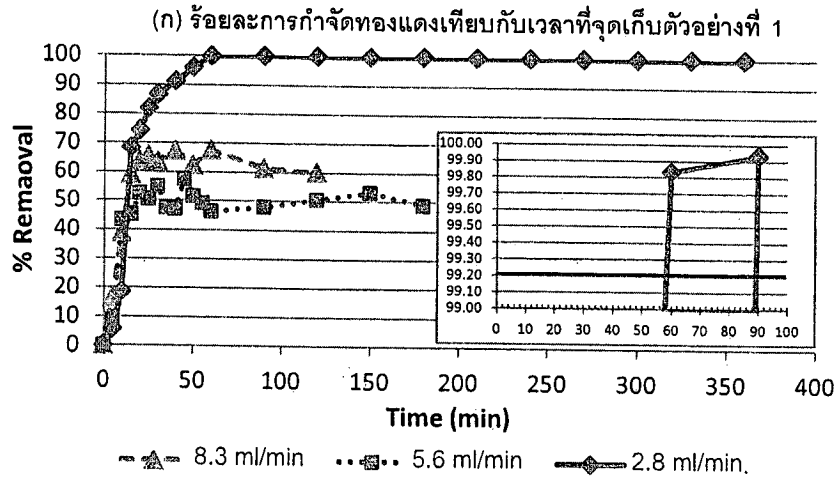
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ค่า/ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	3.4	-
ทองแดง	248	mg/L
โครเมียม	161	mg/L
นิกเกิล	14	mg/L
ซัลเฟต	1,745	mg/L
ไนเตรท	1.2	mg/L
ของแข็งละลายทั้งหมด	2,735	mg/L

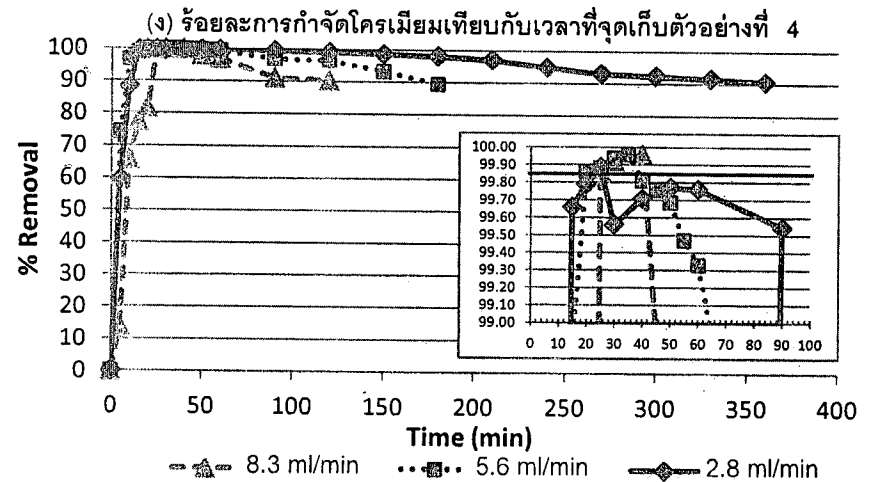
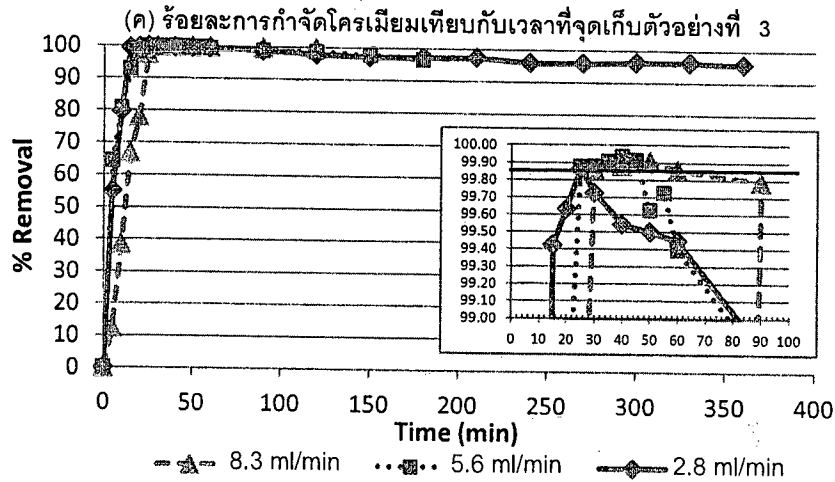
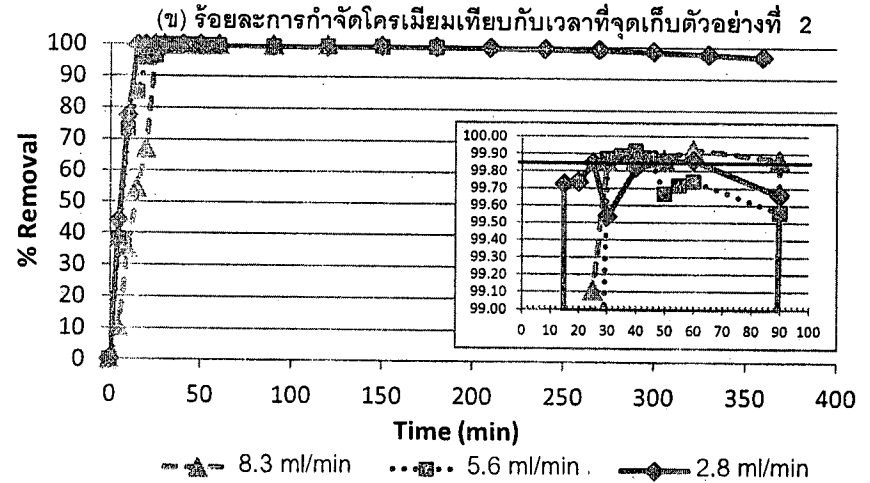
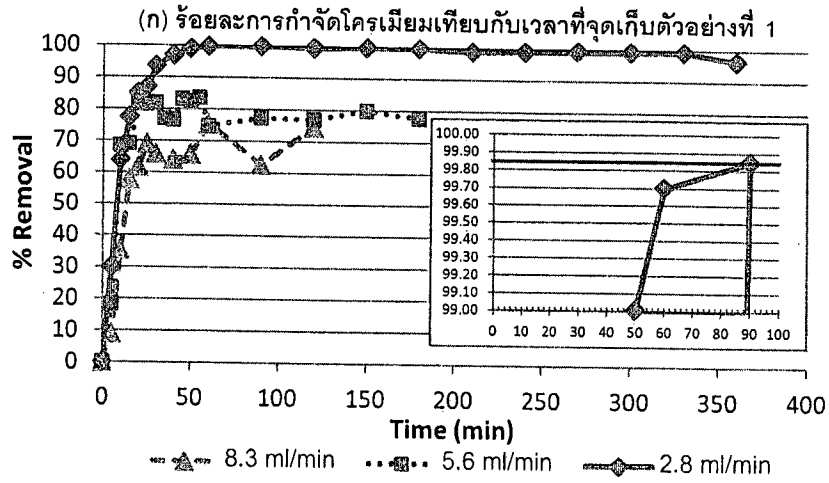
#### 4.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์

ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ โดยติดตามวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้อัตราการไหลที่ 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เก็บน้ำเสียตัวอย่าง 4 ตำแหน่ง คือ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1 - 4.3

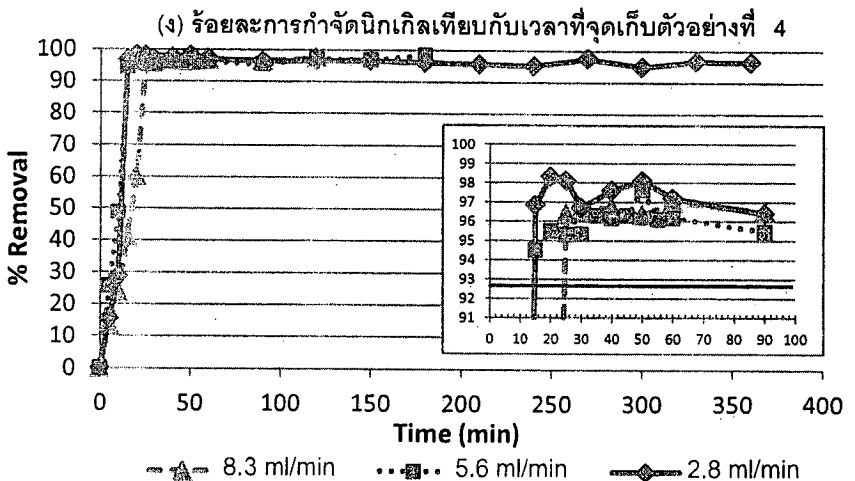
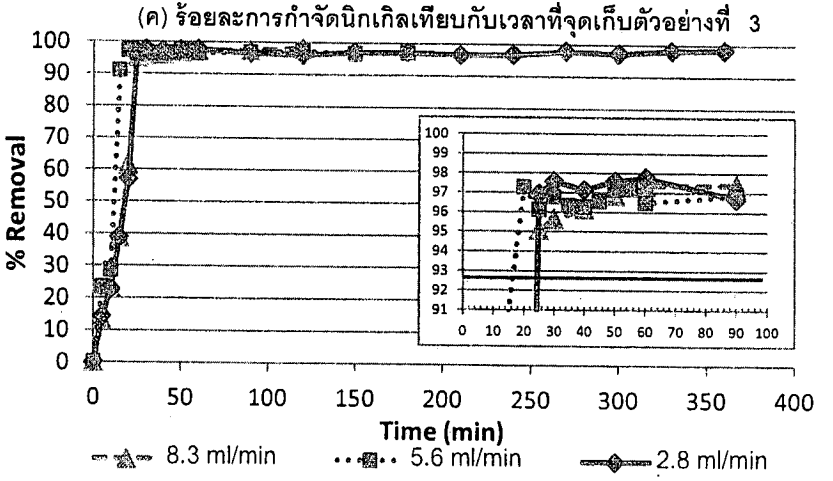
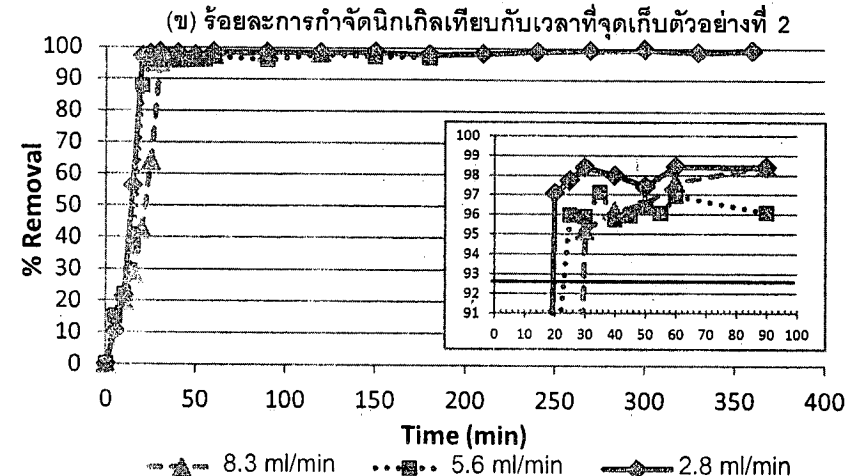
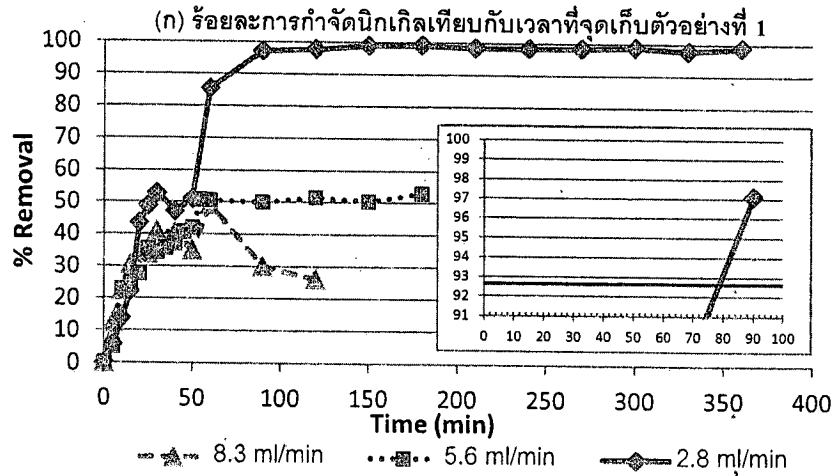
ภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร ด้วยอัตราการไหลต่างๆ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 พบว่าทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือคงที่เมื่อเวลาของการกำจัดผ่านไปกว่า 1 ชั่วโมง โดยผลการทดลองในภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) พบว่า สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างให้ลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดความเข้มข้นของทองแดง โครเมียม และนิกเกิลไม่เกิน 2.0, 0.25 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (เมื่อคิดเป็นร้อยละการกำจัดเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงที่ 248 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียม 161 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิล 14 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ร้อยละการกำจัดต้องมากกว่า 99.19, 99.84 และ 92.86 ตามลำดับ จึงจะผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม) เมื่อเดินระบบโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่ง ณ เวลาดังกล่าวนี้นพบทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเหลืออยู่เพียง 0.42, 0.25 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละของการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ 99.83, 99.85 และ 97.08 ตามลำดับ แต่ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ทั้งนี้เป็นเพราะอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบสูง หมายถึงระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ในระบบ (ช่องกักเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1) เพื่อทำการกำจัดมีน้อยลง (เมื่อเดินระบบที่อัตราไหล 2.8, 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียถูกกักเก็บอยู่ในช่องกักเก็บตัวอย่างที่ 1 เป็นเวลา 90, 45 และ 30 นาที ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่าร้อยละของการกำจัดมีค่าน้อย ปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่างจึงยังคง



ภาพที่ 4.1 ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4  
ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4  
ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อยู่ในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้การควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยปั๊มที่ใช้งาน เกิดขึ้นได้ไม่ราบเรียบคงที่ตลอดเวลา ซึ่งสังเกตได้จากการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของจุดข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก)

ภาพที่ 4.1 (ข), 4.1 (ค), 4.1 (ง), 4.2 (ข), 4.2 (ค), 4.2 (ง), 4.3 (ข), 4.3 (ค) และ 4.3 (ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่าง ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยอัตราการไหลต่างๆ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดขึ้น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก)) นั่นคือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด โดยพบปริมาณทองแดง โครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างที่ 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 - 4 ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 - 4.4

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2, 3 และ 4 พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ที่ทุกอัตราการไหล ดังนี้ ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อ นาที เป็นระยะเวลา 30, 30, และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 30, และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.19 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาที)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	99.89	30	99.98	25	99.98
5.6	-	-	30	99.96	25	99.84	25	99.74
2.8	60	99.83	25	99.84	25	99.88	20	99.89

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาท)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	99.86	30	99.86	25	99.86
5.6	-	-	30	99.87	25	99.87	20	99.86
2.8	90	99.85	25	99.85	25	99.86	25	99.89

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาท)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	95.19	25	95.07	25	96.37
5.6	-	-	25	95.95	20	97.28	15	94.50
2.8	90	97.08	25	97.72	25	96.91	15	96.83

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 3 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.86 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.07 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 20 และ 25 นาที ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.74 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 25 และ 20 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.86 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3,

5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 20 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 94.50 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 15 และ 15 นาที ตามลำดับ

อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ในระบบ โดยพบว่าแนวโน้มในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง หรือนั่นคือการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ภายในระบบกำจัด เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ แต่เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าไม่สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในการทดลองต่อจากนี้จึงเลือกเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากร้านน้ำเสียโรงงานผลิตแทนทิมพ์

ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากร้านน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนทิมพ์ โดยติดตามวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ผลการทดลองแสดงดังแสดงในภาพที่ 4.4 - 4.6

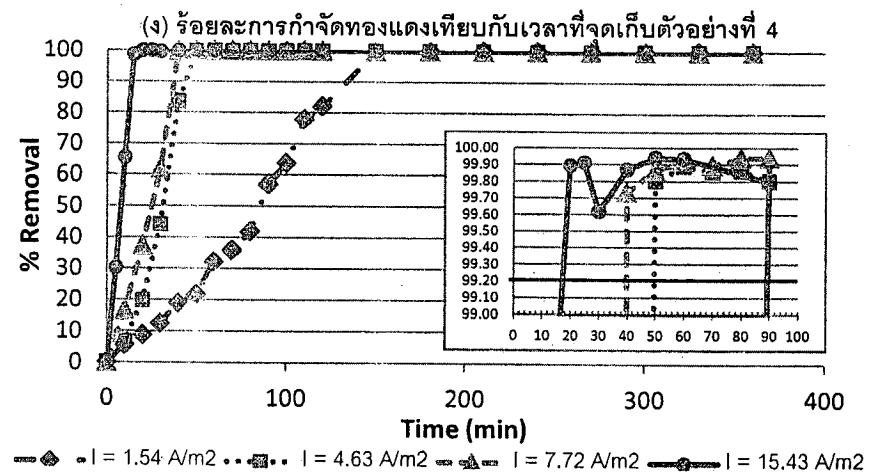
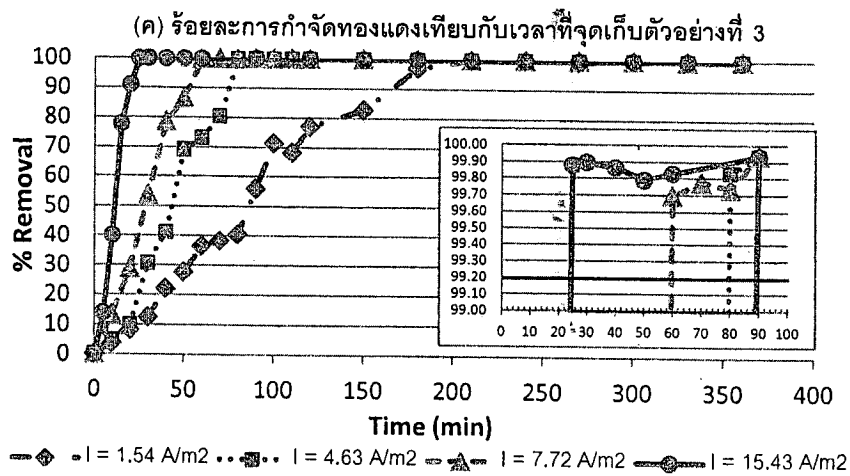
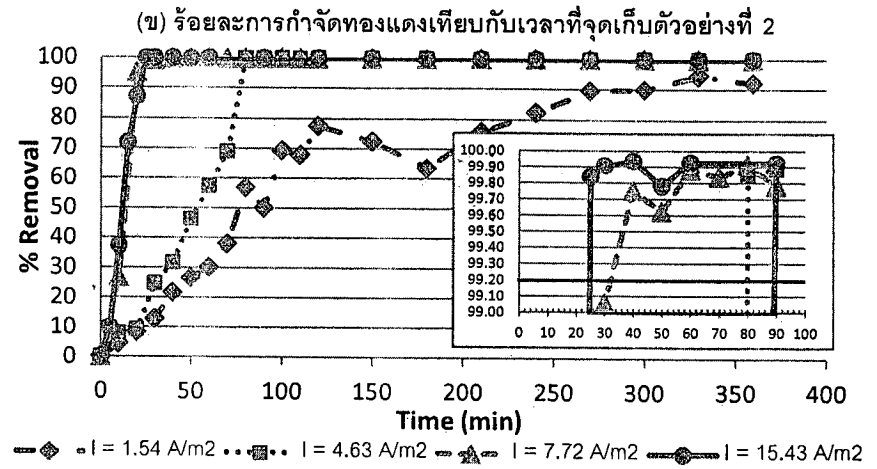
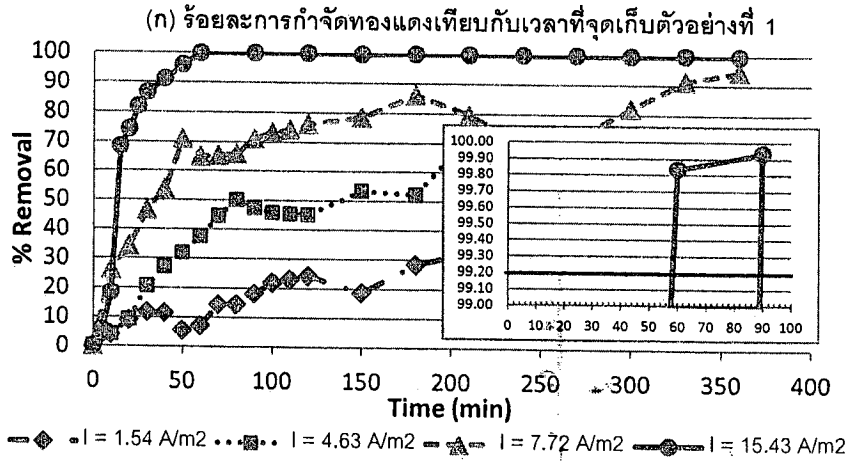
ภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากร้านน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 พบว่าทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือคงที่เมื่อเวลาของการกำจัดผ่านไปกว่า 2 ชั่วโมง ทั้งนี้อัตราเร็วในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในช่วงต้นของการกำจัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ คือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นได้รวดเร็ว เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแก่ระบบมากขึ้น (ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟในแต่ละรูป) เป็นผลให้ปริมาณโลหะไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างมีค่าน้อยเมื่อเวลาของการกำจัดดำเนินไป โดยผล

การทดลองในภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก) พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่ 2.0, 0.25 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 เป็นระยะเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่ง ณ เวลาดังกล่าวนี้พบทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างเหลืออยู่เพียง 0.42, 0.25 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละของการกำจัดทองแดงและโครเมียมที่ 99.83, 99.85, และ 97.08 ตามลำดับ แต่ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63 และ 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง

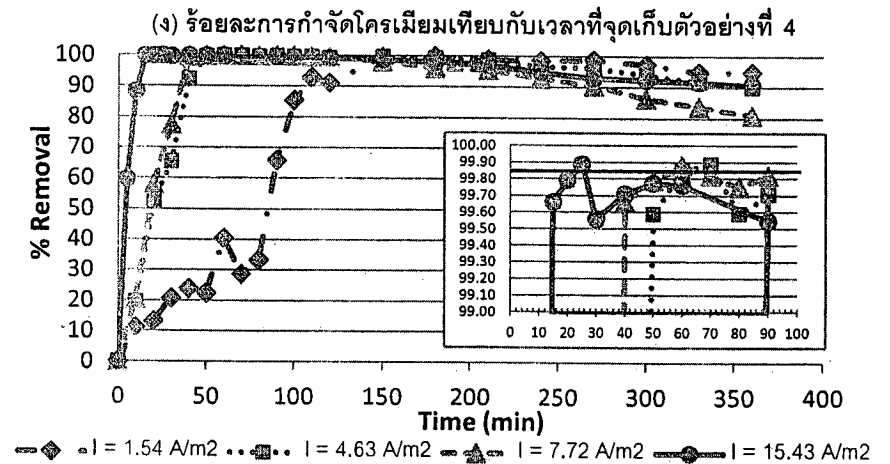
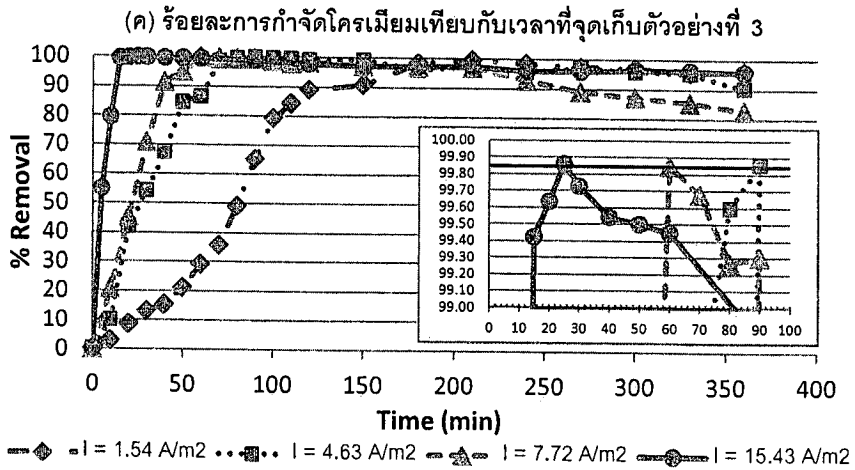
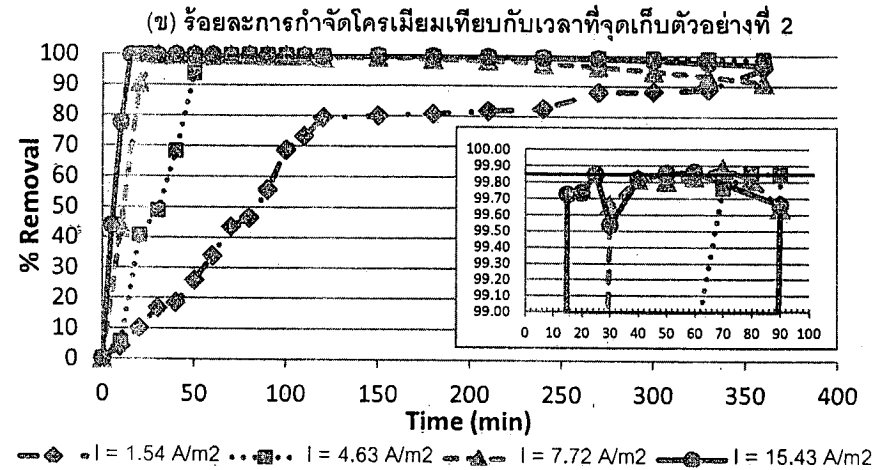
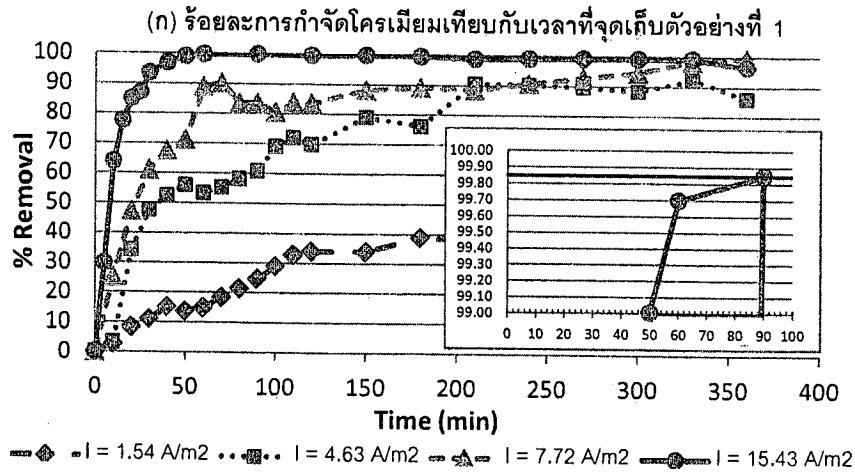
ภาพที่ 4.4 (ข), 4.4 (ค), 4.4 (ง), 4.5 (ข), 4.5 (ค), 4.5 (ง), 4.6 (ข), 4.6 (ค) และ 4.6 (ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับที่เกิดขึ้น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก)) นั่นคือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด โดยเฉพาะเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแก่ระบบมากขึ้น และปริมาณโลหะไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างมีค่าน้อยเมื่อเวลาของการกำจัดดำเนินไป โดยพบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2-4 ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4:5 - 4:7

ตารางที่ 4.5 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	210	99.74	150	99.63
4.63	-	-	80	99.85	80	99.83	50	99.80
7.72	-	-	40	99.75	60	99.69	40	99.73
15.43	60	99.83	25	99.84	25	99.88	20	99.89

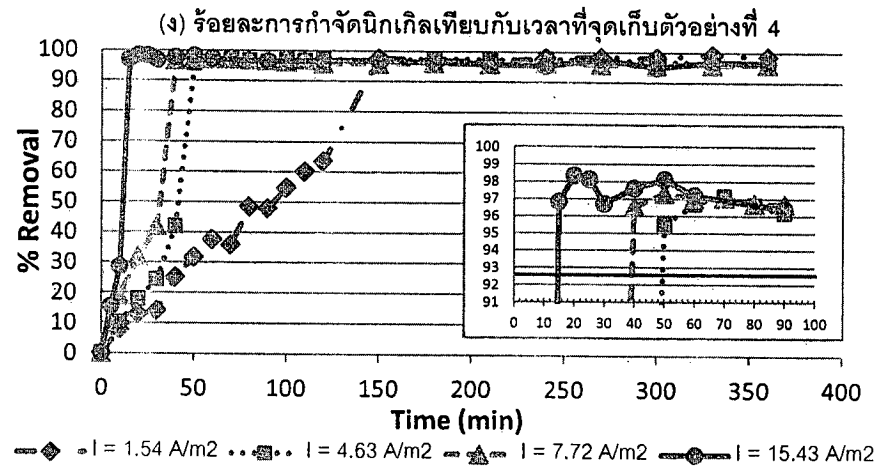
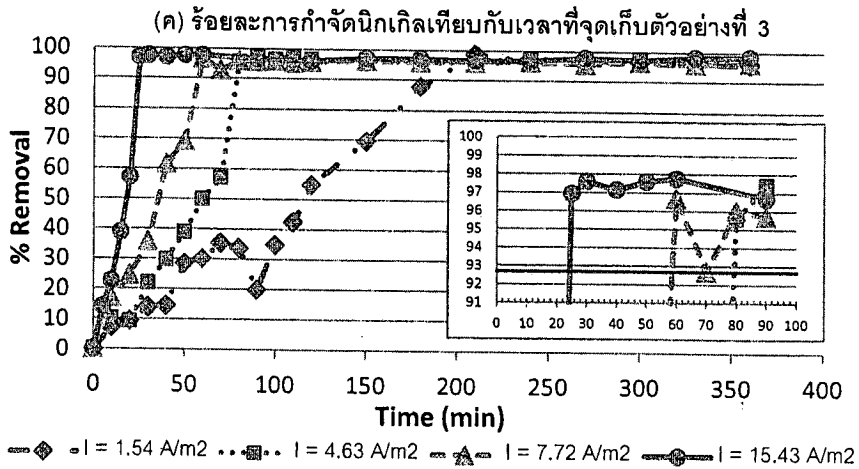
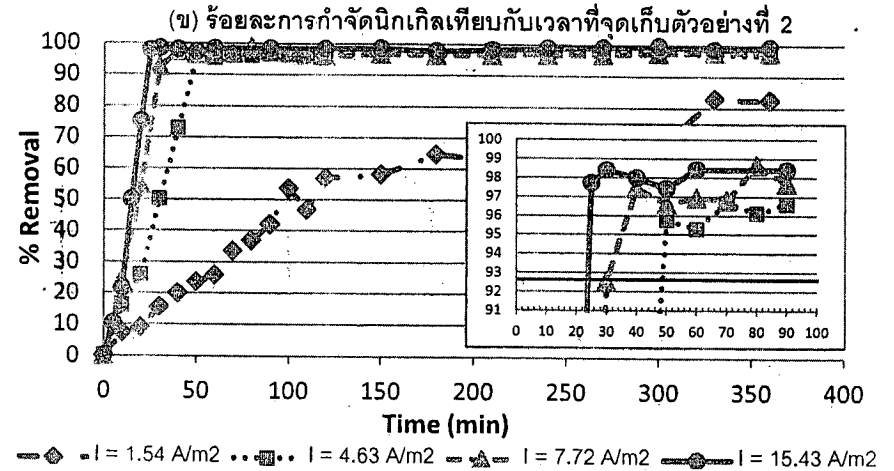
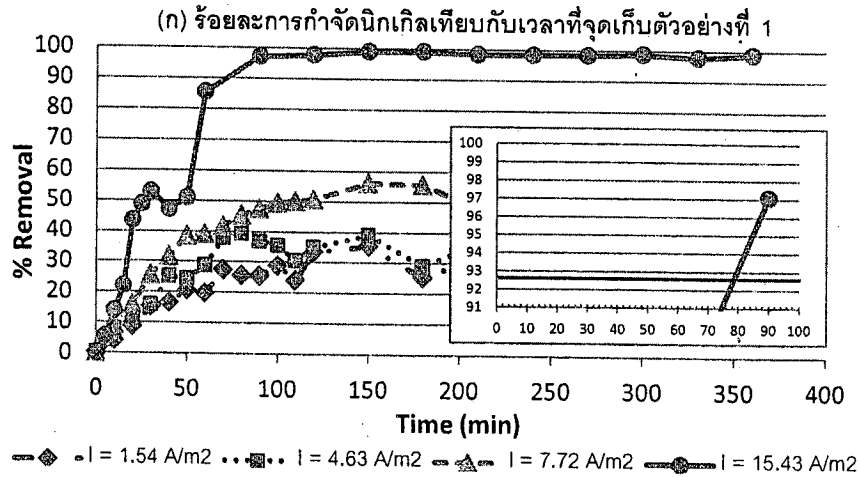


ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4  
 ความคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4

ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดนิเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 : ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่ออนาที

ตารางที่ 4.6 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	-	-	180	99.85
4.63	-	-	80	99.86	90	99.86	70	99.89
7.72	-	-	70	99.88	60	99.84	60	99.88
15.43	90	99.85	25	99.85	25	99.86	25	99.89

ตารางที่ 4.7 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	210	98.68	150	97.53
4.63	-	-	50	95.75	80	95.58	50	95.49
7.72	-	-	40	97.44	60	96.67	40	96.52
15.43	90	97.08	25	97.72	25	96.91	15	96.83

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่พบว่า ปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์

ต่อตารางเมตร โดยสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.75 ที่เวลา 80, 40 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 ที่เวลา 80, 70 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.75 ที่เวลา 50, 40 และ 25 นาที ตามลำดับ

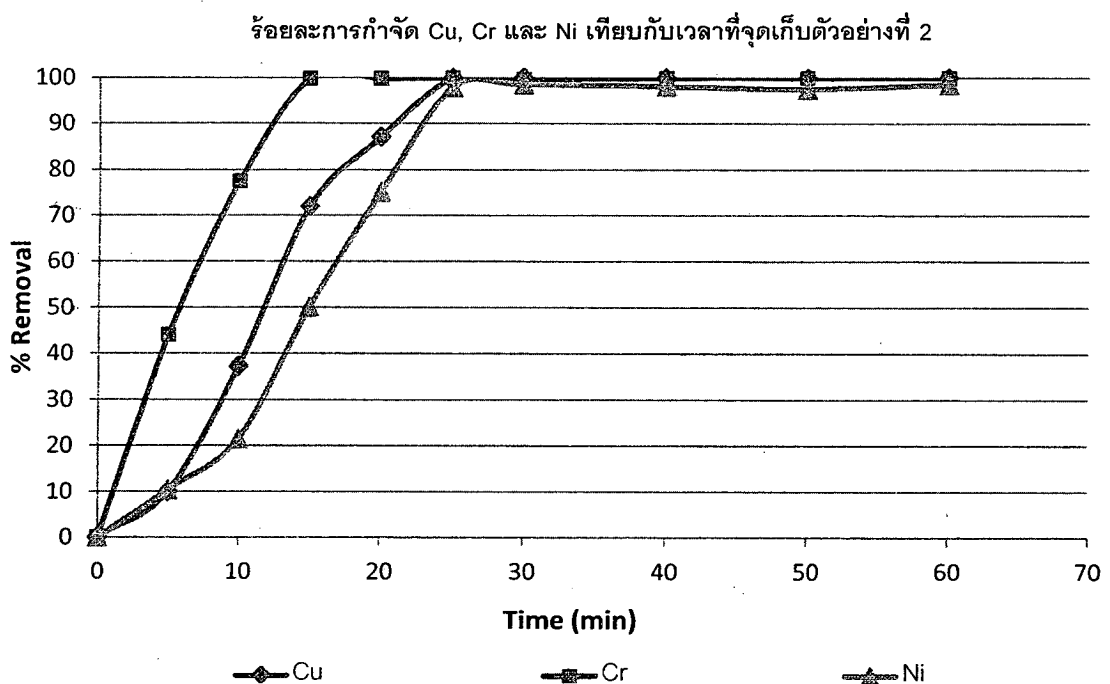
ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 3 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.69 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 210, 80, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 90, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.58 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 210, 80, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ที่ทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะไอออนออกจากรน้ำเสียลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้มามีค่ามากขึ้น ดังนี้ ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.63 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 150, 50, 40 และ 20 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 180, 70, 60 และ 20 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.49 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 150, 50, 40 และ 15 นาที ตามลำดับ

ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลถูกกำจัดได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ในเวลา 25 นาที โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้กระแสไฟฟ้าเพียงจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้อย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 เพิ่มเติม และสามารถลดขนาดถึงปฏิบัติการหรือขนาดระบบบำบัดลงได้ครึ่งหนึ่ง ทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าและค่าก่อสร้างระบบลงได้ และจากผลการศึกษาเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) พบว่า Akbal และ Camci ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการกำจัด

ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียง 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ตัวอย่าง (ภาพที่ 4.7) พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน โดยภาพรวมแล้วค่าร้อยละของการกำจัดโครเมียมมีค่ามากกว่าร้อยละของการกำจัดทองแดงและมากกว่าร้อยละของการกำจัดนิกเกิล นั้นแสดงว่าโครเมียมถูกกำจัดออกจากระบบได้ง่ายกว่าทองแดง และทองแดงถูกกำจัดออกจากระบบได้ง่ายกว่านิกเกิล โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของโครเมียม,  $E^\circ = 1.33$  โวลต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของทองแดง,  $E^\circ = 0.34$  โวลต์ และมีค่ามากกว่าค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของนิกเกิล,  $E^\circ = -0.26$  โวลต์ ดังนั้นโครเมียมมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดได้ดีกว่าทองแดงและนิกเกิล ปฏิบัติการกำจัดผ่านกระบวนการรีดักชันจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าและเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมากขึ้น อัตราการลดลงของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจะสูงขึ้น เป็นผลให้ใช้เวลาในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลน้อยลง

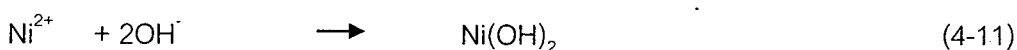
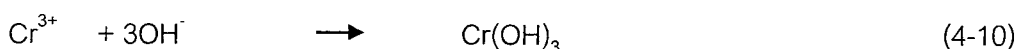
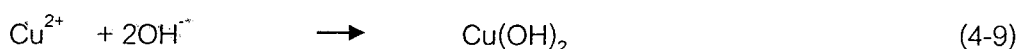
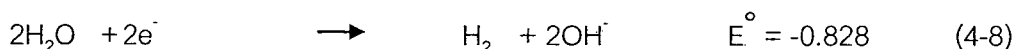
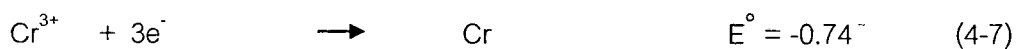
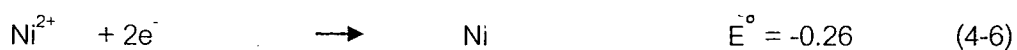
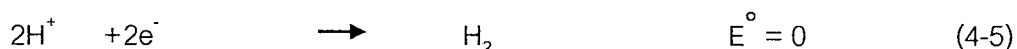
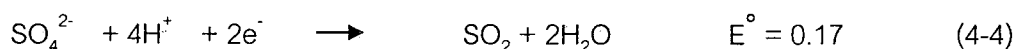
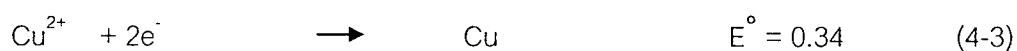
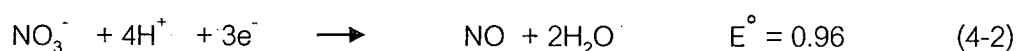
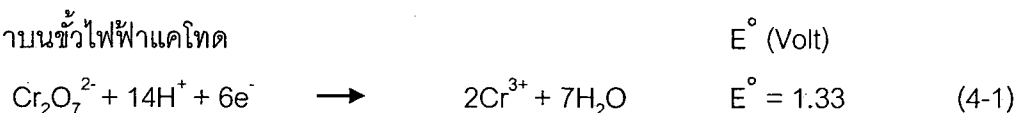


ภาพที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2

### 4.3 พีเอช

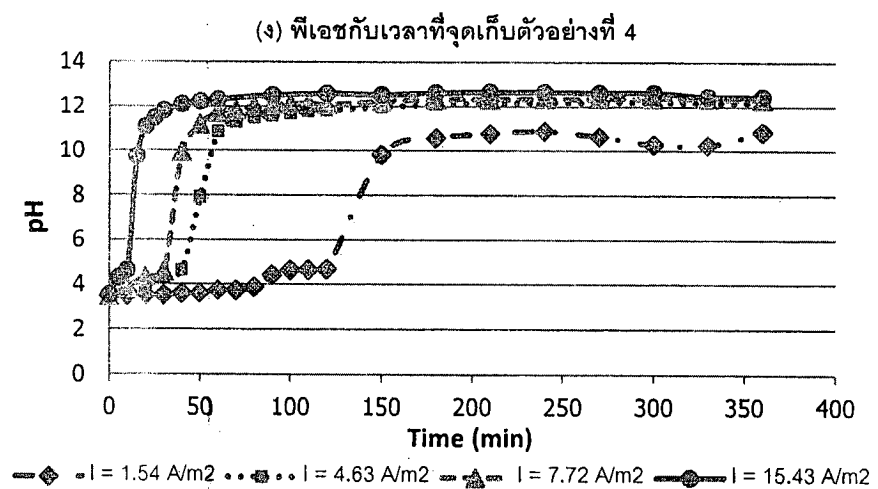
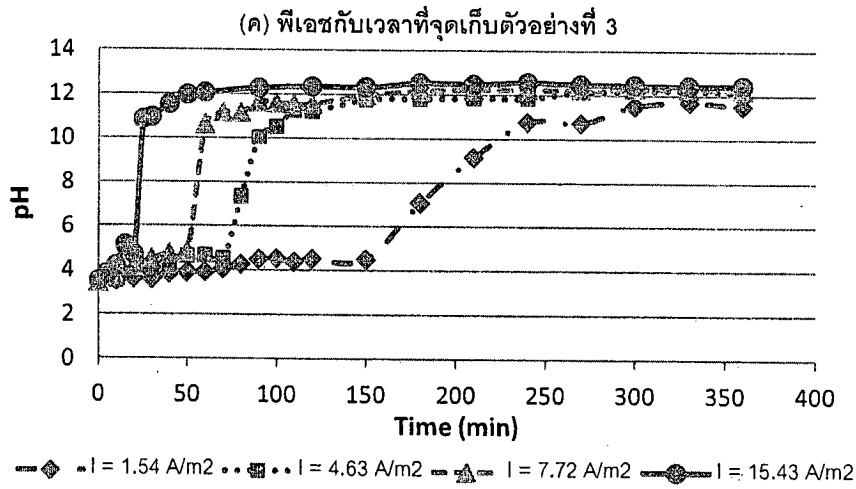
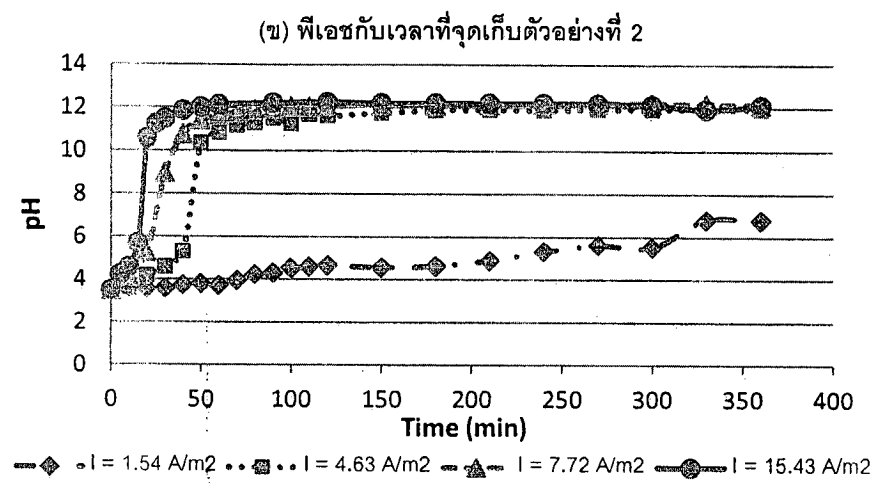
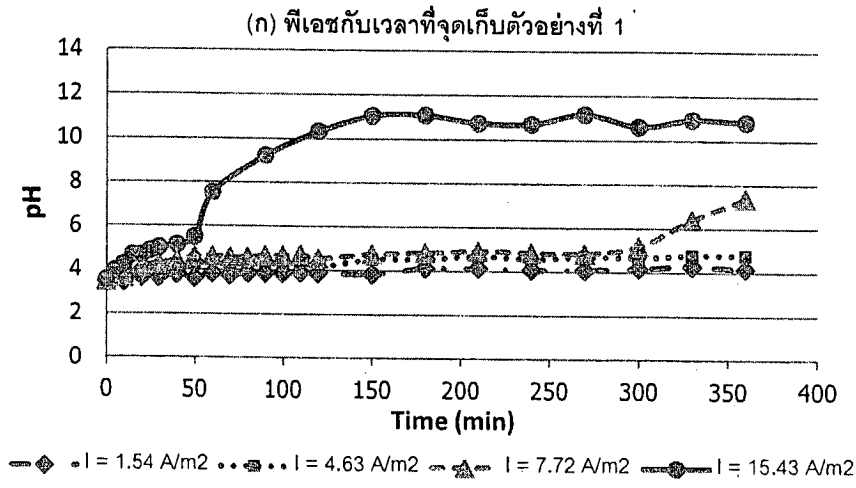
น้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนพิมพ์มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.4 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทำการตรวจวัดค่าพีเอชจากน้ำเสียจริงตลอดช่วงการทดลอง โดยมีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเกิดขึ้นดังภาพที่ 4.8 และสามารถอธิบายสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยอาศัยปฏิกิริยาที่ (4.1) – (4.11)

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแคโทด



ภาพที่ 4.8 แสดงค่าพีเอชของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา พบว่าทุกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในทุกๆ จุดเก็บตัวอย่าง ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดลองด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงหลักๆ ดังนี้

1) ช่วงเริ่มต้นการทดลอง การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อันเป็นผลเนื่องมาจากการดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) ซึ่งเป็นการกำจัดโครเมียม ทองแดงและนิกเกิลออกจากระบบผ่านปฏิกิริยารีดักชัน (พิจารณาภาพ 4.9 ประกอบ) พร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ  $\text{H}^+$  ไอออน ซึ่งมีอยู่ปริมาณหนึ่งในน้ำตัวอย่าง (ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

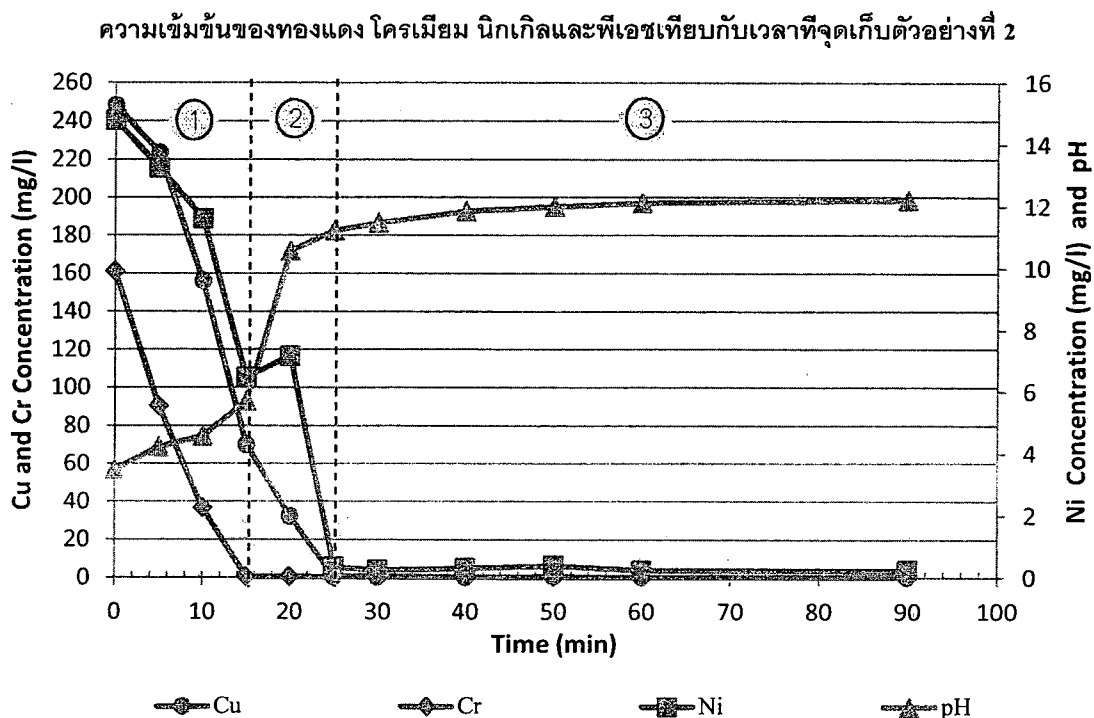


ภาพที่ 4.8 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ต่างๆ

(ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4

ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ตัวอย่างเท่ากับ 3.4) ส่งผลให้ความเป็นกรดของน้ำตัวอย่างลดลง ค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9. ความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลกับค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาพที่ 4.9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ของการกำจัด ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากภาพพบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง โครเมียมและทองแดงถูกกำจัดอย่างรวดเร็ว จนความเข้มข้นลดลงจนเข้าใกล้ค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ และนิกเกิลซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ช้าที่สุด แสดงค่าความเข้มข้นที่ลดลงน้อยที่สุดในช่วงเริ่มต้นของการทดลองนี้ การเพิ่มขึ้นค่าพีเอชในน้ำตัวอย่างของช่วงการทดลองนี้ เกิดขึ้นจนถึงพีเอชประมาณ 5.5 - 6

2) เมื่อปริมาณโลหะไอออนในน้ำตัวอย่างลดลง ประกอบกับปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกควบคุมไว้ที่ค่าคงที่ค่าเดิม เป็นผลให้ปฏิกิริยารีดักชันที่ (4-8) เริ่มดำเนินไปร่วมกับปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) และด้วยสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (4-8) คือ  $H_2O$  ซึ่งมีปริมาณมากมายในตัวอย่างที่ทำการทดลอง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์  $OH^-$  ไอออน เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 2 ของการทดลอง จากค่าพีเอชประมาณ 5.5 – 6 ไปเป็นพีเอชประมาณ 10

ปริมาณ  $OH^-$  ไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (4-8) ยังผลให้เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนร่วมขึ้น ดังแสดงไว้ในปฏิกิริยาที่ (4-9) ถึง (4-11) ซึ่งปฏิกิริยาการตกตะกอนทั้ง 3 นี้ นับเป็นปฏิกิริยาร่วมที่สำคัญในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย การดำเนินไปของปฏิกิริยาทั้ง 3 ส่งผลให้ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลถูกกำจัดออกไปจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้นในช่วงที่ 2 ของการทดลองนี้ (ภาพที่ 4.9)

3) เมื่อโลหะไอออนทั้งสามถูกกำจัดออกจนหมดแล้วและน้ำตัวอย่างมีค่าพีเอชค่อนข้างสูง (ประมาณ 10) การดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) และ (4-9) ถึง (4-11) สิ้นสุดลง การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในช่วงนี้ท้ายของการทดลองนี้ เกิดเนื่องมาจากการดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-8) เท่านั้น จากภาพที่ 4.8 และ 4.9 การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในช่วงท้ายนี้ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง สาเหตุที่เห็นเป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในบริเวณที่ค่าพีเอชสูง การเพิ่มขึ้นของ 1 พีเอชยูนิต ต้องใช้  $OH^-$  ไอออนเป็นจำนวนมาก (ปฏิกิริยาที่ 4-12) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วงท้ายของการทดลองนี้เกิดขึ้นช้าลงอย่างมากหรือจนอาจจะไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้

$$pH = -\log [H^+] \quad (4-12)$$

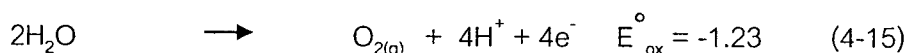
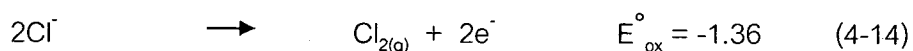
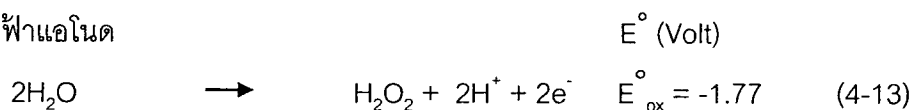
ตารางที่ 4.8 แสดงตัวอย่างปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 ยูนิต

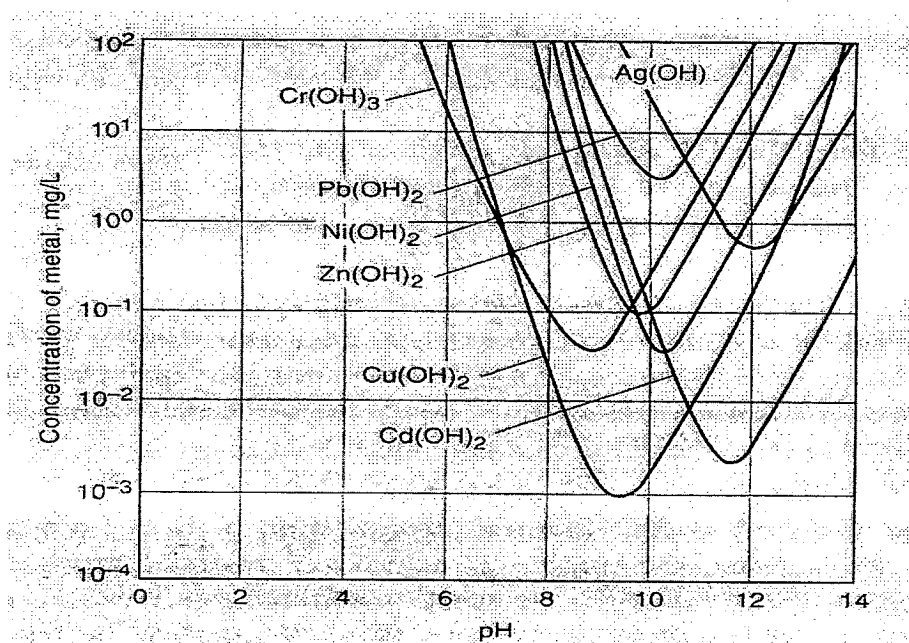
การเพิ่มของ pH จากค่าหนึ่งไปค่าหนึ่ง	$[OH^-]$ (mol/L)
7 → 8	$9 \times 10^{-7}$
9 → 10	$9 \times 10^{-5}$
11 → 12	$9 \times 10^{-3}$

นอกจากนี้ที่ระดับพีเอช 11 พบการเพิ่มขึ้นของโครเมียมในน้ำตัวอย่าง (หรือการลดลงของ ร้อยละการกำจัดโครเมียม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.5) อันแสดงถึงความเป็นไปได้ในการละลายกลับ ของตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ที่คาดว่าเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงที่ 2 ของการเพิ่มค่าพีเอช ภาพที่ 4.10 แสดง อิทธิพลของค่าพีเอชต่อการละลายของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ จากภาพที่ 4.10 พบว่า ตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  สามารถละลายได้ที่พีเอชต่ำกว่าตะกอน  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  และเริ่มละลาย กลับได้ตั้งแต่พีเอช 9 จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำตัวอย่าง เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงกว่า 11 ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่เก็บและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบเป็นระยะเวลานานเกินไป ส่งผลให้ค่าพีเอชสูงขึ้น และเป็นสาเหตุให้ตะกอนของโลหะหนักละลายกลับคืนในรูปของสารละลาย ทำให้พบการเพิ่มขึ้นของโลหะ ในน้ำตัวอย่าง

ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในแต่ละช่วงของการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ กล่าวคือ เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามาก เวลาที่ใช้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงพีเอชช่วงที่ 1 จะมีค่าน้อย ทำให้พบช่วงการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟในภาพที่ 4.8 (ช่วงที่ 2 ของการเปลี่ยนแปลงพีเอช) เร็วขึ้น เช่น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การเพิ่มขึ้นของพีเอชในช่วงที่ 1 สิ้นสุดลงภายในเวลา 15 นาที และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การเพิ่มขึ้นของพีเอชในช่วงที่ 1 สิ้นสุดลง ณ เวลา 40 นาที เป็นต้น สำหรับข้อไฟฟ้าแอโนด ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาได้ถูกนำเสนอไว้ในปฏิกิริยาที่ (4-13) ถึง (4-15)

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแอโนด





ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ

(Metcalf และ Eddy, 2004)

#### 4.4 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

จากที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น พบว่าในขณะที่ทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ เวลาต่าง ๆ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกริยาขึ้นไป ดังนั้นปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ได้ถูกใช้ไปสำหรับการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเท่านั้น ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดโลหะไอออนที่ต้องการออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ

ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแส แสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.11 และภาพที่ 4.11 - 4.13 พบว่า ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 55.39, 28.87, 65.79 และ 57.25 ณ นาทีที่ 20, 30, 10 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 62.25, 85.48, 75.18 และ 95.70 ณ นาทีที่ 20, 20, 10 และ 10 ตามลำดับ และ

นิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 4.06, 2.05, 1.49 และ 1.76 ณ นาที่ที่ 30, 10, 10 และ 20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)
	1.54	20	55.39	80	89.15	100	89.34	110
4.63	30	28.87	80	52.30	50	57.88	40	87.60
7.72	10	65.79	20	119.35	40	49.27	40	62.64
15.43	15	57.25	15	60.15	15	64.93	15	82.50

ตารางที่ 4.10 แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)
	1.54	20	62.25	100	102.78	100	118.42	10
4.63	20	85.48	20	101.44	20	104.92	20	129.90
7.72	10	75.18	20	135.07	30	70.37	20	86.53
15.43	10	95.70	5	131.45	5	164.22	5	178.00

ตารางที่ 4.11 แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส (%)
1.54	30	4.06	10	5.86	10	5.77	10	6.25
4.63	10	2.05	50	5.17	80	3.22	50	5.14
7.72	10	1.49	30	4.99	10	2.79	40	3.90
15.43	20	1.76	20	3.93	25	3.13	15	5.20

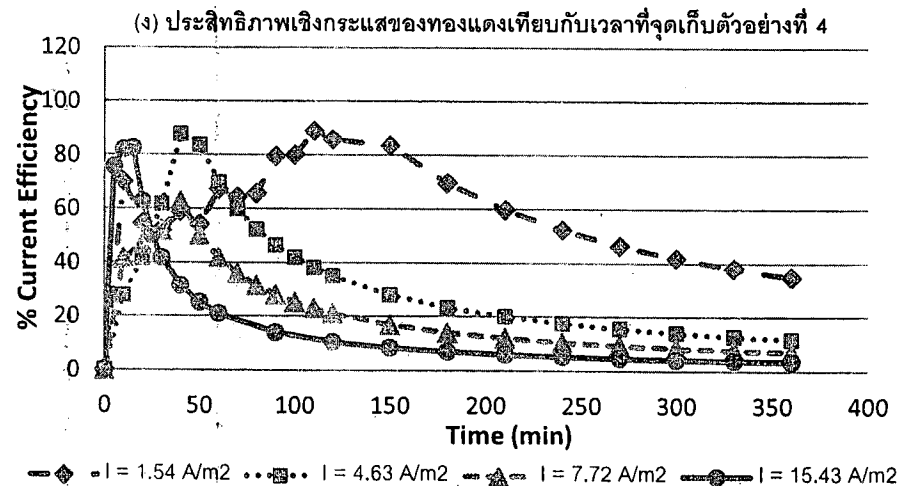
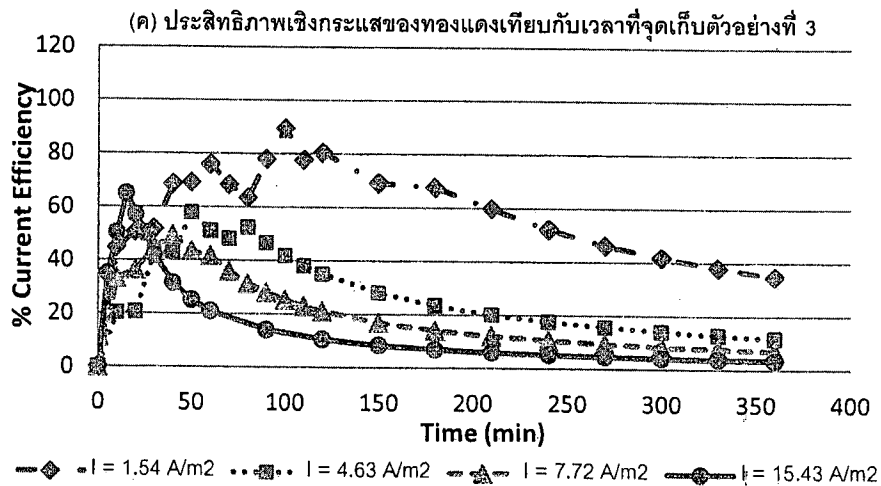
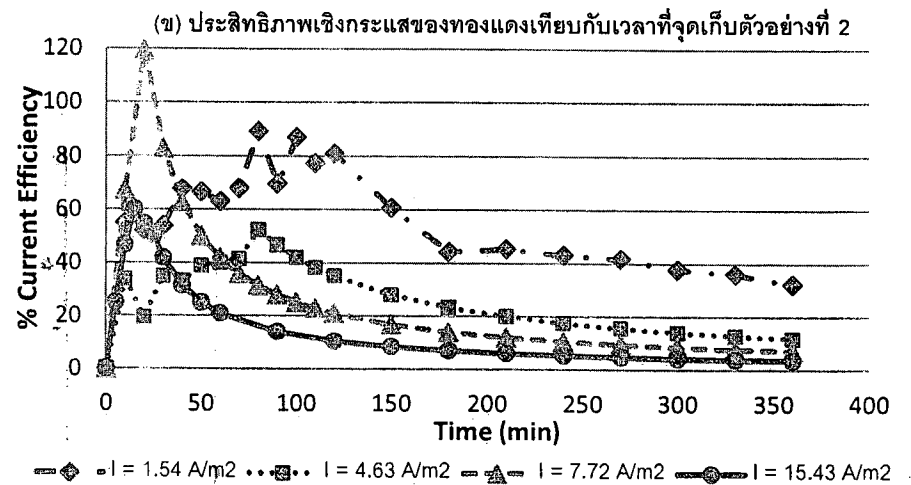
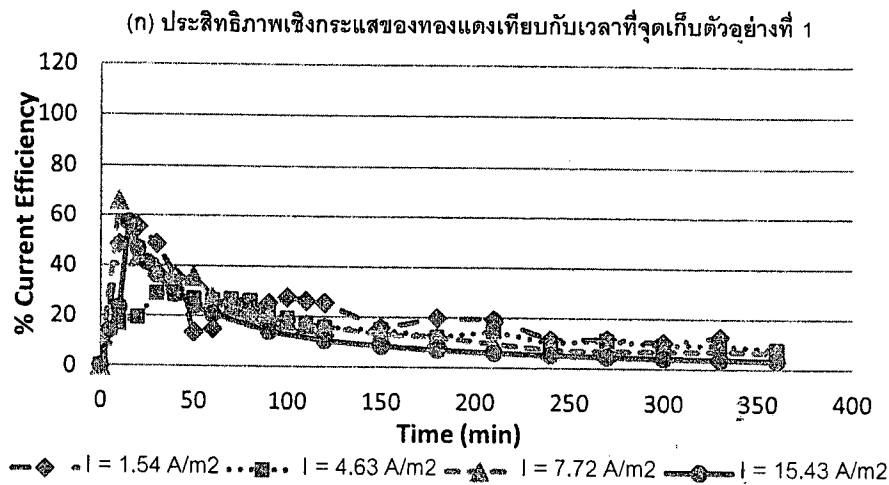
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 89.15, 52.30, 119.35 และ 60.15 ณ นาที่ที่ 80, 80, 20 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 102.78, 101.44, 135.07 และ 131.45 ณ นาที่ที่ 100, 20, 20 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 5.86, 5.17, 4.99 และ 3.93 ณ นาที่ที่ 10, 50, 30 และ 20 ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 89.34, 57.88, 49.27 และ 64.93 ณ นาที่ที่ 110, 50, 40 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 118.42, 104.92, 70.37 และ 164.22 ณ นาที่ที่ 100, 20, 30 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 5.77, 3.22, 2.79 และ 3.13 ณ นาที่ที่ 10, 80, 10 และ 25 ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 88.78, 87.60, 62.64 และ 82.50 ณ นาที่ที่ 110, 40, 40 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 165.18, 129.90, 86.53 และ 178.00 ณ นาที่ที่ 10, 20, 20 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 6.25, 5.14, 3.90 และ 5.20 ณ นาที่ที่ 10, 50, 40 และ 15 ตามลำดับ

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสจะมีค่าลดลงเมื่อผ่านค่าสูงสุดมาแล้ว ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายน้อย ณ เวลาดังกล่าว ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้ไปในระบบ ถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาดำเนินผ่านไป และพบว่าเวลาที่เกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสที่ไฟฟ้าให้กับระบบมีค่ามากขึ้น เช่น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่เวลา 80, 80, 20 และ 15 นาที เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

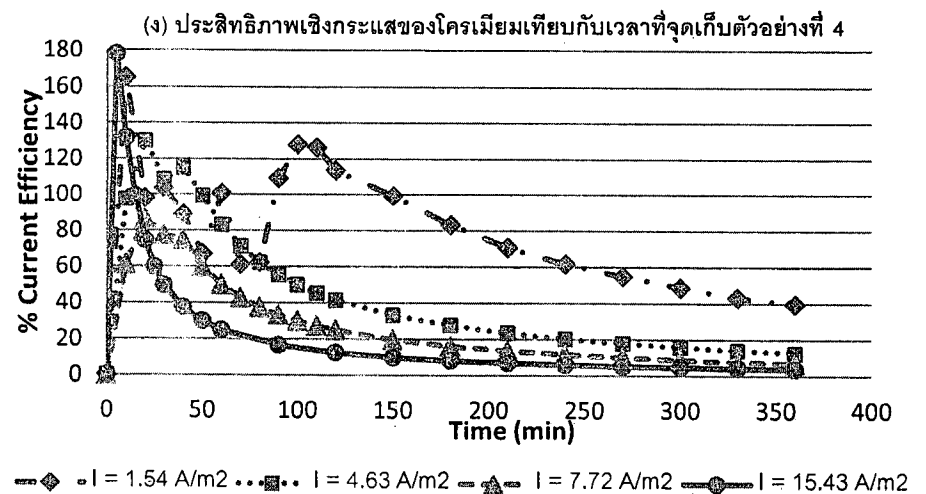
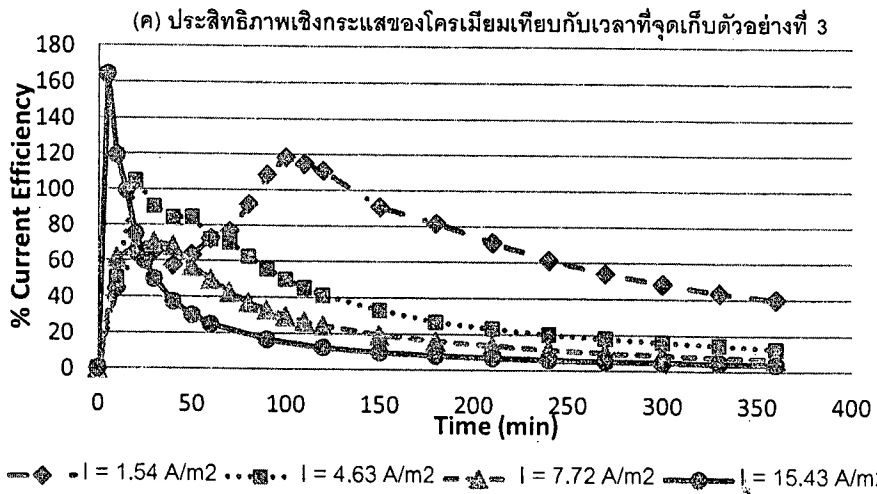
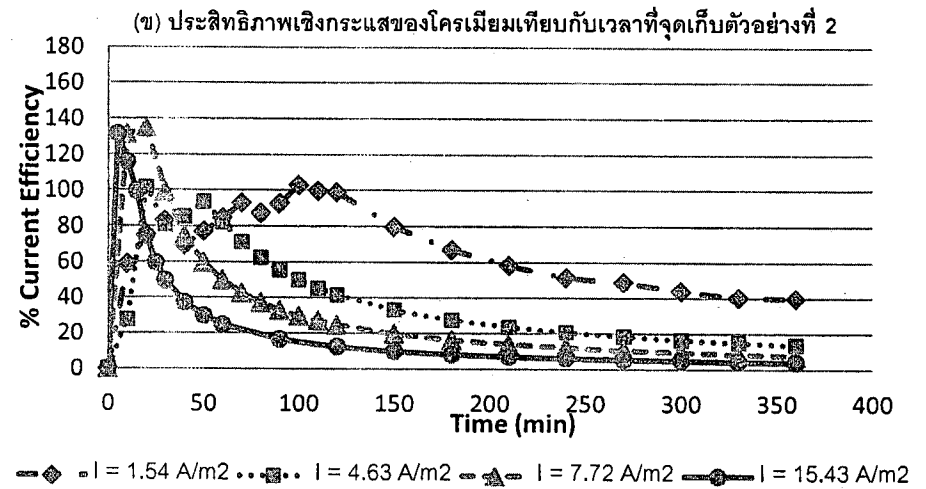
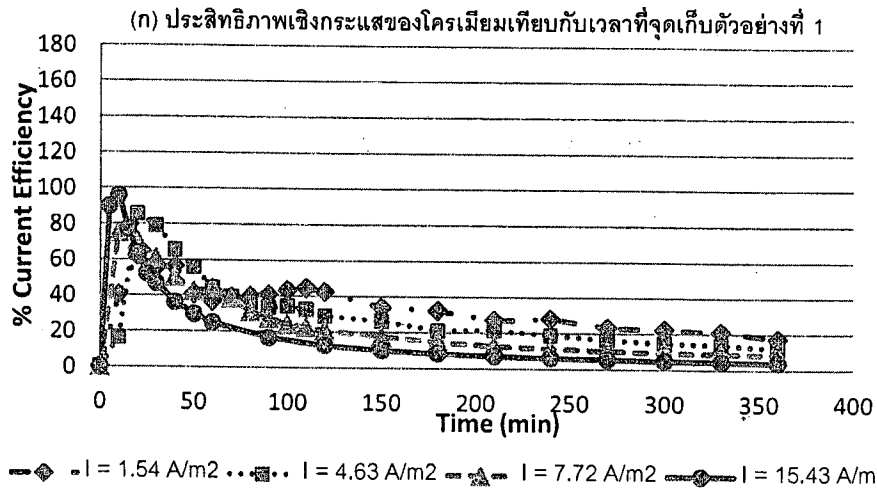
จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริง พบว่าเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที และควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 โดยสามารถกำจัดทองแดง ณ นาที่ที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น 248 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.84 สามารถกำจัดโครเมียม ณ นาที่ที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 161 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.85 และสามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาที่ที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 14 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 97.72 ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้กระแสไฟฟ้าเพียงจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 สามารถกำจัดทองแดงและโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ โดยไม่จำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 เพิ่มเติม



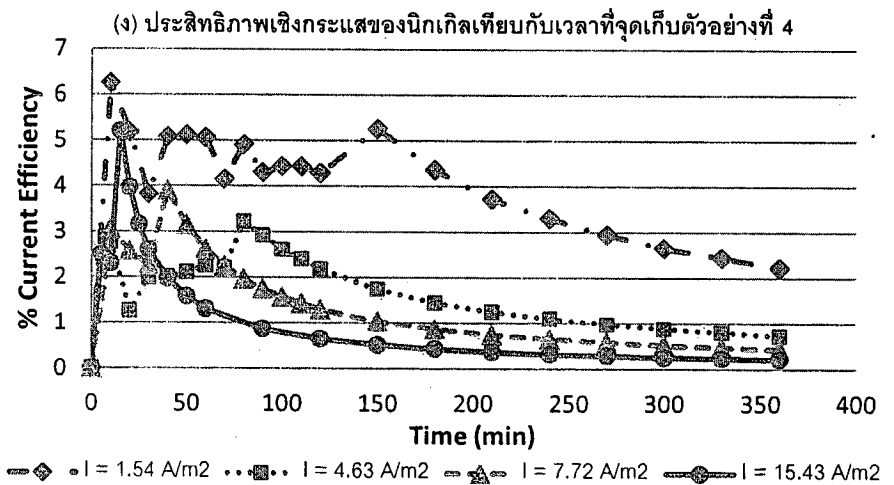
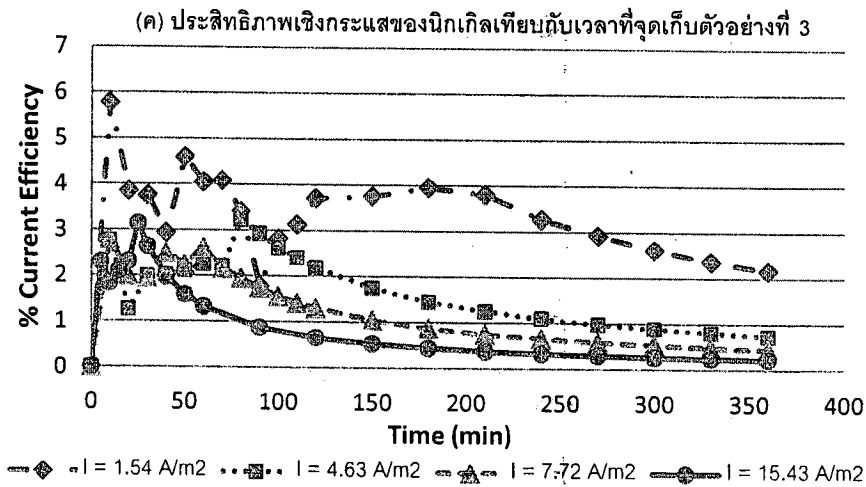
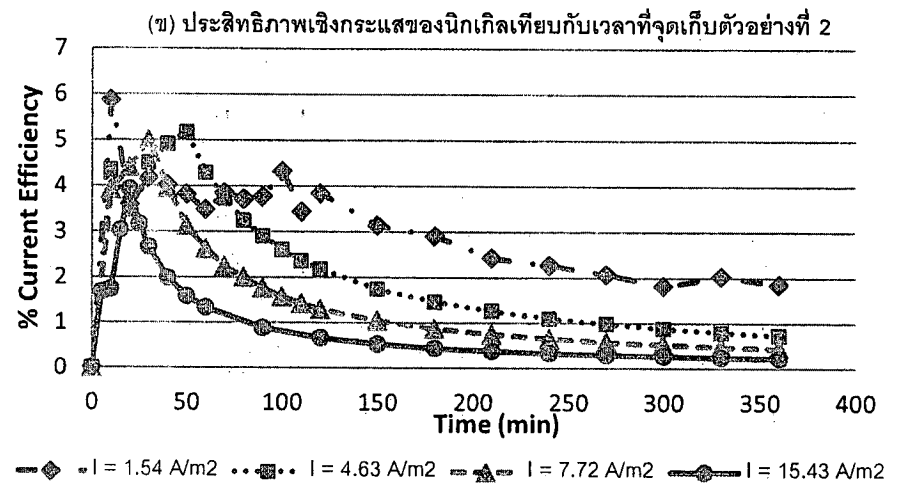
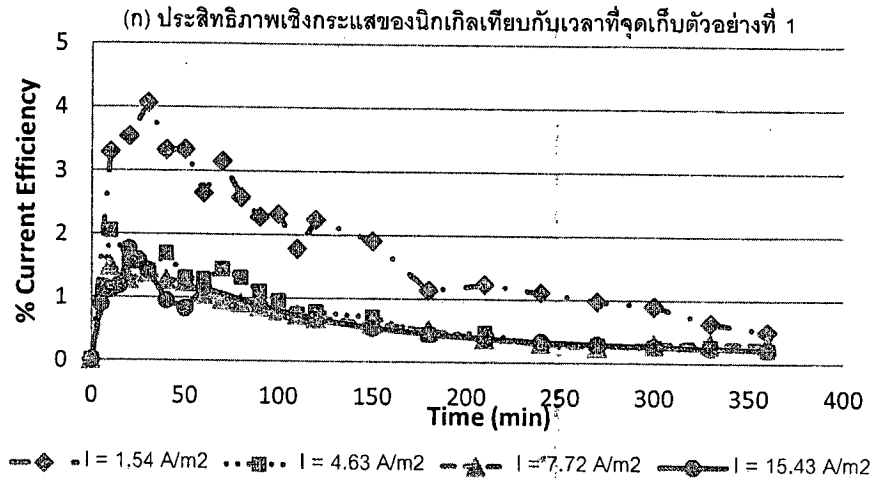
ภาพที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อ

ตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4

ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.13 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.5 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง มีค่าใช้จ่ายอยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือ ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการนี้จะไม่ขอคำนึงถึงค่าเครื่องมือ อันได้แก่ อุปกรณ์เครื่องแก้ว ปิเปต เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า และเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก เป็นต้น เนื่องจากราคาต้นทุนและขนาด/ปริมาณการใช้อุปกรณ์เหล่านี้ในระดับอุตสาหกรรมมีความแตกต่างจากระดับห้องปฏิบัติการค่อนข้างมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ จึงขอพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่าชั่วโมงไฟฟ้าเท่านั้น

##### 4.5.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม)

น้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (โซเดียมคลอไรด์ 29.25 กรัม) ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมคลอไรด์ 0.351 บาท ซึ่งถ้าน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมคลอไรด์ 351 บาท

##### 4.5.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางเคมีไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าโดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยเพียงใด ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า (kWh/m}^3\text{)} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาตรน้ำเสียที่บำบัด (L)}} \\ &= \frac{7.4 \text{ volt} \times 1 \text{ A} \times \left(\frac{25}{60}\right) \text{ hr}}{1 \text{ L}} \\ &= 3.08 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย  
ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่าหน่วย/หน่วย}) \\ &= 3.08 \times 2.5 \\ &= 7.7 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าสำหรับ 4 ช่องการบำบัดอยู่ที่ 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หากสามารถระงับการจ่ายไฟในช่องการบำบัดที่ 3 และ 4 ได้ กำลังไฟฟ้าที่ใช้และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าจะลดลงเหลือน้อยกว่า 3.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และ 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

จากผลการศึกษาเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) พบว่า Akbal และ Camci ใช้พลังงานไฟฟ้า 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 25.18 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิล แต่ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 3.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่า Akbal และ Camci ถึง 3 เท่า

#### 4.5.3. ค่าขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแกรไฟต์ โดยขั้วไฟฟ้าแคโทดขนาด 3 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 12 แผ่น ราคา 1,200 บาท และขั้วไฟฟ้าแอโนดขนาด 12 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ราคา 1,050 บาท รวมค่าขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทดและแอโนดเท่ากับ 2,250 บาท

#### 4.6 แนวคิดการนำไปใช้งานจริง

##### Plant Scale

อัตราการน้ำเสียไหลก่อนเข้าถังบำบัดเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (โรงงานขนาดเล็ก) ระยะเวลาที่เก็บน้ำสำหรับวิธีการเคมีไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ 180 นาที

คำนวณ

$$\begin{aligned}\text{ขนาดถังบำบัด} &= 180 \text{ min} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ day}} \\ &= 0.125 \text{ m}^3\end{aligned}$$

ในงานวิจัยนี้ ใช้พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; AV) ผึ่ง  
ขั้วแคโทดเท่ากับ 64.8 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}\frac{A}{V} &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \\ \frac{A}{0.125 \text{ m}^3} &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \\ \therefore A &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \times 0.125 \text{ m}^3 = 8.1 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ขนาดขั้วไฟฟ้า (A)} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\ &= 0.35 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 2 \text{ ด้าน} \times 12 \text{ แผ่น} \\ &= 8.4 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\therefore \frac{A}{V} = \frac{8.4 \text{ m}^2}{0.125 \text{ m}^3} = 67.2 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned}\text{กระแสไฟฟ้า (A)} &= \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m}^2) \times \text{พื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด (m}^2) \\ &= 15.43 \text{ (A/m}^2) \times 8.4 \text{ m}^2 \\ &= 130 \text{ A}\end{aligned}$$

ในการออกแบบสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ใช้ถังบำบัดขนาด 0.125 ลูกบาศก์  
เมตร ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 1 เมตร จำนวน 12 แผ่น และให้กระแสไฟฟ้า 130  
แอมแปร์