

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการกำจัดโลหะหนักสามชนิดในน้ำเสียซีโอดี คือ โครเมียม เงิน และปรอท ซึ่งจะใช้น้ำเสียซีโอดีเจือจางในการทดลอง (น้ำเสียซีโอดีเจือจาง หมายถึง การนำน้ำเสียซีโอดีมาเจือจาง 10 เท่าด้วยน้ำกลั่น) ส่วนภาพรายละเอียดของผลการทดลอง จะแสดงในภาคผนวก ก.

ผลการศึกษานี้สำหรับงานวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 1** ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจางต่อการตกตะกอนโลหะหนัก คือ โครเมียม เงิน และปรอท

**การทดลองที่ 2** ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้น และชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม
- 2) ศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม
- 3) คำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น เพื่อใช้วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

**การทดลองที่ 3** การทดลองระบบบำบัดน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปตามชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม และศึกษาถึงชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

#### 4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง ต่อการตกตะกอนของโลหะหนัก

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ คือ โครเมียม เงิน และปรอท ในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง ภายหลังจากการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ทราบว่าค่าพีเอชจะมีผลต่อปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำเสียซีโอดีเจือจางอย่างไร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลองที่ 2 ต่อไป ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์		ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก. / ล.)		
	มล.	กรัม / ลิตร	โครเมียม	เงิน	ปรอท
0.3	0	0	49.8	223.1	354.2
1	73.2	36.6	46.5	199.5	298.2
3	128.4	64.2	44.7	191.4	173.8
5	130.5	65.3	1.98	179.9	93.2
7	131.1	65.6	0.21	131.4	85.6

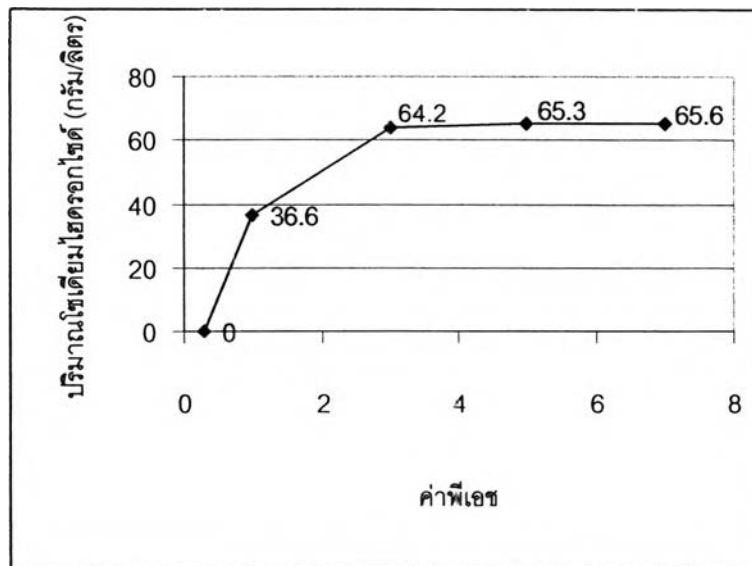
หมายเหตุ : ค่าพีเอช 0.3 คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียซีโอดีเจือจางที่ยังไม่ปรับค่าพีเอช

#### 4.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

น้ำเสียซีโอดีเจือจางมีค่าพีเอชเท่ากับ 0.3 ดังนั้นเมื่อต้องการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าต่างๆ ช่างต้นจำเป็นต้องใช้สารเคมีปรับพีเอชที่ให้สภาพต่าง ซึ่งในที่นี้จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50 % เป็นสารปรับพีเอช ซึ่งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (จากรูปที่ 4.1) เมื่อต้องการปรับพีเอชเริ่มต้นจาก 0.3 ให้เป็น 1 และ 3 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากถึง 36.6 และ 64.2 กรัม/ลิตร ตามลำดับ แต่สำหรับการปรับพีเอชเป็น 5 และ 7 ต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่แตกต่างกับการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 มากนัก คือ มีความต้องการเท่ากับ 65.3 และ 65.6 กรัม/ลิตร ตามลำดับ

ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่า น้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำมักมีสภาพกรด และมีปริมาณไอออนไฮโดรเจนสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชสูงกว่า) ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นย่อมทำให้มีความสามารถในการสะเทินสภาพต่างได้ในปริมาณสูงด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องให้ปริมาณสารปรับพีเอชในปริมาณมากจึงจะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างการคำนวณ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ที่พีเอชเท่ากับ 1 มี [H}^+ \text{]} &= 0.1 \text{ โมล/ลิตร} \\
 \text{ที่พีเอชเท่ากับ 2 มี [H}^+ \text{]} &= 0.01 \text{ โมล/ลิตร} \\
 \text{ที่พีเอชเท่ากับ 3 มี [H}^+ \text{]} &= 0.001 \text{ โมล/ลิตร}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.1 ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น

ดังนั้น ถ้าต้องการปรับค่าพีเอชจาก 1 เป็น 2 ต้องทำให้ความเข้มข้นของ  $[H^+]$  ลดลงหรือต้องการปริมาณ  $[OH^-]$  มาสะท้อน  $= 0.1 - 0.01 = 0.09$  โมล/ลิตร

ถ้าต้องการปรับค่าพีเอชจาก 2 เป็น 3 ต้องทำให้ความเข้มข้นของ  $[H^+]$  ลดลง หรือต้องการปริมาณ  $[OH^-]$  มาสะท้อน  $= 0.01 - 0.001 = 0.009$  โมล/ลิตร

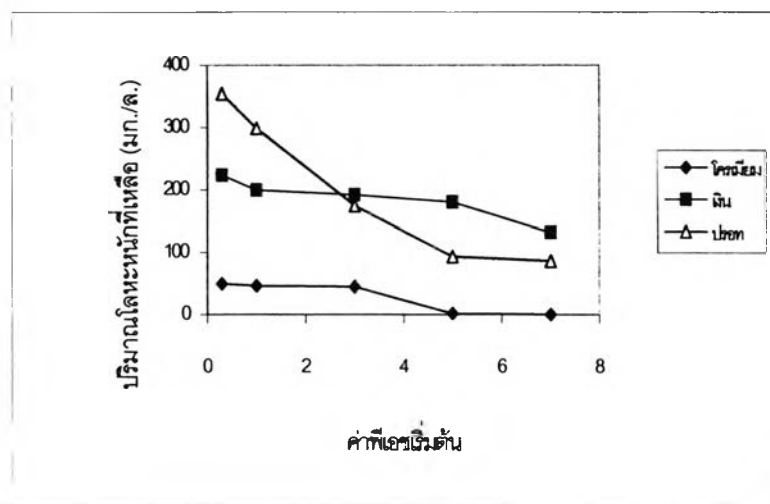
จากการคำนวณข้างต้นพบว่า การปรับค่าพีเอชจาก 1 เป็น 2 ต้องใช้ปริมาณอิออนไฮดรอกไซด์มากกว่าการปรับค่าพีเอชจาก 2 เป็น 3 ประมาณ 10 เท่า แต่การคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งเป็นการสมมติว่าในน้ำมีเฉพาะ  $[H^+]$  และ  $[OH^-]$  เท่านั้น แต่การทดลองจริงอาจได้ผลไม่ตรงกับค่าที่คำนวณ เนื่องจากอิออนไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปอาจทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ในน้ำเสียซีไอดีเจือจางด้วย

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโลหะหนัก คือ โครเมียม เงิน และปรอท มีปริมาณลดลงเมื่อมีการปรับค่าพีเอชสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากกลไกการสร้างตะกอนผลึกทางเคมี เนื่องจากใช้สารละลายไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช ดังนั้นจึงเป็นการเติมปริมาณไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ลงในน้ำเสียซีไอดีเจือจางมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาร่างตะกอนแข็งของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจางจึงมีปริมาณลดลง ประกอบกับการเพิ่มพีเอชจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักลดลง

#### 4.1.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชสูงขึ้น ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจางจะมีปริมาณลดลง โดยเฉพาะเมื่อปรับค่าพีเอชจาก 3 ไปเป็น 5 อัตราการลดลงของโครเมียมจะลดลงอย่างมาก รองลงมา คือ เงินและปรอท ตามลำดับ ในขณะที่การปรับค่าพีเอชจาก 3 ไปเป็น 5 จะใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับพีเอชในช่วงจาก 0.3 ถึง 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงค่าพีเอช 3 ถึง 5 แม้ว่าจะเติมปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH) น้อยลง แต่ปริมาณโลหะหนักลดลงมากขึ้น คือ โครเมียม เงิน และปรอท ตามลำดับ

แนวโน้มในการลดลงของปริมาณโลหะหนัก จะพิจารณาได้จาก รูปที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าในช่วงพีเอช 0.3 ถึง 5 ปริมาณปรอทมีอัตราการลดลงค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับปริมาณโครเมียม ในช่วงพีเอช 0.3 ถึง 3 อัตราการลดลงไม่มากนัก แต่สำหรับช่วงพีเอชจาก 3 ถึง 5 อัตราการลดลงมากขึ้น ส่วนการลดลงของเงินก็จะคล้ายกับโครเมียม แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.2 นี้ ปริมาณเงินและปรอทจะมีแนวโน้มลดลงไม่มากนัก เนื่องจากค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นจากการปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไม่ทำให้ปริมาณเงินและปรอทลดลงอีกมากนัก



รูปที่ 4.2 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือกับค่าพีเอชเริ่มต้น

สำหรับค่าพีเอช 7 ปริมาณโลหะหนักจะเหลือน้อยที่สุด แต่ปริมาณโครเมียมเหลือเท่ากับ 0.21 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่มากกว่า 0.75 มก./ล.) ซึ่งถ้าทำการทดลองที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 7 ปริมาณโครเมียมในน้ำต่ำกว่าค่ามาตรฐานแล้ว

ดังนั้นในการทดลองที่ 2 จะใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 0.3 , 1 , 3 และ 5 เท่านั้น โดยไม่ทำการทดลองที่สภาวะที่เป็นต่าง เพื่อศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักเท่านั้น ไม่ใช่เกิดจากการเติมสารละลายไฮดรอกไซด์

## 4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมหมายถึงการหาค่าต่าง ๆ ที่เหมาะสม คือ ค่าพีเอชเริ่มต้น ชนิดของขั้วไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อใช้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ในการทดลอง จะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียซีโอดีเจือจางลดลง โดยใช้ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัด และค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ง.) เป็นเกณฑ์ในการหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดค่าสูงสุดของปรอทและโครเมียม ( $Cr^{+3}$ ) ไว้ไม่เกิน 0.005 และ 0.75 มก./ล. ตามลำดับ แต่ไม่ได้กำหนดค่าสูงสุดของโลหะเงินเอาไว้ อย่างไรก็ตามนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งได้กำหนดค่าสูงสุดของเงินในน้ำทิ้งไว้ไม่เกิน 1.0 มก./ล. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบค่าของโลหะเงินตามข้อกำหนดดังกล่าวด้วย (พัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร , 2545)

ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน โดยในสองขั้นตอนแรกจะเป็นการหาสภาวะต่าง ๆ คือ การหาค่าพีเอชเริ่มต้น ชนิดของขั้วไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจางให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง ส่วนในขั้นตอนที่สามจะวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้ในการสรุปหาสภาวะที่เหมาะสม

### 4.2.1 ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า และค่าพีเอชเริ่มต้น

#### 4.2.1.1 ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและคาร์บอน

ในการทดลองนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าคือ อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด ส่วนคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด โดยทำการทดลองที่พื้นที่หน้าตัดประมาณ  $6.5 \times 7$  ซม. ต่อน้ำเสียซีโอดีเจือจาง 1 ลิตร หรือมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $45.5$  ตร.ซม./น้ำเสีย 1 ลิตร แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสีย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.2

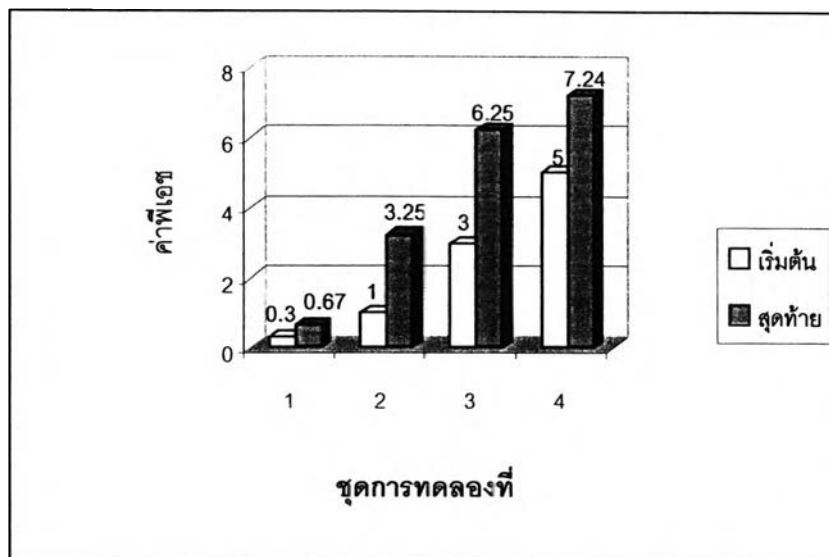
ตารางที่ 4.2 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน

ค่าพีเอช		ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ค่าความ ต่างศักย์ ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแส ไฟฟ้า (แอมแปร์)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.3	0.67	626	357	29.0	35.7	27.3	6.33
1	3.25	622	287	33.3	41.2	32.7	6.33
3	6.25	498	252	31.9	40.3	43.2	6.33
5	7.24	376	231	33.3	41.1	46.8	6.33

หมายเหตุ : - เริ่มต้น หมายถึง ค่าที่วัดก่อนเริ่มการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี  
 - สุดท้าย หมายถึง ค่าที่วัดหลังเสร็จสิ้นการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

#### 1) ค่าพีเอช

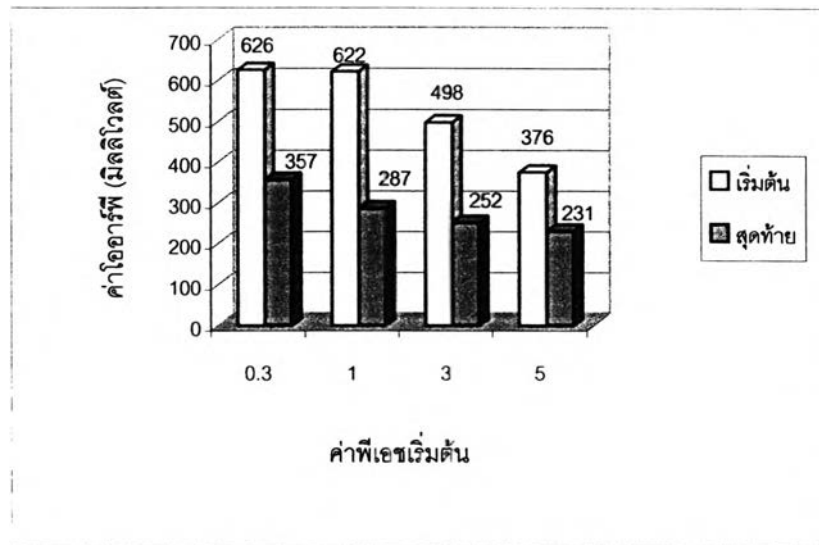
ในแต่ละชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 คือมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 1 3 และ 5 ตามลำดับ จะพบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะมีค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งการที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดอออนไฮดรอกไซด์ (OH) ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมี แต่สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้น 0.3 จะทำให้เกิดค่าพีเอชสุดท้ายเพียง 0.67 ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น 1 3 และ 5 ซึ่งเป็นเช่นนี้ อาจเป็นเพราะที่สภาวะกรดมีปริมาณอออนไฮโดรเจนสูง ทำให้ปริมาณอออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับอออนไฮโดรเจน ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมได้จากหัวข้อ 4.1.1



รูปที่ 4.3 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

## 2) ค่าไออาร์พี

ค่าไออาร์พีเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้สภาวะการทำงานของระบบทางชีวภาพหรือปฏิกิริยาทางเคมีของระบบว่าค่าไออาร์พีที่มีค่าเป็นบวก แสดงว่าอยู่ในปฏิกิริยารีดักชันหรืออยู่ในสภาวะแอโรบิก แต่ถ้าค่าไออาร์พีมีค่าเป็นลบแสดงว่าอยู่ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรืออยู่ในสภาวะแอนแอโรบิก จากตารางที่ 4.2 พบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น ค่าไออาร์พีจะมีค่าลดลง แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนไปสู่ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งในขณะที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ก็จะมีค่าไออาร์พีลดลงเช่นกัน แต่ลดลงในปริมาณที่ไม่มากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง ดังแสดงได้ตามรูปที่ 4.4

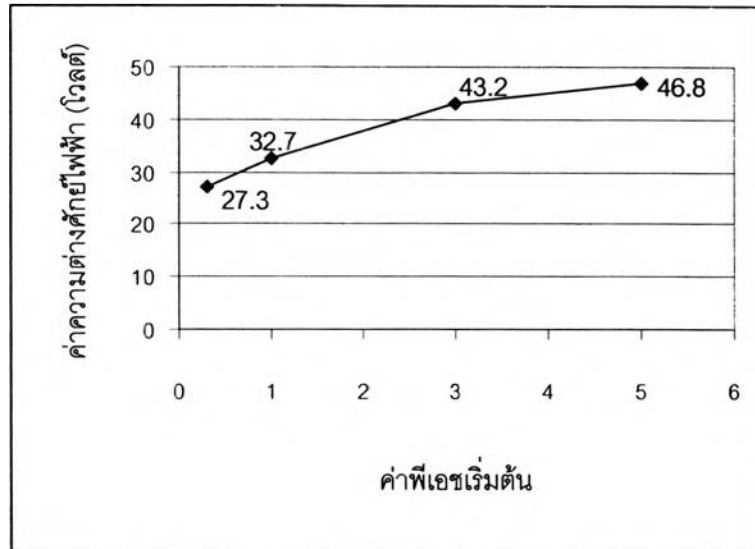


รูปที่ 4.4 ค่าโออาร์พีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซีวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

### 3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า

จากแผนการทดลอง ในการทดลองที่ 2 ชั้นตอนที่ 1 เมื่อเริ่มในแต่ละการทดลอง (ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น) จะปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่าที่เครื่อง DC Power Supply จะสามารถจ่ายได้ ดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถปรับได้จะมีค่าสูงขึ้นด้วย คือ ที่พีเอชเริ่มต้น 0.3 1 3 และ 5 จะสามารถปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ที่ 27.3 32.7 43.2 และ 46.8 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการที่น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นต่ำ อีออนในน้ำมีการแตกตัวได้ดี ดังนั้นค่าความต้านทานจะต่ำ ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าต่ำด้วย (จาก  $V = IR$  เมื่อกระแสมีค่าคงที่) ซึ่งเมื่อมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น อีออนในน้ำทำปฏิกิริยากัน มีการแตกตัวได้น้อยลง ทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่สำหรับที่ค่าพีเอชเริ่มต้นจาก 3 ไปเป็น 5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่าอีออนมีการแตกตัวดีขึ้นไม่มากนัก



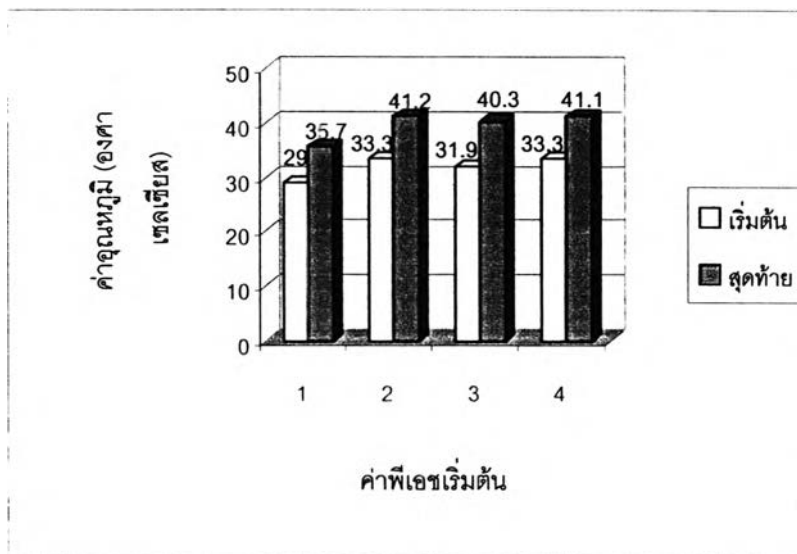


รูปที่ 4.5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น  
สำหรับขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน

สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่าย จะเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจะสามารถจ่ายได้ นั่นคือ ประมาณ 6.33 แอมแปร์ เนื่องจากเมื่อปรับไปที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าที่จ่ายควรจะมีค่ามากกว่า 6.33 แอมแปร์ แต่เครื่องมีความสามารถในการจ่ายไฟสูงสุดเพียง 6.33 แอมแปร์ เท่านั้น (จากกฎของโอห์ม  $V = IR$ ) แสดงว่า ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจะมีค่าคงที่ คือ 6.33 แอมแปร์ (ดังตารางที่ 4.2)

#### 4) ค่าอุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้จะทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.2 ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่า 29.0 33.3 31.9 และ 33.3 องศาเซลเซียส แต่หลังจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสุดท้ายจะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 35.7 41.2 40.3 และ 41.1 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss) (กัณฑมาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)



รูปที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

#### 5) ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากการทดลอง (ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4) พบว่าเมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจะมีปริมาณลดลง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชสุดท้าย	ปริมาณโลหะหนัก (มก. / ล.)					
		โครเมียม		เงิน		ปรอท	
		เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
0.3	0.67	49.8	43.1	223.1	2.35	354.2	15.4
1	3.25	46.5	38.2	199.5	0.92	298.5	1.37
3	6.25	44.7	1.83	191.4	0.43	173.8	0.60
5	7.24	1.98	1.56	179.9	0.41	93.2	12.91

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับซัลฟูเนียมและคาร์บอน

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	โครเมียม	เงิน	ปรอท
0.3	13.45	98.97	95.65
1	17.85	99.54	99.54
3	95.91	99.78	99.65
5	21.21	99.77	86.15

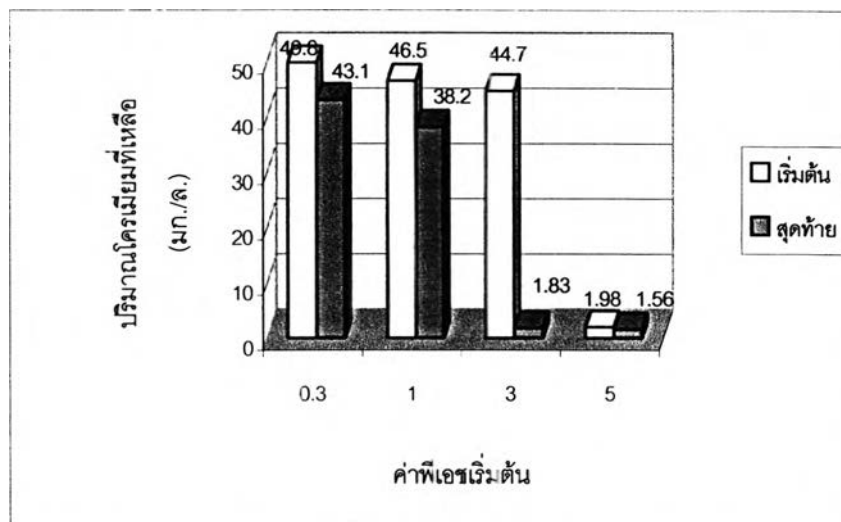
### ก. โครเมียม

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสีย 49.8 46.5 44.7 และ 1.98 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ซัลฟูเนียมและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงเป็น 43.1 38.2 1.83 และ 1.56 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.7) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมแล้วจะมีค่า 13.45 17.85 95.91 และ 21.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.10)

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 95.91 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 แม้จะสามารถบำบัดจนมีปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียเพียง 1.56 มก./ล. แต่เป็นการบำบัดจากปริมาณโครเมียมเริ่มต้น 1.98 มก./ล. ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดจึงมีค่าน้อยเพียง 21.21 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยสภาวะนี้ ยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.75 มก.ล.)

### ข. เงิน

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณเงินเริ่มต้นในน้ำเสีย 223.1 199.5 191.4 และ 179.9 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ซัลฟูเนียมและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณเงินลดลงเป็น 2.35 0.92 0.43 และ 0.41 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมแล้ว จะมีค่า 98.97 99.54 99.78 และ 99.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.10)

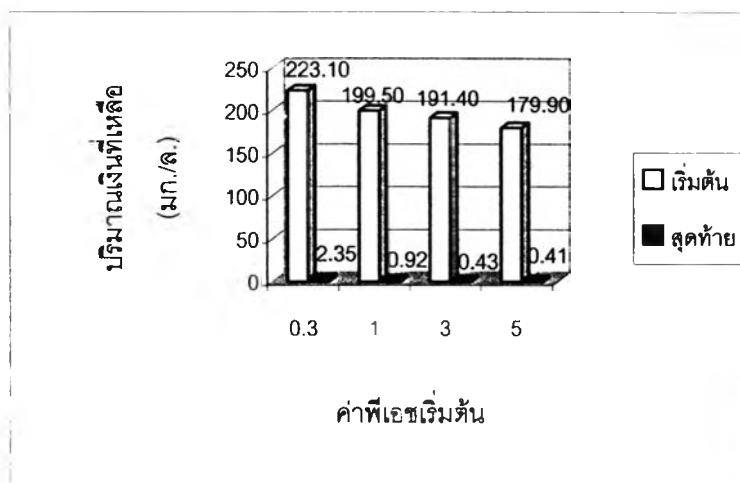


รูปที่ 4.7 ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอน

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.78 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอื่นก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี สามารถลดปริมาณเงินได้ค่อนข้างสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่สภาวะนี้จะสามารถกำจัดเงินได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ค่าปริมาณเงินที่เหลือในน้ำเสียหลังจากการบำบัดก็มีค่าเพียง 0.92 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.2 (ไม่เกิน 1 มก./ล.)

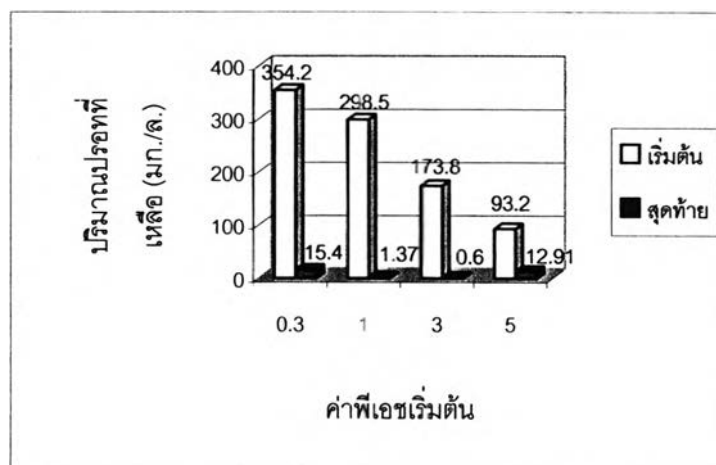
### ค. พรอท

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณพรอทเริ่มต้นในน้ำเสีย 354.2 298.5 173.8 และ 93.2 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอน เป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณพรอทลดลงเป็น 15.4 1.37 0.60 และ 12.91 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.9) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดพรอทแล้ว จะมีค่า 95.65 99.54 99.65 และ 86.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.10)

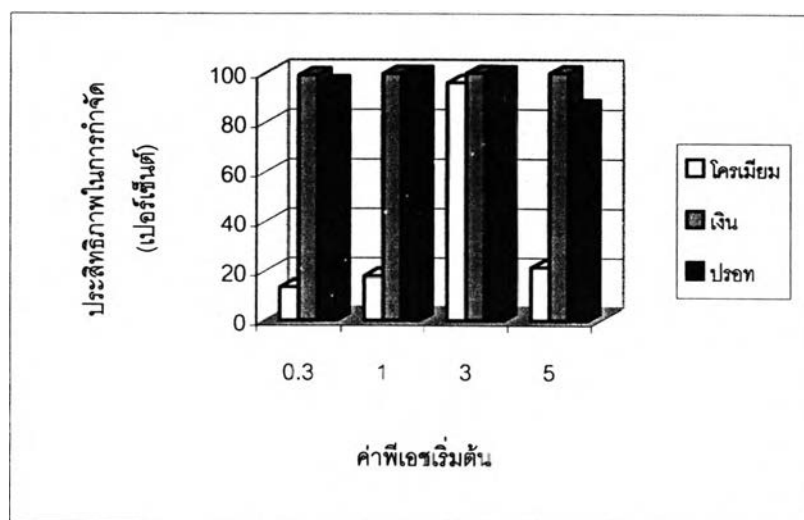


รูปที่ 4.8 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.65 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอื่นก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่สามารถลดปริมาณปรอทได้ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับปริมาณปรอทเริ่มต้นในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณปรอทที่เหลือในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยสภาวะนี้ยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.005 มก./ล.)



รูปที่ 4.9 ปริมาณปรอทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับข้าวอะลูมิเนียมและคาร์บอน

#### 4.2.1.2 ชั่วไฟฟ้าเหล็กและคาร์บอน

ในการทดลองนี้จะใช้ชั่วไฟฟ้าคือ เหล็กเป็นขั้วแอโนด ส่วนคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด โดยทำการทดลองที่พื้นที่หน้าตัดประมาณ  $6.5 \times 7$  ซม. ต่อน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 1 ลิตร หรือมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45.5 ตร.ซม./น้ำเสีย 1 ลิตร แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสีย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับชั่วเหล็กและคาร์บอน

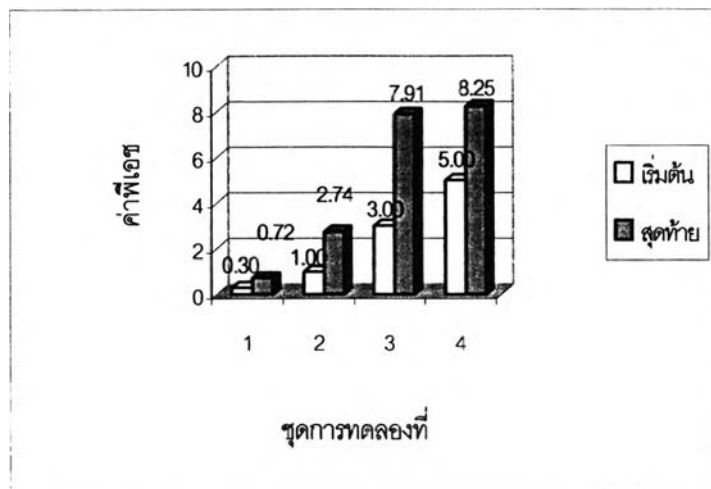
ค่าพีเอช		ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.3	0.72	625	277	30.7	32.4	2.8	6.33
1	2.74	620	264	31.2	35.7	5.3	6.33
3	7.91	482	-185	30.8	32.7	6.1	6.33
5	8.25	423	-183	30.9	32.5	8.7	6.33

- หมายเหตุ : - เริ่มต้น หมายถึง ค่าที่วัดก่อนเริ่มการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี  
 - สุดท้าย หมายถึง ค่าที่วัดหลังเสร็จสิ้นการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

##### 1) ค่าพีเอช

ในแต่ละชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 คือมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 1 3 และ 5 จะพบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะมีค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้นคือ 0.72 2.74 7.91 และ 8.25 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งการที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดอิออนไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมี แต่สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้น 0.3 จะทำให้เกิดค่าพีเอชสุดท้ายเพียง 0.72 ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น 1 3 และ 5 ซึ่งที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะที่สภาวะกรด มีปริมาณอิออนไฮโดรเจนสูง ทำให้ปริมาณอิออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีปริมาณไม่

เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับอออนไฮโดรเจน ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมได้จากหัวข้อ 4.1.1

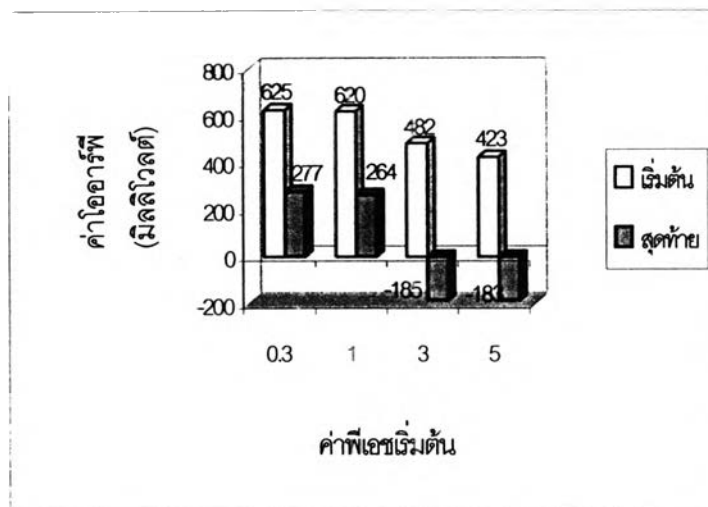


รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวเหล็กและคาร์บอน

## 2) ค่าไออาร์พี

จากตารางที่ 4.5 พบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 ค่าไออาร์พีจะมีค่าลดลง โดยค่าไออาร์พีเริ่มต้นมีค่า 625 482 และ 423 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และค่าไออาร์พีสุดท้ายมีค่า 277 264 -185 และ -183 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าไออาร์พีเริ่มต้นจะมีค่าเป็นบวกแสดงว่าในน้ำมีสารรับอิเล็กตรอน แต่หลังจากที่ผ่านการบำบัดแล้ว ค่าไออาร์พีจะมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 3 และ 5 ค่าไออาร์พีสุดท้ายจะมีค่าติดลบ แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาในการกำจัดอออนของโลหะหนักในน้ำเสียได้ดีขึ้นด้วย



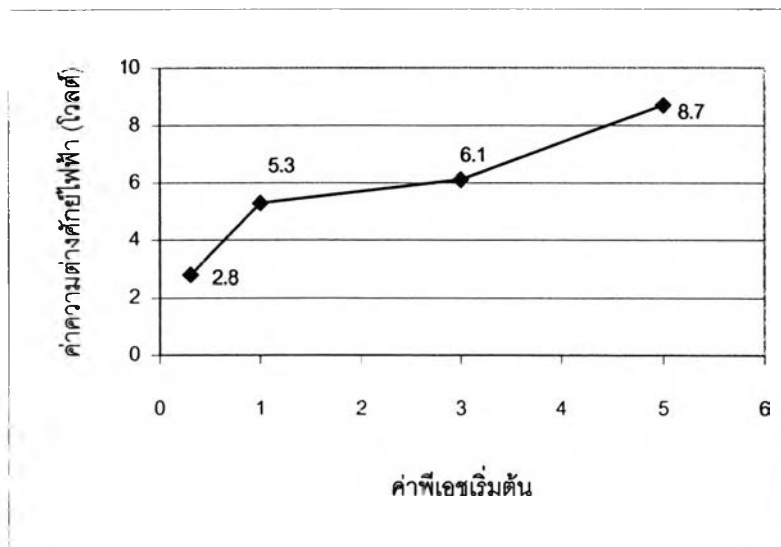


รูปที่ 4.12 ค่าโออาร์พีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน

### 3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.5 พบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น 0.3 1 3 และ 5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 2.8 5.3 6.1 และ 8.7 โวลต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง DC Power Supply ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะสามารถจ่ายได้ นั่นคือ 6.33 แอมแปร์ ดังนั้นในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ คือ 6.33 แอมแปร์

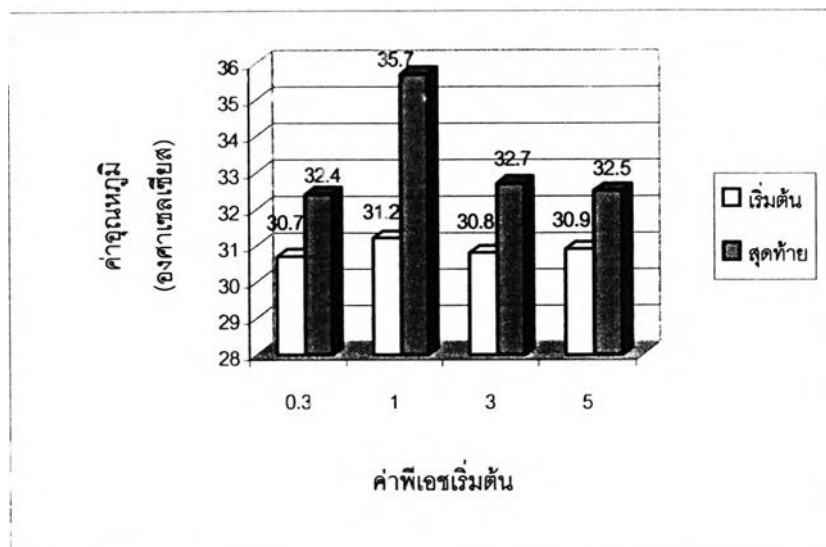
ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจ่ายได้ จะเห็นได้ว่ามีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่าที่สภาวะในหัวข้อ 4.2.1.1 ซึ่งใช้ขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า คือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 27.3 32.7 43.2 และ 46.8 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการที่ขั้วเหล็กมีค่าความต้านทานต่ำกว่าขั้วอะลูมิเนียม ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจ่ายกระแสไฟตรงจะสามารถจ่ายได้มีค่าต่ำกว่า ซึ่งทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าลงได้ ถ้ามีการบำบัดที่สภาวะเดียวกันกับขั้วอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.13 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น  
สำหรับขั้วเหล็กและคาร์บอน

#### 4) ค่าอุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ จะทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.5 ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 0.3 1 3 และ 5 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่า 30.7 31.2 30.8 และ 30.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่หลังจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิสุดท้ายจะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 32.4 35.7 32.7 และ 32.5 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss)



รูปที่ 4.14 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและคาร์บอน

#### 5) ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการทดลอง (ดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7) การบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี จะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีปริมาณน้อยลง ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับซั้วเหล็ก และคาร์บอน

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชสุดท้าย	ปริมาณโลหะหนัก (มก. / ล.)					
		โครเมียม		เงิน		ปรอท	
		เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
0.3	0.72	49.8	39.7	223.1	1.39	354.2	11.7
1	2.74	46.5	34.3	199.5	0.31	298.5	1.91
3	7.91	44.7	1.44	191.4	0.09	173.8	0.08
5	8.25	1.98	1.69	179.9	0.75	93.2	7.02

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอน

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	โครเมียม	เงิน	ปรอท
0.3	20.28	99.38	96.70
1	26.24	99.84	99.36
3	96.78	99.95	99.95
5	14.65	99.58	92.47

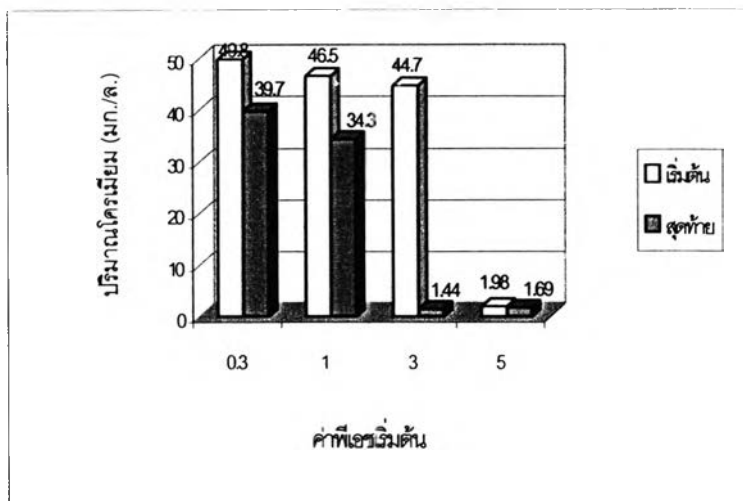
### ก. โครเมียม

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสีย 49.8 46.5 44.7 และ 1.98 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงเป็น 39.7 34.3 1.44 และ 1.69 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.15) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมแล้ว จะมีค่า 20.28 26.24 96.78 และ 14.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.18)

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 96.78 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 แม้จะสามารถบำบัดจนมีปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียเพียง 1.69 มก./ล. แต่เป็นการบำบัดจากปริมาณโครเมียมเริ่มต้น 1.98 มก./ล. ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดจึงมีค่าน้อยเพียง 14.65 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยสภาวะนี้ ยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.75 มก.ล.)

### ข. เงิน

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณเงินเริ่มต้นในน้ำเสีย 223.1 199.5 191.4 และ 179.9 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณเงินลดลงเป็น 1.39 0.31 0.09 และ 0.75 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.16) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเงินแล้ว จะมีค่า 99.38 99.84 99.95 และ 99.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.18)

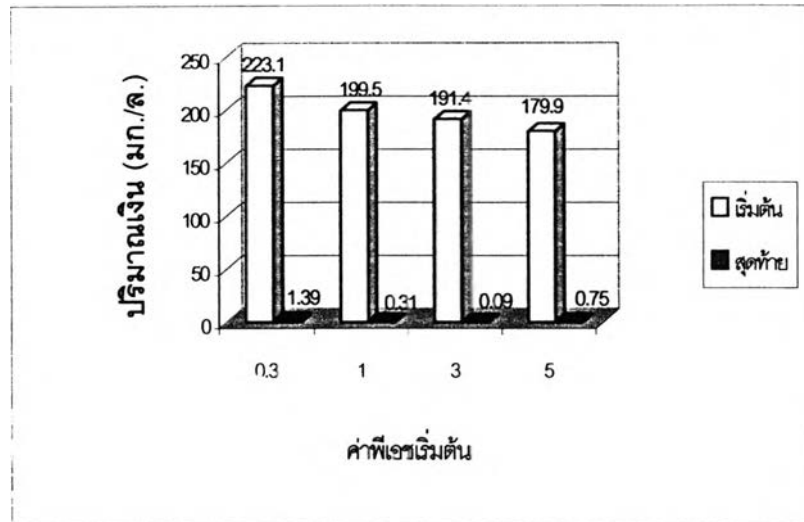


รูปที่ 4.15 ปริมาณโคโรเนียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซัลเฟอร์และคาร์บอน

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าที่สภาวะในหัวข้อ 4.2.1.1 (ซัลเฟอร์และคาร์บอน) ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอื่นก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี สามารถลดปริมาณเงินได้ค่อนข้างสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่สภาวะนี้จะสามารถกำจัดเงินได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1 ค่าปริมาณเงินที่เหลือในน้ำเสียหลังจากการบำบัดก็มีค่าเพียง 0.31 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.2 (ไม่เกิน 1 มก./ล.)

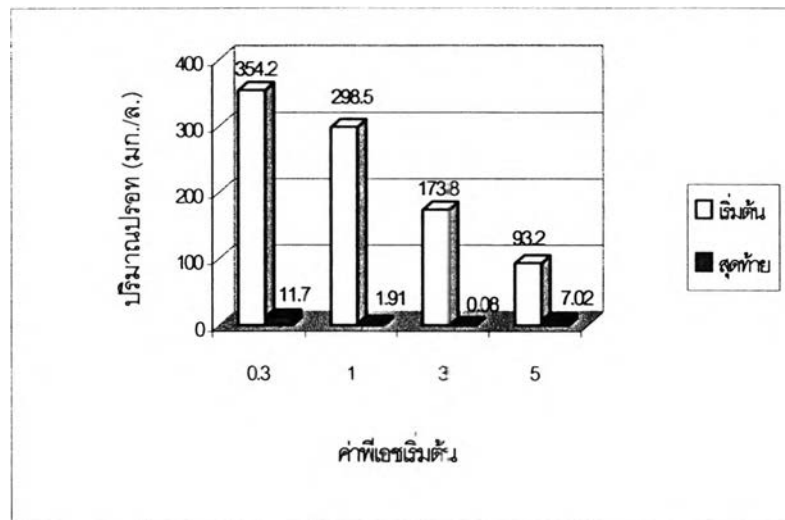
### ค. พรอท

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณพรอทเริ่มต้นในน้ำเสีย 354.2 298.5 173.8 และ 93.2 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณพรอทลดลงเป็น 11.7 1.91 0.08 และ 7.02 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.17) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดพรอทแล้ว จะมีค่า 96.70 99.36 99.95 และ 92.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.18)

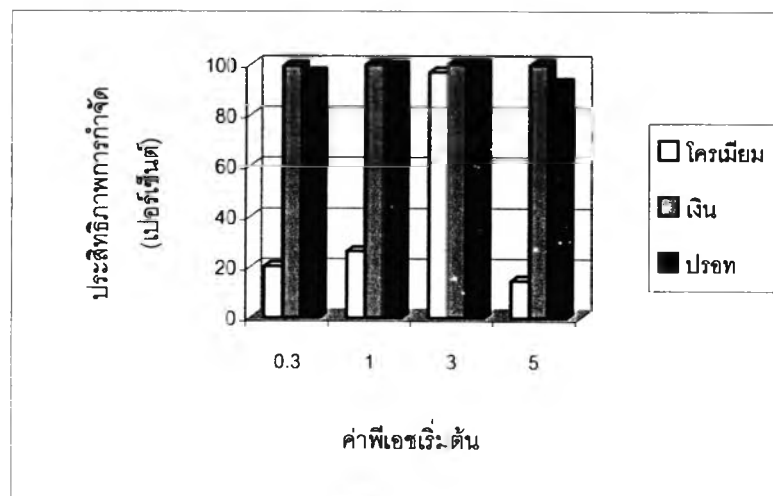


รูปที่ 4.16 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซัลเฟตและคาร์บอน

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอื่นก็ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี สามารถลดปริมาณปรอทได้ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับปริมาณปรอทเริ่มต้นในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น และโดยเฉลี่ยแล้วจะสามารถกำจัดปริมาณปรอทได้ดีกว่าสภาวะในหัวข้อ 4.2.1.1 (อะลูมิเนียมและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยสภาวะนี้ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.005 มก./ล.)



รูปที่ 4.17 ปริมาณปรอทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวเหนียวและคาร์บอน



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับข้าวเหนียวและคาร์บอน

### 4.2.1.3 ชั่วไฟฟ้าเหล็กและเหล็ก

ในการทดลองนี้จะใช้ชั่วไฟฟ้า คือ เหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดโดยทำการทดลองที่พื้นที่หน้าตัดประมาณ  $6.5 \times 7$  ซม. ต่อน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 1 ลิตร หรือมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 45.5 ตร.ซม./น้ำเสีย 1 ลิตร แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสีย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับชั่วเหล็กและเหล็ก

ค่าพีเอช		ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.3	0.65	605	303	31.3	38.2	2.5	6.33
1	2.27	603	279	34.3	44.4	4.7	6.33
3	8.60	555	169	34.7	41.0	5.6	6.33
5	8.97	513	-51	32.4	43.0	7.3	6.33

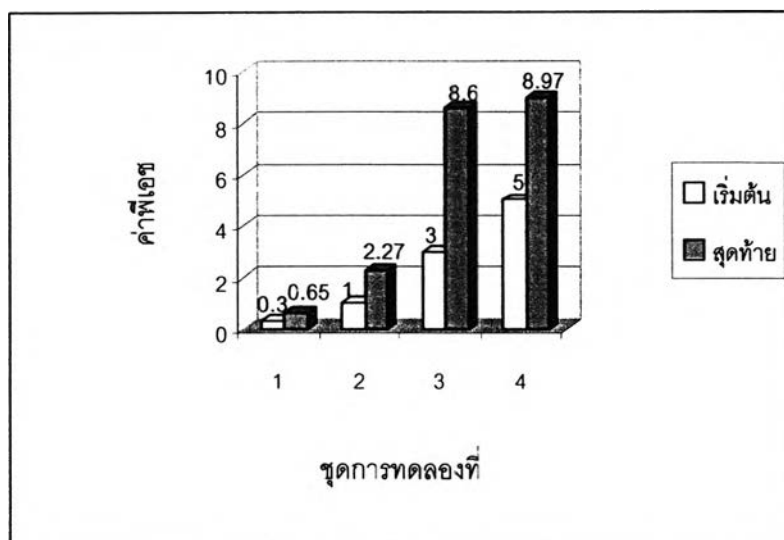
- หมายเหตุ : - เริ่มต้น หมายถึง ค่าที่วัดก่อนเริ่มการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี  
 - สุดท้าย หมายถึง ค่าที่วัดหลังเสร็จสิ้นการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

#### 1) ค่าพีเอช

ในแต่ละชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 คือมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 1 3 และ 5 จะพบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะมีค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้นคือ 0.65 2.27 8.60 และ 8.25 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งการที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดอิออนไฮดรอกไซด์ (OH) ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมี แต่สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้น 0.3 จะทำให้เกิดค่าพีเอชสุดท้ายเพียง 0.65 ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น 1 3 และ 5 ซึ่งที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะที่สภาวะกรด มีปริมาณอิออนไฮโดรเจนสูง ทำให้ปริมาณอิออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีปริมาณไม่



เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับอ็อกซิเจน ไฮโดรเจน ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมได้จากหัวข้อ 4.1.1



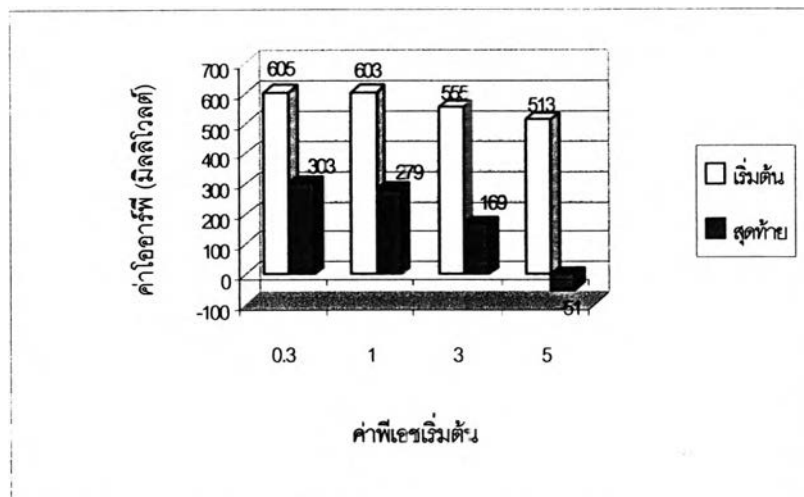
รูปที่ 4.19 ค่าพีเอชเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้อหลักและหลัก

## 2) ค่าไออาร์พี

จากตารางที่ 4.8 จะพบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีค่าไออาร์พีเริ่มต้น คือ 605 603 555 และ 513 ตามลำดับ ส่วนค่าไออาร์พีสุดท้ายจะมีค่าต่ำลง คือ 303 279 169 และ -51 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกิดแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ช่วยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ดีขึ้น

## 3) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.8 พบว่าในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น 0.3 1 3 และ 5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 2.5 4.7 5.6 และ 7.3 โวลต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง DC Power Supply ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะสามารถจ่ายได้ นั่นคือ 6.33 แอมแปร์ ดังนั้นในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้นเมื่อทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ คือ 6.33 แอมแปร์

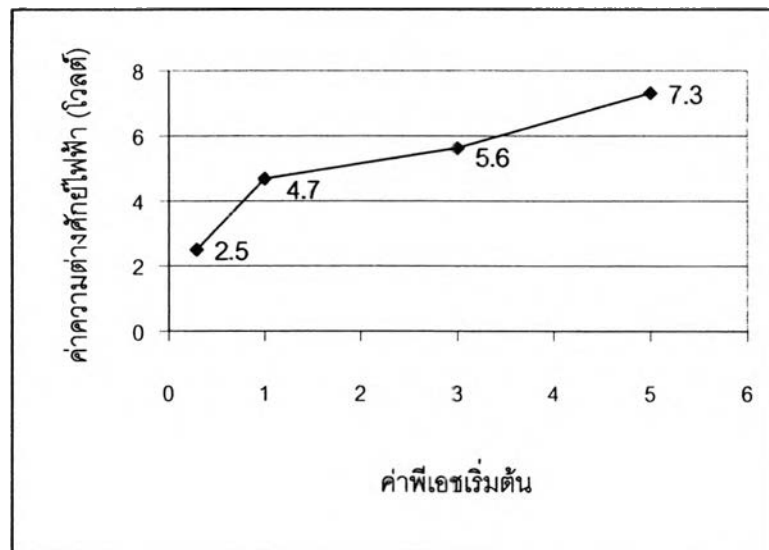


รูปที่ 4.20 ค่าโออาร์ทีเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและเหล็ก

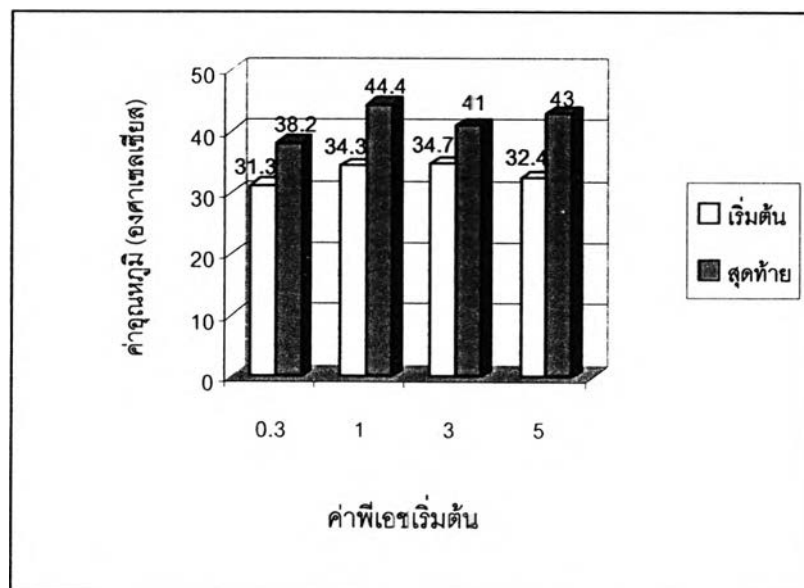
ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจ่ายได้ จะเห็นได้ว่ามีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่ำกว่าที่สภาวะในหัวข้อ 4.2.1.1 (อะลูมิเนียมและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า) คือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 27.3 32.7 43.2 และ 46.8 โวลต์ ตามลำดับ และต่ำกว่าที่สภาวะในหัวข้อ 4.2.1.2 (เหล็กและคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า) คือมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 2.8 5.3 6.1 และ 8.7 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการที่ขั้วเหล็กมีค่าความต้านทานต่ำกว่าขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องจ่ายกระแสไฟตรงจะสามารถจ่ายได้มีค่าต่ำกว่า ซึ่งทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าลงได้

#### 4) ค่าอุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ จะทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.8 ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น ที่ 0.3 1 3 และ 5 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่า 31.3 34.3 34.7 และ 32.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่หลังจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิสุดท้ายจะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 38.2 44.4 41.0 และ 43.0 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss)



รูปที่ 4.21 ค่าความต่างค่างบไฟฟ้าสูงสุดที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก



รูปที่ 4.22 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก

##### 5) ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการทดลอง (ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10) การบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีจะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีปริมาณน้อยลง ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น  
สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก

ค่าพีเอช เริ่มต้น	ค่าพีเอช สุดท้าย	ปริมาณโลหะหนัก (มก. / ล.)					
		โครเมียม		เงิน		ปรอท	
		เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
0.3	0.65	49.8	6.30	223.1	0.27	354.2	0.07
1	2.27	46.5	4.93	199.5	0.41	298.5	0.06
3	8.60	44.7	0.09	191.4	0.16	173.8	0.004
5	8.97	1.98	0.08	179.9	0.15	93.2	0.01

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก

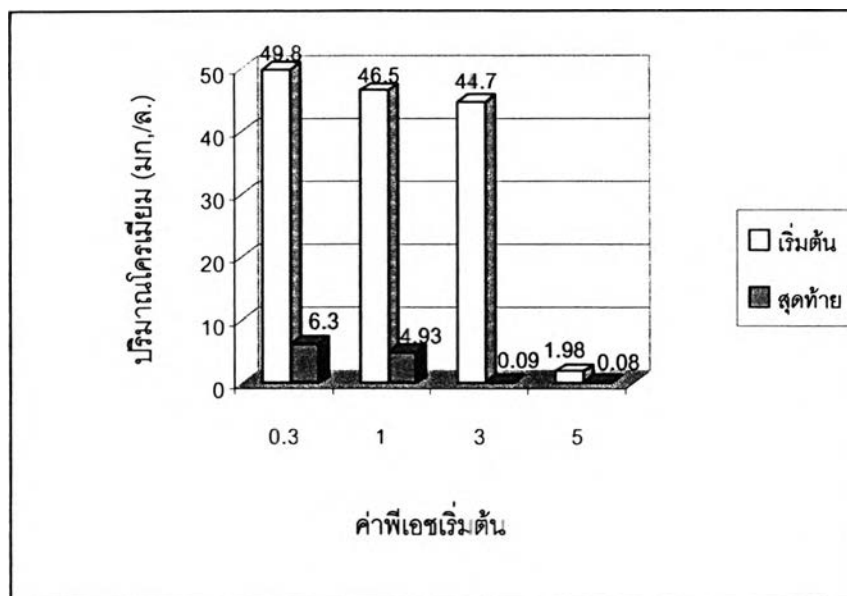
ค่าพีเอชเริ่มต้น	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	โครเมียม	เงิน	ปรอท
0.3	87.35	99.88	99.98
1	89.40	99.79	99.98
3	99.80	99.92	99.998
5	95.96	99.92	99.989

#### ก. โครเมียม

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสีย 49.8 46.5 44.7 และ 1.98 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จะทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงเป็น 6.30 4.93 0.09 และ 0.08 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.23) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมแล้ว จะมีค่า 87.35 89.40 99.80 และ 95.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.26)

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.80 เปอร์เซ็นต์ และจะพบว่าที่สภาวะที่นี้จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าทั้งสองสภาวะแรก (หัวข้อ 4.2.1.1 และ 4.2.1.2) และในสภาวะนี้ที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 3 และ 5 ปริมาณ

โครเมียมสุดท้ายที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีค่าเพียง 0.09 และ 0.08 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.75 มก.ล.)

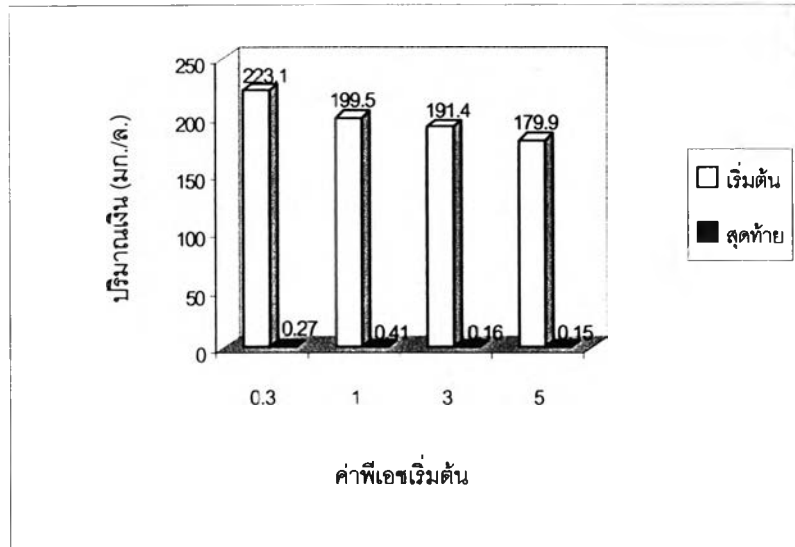


รูปที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับซั้วเหล็กและเหล็ก

#### ข. เงิน

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณเงินเริ่มต้นในน้ำเสียม 223.1 199.5 191.4 และ 179.9 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณเงินลดลงเป็น 0.27 0.41 0.16 และ 0.15 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.24) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเงินแล้ว จะมีค่า 99.88 99.79 99.92 และ 99.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.26)

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.92 เปอร์เซ็นต์ และจะพบว่าที่สภาวะนี้ทุกค่าพีเอชเริ่มต้นจะสามารถกำจัดเงินให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.2 (ไม่เกิน 1 มก./ล.)

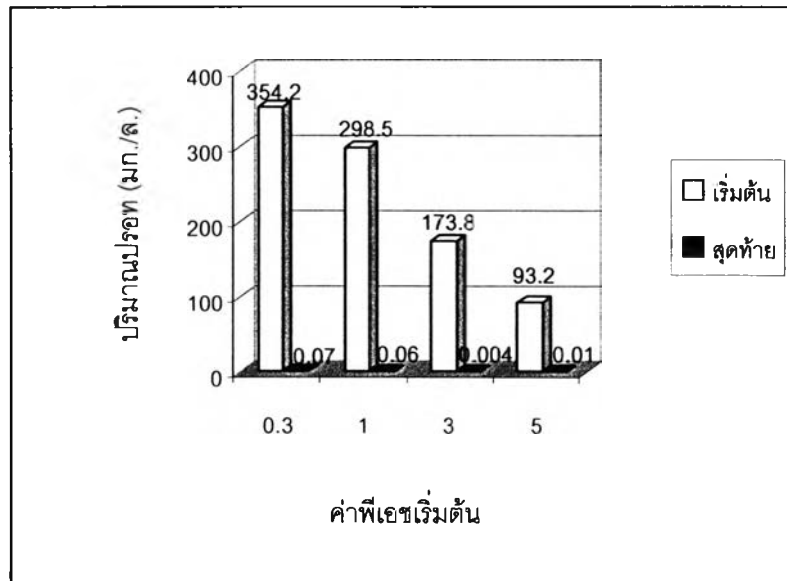


รูปที่ 4.24 ปริมาณเงินเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับขั้วเหล็กและเหล็ก

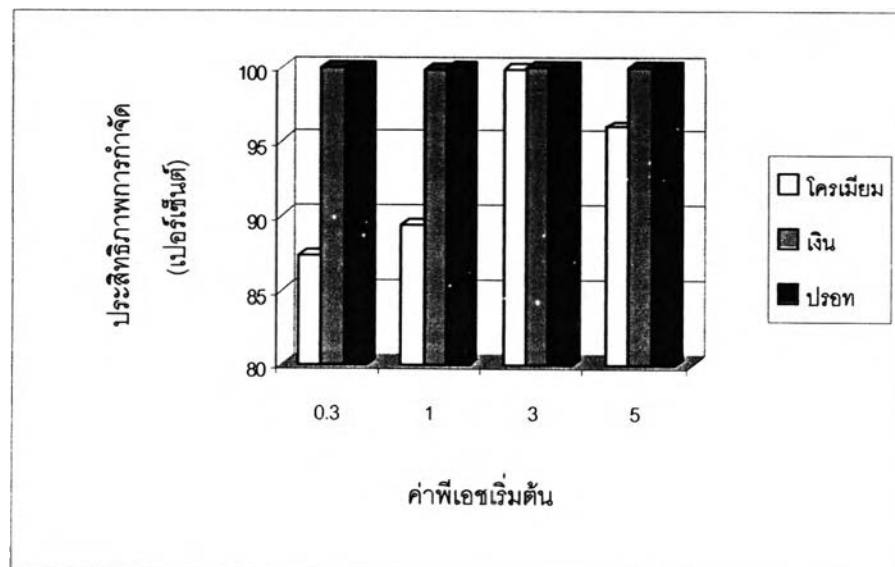
### ค. ปรอท

ในแต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 0.3 1 3 และ 5 จะมีปริมาณปรอทเริ่มต้นในน้ำเสีย 354.2 298.5 173.8 และ 93.2 มก./ล. ตามลำดับ แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณปรอทลดลงเป็น 0.07 0.06 0.004 และ 0.01 มก./ล. ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.25) ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทแล้ว จะมีค่า 99.98 99.98 99.998 และ 99.989 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.26)

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด คือ 99.998 เปอร์เซ็นต์ และจะพบว่าที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้นจะสามารถกำจัดปรอทได้ดีกว่าที่สภาวะในหัวข้อ 4.2.1.1 (ขั้วอะลูมิเนียมและคาร์บอน) และหัวข้อ 4.2.1.2 (ขั้วเหล็กและคาร์บอน) ซึ่งที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 3 นี้ จะสามารถกำจัดปริมาณปรอทในน้ำเสียจนทำให้มีปริมาณปรอทสุดท้ายเท่ากับ 0.004 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.005 มก./ล.)



รูปที่ 4.25 ปริมาณโปรทเริ่มต้นและสุดท้าย สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก

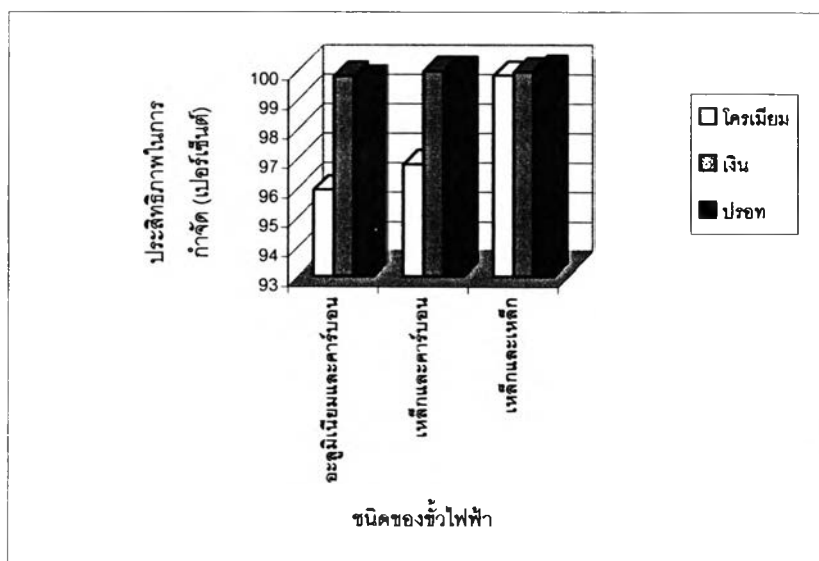


รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้น สำหรับข้าวเหล็กและเหล็ก

#### 4.2.1.4 สรุปค่าพีเอชเริ่มต้น และชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ผลการทดลองการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยระบบไฟฟ้าเคมี ซึ่งแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.10 4.18 และ 4.26 จะพบว่าสำหรับทุกคู่ของขั้วไฟฟ้าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด คือ โครเมียม เงิน และปรอท จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด แม้ว่าค่าพีเอชสุดท้ายของแต่ละคู่ของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด คือ ค่าพีเอชเริ่มต้น 3 ซึ่งจะใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นนี้ในการทดลองขั้นต่อไป

สำหรับชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ถ้าหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 สำหรับทุกคู่ของขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.27 จะพบว่าขั้วเหล็กและเหล็ก จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม เงิน และปรอท ได้ดีที่สุดใน ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้ขั้วไฟฟ้า คือ เหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3

ข้อสำคัญอีกประการคือที่สภาวะขั้วเหล็กและเหล็ก ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 เมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแล้ว ปริมาณโลหะหนักทั้งสามชนิด คือ โครเมียม เงิน และปรอท เหลืออยู่ในน้ำเสียน้อยกว่าค่ามาตรฐาน โดยมีค่าโครเมียม เงิน และปรอท เหลืออยู่ในน้ำหลังการทดลองเท่ากับ 0.09 0.16 และ 0.004 มก./ล. ตามลำดับ



## 4.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือเมื่อบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแล้ว จะมีปริมาณโลหะหนักทั้งสามชนิดเหลืออยู่ในน้ำน้อยกว่าค่ามาตรฐาน

ในขั้นตอนนี้จะใช้เหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดซึ่งมีขนาด กว้าง 14 ซม. ยาว 29.5 ซม. หนา 0.2 ซม. ในขณะที่พื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสน้ำเสีย คือประมาณ  $12.5 \times 29.5$  ตร.ซม. หรือเท่ากับ  $368.75$  ตร.ซม./น้ำเสียซีไอดีเจือจาง 1.5 ลิตร และจะทำการทดลองที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามค่า คือ 1 2 และ 2.8 โวลต์ ซึ่งจะได้ผลการทดลองของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แต่ละระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ตามตารางที่ 4.11 ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 ตามลำดับ

**หมายเหตุ :** ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง DC Power Supply จะสามารถจ่ายได้

### 4.2.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากการทดลองเมื่อปรับเครื่อง DC Power Supply ให้จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด จะได้ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 2.8 โวลต์ จ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด 6.33 แอมแปร์ ดังนั้นจึงทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามค่า คือ 1 2 และ 2.8 โวลต์ เพื่อทดลองหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม เนื่องจากถ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำจะมีผลต่อค่าใช้จ่าย (ค่าไฟฟ้า) ที่ใช้ในการบำบัดด้วย

ตารางที่ 4.11 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์

ระยะเวลา ในการทำ ปฏิกิริยา (นาทื)	ค่าพีเอช	ค่าไอ อาร์พี (มิลลิ โวลต์)	ค่าความนำ ไฟฟ้า (มิลลิ ซีเมน/ เซนติเมตร)	ค่าของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ค่าความ ต่างศักย์ ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่ากระแส ไฟฟ้า (แอมแปร์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	3.00	510	59.3	310	1.0	1.34	33.5
5	3.39	13	55.7	480	1.0	1.27	32.9
10	3.50	-56	56.3	500	1.0	1.20	33.0
15	3.67	-72	55.6	730	1.0	1.18	33.2
20	3.92	-134	55.3	340	1.0	1.17	33.2
25	4.91	-256	55.5	960	1.0	1.16	32.9
30	5.81	-298	54.9	1,080	1.0	1.11	33.2
45	6.82	-407	55.5	1,460	1.0	1.07	32.7
60	6.56	-383	55.4	1,540	1.0	1.04	33.2
90	7.15	-485	55.5	1,680	1.0	1.05	33.7
120	7.51	-512	55.5	1,740	1.0	1.05	33.8

ตารางที่ 4.12 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์

ระยะ เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ค่าพีเอช	ค่าไอ อาร์พี (มิลลิ โวลต์)	ค่าความนำ ไฟฟ้า (มิลลิ ซีเมน/ เซนติเมตร)	ค่าของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)	ค่าความ ต่างศักย์ ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่ากระแส ไฟฟ้า (แอมแปร์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	3.00	510	59.3	310	2.0	4.24	34.3
5	3.43	-23	60.1	1,200	2.0	4.13	33.4
10	4.12	-117	59.2	1,260	2.0	4.01	33.3
15	6.70	-364	59.1	2,240	2.0	3.97	32.9
20	6.80	-392	58.9	2,340	2.0	3.89	33.1
25	7.23	-405	58.7	2,820	2.0	3.82	33.1
30	7.90	-479	59.1	3,860	2.0	3.75	33.1
45	7.97	-476	54.6	4,460	2.0	3.71	33.0
60	8.02	-648	55.8	5,920	2.0	3.67	32.8
90	8.10	-682	49.3	8,220	2.0	3.59	33.4
120	8.13	-695	51.1	9,900	2.0	3.50	33.5

ตารางที่ 4.13 ผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์

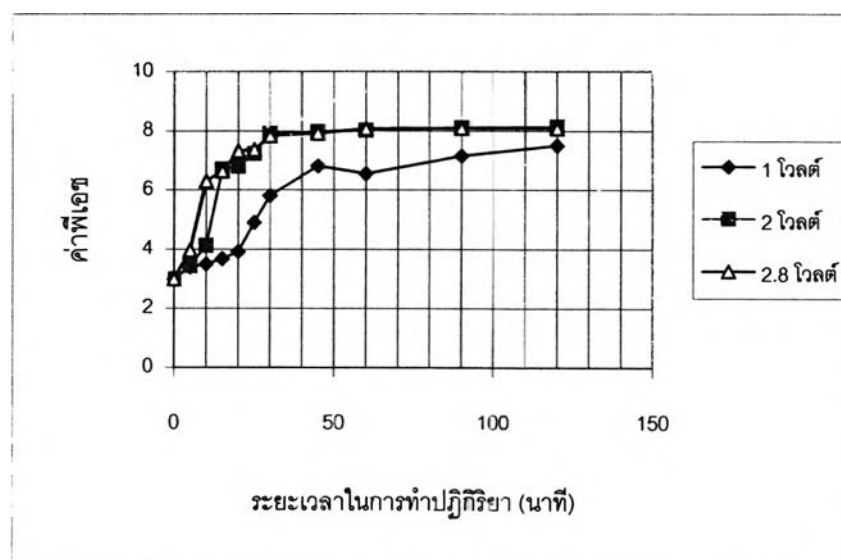
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าพีเอช	ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์)	ค่าความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมน/เซนติเมตร)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มา./ล.)	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	3.00	510	59.3	310	2.8	6.33	35.8
5	3.97	-96	49.3	380	2.8	6.33	34.5
10	6.31	-82	49.5	1,180	2.8	6.33	34.7
15	6.64	-415	50.0	1,980	2.8	6.33	34.9
20	7.32	-434	51.2	3,060	2.8	6.33	35.1
25	7.36	-476	49.3	3,660	2.8	6.33	35.1
30	7.83	-566	49.1	4,560	2.8	6.33	34.4
45	7.92	-710	48.6	6,780	2.8	6.33	34.8
60	8.07	-692	48.2	8,030	2.8	6.33	35.6
90	8.09	-712	47.7	13,040	2.8	6.33	35.9
120	8.08	-722	47.9	17,740	2.8	6.33	37.0

#### 4.2.2.2 ค่าพีเอช

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 จะพบว่าเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ค่าพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่ามีการเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์ในน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการไฟฟ้าเคมีนั้นคือที่บริเวณขั้วแคโทด เมื่อโมเลกุลของน้ำรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าจะทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์เกิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.28 ค่าพีเอชจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยในช่วง 30 นาทีแรก จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยลง และพบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นได้ต่ำกว่าค่าพีเอชที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 และ 2.8 โวลต์ ซึ่งในช่วง 25 นาทีแรก ค่าพีเอชที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ จะมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ เล็กน้อย หลังจากนั้นค่าพีเอชจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นนี้ เกิดจากการมีปริมาณไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสร้างตะกอนแข็งของโลหะไฮดรอกไซด์ ในขณะที่ทำการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกลไกที่ช่วยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

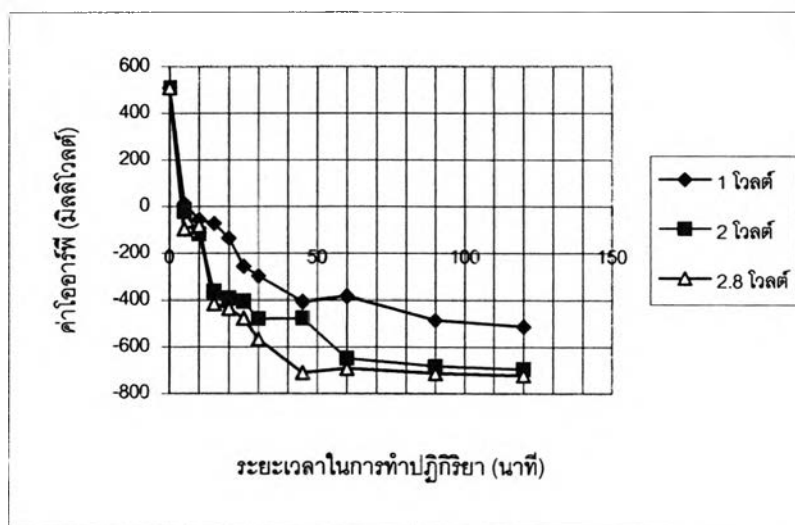


รูปที่ 4.28 ค่าพีเอชของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.2.3 ค่าไออาร์พี

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 เมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ค่าไออาร์พีจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าติดลบ ซึ่งแสดงว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน มีการให้และรับอิเล็กตรอนของสารต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีภายในระบบ ค่าไออาร์พีจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนไปสู่ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

จากรูปที่ 4.29 ในช่วงประมาณ 5 นาทีแรก ค่าไออาร์พีที่สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ มีแนวโน้มลดลง โดยมีอัตราการลดลงใกล้เคียงกัน และค่าไออาร์พีเริ่มจะเข้าสู่ค่าติดลบ หลังจากนั้นค่าไออาร์พีจะมีค่าลดลงโดยมีค่าติดลบ ซึ่งที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ ค่าไออาร์พีจะลดลงต่ำที่สุดจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณหนึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นค่าไออาร์พีก็ยังมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ลดลงด้วยอัตราที่ต่ำลงจนเริ่มจะมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในระบบน้อยลง



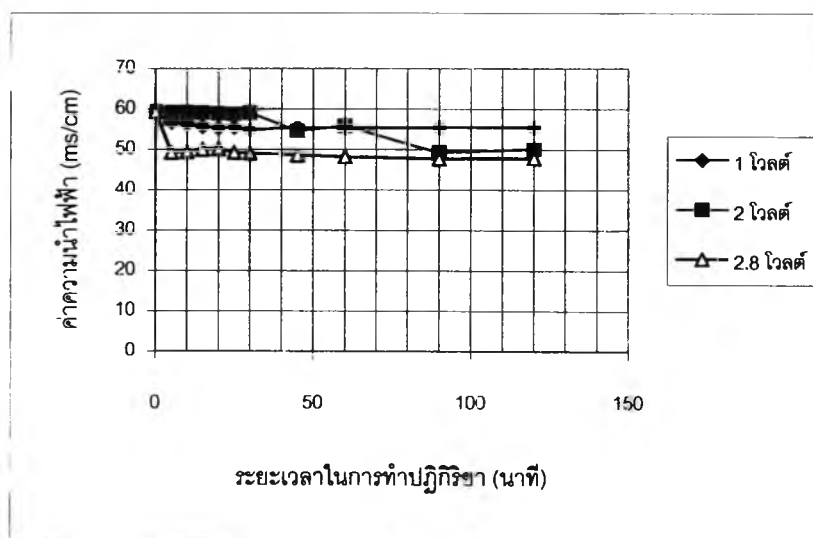
รูปที่ 4.29 ค่าไออาร์พีของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.2.4 ค่าความนำไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 พบว่าเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไป ค่าความนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า และจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า คือ ถ้าค่าความต้านทานต่ำ ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่าความนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง เพราะแนวโน้มของระบบจะทำให้มีปริมาณอิออนลดลง อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในระบบ แต่ก็มีแนวโน้มลดลงในอัตราที่ไม่มากนัก ซึ่งอาจเนื่องมาจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบ จะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ทำให้ยังคงมีปริมาณอิออนอยู่ในน้ำ ค่าความนำไฟฟ้าจึงยังคงสูงอยู่ เพราะปริมาณอิออนมีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้า คือ ถ้าปริมาณอิออนมีค่าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าก็จะลดลงตามไปด้วย (มันสิน ตันฑุลเวศม์ , 2545)

ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 2 และ 1 โวลต์ จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของอิออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้ปริมาณอิออนมีจำนวนลดลง ค่าความนำไฟฟ้าจึงลดลงมากที่สุดด้วย

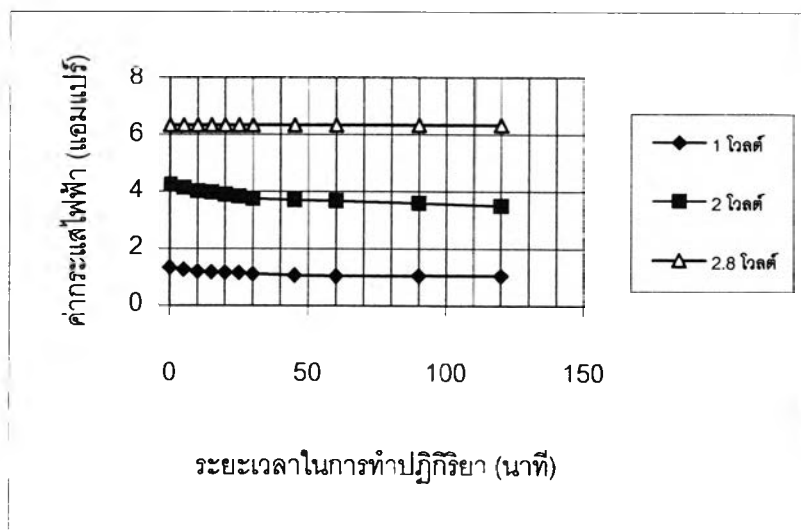


รูปที่ 4.30 ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.2.5 ค่ากระแสไฟฟ้า

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความนำไฟฟ้า ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.2.4 นั้นแสดงว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป ค่าความต้านทานในน้ำจะสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากผลของการเกิดปฏิกิริยาเคมีในระบบ ทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำลง เพราะค่ากระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $V = IR$ ) คือ ถ้าค่าความต้านทานต่ำ ค่ากระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.31 ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 และ 2 โวลต์ เมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาผ่านไป ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อปฏิกิริยาเคมีในระบบเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว กระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มคงที่ สำหรับที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ คือ 6.33 แอมแปร์ เนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง DC Power Supply จะสามารถจ่ายได้สำหรับระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าก็ควรจะมีค่ามากขึ้นด้วย แต่เครื่อง DC Power Supply นี้สามารถจ่ายกระแสไฟสูงสุดเพียง 6.33 แอมแปร์ ดังนั้นตลอดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เครื่อง DC Power Supply จะจ่ายกระแสให้กับระบบ 6.33 แอมแปร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจึงไม่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 6.33 แอมแปร์ ในการแปรผลค่าความต้านทานของระบบได้



รูปที่ 4.31 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายระบบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

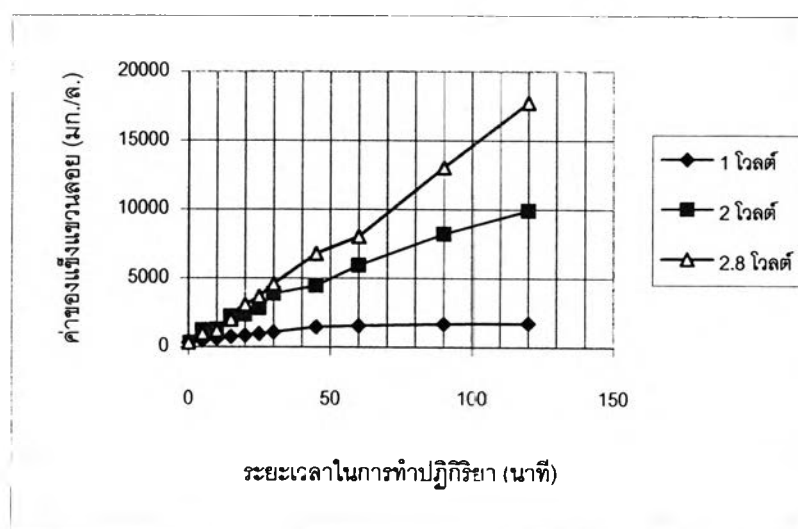


#### 4.2.2.6 ของแข็งแขวนลอย

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 จะพบว่าค่าของแข็งแขวนลอย (SS) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการทดลอง น้ำเสียซีโอดีเจ็องจะมีสีเขียวย่อและใส ไม่มีของแข็งแขวนลอย แต่เมื่อนำไปปรับค่าพีเอชเป็น 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำเสียจะเป็นสีน้ำตาลอ่อน เมื่อเริ่มเดินระบบโดยจ่ายกระแสไฟตรงเข้าระบบจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยเริ่มเกิดตะกอนและมีสีน้ำตาลแก่ขึ้นตามลำดับจนกระทั่งกลายเป็นสีดำ และจะสังเกตเห็นตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างชัดเจน

จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่าของแข็งแขวนลอย (SS) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ จะทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยมีอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุด ซึ่งแสดงว่าที่สภาวะนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีมากกว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 และ 2 โวลต์

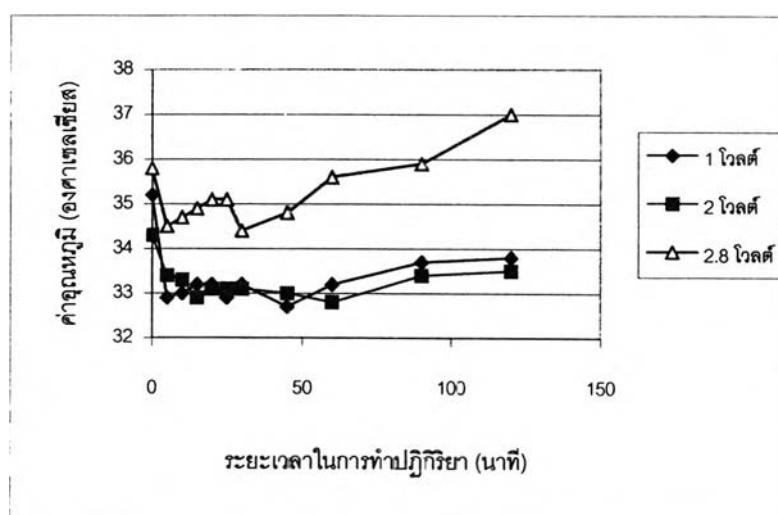
ค่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบนี้ อาจเกิดจากการเกิดของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า และได้จากการเกิดโลหะไฮดรอกไซด์ของอ็อกซิเจนโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียตลอดจนอ็อกซิเจนหรือสารต่างๆ ที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียซีโอดี แสดงว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ขั้วไฟฟ้ามีการสลายตัวเกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และมีการเกิดปฏิกิริยาของอ็อกซิเจนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำได้น้อยกว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 และ 2.8 โวลต์



รูปที่ 4.32 ค่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.2.7 ค่าอุณหภูมิ

จากตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 และจากรูปที่ 4.33 พบว่าอุณหภูมิมีค่าลดลงในช่วงแรก แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ เมื่อทำปฏิกิริยาครบ 2 ชั่วโมง ค่าอุณหภูมิมียังสูงขึ้น คือ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (ที่ 0 นาที) แต่ในขณะที่การทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 และ 2 โวลต์ ค่าอุณหภูมิสุดท้าย (เมื่อครบ 2 ชั่วโมง) คือ 33.8 และ 33.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (ที่ 0 นาที) แต่อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิก็น่าจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ถ้าหากทำการทดลองต่อไปให้เกิน 2 ชั่วโมง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง คือ 1.5 ลิตร ซึ่งใช้ปริมาณมากกว่าการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 (ใช้น้ำเสีย 1 ลิตร) ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในระบบ ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อจะทำให้ค่าอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.33 ค่าอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.2.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากการทดลองการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจางด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 และทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะสามารถวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

##### ก. โครเมียม

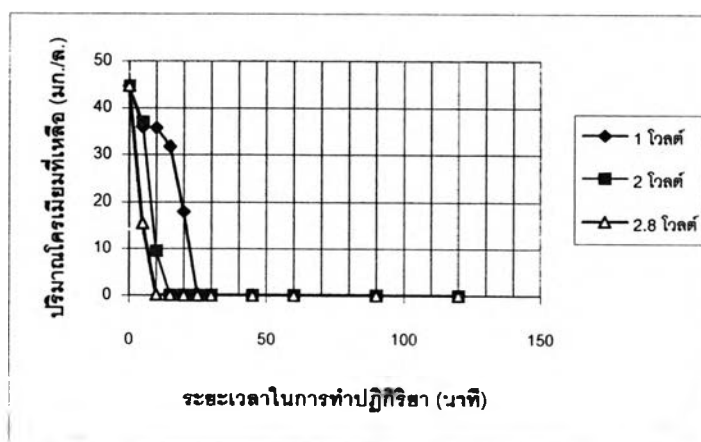
จากตารางที่ 4.14 จะพบว่าที่แต่ละสภาวะ คือที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะสามารถกำจัดโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียซีโอดีเจือจางให้มีปริมาณโครเมียมต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ มีค่าไม่เกิน 0.75 มก./ล.ได้ ดังนั้นวิธีการบำบัดนี้จึงสามารถกำจัดโครเมียมให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

จากรูปที่ 4.34 จะพบว่าการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะมีอัตราการลดลงของปริมาณโครเมียมในน้ำเสียอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลา 25 15 และ 10 นาทีแรก ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถกำจัดโครเมียมให้มีปริมาณเหลืออยู่ในน้ำ 0.29 0.13 และ 0.18 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน จากนั้นปริมาณโครเมียมจะลดลงด้วยอัตราที่ต่ำลง จนกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง คือไม่มีการลดลงของปริมาณโครเมียมมากนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ ใช้เวลาเพียง 10 นาที ก็สามารถกำจัดโครเมียมให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้แล้ว แต่ในขณะเดียวกันการใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์ ก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย



ตารางที่ 4.14 ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด

ระยะเวลา ในการทำ ปฏิกิริยา (นาท)	ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ					
	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์	
	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
0	44.7	0	44.7	0	44.7	0
5	35.84	19.82	37.00	17.23	15.50	65.32
10	35.73	20.07	9.58	78.57	0.18	99.60
15	31.73	29.02	0.13	99.71	0.12	99.73
20	17.94	59.87	0.12	99.73	0.06	99.866
25	0.29	99.35	0.12	99.73	0.05	99.888
30	0.19	99.57	0.10	99.776	0.04	99.911
45	0.12	99.73	0.09	99.799	0.04	99.911
60	0.09	99.80	0.04	99.91	0.04	99.911
90	0.09	99.80	0.03	99.93	0.03	99.933
120	0.05	99.89	0.02	99.96	0.03	99.933



รูปที่ 4.34 ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.15 ปริมาณเงินที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด

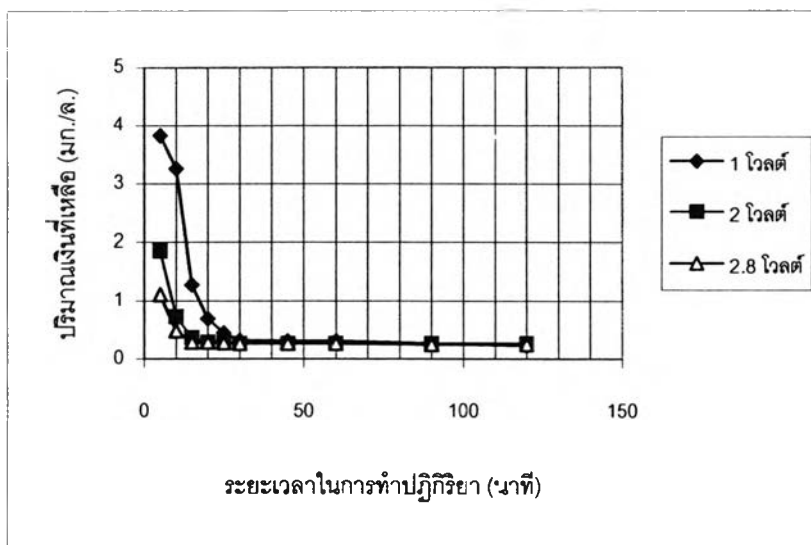
ระยะเวลา ในการทำ ปฏิบัติการ (นาทื)	ปริมาณเงินที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ					
	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์	
	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
0	191.4	0	191.4	0	191.4	0
5	3.83	97.999	1.86	99.03	1.11	99.42
10	3.26	98.30	0.73	99.62	0.49	99.74
15	1.28	99.33	0.37	99.81	0.29	99.848
20	0.70	99.63	0.29	99.848	0.29	99.848
25	0.45	99.76	0.28	99.854	0.28	99.854
30	0.32	99.833	0.27	99.859	0.27	99.86
45	0.31	99.838	0.27	99.859	0.27	99.860
60	0.31	99.838	0.27	99.859	0.27	99.860
90	0.27	99.86	0.27	99.859	0.25	99.869
120	0.23	99.88	0.27	99.859	0.25	99.869

## ข. เงิน

จากตารางที่ 4.15 จะพบว่าที่แต่ละสภาวะ คือที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะสามารถกำจัดเงินที่อยู่ในน้ำเสียซีโอดีเจือจางให้มีปริมาณเงินต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง คือ มีค่าไม่เกิน 1.0 มก./ล.ได้ ดังนั้นวิธีการบำบัดนี้จึงสามารถกำจัดเงินได้ดี

ตามรูปที่ 4.35 ถ้าสร้างกราฟตั้งแต่เวลาเริ่มต้นทำปฏิบัติการ ปริมาณเงินเริ่มต้นจะมีค่าสูงถึง 191.4 มก./ล. ซึ่งทำให้กราฟทั้งสามเส้นทับกันพอดี จึงมองเห็นเส้นกราฟไม่ชัดเจน ดังนั้นในการสร้างกราฟนี้ จะเริ่มต้นสร้างกราฟที่ระยะเวลาในการทำปฏิบัติการผ่านไปตั้งแต่ 5 นาทีแรกเป็นต้นไป และจากรูปที่ 4.35 จะพบว่า การทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะมีอัตราการลดลงของปริมาณเงินในน้ำเสียอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลา 20 10 และ 10

นาที่แรก ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถกำจัดเงินให้มีปริมาณเหลืออยู่ในน้ำ 0.70 0.73 และ 0.49 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ จากนั้นปริมาณเงินจะลดลงด้วยอัตราที่ต่ำลง จนกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง คือไม่มีการลดลงของปริมาณเงินมากนัก ดังนั้นจึงถือว่าวิธีการบำบัดนี้สามารถกำจัดเงินในน้ำเสียซีไอดีได้ดี



รูปที่ 4.35 ปริมาณเงินที่เหลืออยู่ในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

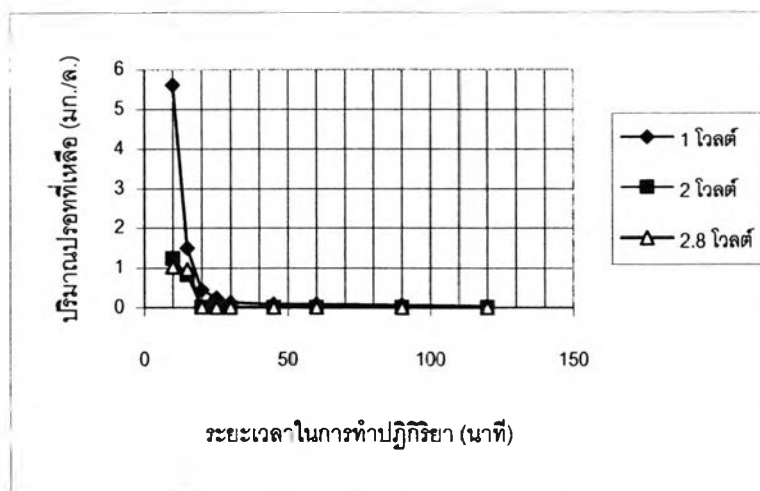
### ค. พรอท

จากตารางที่ 4.16 จะพบว่าที่สภาวะค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ เมื่อทำการทดลองครบ 2 ชั่วโมง ปริมาณพรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย คือ 0.04 มก./ล. ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กำหนดไว้ไม่เกิน 0.005 มก./ล.) ในขณะที่การทดลองที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 และ 2.8 โวลต์ จะสามารถกำจัดพรอทให้มีปริมาณพรอทต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้ ดังนั้นปริมาณพรอทจึงเหมือนเป็นตัวชี้วัดถึงสภาวะค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด คือ โครเมียม เงิน และพรอท ในน้ำเสียซีไอดี

ตารางที่ 4.16 ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัด

ระยะเวลา ในการทำ ปฏิบัติการ (นาที)	ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ					
	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์		ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.8 โวลต์	
	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
0	173.8	0	173.8	0	173.8	0
5	124.2	28.54	55.70	67.95	7.34	95.78
10	5.62	96.77	1.25	99.28	1.04	99.40
15	1.51	99.13	0.83	99.52	0.97	99.44
20	0.45	99.74	0.019	99.989	0.015	99.991
25	0.25	99.86	0.009	99.9948	0.011	99.994
30	0.13	99.93	0.009	99.9948	0.007	99.996
45	0.09	99.95	0.008	99.9954	0.0048	99.9972
60	0.09	99.95	0.0047	99.9973	0.0045	99.9974
90	0.07	99.96	0.0047	99.9973	0.0039	99.9978
120	0.04	99.98	0.0044	99.9975	0.0037	99.9979

ตามรูปที่ 4.36 ถ้าสร้างกราฟตั้งแต่เวลาเริ่มต้นทำปฏิบัติการ ปริมาณปรอทเริ่มต้นจะมีค่าสูง ทำให้กราฟทั้งสามเส้นทับกัน จึงมองเห็นเส้นกราฟไม่ชัดเจน ดังนั้นในการสร้างกราฟนี้ จะเริ่มต้นสร้างกราฟที่ระยะเวลาในการทำปฏิบัติการผ่านไปตั้งแต่ 10 นาทีแรกเป็นต้นไป และจากรูปที่ 4.36 จะพบว่ากราฟที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 2 และ 2.8 โวลต์ จะมีอัตราการลดลงของปริมาณปรอทในน้ำเสียอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลา 20 10 และ 10 นาทีแรกตามลำดับ จากนั้นปริมาณปรอทจะลดลงด้วยอัตราที่ต่ำลงจนกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง คือมีการลดลงของปริมาณปรอทน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามเฉพาะที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 และ 2.8 โวลต์เท่านั้น ที่สามารถกำจัดปรอทให้มีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือมีปริมาณปรอทเหลืออยู่ในน้ำเสีย 0.0047 และ 0.0048 มก./ล. ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการบำบัด 60 และ 45 นาที ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการบำบัด (ตามหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป คือหัวข้อ 4.2.3) เพื่อให้ในการวิเคราะห์หาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิบัติการที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4.36 ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.3 ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัด

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการสรุปถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสียซีไอดี คือ โครเมียม เงิน และปรอท โดยใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมและค่าที่ยอมรับได้ของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง เป็นเกณฑ์ในการเลือกสภาวะเพื่อให้คำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ซึ่งค่าใช้จ่ายเบื้องต้นนี้จะประกอบด้วยค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้าและค่าบำบัดตะกอน ซึ่งมีวิธีการคำนวณตามภาคผนวก ข.

ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายนี้ จะวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด ดังนี้

##### 1) โครเมียม

จากหัวข้อ 4.2.2 จะสามารถสรุปสภาวะที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม ให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ ไม่เกิน 0.75 มก./ล. โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ตามตารางที่ 4.17 และ 4.18



ตารางที่ 4.17 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)
1	0.29	1.22	25	960
2	0.13	4.09	15	2,240
2.8	0.18	6.33	10	1,180

ตารางที่ 4.18 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีโอดี

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ (บาท/ลบ.ม.)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม. น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)
1	1,284	3.29	22.29	1,310	13,100
2	1,284	4.00	52.01	1,341	13,410
2.8	1,284	5.77	27.40	1,318	13,180

- หมายเหตุ :
- บาท / ลบ.ม. หมายถึง บาทต่อน้ำเสียซีโอดีเจือจาง 10 เท่า 1 ลบ.ม.
  - บาท / ลบ.ม. น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น หมายถึง บาทต่อน้ำเสียซีโอดีที่ไม่ได้เจือจาง 1 ลบ.ม.
  - ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้าที่เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเวลา ซึ่งเริ่มจากเวลาเริ่มต้นถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต้องการ
  - ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นนี้ ไม่คิดราคาของขั้วเหล็ก เนื่องจากเหล็กมีราคาถูกมาก ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จึงแทบจะไม่มีนัยสำคัญ
  - ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ หมายถึง ค่าสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 3

จากทั้งสองตารางข้างต้น จะพบว่าค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการบำบัดต่ำที่สุดคือ 13,100 บาท / ลบ.ม.น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น ดังนั้นจึงสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีเจือจางด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ใช้ขั้วเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.22 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำ คือ 0.29 มก./ล.

## 2) เงิน

จากหัวข้อ 4.2.2 จะสามารถสรุปสภาวะที่ใช้ในการกำจัดเงินให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกิน 1.0 มก./ล. โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ตามตารางที่ 4.19 และ 4.20

ตารางที่ 4.19 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเงิน

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณเงินที่เหลือ (มก./ล.)	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)
1	0.70	1.232	20	840
2	0.73	4.13	10	1,260
2.8	0.49	6.33	10	1,180

ตารางที่ 4.20 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดเงินในน้ำเสียซีโอดี

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ (บาท/ลบ.ม.)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)
1	1,284	0.80	19 50	1,305	13,050
2	1,284	2.69	29 26	1,316	13,160
2.8	1,284	5.77	27 40	1,318	13,180

จากทั้งสองตารางข้างต้น จะพบว่าค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการบำบัดต่ำที่สุด คือ 13,050 บาท / ลบ.ม.น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น ดังนั้นจึงสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเงินในน้ำเสียซีโอดี เจือจางด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ใช้ขั้วเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้น เป็น 3 ทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.232 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ปริมาณเงินที่เหลืออยู่ในน้ำ คือ 0.70 มก./ล.

### 3) ปรอท

จากหัวข้อ 4.2.2 จะสามารถสรุปสภาวะที่ใช้ในการกำจัดปรอทให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ ไม่เกิน 0.005 มก./ล. โดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ตามตารางที่ 4.21 และ 4.22

ตารางที่ 4.21 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ปริมาณปรอทที่เหลือ (มก./ล.)	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)
1	*	*	*	*
2	0.0047	3.91	60	5,920
2.8	0.0048	6.33	45	6,780

ตารางที่ 4.22 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดี

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ (บาท/ลบ.ม.)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)
1	*	*	*	*	*
2	1,284	15.28	137.46	1,437	14,370
2.8	1,284	25.98	157.43	1,468	14,680

หมายเหตุ : - \* คือ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ ไม่สามารถกำจัดปรอทให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานได้

จากทั้งสองตารางข้างต้น จะพบว่าค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการบำบัดต่ำที่สุด คือ 14,370 บาท / ลบ.ม. น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น ดังนั้นจึงสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดี เจือจางด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ใช้ขั้วเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 3.91 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำ คือ 0.0047 มก./ล.

#### 4.2.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด

จากหัวข้อ 4.2.3 จะพบว่าหากต้องการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดพร้อมกัน คือ โครเมียมเงิน และปรอท จะต้องใช้สภาวะที่ใช้ในการกำจัดปรอทเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสียซีโอดี เนื่องจากในการกำจัดปรอทจะต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่าการกำจัดโครเมียมและเงิน และต้องทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 และ 2.8 โวลต์ เท่านั้น (ภายในเวลา 2 ชั่วโมง)

จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 เมื่อคำนึงถึงค่ามาตรฐานของโลหะหนักทั้งสามชนิด และในหัวข้อ 4.2.3 คำนึงถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการบำบัดแล้ว (การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา จะแสดงในภาคผนวก ค.) สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิด คือ โครเมียมเงิน และปรอท ในน้ำเสียซีโอดีพร้อมกัน คือ ใช้ขั้วเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 3.91 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โลหะหนักทั้งสามชนิดที่เหลือ คือ โครเมียมเงิน และปรอท จะมีปริมาณเหลืออยู่ในน้ำเสีย คือ 0.04 0.27 และ 0.0047 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดในน้ำเสียซีโอดี

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ (ขั้วแอโนดและแคโทด)	เหล็ก
ค่าพีเอชเริ่มต้น	3
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	2
ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	3.91
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	60
ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	5,920
ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ (บาท/ลบ.ม.)	1,284
ค่าไฟฟ้า (บาท/ลบ.ม.)	15.28
ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน (บาท/ลบ.ม.)	137.46
ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม.)	1,437
ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ลบ.ม. น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)	14,370
ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น (บาท/ตัวอย่าง) *	1.15
ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	0.04
ปริมาณเงินที่เหลือ (มก./ล.)	0.27
ปริมาณปรอทที่เหลือ (มก./ล.)	0.0047

หมายเหตุ : \* สำหรับการวิเคราะห์ซีโอดีแบบเปิด (น้ำเสีย 1 ตัวอย่างทำให้เกิดน้ำเสียซีโอดี ประมาณ 80 มล.)

### 4.3 การทดลองที่ 3 การทดลองระบบบำบัดน้ำเสียซีโอติด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปตามชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม และศึกษาชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัด

#### 4.3.1 ศึกษาน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไป

จากหัวข้อ 4.2.1 ทำให้เราทราบว่าชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอติ คือ เหล็ก โดยใช้เหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ส่วนสภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ จะทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากหัวข้อ 4.2.4 ใช้ค่า พีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 3.91 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที) ดังนั้นในการทดลองนี้จะเป็นการหาค่ามวลของเหล็กที่สลายตัวออกจากขั้วไฟฟ้า แล้วปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียและในตะกอน

ตารางที่ 4.24 น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง

ขั้วไฟฟ้า	น้ำหนักของขั้วไฟฟ้า (กรัม)	
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
ขั้วแอโนด	609	606
ขั้วแคโทด	695	694

หมายเหตุ : ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 60 นาที

จากตารางที่ 4.20 พบว่าเมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีตามสภาวะข้างต้นแล้ว ขั้วแอโนดสลายตัวออกมา 3 กรัม ส่วนขั้วแคโทดมีการสลายตัวออกมาเล็กน้อยเพียง 1 กรัม ดังนั้นจะพบว่าปริมาณเหล็กที่สลายตัวออกจากขั้วไฟฟ้าทั้งสองรวมกัน คือ 4 กรัม ภายใต้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที หรือคิดเป็นอัตราการสลายตัวของเหล็กเท่ากับ 0.067 กรัมต่อนาที และจะพบว่าที่ขั้วแอโนดมีการสลายตัวของเหล็กออกมามากกว่า อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าจะมีการสลายตัวออกมาปนเปื้อนในระบบ ในขณะที่ขั้วแคโทดสารต่างๆ รอบขั้วไฟฟ้าจะเข้ามาจับอิเล็กตรอน ทำให้ไม่มีการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแคโทดมากนัก

สำหรับน้ำเสียซีไอดีเจือจางเริ่มต้นจะมีปริมาณเหล็กประมาณ 27.59 มก./ล. (เท่ากับ 0.041 กรัม / น้ำเสีย 1.5 ลิตร) และเมื่อนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วตามสภาวะข้างต้นไปหาค่าเหล็กจะมีค่าเท่ากับ 17.60 มก./ล. (เท่ากับ 0.026 กรัม / น้ำเสีย 1.5 ลิตร) ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเหล็กไม่ได้ถูกกำจัดให้น้อยลงมากนัก ถ้าเปรียบเทียบกับปริมาณของโครเมียม เงิน และปรอท ซึ่งปริมาณเหล็กที่ยังคงมีปริมาณสูงอยู่นี้จะได้มาจากการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า ตามตารางที่ 4.20 ดังนั้นปริมาณเหล็กที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับสมการดังต่อไปนี้

$$Fe_{input} = Fe_{output} \quad (4.1)$$

$$Fe_1 + Fe_2 = Fe_3 + Fe_4 \quad (4.2)$$

### โดยที่

$Fe_{input}$  คือ ปริมาณเหล็กเริ่มต้นการบำบัด (กรัม)

$Fe_{output}$  คือ ปริมาณเหล็กหลังจากบำบัดแล้ว (กรัม)

$Fe_1$  คือ ปริมาณเหล็กเริ่มต้นในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง (กรัม)

$Fe_2$  คือ ปริมาณเหล็กที่ได้จากการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า (กรัม)

$Fe_3$  คือ ปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ในน้ำเสียภายหลังการบำบัด (กรัม)

$Fe_4$  คือ ปริมาณเหล็กที่อยู่ในตะกอนภายหลังการบำบัด (กรัม)

$$\text{แทนค่า} \quad 0.041 + 4 = 0.026 + Fe_4$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad Fe_4 = (0.041 + 4) - 0.026$$

$$Fe_4 = 4.015 \text{ กรัม}$$

จากการคำนวณข้างต้น จะพบว่าปริมาณเหล็กที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในขณะทำการบำบัดจะเกิดจากการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าแอโนด และปริมาณของเหล็กส่วนใหญ่ก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับไฮดรอกไซด์ไอออนและออกซิเจน ซึ่งจะกลายเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นภายหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

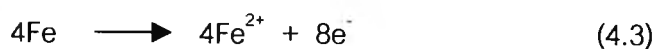
### 4.3.2 ศึกษาชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้น

จากการทดลอง ตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดจะมีสีดำปนสีเขียว และเมื่อนำไปอบในตู้อบจะกลายเป็นตะกอนสีแดง และเมื่อนำตะกอนที่เกิดขึ้นนี้ไปวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) แล้ว จะพบสารประกอบ 3 ชนิด คือ

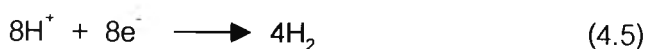
1.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ Maghemite (Iron Oxide)
2.  $\text{FeO}(\text{OH})$  หรือ Goethite (Iron Oxide Hydroxide)
3.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หรือ Thenardite (Sodium Sulfate)

จากผลการทดลองข้างต้น จะพบสารประกอบของเหล็กถึงสองชนิดในตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งจะมีปริมาณเหล็กอยู่ในตะกอนมาก โดยสารประกอบของเหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (ขั้วเหล็ก) มีการสลายตัว คือ จ่ายอิเล็กตรอนทำให้เกิดไอออนของเหล็ก แล้วรวมตัวกับไอออนของไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

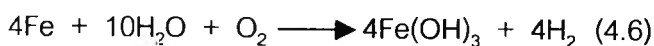
#### ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



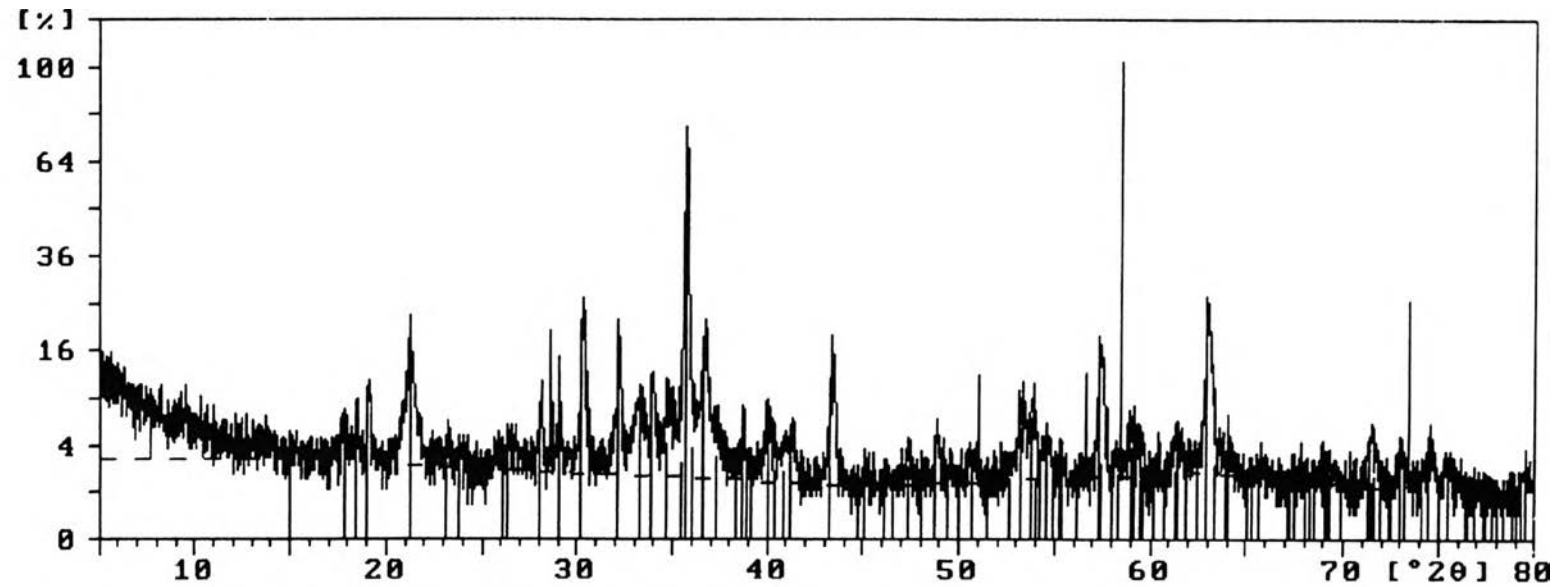
#### ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



#### ปฏิกิริยารวม

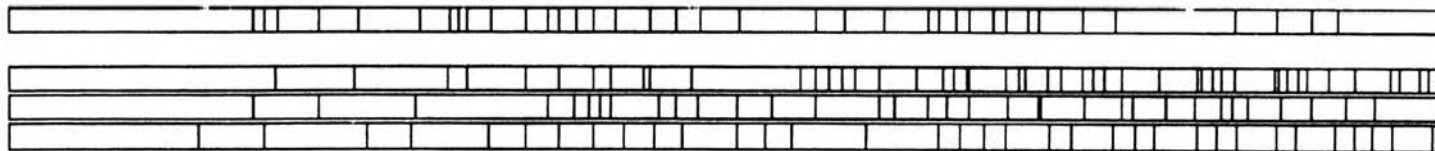






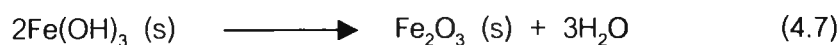
E-460

- 1: 36-0397
- 2: 29-0713
- 3: 39-1346



รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดด้วยเครื่อง XRD

ซึ่งหลังจากนั้น  $\text{Fe(OH)}_3$  จะสามารถถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบของเหล็ก คือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้ ดังสมการที่ 4.7 และอาจถูกเปลี่ยนเป็น  $\text{FeO(OH)}$  ได้ด้วย



ส่วนสารประกอบของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ที่ตรวจพบก็มีโอกาสเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน เพราะในน้ำเสียจะมีอิออนของโซเดียม ซึ่งเกิดจากการเติมสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นและอิออนของซัลเฟตก็มีอยู่ในน้ำเสียซีโอได้ออยู่แล้ว ดังนั้นจึงสามารถตรวจพบสารประกอบของโซเดียมซัลเฟตด้วย

### 4.3.3 การนำระบบไฟฟ้าเคมีไปใช้งานจริง

กระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดโครเมียม เงิน และปรอทในน้ำเสียซีโอไดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยการจ่ายกระแสไฟตรงให้กับระบบ เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนและทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (รีดอกซ์) ในระบบแทนการใช้สารเคมี ซึ่งช่วยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอไดได้ และเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำระบบไปพัฒนา ตลอดจนออกแบบให้ระบบมีความสะดวกในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในการใช้งานจริง จะต้องมีส่วนของการเดินระบบที่ชัดเจน เช่น จะต้องปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นเท่าไรที่เครื่องจ่ายกระแสไฟตรงจะสามารถจ่ายได้

จากผลการทดลองพบว่า ในการเริ่มเดินระบบจะต้องทำการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในระบบ และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด (ตามตารางที่ 4.23) จะคิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 5.21 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดได้ (รายละเอียดในการคำนวณจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข.)

ในการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในงานจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบ ลักษณะและการจัดวางของขั้วไฟฟ้า เพราะถือว่าเป็นค่าความต้านทานซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ที่เครื่องจ่ายกระแสไฟตรงจะสามารถจ่ายได้ และยังมีผลต่อค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดด้วย อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงหรือการใช้งานกับน้ำเสียประเภทอื่น ควรจะมี

การทดลองเบื้องต้น (คล้ายกับการทำจารทดสอบ) กับระบบที่ออกแบบแล้ว เพื่อทดสอบการจ่ายกระแสไฟในแต่ละค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

### การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

#### ข้อดี

1. สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถกำจัดโลหะหนักหลายชนิดในน้ำเสียได้ในเวลาเดียวกัน
3. ประหยัดการใช้สารเคมียกเว้นในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น ซึ่งถือเป็นการช่วยลดการใช้ปริมาณสารเคมี
4. การเดินระบบไม่มีความซับซ้อน ไม่ยุ่งยากและไม่ต้องอาศัยความชำนาญมาก
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้หลายชนิด โดยเฉพาะน้ำเสียที่ไม่ต้องมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลงอย่างมาก
6. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารอินทรีย์ สี ฟีนอล ในน้ำเสียได้ พร้อมกับการกำจัดโลหะหนัก

#### ข้อเสีย

1. น้ำเสียซีโอติที่มีสภาพเป็นกรด และในการเดินระบบจะเกิดแก๊สที่บริเวณขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดไอกรด ส่งกลิ่นเหม็น และเป็นอันตรายได้
2. เกิดแก๊สออกซิเจนซึ่งทำให้เกิดการออกซิไดส์ และน้ำเสียมีสภาพกรดทำให้เกิดการกัดกร่อน ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าบ่อยขึ้น
3. ในการเดินระบบจะทำให้เกิดตะกอนของเหล็กในปริมาณมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้า

## 4.4 กลไกในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอติด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีใช้หลักการในการถ่ายเทอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งในการถ่ายเทอิเล็กตรอนนี้จะอาศัยการจ่ายกระแสไฟตรงเข้าไปในระบบ เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนของอิออนและโมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด และอาศัยผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยในการบำบัดสิ่งที่ไม่ต้องการในน้ำเสีย

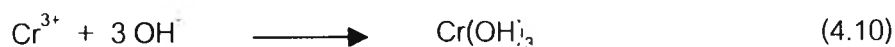
ในงานวิจัยนี้เป็นการกำจัดโลหะหนักสามชนิดที่อยู่ในน้ำเสียซีโอดี คือ โครเมียม เงิน และปรอท โดยอาศัยการจ่ายกระแสไฟตรงลงไปในน้ำเสีย เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่อยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ โดยทำให้โลหะหนักเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารประกอบของโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ สามารถตกตะกอน และแยกออกจากน้ำเสียได้ (Electroprecipitation) ซึ่งในการทดลองเพิ่มเติมได้นำตะกอนที่บริเวณขั้วแคโทดมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก แต่พบในปริมาณที่น้อยมาก (รายละเอียดในภาคผนวก ข.) ดังนั้นจึงอาจแยกกลไกที่ใช้ในการกำจัดได้ดังนี้

#### 4.4.1 กลไกการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในน้ำเสียแล้ว ค่าพีเอชของน้ำเสียจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด เนื่องจากมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนของขั้วแคโทดอันเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อไฮโดรเจนอิออนและโมเลกุลของน้ำมารับอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์อิออน ตามสมการที่ 4.8 และ 4.9



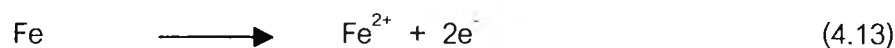
จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำรับอิเล็กตรอนแล้ว จะเกิดไฮดรอกไซด์อิออน ซึ่งควรจะทำให้ค่าพีเอชของสารละลาย (น้ำเสีย) มีค่าเพิ่มขึ้นในทันที แต่จากรูปที่ 4.28 ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา (ประมาณ 5-10 นาทีแรก) ค่าพีเอชจะยังเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำเสียมีค่าความเป็นกรดมาก ทำให้ในระบบมีไฮโดรเจนอิออนมาก ดังนั้นในช่วงแรกไฮโดรเจนอิออนจะรับอิเล็กตรอนที่จ่ายจากขั้วแคโทด ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาที่ 4.8 มากกว่าที่จะเกิดตามปฏิกิริยาที่ 4.9 ดังนั้นในช่วงแรกของการทดลองที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ค่าพีเอชจะค่อย ๆ สูงกว่าในสารละลาย แต่เมื่อเวลาผ่านไปไฮโดรเจนอิออนในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปจนเกือบหมด ในขณะที่ปฏิกิริยาที่ 4.9 จะยังดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ดังนั้นจะทำให้มีปริมาณของไฮดรอกไซด์อิออนสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมากขึ้น โดยที่ไฮดรอกไซด์อิออนจำนวนหนึ่งจะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันไฮดรอกไซด์อิออนบางส่วนก็จะเกิดปฏิกิริยากับอิออนของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (หทัยทัต ชื้อสุวรรณ, 2544) ดังสมการที่ 4.10 4.11 และ 4.12



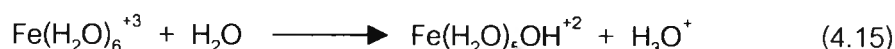
กลไกที่เกิดขึ้นตามสมการข้างต้นนี้ เป็นกลไกการตกตะกอนของโลหะหนักด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนของอ็อกไซด์ของโลหะในรูปของเมทัลไฮดรอกไซด์ (Metal Hydroxide Form) โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์อ็อกไซด์ในน้ำเสีย แต่เป็นการอาศัยปฏิกิริยารีดักชันของโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้เกิดไฮดรอกไซด์อ็อกไซด์ซึ่งมีส่วนช่วยในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

#### 4.4.2 กลไกการตกตะกอนของโลหะหนักกับสารประกอบเชิงซ้อน

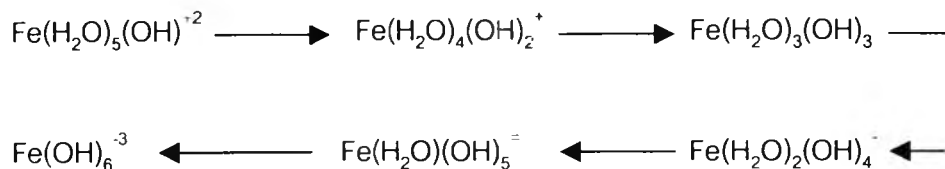
ในงานวิจัยนี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในระบบที่บริเวณขั้วแอโนด ซึ่งใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าลงไปในระบบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 4.13 และเมื่อ  $\text{Fe}^{2+}$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{H}^+$  และ  $\text{O}_2$  จะทำให้เกิด  $\text{Fe}^{3+}$  ตามสมการที่ 4.14



จากข้อความข้างต้นพบว่า  $\text{Fe}^{3+}$  ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของขั้วแอโนดนี้จะอยู่รวมกับน้ำ เพราะอ็อกไซด์ของโลหะทุกชนิดจะอยู่รวมกับโมเลกุลของน้ำและไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปอิสระได้ ดังนั้นการเขียนที่ถูกต้องจึงควรเป็น  $\text{Fe(H}_2\text{O)}_6^{+3}$  แต่เพื่อความสะดวกในการเขียน บางครั้งมักตัดโมเลกุลของน้ำออกโดยถือว่าเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้นจึงเหลือเพียง  $\text{Fe}^{3+}$  เท่านั้น ซึ่งสามารถไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed) ให้เป็นอ็อกไซด์ต่าง ๆ ของเหล็ก โดยมี  $\text{OH}^-$  เป็น Ligand ตามสมการที่ 4.15



จากสมการที่ 4.15 นี้ จะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของ  $\text{Fe(H}_2\text{O)}_6^{+3}$  ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ต่อไปอีก ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้น ประจุบวกจะลดลงเรื่อย ๆ จนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีลำดับดังนี้ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)



เมื่อน้ำมีค่าพีเอชสูงขึ้น อีออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ ซึ่งจะกลายเป็นตัวกลางที่ทำให้โลหะหนักดูดซับที่ผิวได้ หรือทำให้เกิดกลไก Co-precipitation ซึ่งจะเป็นกลไกหนึ่งที่จะช่วยในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย (Paul Morkovsky , 2001) ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบในตะกอนด้วยเครื่อง XRD ในหัวข้อ 4.3.2 ที่พบสารประกอบของเหล็ก คือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{FeO}(\text{OH})$

ข้อความข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kongsricharoern , 1994 ซึ่งกำจัดโครเมียมด้วยการตกตะกอนโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี (ใช้เหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) ซึ่งพบว่าในตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบจะประกอบด้วย  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  (Chromite) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาของเหล็กและโครเมียมอีออนเป็นกลไกอย่างหนึ่งที่จะช่วยในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย ซึ่งปรอทและเงินก็อาจถูกกำจัดด้วยกลไกนี้ได้เช่นเดียวกัน ส่วนสารประกอบในตะกอนที่ตรวจพบอีกชนิดหนึ่ง คือ  $\text{FeO}(\text{OH})$  ซึ่งก็น่าจะเป็นอีกสารประกอบเชิงซ้อนหนึ่งที่สามารถรวมตัวกับโลหะหนักได้ และจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักที่สามารถแยกตัวออกจากน้ำเสียได้ จึงถือว่าเป็นการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียอีกวิธีหนึ่ง

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ปริมาณโลหะหนัก คือ โครเมียม เงิน และปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียซีโอดีติภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะมีปริมาณน้อยลง ดังนั้นจึงควรเกิดสารประกอบของโลหะหนักเหล่านี้ในตะกอนด้วย แต่จากการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตะกอนภายหลังการบำบัด ด้วยเครื่อง XRD กลับไม่พบสารประกอบของโลหะหนักเหล่านี้เลย ซึ่งอาจเกิดจากการที่ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของเหล็กและโซเดียมที่อยู่ในตะกอนภายหลังการบำบัด ซึ่งข้อจำกัดของการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยเครื่อง XRD คือ เครื่อง XRD จะสามารถวิเคราะห์สารประกอบที่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 ของสารประกอบทั้งหมดในตัวอย่าง ดังนั้นการที่ตรวจวิเคราะห์ไม่พบสารประกอบของโครเมียม เงิน และปรอท ในตัวอย่างตะกอน เนื่องจากปริมาณของโลหะหนักเหล่านี้จะมีปริมาณใกล้เคียงร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับปริมาณของเหล็กและโซเดียมที่อยู่ในตัวอย่าง