

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการ Electro-coagulation โดยศึกษาทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการใช้พลังงาน โดยมุ่งที่จะนำไปทดแทนระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน และการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง และสารแขวนลอยในน้ำ รวมถึงเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ และปริมาณพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดังแสดงในผลการทดลอง และการคำนวณดังนี้

4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยเทคนิค

Electro-coagulation

การทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่างกันทั้งหมด 4 ระดับคือ 5 Volt, 10 Volt, 15 Volt และ 20 Volt ทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาที่ทำให้ความกระด้างทั้งหมดของน้ำบาดาลลดลงได้มากที่สุดโดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Retention time) น้อยที่สุดเพื่อใช้ในการคำนวณขนาดถังปฏิกรณ์ ค่าใช้จ่ายและพลังงานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่มีความต้องการน้ำ 120 ลบ.ม./วัน โดยในการทดลองนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำเมื่อระยะเวลาผ่านไปทุก 10 นาที และวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) pH ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้า และอุณหภูมิ จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างน้ำตกตะกอนเป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาทีแล้วนำน้ำในส่วนที่ปราศจากตะกอนมาวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำ ความขุ่น และปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1.1 ความสามารถในการกำจัดความกระด้างและความขุ่น

ในแง่ของความกระด้าง ความสามารถในการกำจัดความกระด้าง (% Hardness removal)คำนวณจาก

Hardness removal (%) = $\frac{\text{ความกระด้าง}_0 - \text{ความกระด้าง}_{\text{หลัง}_t}}{\text{ความกระด้าง}_0} \times 100$

เมื่อ ความกระด้าง₀ หมายถึงค่าความกระด้างเริ่มต้นของน้ำ (mg/l as CaCO₃)
ความกระด้าง_t หมายถึงค่าความกระด้างของน้ำหลังจากผ่าน Electro-coagulation ที่เวลา t (mg/l as CaCO₃)

จากผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยแรงดันไฟฟ้า 10 Volt เป็นเวลา 50 นาที สามารถกำจัดความกระด้างได้มากที่สุดจาก 302 mg/l as CaCO₃ เหลือเพียง 54 mg/l as CaCO₃ หรือคิดเป็น 82.12% ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของน้ำด้วย Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นระยะเวลา 60 นาที

เวลา (นาที)	ความสามารถในการกำจัดความกระด้างของน้ำ(%)			
	5 Volt	10 Volt	15 Volt	20 Volt
10	19.87	35.10	39.74	50.99
20	40.40	60.26	61.59	71.52
30	49.01	64.90	68.87	67.55
40	60.93	80.79	71.52	64.24
50	66.23	82.12	67.55	63.58
60	70.20	75.50	52.32	50.99

การที่น้ำมีความกระด้างลดลงหลังจากผ่านกระบวนการ Electro-coagulation เริ่มจากเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วคือ 1) ที่ขั้ว Anode

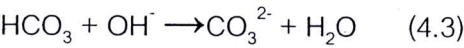
โลหะอลูมิเนียมจะสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้มีไอออนของอลูมิเนียมหลุดออกมาอยู่ในน้ำอย่างอิสระ ดังสมการ(Malakootian และคณะ, 2009)



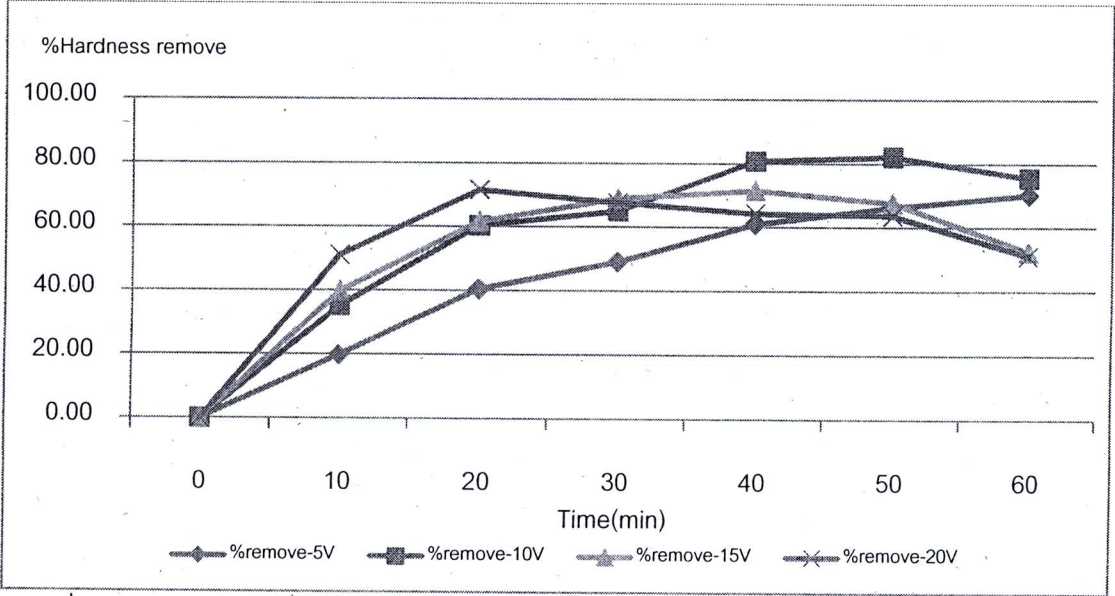
2) น้ำที่อยู่รอบๆ ขั้ว Cathode เมื่อได้รับอิเล็กตรอนจะแตกตัวเป็น H_2 และ OH^- ดังสมการ



ซึ่งในน้ำบาดาลตามธรรมชาติจะมี Ca^{2+} , Mg^{2+} และต่างจำพวก HCO_3^- ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อ HCO_3^- รวมกับ OH^- ที่เกิดบริเวณขั้ว Cathode จะแตกตัวเป็น CO_3^{2-} และน้ำดังสมการ

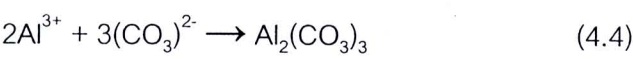


จากนั้น CO_3^{2-} ที่เกิดขึ้นนี้จะรวมกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่มีอยู่แล้วในน้ำเกิดเป็น CaCO_3 และ MgCO_3 ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้จึงทำให้ความกระด้างของน้ำบาดาลลดลง



ภาพที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างด้วย Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นระยะเวลา 60 นาที

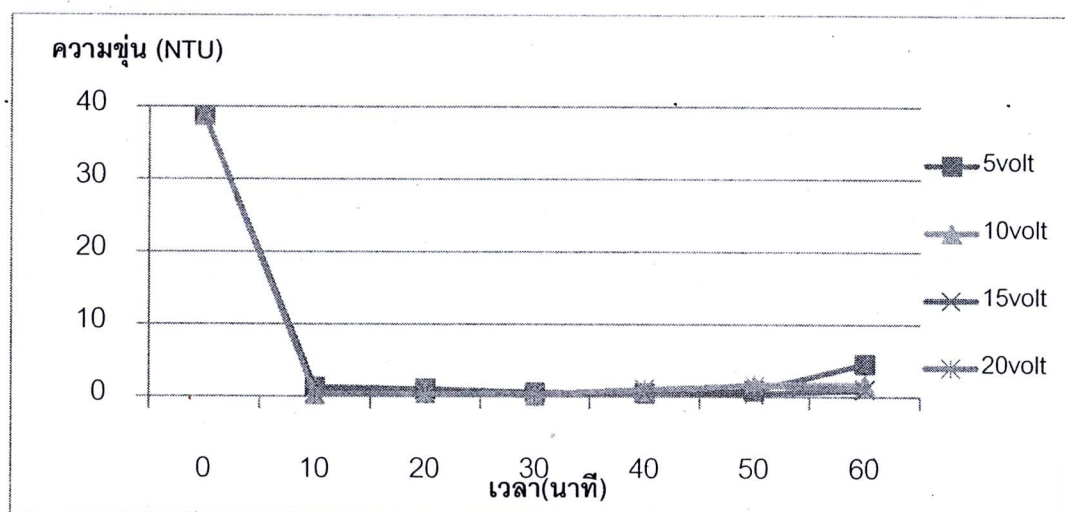
เมื่อนำค่าประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างมาวิเคราะห์ในรูปของกราฟดังภาพที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างสูงสุดของแต่ละระดับแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงเวลา 40-50 นาที จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก ทำให้รวมกับเกลือหรือสารละลายอื่นๆเกิดเป็นอลูมิเนียมคาร์บอเนตในน้ำแทนที่จะรวมกับแคลเซียมหรือแมกนีเซียมดังสมการ



ในแง่ของความขุ่นของน้ำบาดาลที่เปลี่ยนไปโดยวัดจากเครื่อง Turbidity meter แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความขุ่นของน้ำหลังจากผ่าน Electro-coagulationโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที

เวลา(นาที)	5volt	10volt	15volt	20volt
0	38.70	38.70	38.70	38.70
10	1.29	0.27	0.42	0.28
20	1.05	0.49	0.95	0.32
30	0.59	0.14	0.42	0.38
40	0.49	0.80	0.40	1.05
50	0.88	1.68	0.41	1.58
60	4.54	1.69	0.94	1.15



ภาพที่ 4.2 ความขุ่นของน้ำหลังจากผ่าน Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที

จากภาพพบว่าความขุ่นลดลงจาก 38.7 NTU เหลือน้อยมากคืออยู่ในช่วง 0.14-1.68 NTU ในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากสมการ (4.1) เมื่อรวมกับ OH^- ที่เกิดจากสมการ (4.2) เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียม $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ ดังสมการ



ซึ่ง $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นนี้จะรวมกับมลสารในน้ำโดยเฉพาะสารแขวนลอยเกิดเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถแยกออกจากน้ำได้ทำให้ความขุ่นของน้ำบาดาลที่ผ่าน Electro-coagulation ลดลง

จากภาพที่ 4.2 เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานเกินไปความขุ่นที่วัดได้กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจมีสาเหตุมาจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานทำให้สารก่อตะกอนเกิดขึ้นตลอดเวลาในปริมาณมากและอาจเกิดเป็น Al_2CO_3 ดังสมการที่ 4.4 จึงไม่สามารถตกตะกอนได้หมดภายในระยะเวลาที่เท่ากันเมื่อเทียบกับการทำการทดลองที่ระยะเวลาสั้นกว่าซึ่งมีสารก่อตะกอนเกิดขึ้นน้อยกว่า อย่างไรก็ตามน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย Electro-coagulation มีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU ซึ่งมีคุณภาพดีเทียบเท่าความขุ่นตามมาตรฐานน้ำประปา

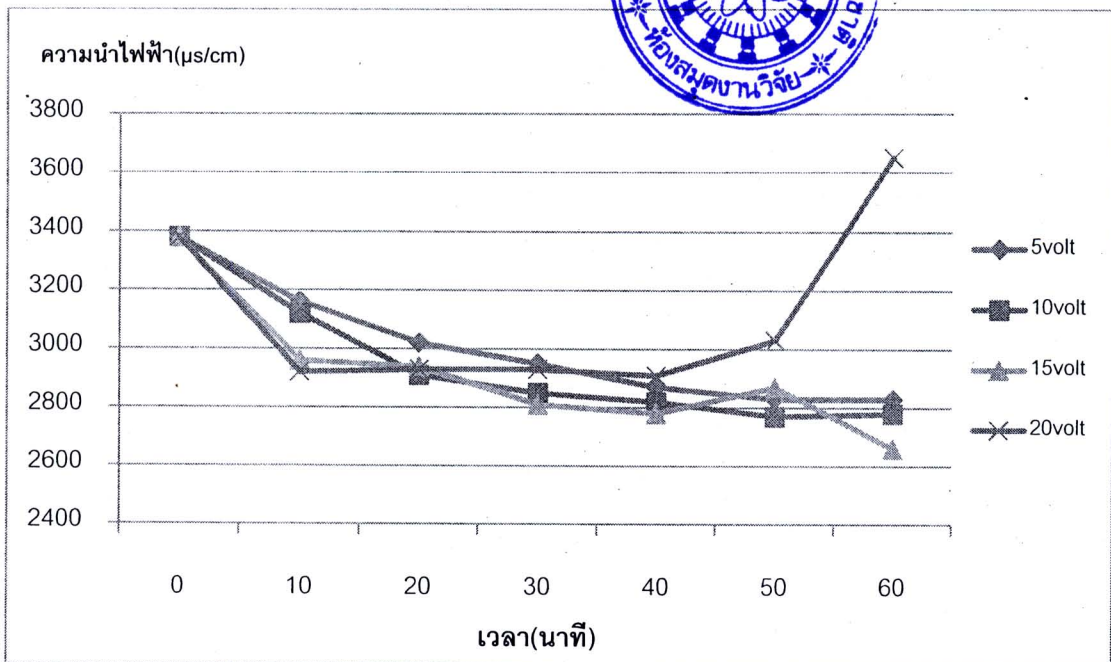
นอกจากนี้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าอาจอยู่ในรูปต่างๆ ดังนี้ $Al(H_2O)_6^{3+}$, $Al(H_2O)_5OH^{2+}$, $Al(H_2O)_4OH^+$ หรือในรูปของโมโนเมอร์หรือพอลิเมอร์ของ $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ ซึ่งสารประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารอื่นๆ ได้เพิ่มขึ้นด้วยดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป (Malakootian และคณะ, 2009 อ้างถึงการวิเคราะห์ของ Jiang และคณะ, 2002; Bazrafshan และ Mahvi, 2007; Kim และคณะ, 2007; Druiche และคณะ, 2008)

4.1.2 ความสามารถในการลดปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)

ค่าปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) และค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) จะมีความสัมพันธ์กันเนื่องจากของแข็งละลายมักจะเป็นของแข็งประเภทเกลือซึ่งแตกตัวเป็นประจุเมื่อเกิดการละลาย ทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นโดยค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) และปริมาณของแข็งละลายน้ำ(TDS) ของน้ำที่ผ่าน Electro-coagulation แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 จากตารางจะพบว่าค่าความนำไฟฟ้าและค่า TDS มีค่าลดลงจากที่สภาวะเริ่มต้นซึ่งมีสาเหตุมาจากสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นเมื่อรวมกับมลสารที่มีประจุในน้ำแล้วเกิดเป็นตะกอนที่มีเสถียรภาพทางไฟฟ้าเมื่อแยกตะกอนออกไปแล้วจึงทำให้น้ำหลังจากผ่าน Electro-coagulationมีค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) และของแข็งละลายน้ำ (TDS) ลดลง

ตารางที่ 4.3 ค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายทั้งหมดในน้ำบาดาลที่ผ่านกระบวนการ Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20Volt เป็นเวลา 60 นาที

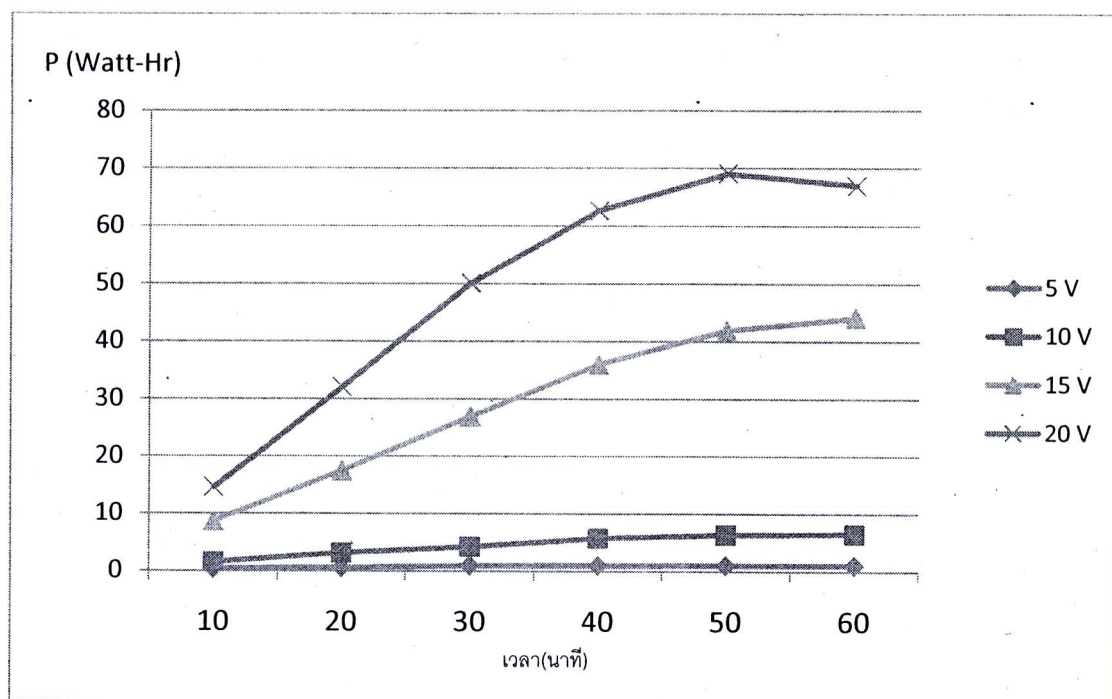
พารามิเตอร์	Conductivity (µs/cm)				TDS (mg/l)			
เวลา (นาที)	5 Volt	10Volt	15Volt	20Volt	5 Volt	10Volt	15Volt	20Volt
0	3,380	3,380	3,380	3,380	1,701	1,701	1,701	1,701
10	3,160	3,120	2,960	2,920	1,576	1,560	1,480	1,459
20	3,020	2,910	2,940	2,930	1,525	1,453	1,469	1,464
30	2,950	2,850	2,810	2,930	1,477	1,427	1,404	1,465
40	2,870	2,820	2,780	2,910	1,437	1,409	1,433	1,457
50	2,830	2,770	2,870	3,030	1,413	1,387	1,436	1,516
60	2,830	2,780	2,660	3,650	1,414	1,392	1,330	1,823



ภาพที่ 4.3 ความนำไฟฟ้าของน้ำบาดาลที่ผ่านกระบวนการ Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20Volt เป็นเวลา 60 นาที

จากภาพที่ 4.3 เป็นการนำข้อมูลค่าความนำไฟฟ้าที่เวลาต่างๆในตารางที่ 4.2 มาแสดงในรูปกราฟ จากภาพเมื่อทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 20 Volt เป็นระยะเวลามากกว่า 40 นาทีพบว่าค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายกลับมีค่าเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากการที่ขั้วไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงดังแสดงในภาพที่ 4.4 ทำให้อลูมิเนียมออกไซด์หลุดออกจากขั้วไฟฟ้าในรูปของ Al^{3+} ในปริมาณสูง ทำให้มีความนำไฟฟ้าสูงขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการสีกร่อนของขั้วไฟฟ้าหลังจากทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที

นอกจากนี้สารละลายต่างๆ ที่อยู่ในน้ำบาดาลบางส่วนยังเปลี่ยนรูปเป็นผลึกของเกลือติดอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานสูงขึ้นเป็นการขัดขวางการปล่อยอิเล็กตรอนของอลูมิเนียมจากขั้ว Anode เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจึงส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นไฟฟ้าที่ระยะเวลาต่างๆในภาพที่ 4.4 ด้วยเหตุนี้ในการทำงานจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าเป็นระยะเพื่อไม่ให้มีผลึกของเกลือหรือสิ่งสกปรกจับที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า



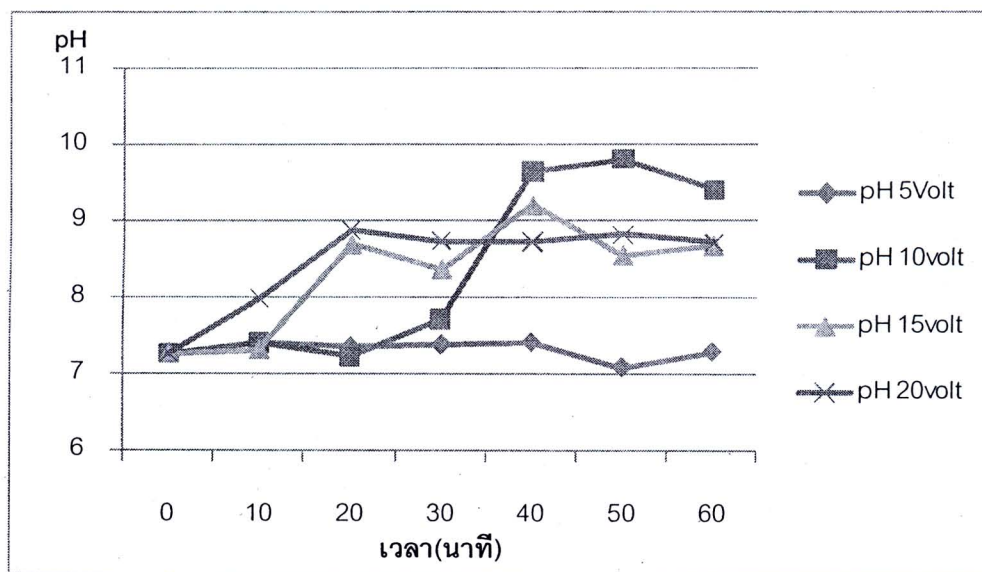
ภาพที่ 4.4 พลังงานไฟฟ้าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20V เป็นเวลา 60 นาที

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิ

ในด้านความเป็นกรด-ด่าง OH^- ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ขั้ว Cathode นอกจากจะรวมกับอลูมิเนียมเกิดเป็นสารก่อตะกอนในรูปสารประกอบต่างๆ แล้วยังมี OH^- ส่วนที่เหลือละลายอยู่ในน้ำ จึงมีส่วนทำให้น้ำที่ผ่าน Electro-coagulation มีค่า pH สูงขึ้นกว่า pH เริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณ OH^- เกิดมากขึ้นทำให้ pH สูงขึ้นตามเวลาดังแสดงค่าในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Malakootian และคณะ(2010) ที่พบว่าค่า pH ของน้ำหลังจากผ่านกระบวนการ Electro-coagulation มีค่าเพิ่มขึ้นจากที่สภาวะเริ่มต้นเสมอ นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Mouedhen และคณะ (2008) ที่ระบุว่าค่า pH เพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดจากโดยปกติในน้ำมีสารประกอบของ Cl^- และ SO_4^{2-} ซึ่งจะแลกเปลี่ยนประจุกับ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ทำให้มี OH^- อิสระเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิและ pH ของน้ำบาดาลที่ผ่านกระบวนการ Electro-coagulation ด้วยแรงดัน 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที

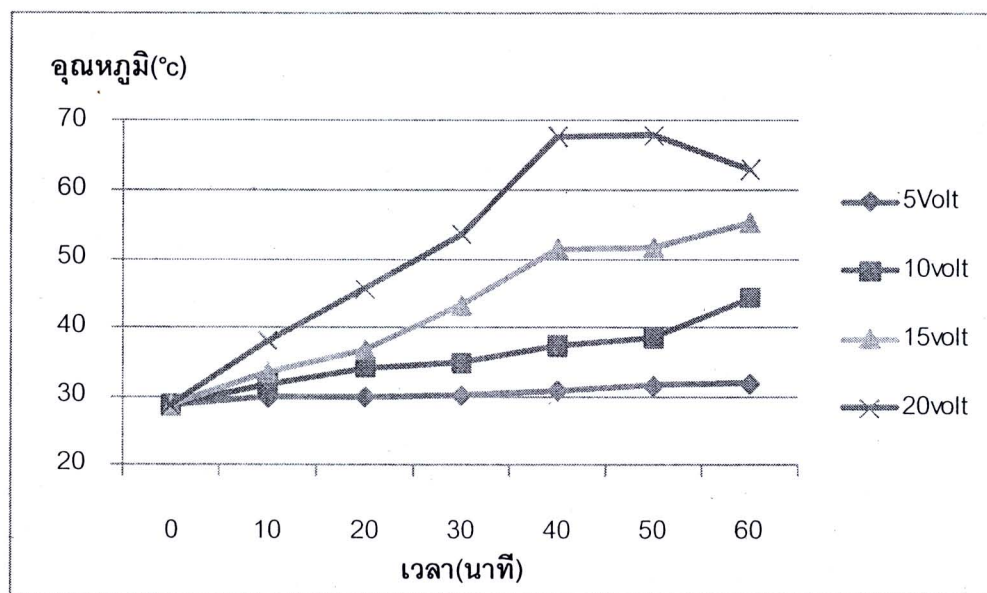
พารามิเตอร์	อุณหภูมิ (°c)				ความเป็นกรด-ด่าง (pH)			
เวลา(นาที)	5 Volt	10 Volt	15 Volt	20 Volt	5 Volt	10 Volt	15 Volt	20 Volt
0	28.7	28.7	28.7	28.7	7.27	7.27	7.27	7.27
10	29.9	31.7	33.5	38.0	7.41	7.41	7.32	7.98
20	30.0	34.1	36.8	45.6	7.35	7.22	8.69	8.87
30	30.2	34.8	43.2	53.5	7.38	7.72	8.37	8.73
40	30.9	37.3	51.4	67.8	7.41	9.64	9.20	8.72
50	31.6	38.5	51.6	67.9	7.09	9.80	8.55	8.81
60	31.9	44.3	55.2	63.0	7.29	9.40	8.67	8.71



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ผู้วิจัยพบว่าน้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามเวลาโดยเมื่อทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น อุณหภูมิของน้ำก็ยิ่งสูงมากขึ้นด้วยดังภาพที่ 4.6 เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าที่แช่อยู่ในตัวอย่างน้ำบาดาลทำให้น้ำได้รับการถ่ายเทพลังงานจากขั้วไฟฟ้าในรูปของพลังงานความร้อนด้วย เมื่อพิจารณาค่าความกระด้างของน้ำที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาเดียวกันพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

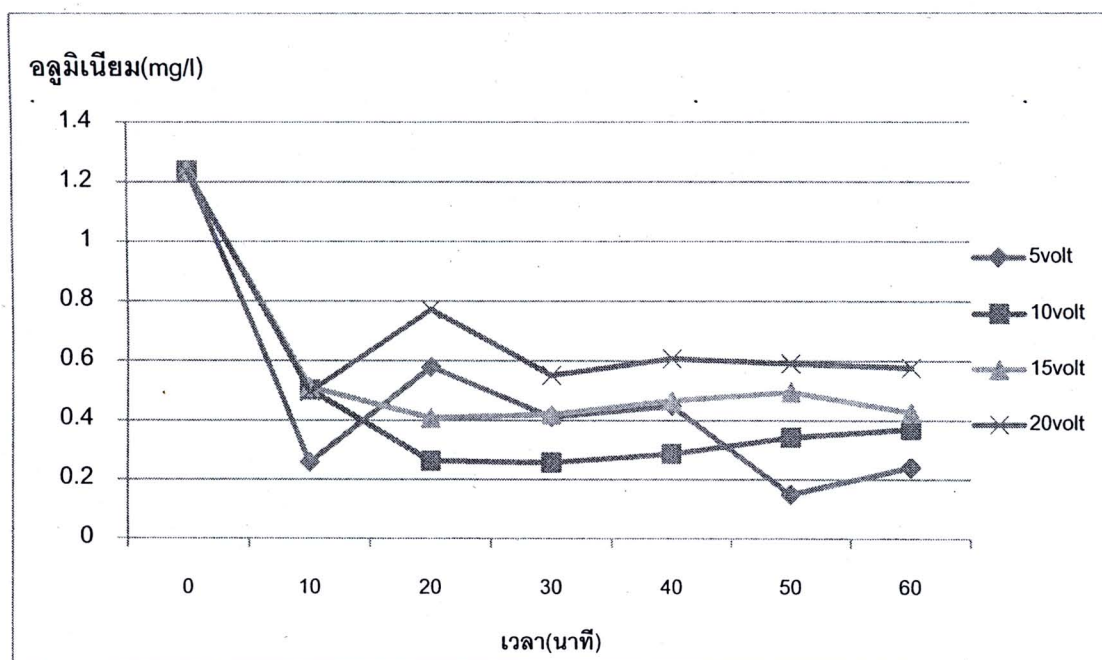
ความกระด้างของ Electro-coagulation แต่อย่างไร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของจันทร์พร พลากรกุล (2551) ที่ประยุกต์ใช้ Electro-coagulation โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 28 และ 60°C พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 28°C



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที

4.1.4 ผลพลอยได้ด้านการกำจัดอลูมิเนียม

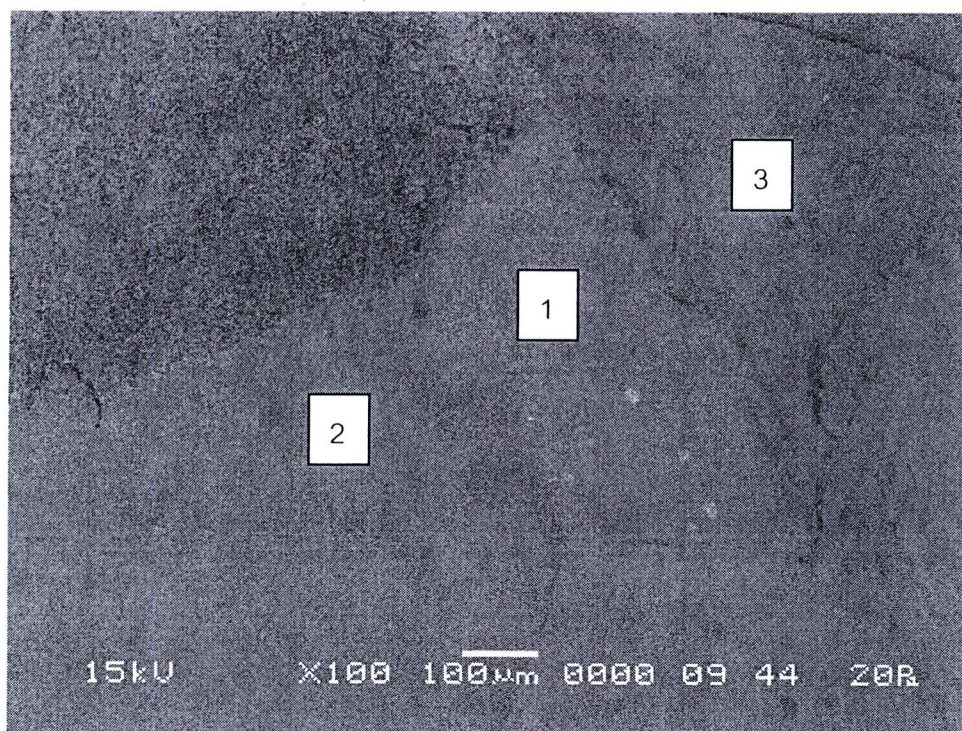
จากการวิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ที่อยู่ในน้ำบาดาลดังภาพที่ 4.7 พบว่า ปริมาณอลูมิเนียมที่อยู่ในน้ำบาดาลก่อนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation เท่ากับ 1.237 mg/l เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย Electro-coagulation และทิ้งให้ตกตะกอนแล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียมที่เหลืออยู่ในน้ำพบว่ามีค่าลดลงอยู่ในช่วง 0.258 – 0.772 mg/l ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมที่มีอยู่แล้วในน้ำบาดาลตามธรรมชาติรวมถึงอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode ในสภาวะที่เป็นด่างเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ของอลูมิเนียมและตกตะกอนแยกออกจากน้ำ



ภาพที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาณอลูมิเนียมในน้ำ (mg/l) หลังจากปรับปรุงด้วย Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5-20 Volt เป็นเวลา 60 นาที และผ่านการตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที

4.1.5 การวิเคราะห์ธาตุในตะกอนจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation

เมื่อนำตะกอนไปถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังภาพที่ 4.8 และวิเคราะห์ธาตุในตะกอนด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer พบว่ามีปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ เช่นออกซิเจน แคลเซียม และแมกนีเซียมอยู่ในตะกอนเช่นเดียวกันดังผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.5 ซึ่งปริมาณอลูมิเนียมและออกซิเจนที่อยู่ในตะกอนน่าจะเป็นสารออกไซด์ของอลูมิเนียมที่ทำให้เกิดตะกอน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าประจุของอลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าไม่ได้ละลายปนเปื้อนไปกับน้ำหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation จึงไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดโลหะก่อนนำน้ำไปใช้งาน



ภาพที่ 4.8 ภาพขยาย 100 เท่าของตะกอนจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 10 Volt เป็นเวลา 40 นาที

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุในตะกอนของน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย
Electro-coagulation ที่แรงดัน 10 Volt เป็นเวลา 40 นาที

จุดที่ 1			จุดที่ 2			จุดที่ 3		
Element	Weight %	Atomic %	Element	Weight %	Atomic %	Element	Weight %	Atomic %
C	5.74	9.56	C	4.03	6.78	C	4.38	7.36
O	42.08	52.67	O	43.36	54.79	O	43.73	55.14
Na	0.30	0.26	Na	0.29	0.25	Na	0.46	0.40
Mg	0.72	0.59	Mg	0.63	0.53	Mg	2.35	1.95
Al	45.03	33.42	Al	45.81	34.33	Al	38.21	28.57
Si	0.79	0.56	Si	0.36	0.26	Si	4.92	3.53
S	0.83	0.52	S	0.98	0.62	S	0.83	0.52
Cl	2.46	1.39	Cl	2.30	1.31	Cl	1.90	1.08
Ca	2.07	1.03	Ca	2.24	1.13	Ca	1.89	0.95
-	-	-	-	-	-	Mn	0.24	0.09
-	-	-	-	-	-	Fe	1.10	0.40
Total	100.00	100.00	Total	100.00	100.00	Total	100.00	100.00

4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลของระบบ Electro-coagulation กับการกรองทรายและการดูดซับด้วยคาร์บอน

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยคาร์บอนแล้วพบว่า การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation มีประสิทธิภาพในการลดความนำไฟฟ้าของแข็งละลายในน้ำทั้งหมดรวมทั้งยังกำจัดความขุ่นและความกระด้างของน้ำบาดาลมากกว่าการกรองด้วยทราย และการดูดซับด้วยคาร์บอนดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยน้ำบาดาลที่ 2-4 คือน้ำบาดาลที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการต่างๆ

ตารางที่4.6 ประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน เทียบกับวิธี Electro-coagulation

พารามิเตอร์	น้ำบาดาล 1	น้ำบาดาล 2	น้ำบาดาล 3	น้ำบาดาล 4
Conductivity(µs/cm)	3,320	3,320	3,630	2,840
TDS (mg/l)	1,659	1,661	1,817	1,418
Turbidity (NTU)	12.35	3.40	3.36	0.09
Hardness (mg/l as CaCO ₃)	300	304	342	60

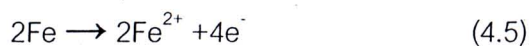
- เมื่อ
- น้ำบาดาล 1 คือตัวอย่างน้ำบาดาลที่สูบจากบ่อบาดาลโดยตรง
 - น้ำบาดาล 2 คือน้ำบาดาลที่สูบจากบ่อบาดาลและผ่านการกรองทราย
 - น้ำบาดาล 3 คือน้ำบาดาลที่ผ่านการกรองทรายและดูดซับด้วยคาร์บอน
 - น้ำบาดาล 4 คือน้ำบาดาลที่ผ่าน Electro-coagulation

สำหรับการเปรียบเทียบในส่วนของการกำจัดความกระด้างโดยใช้วิธีแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน กับวิธี Electro-coagulation นั้นไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากในสภาพการใช้งานจริงทางโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาได้นำน้ำบาดาลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย และดูดซับด้วยคาร์บอน เก็บในถังเก็บน้ำรวมกับน้ำประปាក่อนที่จะผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน เพื่อให้เป็นน้ำป้อนสำหรับห่อฝังเย็น ผู้วิจัยจึงได้นำน้ำบาดาลที่ผ่านการกรองทรายและดูดซับด้วยคาร์บอนแล้ว มาผสมกับน้ำประปาในอัตราส่วน 1:9 มาทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation เพื่อเปรียบเทียบกับปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินจากโรงงานกรณีศึกษาดังผลการทดลองในตารางที่ 4.7 สำหรับอัตราส่วนผสมของน้ำบาดาลต่อน้ำประปา 1:9 ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นค่าเฉลี่ยจากการศึกษาข้อมูลสัดส่วนการใช้น้ำของโรงงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 4.7 ความกระด้างของน้ำ (mg/l as CaCO₃) เมื่อผ่านการปรับปรุงด้วย Electro-coagulation ด้วยแรงดันไฟฟ้า10Volt เป็นเวลา 40 นาทีเทียบกับการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน

พารามิเตอร์	น้ำบาดาลผสม น้ำประปา (1:9)	Electro-coagulation	แลกเปลี่ยนประจุ ด้วยเรซิน
ความกระด้างของน้ำ	114	34	0

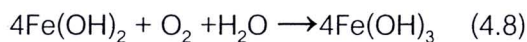
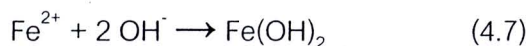
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 พบว่าการกำจัดความกระด้างด้วยวิธีแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินสามารถกำจัดความกระด้างได้ดีกว่าการใช้วิธี Electro-coagulation มากกว่า 3 เท่าแต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนี LSI และ RSI ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า น้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินซึ่งปราศจากความกระด้างนั้นมีแนวโน้มที่จะทำให้วัสดุที่เป็นโลหะเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากตามธรรมชาติเมื่อโลหะเช่นเหล็กสัมผัสกับน้ำ อากาศ หรือความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้อิออนของเหล็กดังสมการ



และตามธรรมชาติของน้ำจะแตกตัวเป็น



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นเมื่อรวมกับ OH^- จะเกิดสารประกอบ ferrous hydroxide ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมเหล็กหรือ ferric hydroxide ต่อไปดังสมการ (Puckorius, 1999)



ในขณะที่น้ำหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย Electro-coagulation ที่มีความกระด้างเล็กน้อยซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดตะกอนบางๆ จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้เนื่องจากตะกอนที่อาจเกิดขึ้นจะไปเคลือบผิวของวัสดุทำให้น้ำหรือออกซิเจนไม่สามารถสัมผัสกับเหล็กได้โดยตรงจึงไม่เกิดการกัดกร่อนดังปฏิกิริยาที่กล่าวไป นอกจากนี้การที่มีอนุมูลไฮดรอกซิลอยู่ในน้ำเมื่อรวมกับ OH^- เกิดเป็นสารประกอบ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ตามสมการที่ (4.5) ซึ่งอาจมีส่วนช่วยชะลอการเกิดสนิมได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.8 ดัชนี LSI และ RSI ของน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินเปรียบเทียบกับน้ำที่ผ่าน electro-coagulation

ตัวอย่าง	LSI	LSI: Indication	RSI	RSI: Indication
ผ่านElectro-coagulation	0.555	Little scale	8.009	Heavy corrosion
ผ่าน Softener	-1.853	Heavy corrosion	11.475	Intolerable corrosion

ที่มา: LSI และ RSI Indication จาก Geo-Heat Center, Oregon Institute of technology

ในทางปฏิบัติงานจริงการใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุเดิมในหอผึ่งเย็น ผู้ปฏิบัติงานมักเติมสารเคมีที่มีธาตุสังกะสี (Zinc: Zn) เพื่อให้ธาตุสังกะสีเคลือบที่ผิวภายในท่อของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและทำหน้าที่เป็นธาตุที่สูญเสียอิเล็กตรอนแทนโลหะที่ใช้ทำท่อหรือโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการทำให้น้ำป้อนสำหรับหอผึ่งเย็นอยู่ในสมดุลหรือมีแนวโน้มไปในทางที่จะเกิดตะกัณเล็กน้อยจึงเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดความสูญเสียที่โครงสร้างของหอผึ่งเย็น และระบบท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการกัดกร่อนได้อีกทางหนึ่ง

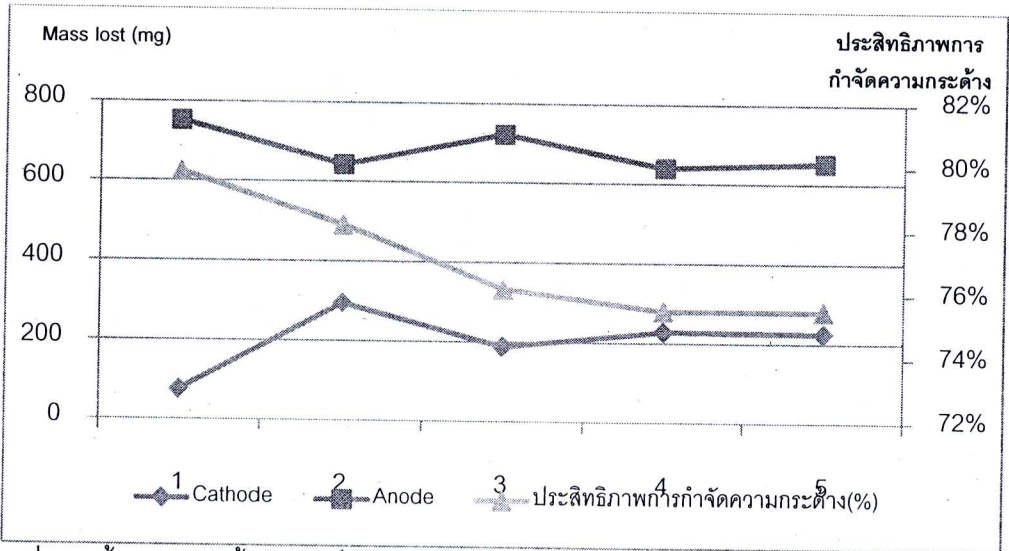
4.3 การวิเคราะห์อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

จากผลการทดลองเพื่อหาน้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สูญเสียในการทำปฏิกิริยา Electro-coagulation ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยน้ำหนักเริ่มต้นของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วเป็น 19.495 g พบว่าน้ำหนักของขั้ว Anode ลดลงมากกว่าขั้ว Cathode อย่างมากตามที่คาดไว้เนื่องจากการสูญเสียโลหะอลูมิเนียมไปในรูปของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ขั้ว Anode และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างเมื่อเวลาผ่านไปโดยใช้ขั้วไฟฟ้าชุดเดิมทั้งหมด 5 ครั้งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างลดลงจาก 80% เหลือ 75% คาดว่าเนื่องจากสาร

แขวนลอยและผลึกเกลือที่เกาะติดกับขั้วไฟฟ้าขั้วขวางอลูมิเนียมออลอนที่เกิดจากขั้ว Anode โดย น้ำหนักของขั้ว Cathode ลดลงเฉลี่ย 1.06% ส่วนน้ำหนักของขั้ว Anode ลดลงเฉลี่ย 3.77% เมื่อ ใช้ขั้วไฟฟ้าซ้ำในแต่ละครั้งโดยน้ำหนักของขั้ว Anode จะลดลงในปริมาณใกล้เคียงกันจึงสามารถ คำนวณปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้างแสดงในภาคผนวก ก สำหรับการประยุกต์ใช้ในการ ปฏิบัติงานจริงอาจยืดอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าได้โดยการสลับแผ่นอลูมิเนียมจากขั้ว Anode มา เป็น Cathode

ตารางที่ 4.9 น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อผ่าน Electro-coagulation ครั้งละ 40 นาที เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของน้ำ (%)

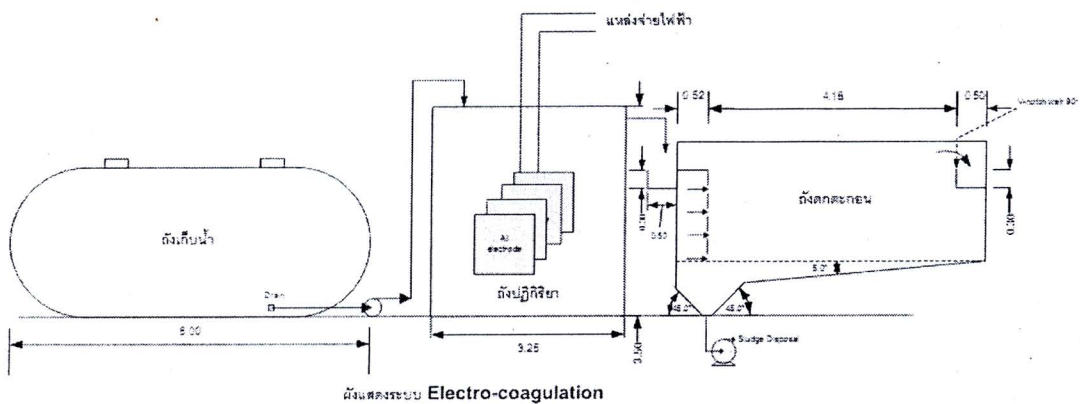
ครั้งที่ทำการ ทดลอง	น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ลดลง(mg)		ประสิทธิภาพการกำจัด ความกระด้าง (%)
	Cathode	Anode	
1	75.30 (0.39%)	751.90 (3.86%)	80%
2	294.00 (1.51%)	643.00 (3.43%)	78%
3	188.30 (0.98%)	722.00 (3.99%)	76%
4	228.40 (1.21%)	640.30 (3.68%)	75%
5	225.20 (1.20%)	653.20 (3.90%)	75%



ภาพที่ 4.9 น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ลดลงและประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของน้ำ (%) เมื่อผ่าน Electro-coagulation ด้วยแรงดันไฟฟ้า 10V เป็นเวลา 40 นาทีจำนวน 5 ครั้ง

4.4 การออกแบบถังปฏิกรณ์ และถังตกตะกอน

การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation ที่ทำการออกแบบสำหรับใช้ทดแทนถังกรองทราย ถังดูดซับด้วยคาร์บอนและถังแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินประกอบด้วย 1) ถังเก็บน้ำทำจากเหล็กเคลือบ Epoxy 2) ถังปฏิกรณ์ Electro-coagulation ทำจากเหล็กเคลือบ Epoxy และ 3) ถังตกตะกอนซึ่งมีการจัดวางดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ผังระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation

ถังเก็บน้ำบาดาล

ถังเก็บน้ำบาดาลซึ่งเป็นถังที่มีการใช้งานอยู่เดิมสำหรับเก็บน้ำบาดาลที่สูบขึ้นมาจากบ่อบาดาลโดยตรง เป็นถังเก็บน้ำชนิดตั้งบนดินทรงแคปซูล (On ground water storage tank-capsule type) ผลิตจากไฟเบอร์กลาสเสริมแรงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เมตรและยาว 6 เมตร ความจุ 25 ลบ.ม. และมีเครื่องสูบน้ำขนาด 2.2 กิโลวัตต์เพื่อทำหน้าที่สูบน้ำเข้าสู่ถัง Electro-coagulation

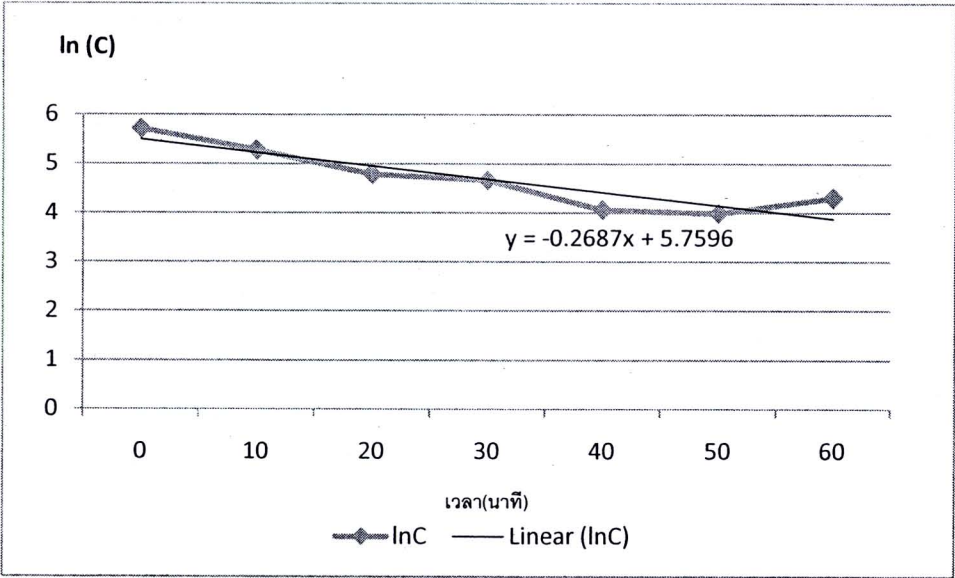
ถังปฏิกรณ์ Electro-coagulation

จากผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 10 Volt เป็นเวลา 60 นาทีพบว่าความกระด้างของน้ำบาดาลลดลงในลักษณะการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 ดังตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ความกระด้างของน้ำเทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 10 Volt เป็นเวลา 60 นาที

เวลา (นาที)	0	10	20	30	40	50	60
C	302	196	120	106	58	54	74
ln(C)	5.710	5.278	4.787	4.663	4.060	3.989	4.304

เมื่อ C คือความกระด้างของน้ำ (mg/l as CaCO₃)



ภาพที่ 4.11 ความกระด้างของน้ำที่ลดลงเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 10 Volt เป็นเวลา 60 นาที
ตามปฏิกิริยาอันดับ 1

จากภาพที่ 4.11 ค่าความชันของเส้นกราฟ (k) มีค่า 0.2687 ซึ่งนำไปคำนวณขนาดของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่องดังสมการ

$$\ln \frac{C_{in}}{C_{out}} = \frac{Vk}{Q}$$

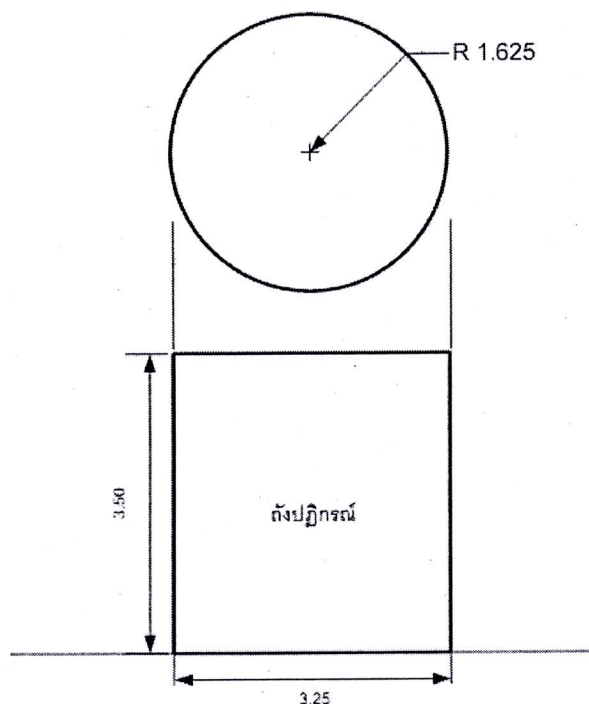
เมื่อ C_{in} คือ ปริมาณความกระด้างของน้ำก่อนเข้าถังปฏิกริยาเท่ากับ 302 mg/l as CaCO₃)

C_{out} คือปริมาณความกระด้างของน้ำที่เหลือหลังผ่านถังปฏิกริยานี้แล้วเท่ากับ 58 mg/l as $CaCO_3$

V คือปริมาตรถังปฏิกรณ์ที่ต้องการ (ลบ.ม.)

Q คืออัตราการไหลของน้ำผ่านถังปฏิกริยาในที่นี้กำหนดให้ใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 6 ลบ.ม./ชั่วโมง

เมื่อคำนวณปริมาตรถังปฏิกรณ์จะได้ถังปฏิกรณ์เป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.25 เมตร ความสูงของระดับน้ำในถังเท่ากับ 3 เมตรและบวกความสูงระหว่างขอบถึงถึงระดับน้ำ (Free board level) เพิ่ม 0.5 เมตร ดังนั้นจะได้ถังทรงกระบอกที่มีปริมาตรรวมคือ 29.04 ลูกบาศก์เมตรภายในติดตั้งขั้วไฟฟ้าซึ่งทำจากอลูมิเนียมแผ่นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1 เมตร x 1.2 เมตร x 1 มิลลิเมตร (หนา) จำนวน 4 แผ่นเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง AC/DC 230Volt (Input) /12 Volt 200 A (Output) และอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าโดยภาพ top view และ front view ของถังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 top view และ front view ของถังปฏิกรณ์ Electro-coagulation

ถังตกตะกอน

ถังตกตะกอนที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้มีลักษณะดังภาพที่ 4.3 โดยเป็นถังตกตะกอนทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

-อัตราการใช้น้ำ 120 ลบ.ม.ต่อวัน

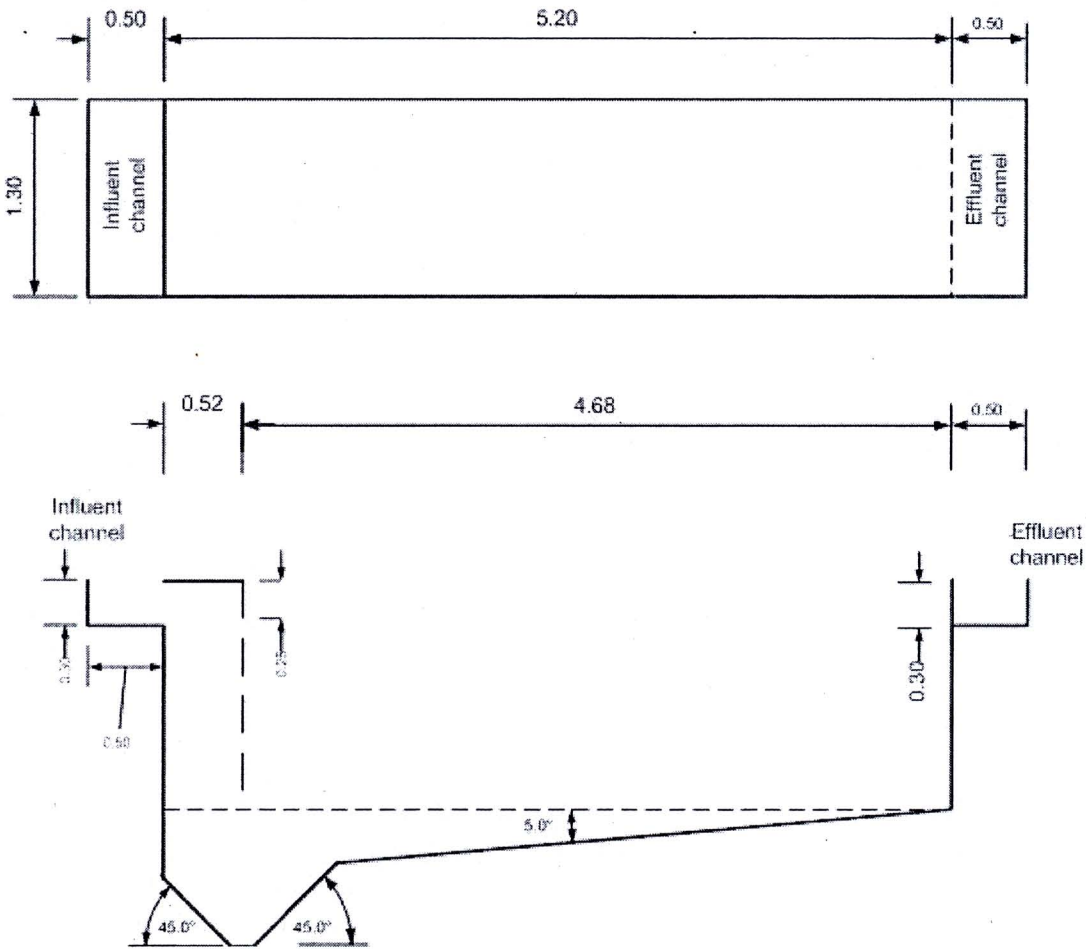
-อัตราการน้ำล้น (Overflow rate) สำหรับสารก่อก้อนประเภทสารส้ม 20-25

ลบ.ม./ตร.ม./วัน โดยในที่นี้เลือกใช้ $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{วัน}$ (Reynolds and Richards, 1996)

-อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (W:L) = 1:3 ถึง 1:4 ในที่นี้เลือกใช้ 1:4

-ระดับความลึกของถังตกตะกอนใช้อัตราส่วน ความกว้าง:ความลึก = 1:1 ถึง 2.25:1 ในที่นี้เลือกใช้ 1:1

ถังตกตะกอนที่ออกแบบจะมีขนาด กว้าง x ยาว x สูงเท่ากับ 1.3 เมตร x 5.2 เมตร x 2 เมตร โดยมีรางรับน้ำเข้าขนาด กว้าง 0.5 เมตร ความสูงของรางรับน้ำเข้า 0.3 เมตร ตลอดด้านกว้างของถังเมื่อน้ำไหลมาที่รางรับน้ำเข้าถังตกตะกอนจะไหลผ่านช่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 0.25 เมตร ที่ออกแบบเพื่อให้มีการกระจายน้ำเข้าสู่ถังตกตะกอนอย่างสม่ำเสมอ โดยมีระยะเวลาการตกตะกอน 2 ชั่วโมง จากนั้นน้ำส่วนที่ใสจะไหลผ่านฝายน้ำล้นแบบสามเหลี่ยมมุม 90 องศา (V-notch weir 90°) ทั้งหมด 11 ฝายตลอดแนวความกว้างของถังตกตะกอน สำหรับพื้นของถังตกตะกอน กำหนดให้มีความลาดเอียง 5 องศาเพื่อให้ตะกอนไหลมารวมในหลุมเก็บตะกอนที่มีความลาดเอียง 45 องศา ตลอดแนวด้านกว้างของถังโดยไม่ต้องมีเครื่องกวาดตะกอนที่กั้นถัง ดังภาพที่ 4.13 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้



ภาพที่ 4.13 top view และ front view ของถังตกตะกอน

การคำนวณขนาดของถังตกตะกอน

การคำนวณขนาดถังตกตะกอนเริ่มจากการคำนวณพื้นที่ของถังตกตะกอนจาก

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ด้านบนของถังตกตะกอน} &= \frac{\text{อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน)}}{\text{อัตราการไหลสูงสุดของสารก่อตะกอน (ลบ.ม./ตร.ม.-วัน)}} \\
 &= (120 \text{ ลบ.ม./วัน}) / (20 \text{ ลบ.ม./ตร.ม.-วัน}) \\
 &= 6 \text{ ตร.ม.}
 \end{aligned}$$

จากอัตราส่วนความกว้าง : ความยาวของถังที่เหมาะสมเป็น 1:4 จึงเลือกใช้ความกว้างของถังเป็น 1.3 เมตรและ 5.2 เมตรตามลำดับ และจากอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง (W:H) ที่เหมาะสมคือ 1:1 จึงเลือกใช้ถังที่มีความลึกจากกันถึงระดับผิวน้ำเท่ากับ 1.3 เมตรเช่นเดียวกับความกว้าง

ของถังโดยยังไม่รวมความสูงจากระดับผิวน้ำถึงขอบของถังตกตะกอน (Free board level) ที่เผื่อไว้ อีก 0.5 เมตร จะได้ถังตกตะกอนที่มีปริมาตร

$$1.3 \text{ ม.} \times 5.2 \text{ ม.} \times 1.3 \text{ ม.} = 8.788 \text{ ลบ.ม.}$$

เมื่อตรวจสอบอัตราการน้ำล้นของถัง (Overflow rate) ซึ่งเท่ากับ $\frac{\text{อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ด้านบนของถังตกตะกอน (ตร.ม.)}}$

$$\frac{120 (\text{ลบ.ม./วัน})}{(1.3 \times 5.2) (\text{ตร.ม.})} = 17.751 \text{ ลบ.ม./ตร.ม.-วัน}$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 20 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความยาวของถังมีความยาวเพียงพอที่ทำให้น้ำจะไม่ไหลเร็วเกินไปจน ตกตะกอนไม่ทัน

ระยะเวลาที่น้ำอยู่ในถังตกตะกอน

คำนวณระยะเวลากักเก็บน้ำในถัง (Hydraulic retention time: HRT) จาก

$$\begin{aligned} \text{เวลาในการกักเก็บน้ำในถัง (ชม.)} &= \frac{\text{ปริมาตรถังตกตะกอน (ลบ.ม.)}}{\text{อัตราการใช้น้ำเฉลี่ย (ลบ.ม./ชั่วโมง)}} \\ &= \frac{(8.788 \times 24)}{120} \\ &= 1.757 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ซึ่งมากกว่าระยะเวลตกตะกอนจากการทดลองที่ได้กำหนดระยะเวลาการตกตะกอนไว้ที่ 1 ชั่วโมง แต่จากข้อกำหนดการออกแบบทั่วไปแนะนำว่าถังตกตะกอนสำหรับการตกตะกอนเคมี ควรมีระยะเวลากักเก็บน้ำในถังตกตะกอนอยู่ในช่วง 2-4 ชั่วโมง ดังนั้นจึงปรับเพิ่มความลึกของถังตกตะกอนเป็น 1.5 เมตรเพื่อให้ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังตกตะกอนเป็น 2 ชั่วโมง ทำให้

ปริมาตรของถังตกตะกอนที่ระดับความลึกของน้ำในถัง 1.5 เมตรเป็น 10.14 ลบ.ม. และมีความเร็วในการไหลของน้ำในถังตกตะกอนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{\text{ปริมาตรถังตกตะกอน(ลบ.ม.)}}{\text{HRT(ชั่วโมง)} \times \text{ความยาวถัง(ม.)} \times \text{สูงของระดับน้ำในถัง(ม.)}} = \frac{10.14}{2.028 \times 1.5 \times 5.2}$$

$$= 0.6410 \text{ เมตร/ชั่วโมง}$$

โดยกำหนดให้ความลาดเอียงของกันถังตกตะกอน 5° จากพื้นระดับและให้หลุมเก็บตะกอน มีความลาดเอียงอย่างน้อย 45° โดยไม่มีอุปกรณ์กวาดตะกอนที่พื้นด้านล่างของถังตกตะกอน

4.5 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ทำโดยประเมินค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำ 120 ลบ.ม./วัน ด้วยวิธีการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน และแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน เปรียบเทียบกับวิธี Electro-coagulation โดยแสดงในรูปของมูลค่าปัจจุบัน (Present value) เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สามารถให้ได้นาน 7 ปี โดยมีระยะเวลาการทำงาน 8,640 ชั่วโมง/ปี ให้อัตราดอกเบี้ย MLR ร้อยละ 6.12 ต่อปี (ธนาคารไทยพาณิชย์, 4 ธันวาคม 2553) และกำหนดให้มูลค่าซากของอุปกรณ์เมื่อสิ้นอายุการใช้งานแล้วไม่มีมูลค่าหรือเท่ากับ 0 บาท ดังแสดงในรายละเอียดดังนี้

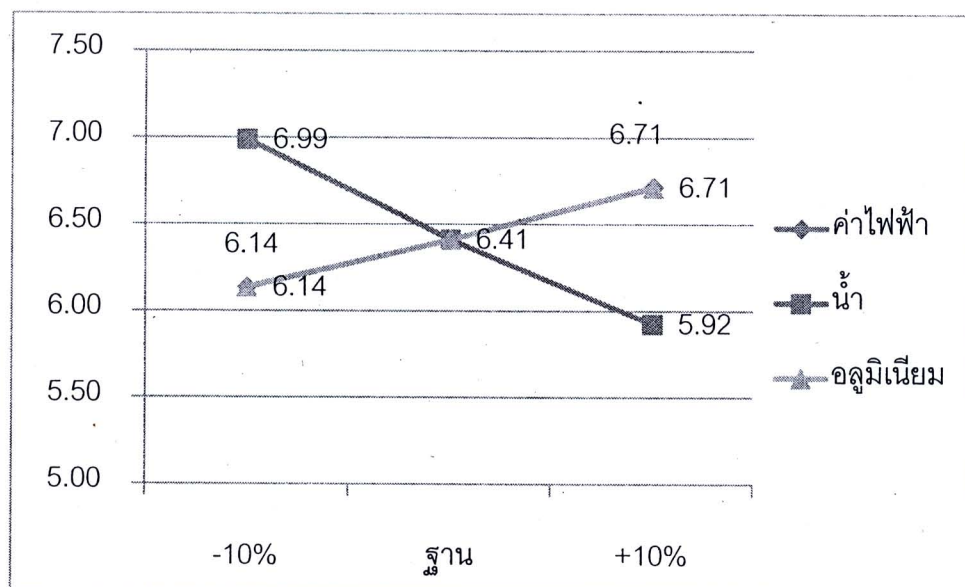
- ค่าแรงสำหรับพนักงานดูแลระบบในวันทำงานปกติชั่วโมงละ 50 บาท
- ค่าไฟฟ้า 3 บาท/กิโลวัตต์
- ค่าน้ำสำหรับทำความสะอาดอุปกรณ์ 20.325 บาท/ลบ.ม.
- ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนและขับไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน 3,000 บาท/ตัน
- ทรายสำหรับถังกรองทราย 1,112 ลิตร มูลค่า 21,746 บาท
- ถ่านกัมมันต์สำหรับถังดูดซับด้วยคาร์บอนปริมาณ 1,668 ลิตร มูลค่า 52,918 บาท
- เรซินพลาสติกสำหรับถังแลกเปลี่ยนประจุปริมาณ 700 ลิตร มูลค่า 37,100 บาท
- เกลือสำหรับฟื้นฟูเรซินปริมาณ 36 ตัน/ปี มูลค่า 194,400 บาท

จากการคำนวณมูลค่าปัจจุบันของการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยวิธี Electro-coagulation ดังสมมติฐานข้างต้น มีมูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 4,572,020.18 บาท มูลค่าปัจจุบันของการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินมีค่าเท่ากับ 5,992,178.03 บาท จะเห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation มีมูลค่าปัจจุบันน้อยกว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบเดิมถึง 1,395,206.83 บาท หรือ 23.70%

การคำนวณจุดคุ้มทุนในการนำ Electro-coagulation มาใช้ทดแทนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบเดิมโดยคำนวณจากการประมาณราคาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้จากการสอบถามผู้แทนจำหน่ายอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

- เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12V/200A สายไฟฟ้าอุปกรณ์ต่างๆ และชุดควบคุมการทำงาน มูลค่า 135,000 บาท
- ถังปฏิกริยา Electro-coagulation ขนาด 21 ลบ.ม. มูลค่า 200,000 บาท
- อลูมิเนียมแผ่นมูลค่าชุดละ 2,163 บาท
- ถังตกตะกอนขนาด 13.52 ลบ.ม. รวมท่อน้ำและอุปกรณ์มูลค่า 435,000 บาท
- เครื่องสูบน้ำขนาด 2.2 kw มูลค่า 57,600 บาท
- เครื่องสูบน้ำตะกอนขนาด 2.2 kw มูลค่า 75,800 บาท
- ค่าขนส่งอุปกรณ์มีมูลค่า 10% ของราคาอุปกรณ์ทั้งหมด

จากการประมาณราคาข้างต้นและค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation สามารถคำนวณจุดคุ้มทุนอย่างง่ายได้เท่ากับ 6.41 ปี และเมื่อกำหนดให้ค่าใช้จ่ายบางรายการคือ ไฟฟ้า น้ำ และอลูมิเนียม มีราคาเปลี่ยนแปลงไป $\pm 10\%$ สามารถคำนวณความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) แสดงในรูปของจุดคุ้มทุน เมื่อราคาไฟฟ้า น้ำและอลูมิเนียมผันแปรเปลี่ยนแปลง

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของการเปลี่ยนแปลงราคา น้ำสำหรับใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจุดคุ้มทุนมากที่สุดเนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation ใช้น้ำปริมาณน้อยกว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินถึง 17 เท่า ดังนั้นการที่ราคาน้ำสูงขึ้นย่อมส่งผลดีต่อ Electro-coagulation โดยระยะเวลาคืนทุนจะลดลงจาก 6.41 ปีเหลือ 6.14 ปี

ปัจจัยที่ส่งผลต่อจุดคุ้มทุนในลำดับถัดไปคือค่าไฟฟ้าและราคาอลูมิเนียมแผ่นตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการ Electro-coagulation ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าและอลูมิเนียมเป็นหลักในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อทดแทนสารกรองทราย คาร์บอน เรซินสำหรับแลกเปลี่ยนประจุ และน้ำรวมทั้งสารละลายเกลือในการบำรุงรักษาสารกรองต่างๆ ด้วย ดังนั้น Electro-coagulation จึงเหมาะสมกับโรงงานที่มีระบบผลิตไฟฟ้าใช้เองหรือมีแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นที่ทำให้ราคาไฟฟ้าถูกลงเนื่องจากราคาไฟฟ้าที่ไม่สูงจะให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลง

จากภาพที่ 4.14 เมื่อพิจารณาจุดคุ้มทุนเมื่อราคาไฟฟ้าและอลูมิเนียมลดลง 10% และเพิ่มขึ้น 10% จะเห็นว่าจุดคุ้มทุนเท่ากันคือ 6.14 และ 6.71 ปีตามลำดับเนื่องจากผลต่างของมูลค่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าสำหรับระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation และระบบ

กรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินที่เพิ่มขึ้น 10% นั้นมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของอูมิเนียมแผ่นที่เพิ่มขึ้น 10% จึงทำให้จุดคุ้มทุนมีค่าเท่ากัน

4.6 การใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation ส่วนใหญ่คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้ารวมถึงเครื่องสูบน้ำต่างๆ ซึ่งมากกว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินถึง 30.55 % ดังแสดงในตารางที่ 4.10 แต่การใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นนี้ก็เพื่อทดแทนสารตัวกลางต่างๆ คือทราย คาร์บอนและเรซินแลกเปลี่ยนประจุ รวมทั้งเกลือและน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซิน และการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดสารกรองด้วย

ตารางที่ 4.11 การใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย (a) วิธีการกรองด้วยทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน เปรียบเทียบกับ (b) วิธี Electro-coagulation

(a) การใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน และแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน

อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า	ขนาด (kw)	จำนวน	ชั่วโมงการทำงาน(ชม)	พลังงานที่ใช้(kw)
เครื่องสูบน้ำขนาด(service)	2.2	1	8,640	19,008.00
เครื่องสูบน้ำขนาด(backwash)	2.2	1	180	396.00
ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำ	7.84	1	8,640	67,737.60
รวม				87,141.60

(b) การใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย electro-coagulation

อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า	ขนาด (kw)	จำนวน	ชั่วโมงการทำงาน(ชม)	พลังงานที่ใช้ (kw)
ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขั้วไฟฟ้า	3.45	1	8,640	29,808.00
เครื่องสูบน้ำ (Service)	2.2	1	8,640	19,008.00
เครื่องสูบน้ำตะกอน	2.2	1	720	1,584.00
ชุดอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำ	8.69	1	8,640	75,081.60
รวม				125,481.60

เมื่อพิจารณาการใช้น้ำพบว่า การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วย Electro-coagulation นั้นมีการใช้น้ำสำหรับทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์น้อยกว่าน้ำสำหรับการบำรุงรักษาสารกรองในระบบกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินถึง 17 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปริมาณน้ำในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ของการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย

Electro-coagulation เปรียบเทียบกับการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน

และแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน

รายการ	Electro-coagulation	การกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอน และแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน
ใช้ในการทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์	~ 2 ลบ.ม. ต่อครั้ง	-
การ backwash สารกรองทรายและคาร์บอน	-	19.5 ลบ.ม. ต่อครั้ง
การฟื้นฟูสภาพเรซิน	-	14.5 ลบ.ม. ต่อครั้ง
รวม	2 ลบ.ม. ต่อครั้ง	34 ลบ.ม. ต่อครั้ง