บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 น้ำบาดาล ที่มีลักษณะดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำบาดาลที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาที่กำหนดโดยการประปาส่วนภูมิภาค(2550)

Parameter	น้ำบาดาลที่ใช้ศึกษา	มาตรฐานน้ำประปา
ความนำไฟฟ้า(µs/cm)	3,380	-
ความขุ่น (NTU)	38.7	5
ความเป็นกรดด่าง	7.27	6.5 – 8.5
อุณหภูมิ (°c)	28.7	-
ความกระด้างทั้งหมด (mg/l as $CaCO_3$)	302	300
ของแข็งละลายทั้งหมด(mg/l)	1,701	600
อลูมิเนียม (mg/l)	1.237	-

ที่มา:การประปาส่วนภูมิภาค(2550)

3.1.2 แอมโมเนีย (NH_3) ความบริสุทธิ์ 30% ยี่ห้อ Panreae น้ำหนักโมเลกุล 17.03 g/mole

3.1.3 Sodium Chloride (NaCl) จากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ น้ำหนักโมเลกุล 53.5 g/mole มีจุดเดือด 520°c

3.1.4 Calcium Carbonate ($CaCO_3$) จากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ น้ำหนักโมเลกุล 100.09 g/mole จุดหลอมเหลว 825°c

3.1.5 Magnesium Sulfate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) จากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ น้ำหนักโมเลกุล 246.48 g/mole

3.1.6 Eriochrome Black T ($C_2H_{12}N_3NaO_7S$) ยี่ห้อ Pannreae น้ำหนักโมเลกุล 461.38 g/mole

3.1.7 Triehtanolamine $N(CH_2CH_2OH)_3$ ยี่ห้อ Unilab น้ำหนักโมเลกุล 149.19 g/mole

3.1.8 Ethylenediaminetetraacetic acid di-Sodium Salt (EDTA di-Sodium salt) $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$ ยี่ห้อ Univar น้ำหนักโมเลกุล 372.24 g/mole

3.1.9 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (conductivity meter) และของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) Mettler Toledo รุ่น 7GO

3.1.10 เครื่องวัดความขุ่น EUTECH รุ่น TN100

3.1.11 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง CyberScan EUTECH pH110

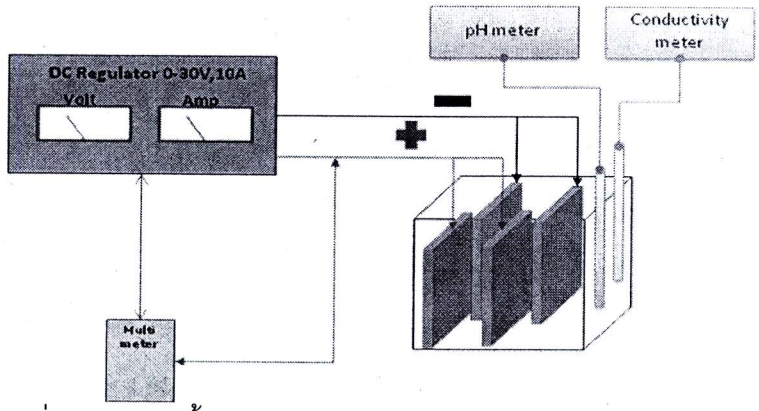
3.1.12 มาตรวัดกระแสไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า UT 30C Mitsubishi Electric

3.1.13 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo

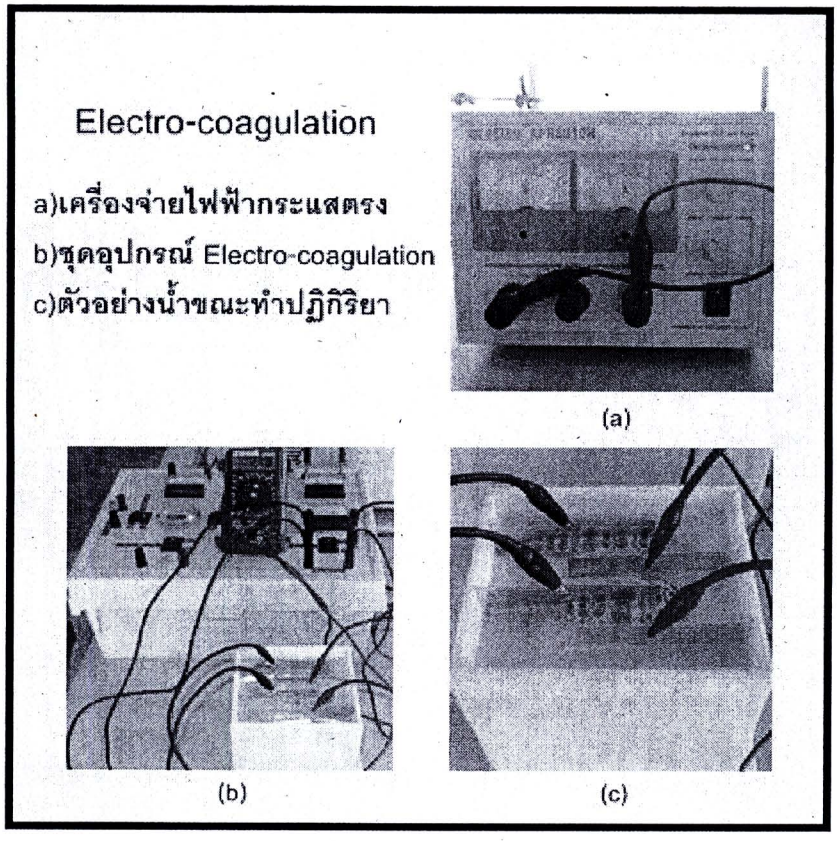
3.1.14 เครื่องวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำ Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ Perkins Elmer AAnalyst 800

3.2 อุปกรณ์

ภาชนะทดลองทำจากอคริลิคหนา 3 mm. ขนาด 12.5x12x10 cm.ที่ต่อเข้ากับสายยาง Polyethylene เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm.สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ โดยมีแผ่นอลูมิเนียมขนาด 8x12 cm. จำนวน 4 แผ่นวางขนานกัน มีระยะห่างระหว่างแผ่น 2 ซม. ในภาชนะเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ATTEN APR3010H ที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ 0-30 Volt ซึ่งมีมาตรวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 3.1 และ 3.2



ภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง Electro-coagulation

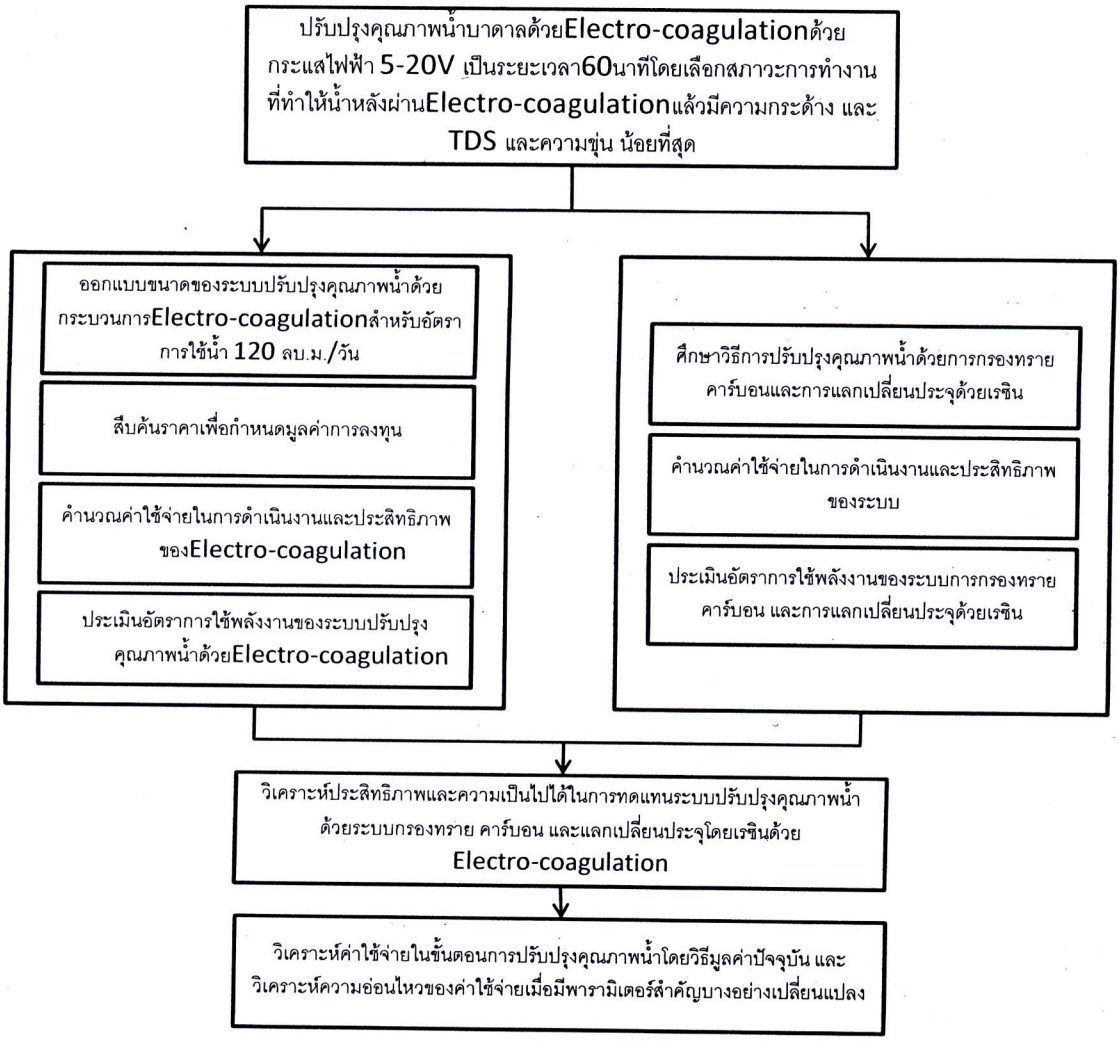


ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.3 วิธีการวิจัย

ในการวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยกระบวนการ Electro-coagulation และเลือกสภาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดความกระด้างของน้ำเพื่อนำมาออกแบบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยกระบวนการ Electro-coagulation โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนคือขั้นตอนการศึกษาความต่างศักย์และระยะเวลาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่เหมาะสมและขั้นตอนที่ 2 เป็นการออกแบบขนาดถังปฏิกรณ์ ถังตกตะกอนรวมทั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation สำหรับใช้ในระดับอุตสาหกรรม และตอนที่ 3 เป็นการคำนวนค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมทั้งการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ และวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงราคาไฟฟ้า น้ำประปา และอลูมิเนียมแผ่นโดยนำผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับ

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้ในปัจจุบันของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาดังได้แสดงในแผนผังดังภาพที่3.3

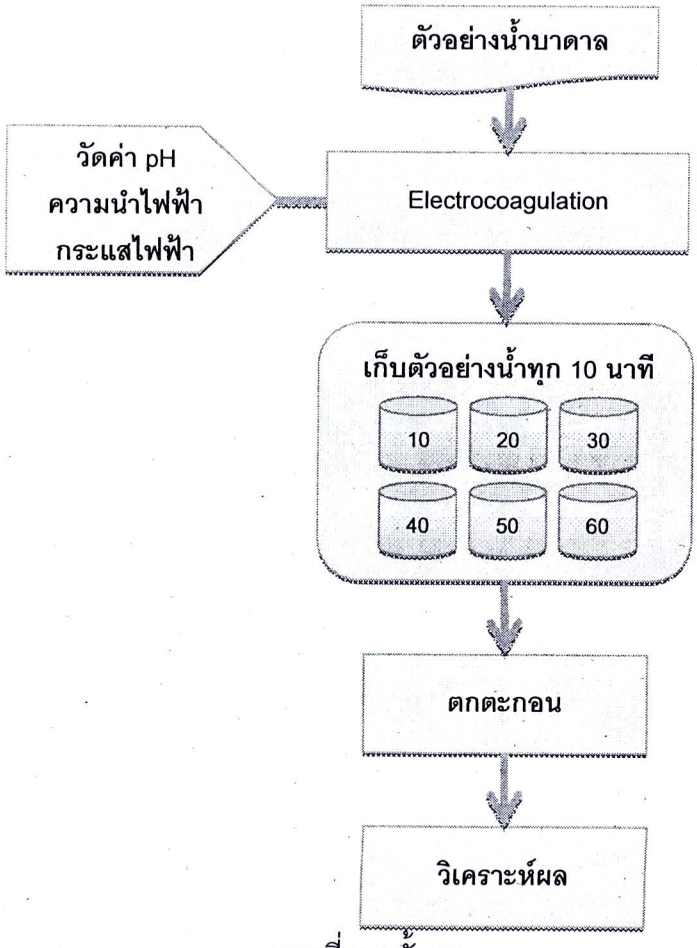


ภาพที่ 3.3 ลำดับวิธีการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วย Electro-coagulation และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการ Electro-coagulation

ทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยอุปกรณ์การทดลองในข้อที่ 3.2 เป็นเวลา 60 นาทีโดยปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 4 ระดับคือ 5 Volt, 10 Volt, 15 Volt และ 20 Volt ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำจากภาชนะทดลองเมื่อเวลาผ่านไปทุก 10 นาที ทำการวิเคราะห์ค่า ความนำไฟฟ้า (Conductivity) อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขั้วไฟฟ้า และความเป็นกรดด่าง (pH) จากนั้นปล่อยน้ำตัวอย่างให้ตกตะกอนเป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที แยกน้ำส่วนที่ปราศจากตะกอนแล้วนำไปวิเคราะห์ความกระด้างทั้งหมด ความขุ่น และอลูมิเนียม ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.2 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำระดับอุตสาหกรรม

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ผ่านกระบวนการ Electro-coagulation เลือกระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของน้ำและสารแขวนลอยดีที่สุดแล้วจึงออกแบบถังปฏิกรณ์ Electro-coagulation โดยอ้างอิงเกณฑ์การออกแบบถังปฏิกิริยาแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) ดังนี้(เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2535, น.30-33)

<u>สมการสำหรับการออกแบบถังปฏิกิริยาแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow)</u>

สำหรับปฏิกิริยาที่มีอันดับของปฏิกิริยาเป็นอันดับที่1 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและปริมาตรที่ทำให้ได้ความเข้มข้นขาออกที่ต้องการตามสมการที่ (3.1)

$$\ln \frac{C_{in}}{C_{out}} = \frac{Vk}{Q} \qquad (3.1)$$

เมื่อ C_{in} คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารในน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความกระด้างทั้งหมดในหน่วย mg/l as $CaCO_3$

C_{out} คือปริมาณความเข้มข้นของสารในน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ สำหรับงานวิจัยนี้คือค่าความกระด้างทั้งหมดในหน่วย mg/l as $CaCO_3$ ที่เหลืออยู่ในน้ำหลังผ่านถังปฏิกรณ์

V คือปริมาตรถังปฏิกรณ์ (m^3)

k คือค่าคงที่ปฏิกิริยาโดยสามารถคำนวณได้เมื่อทราบอันดับของปฏิกิริยา

Q คืออัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (m^3/hr)

<u>มาตรฐานการออกแบบถังตกตะกอน</u> (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2535, น.218-243)

ในการออกแบบถังตกตะกอนเคมีได้มีค่ามาตรฐานและสมการสำหรับการคำนวณขนาดถังตกตะกอน รางรับและรางระบายน้ำ รวมทั้งขนาดของฝายน้ำล้นดังนี้

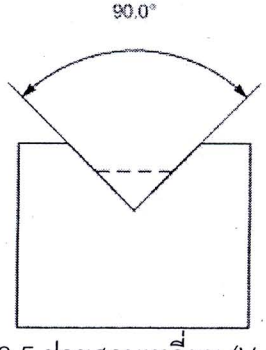
- อัตราการไหลสูงสุดของสารก่อตะกอน (Solid loading) ประเภทที่ใช้สารประกอบของอลูมิเนียม เช่นสารส้ม (Alum) คือ 20.4-24.5 m^3/m^2/วัน (Reynolds และ Richards, 1996, p.264)
- ขนาดของถังตกตะกอนมี อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (W:L) = 1:3 ถึง 1:4 และ ความกว้าง: ความลึก = 1:1 ถึง 2.25:1
- อัตราน้ำล้นฝาย (weir loading) ของสารก่อตะกอนประเภทสารประกอบจากอลูมิเนียม 150 m^3/m-วัน โดยใช้สมการสำหรับการคำนวณขนาดถังตกตะกอน และรางระบายน้ำต่างๆ ดังนี้

$$\text{พื้นที่ผิวของถังตกตะกอน(ตร.ม.)} = \frac{\text{อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./วัน)}}{\text{อัตราการไหลสูงสุดของสารก่อตะกอน(ลบ.ม./ตร.ม.-วัน)}}$$

$$\text{เวลาในการตกตะกอน (ชม.)} = \frac{\text{ปริมาตรถังตกตะกอน(ลบ.ม.)}}{\text{อัตราการใช้น้ำเฉลี่ย(ลบ.ม./ชั่วโมง)}}$$

อัตราน้ำล้นฝายสำหรับฝายสามเหลี่ยมมุม 90°(ลบ.ม./วินาที) = $1.47\ H^{2.5}$

เมื่อ H คือความสูงของระดับน้ำที่ไหลผ่านฝายดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ฝายสามเหลี่ยม (V-notch)

จากนั้นคำนวณขนาดของรางระบายน้ำออกจากฝายโดยกำหนดให้เผื่อความสูงสำหรับการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน (Friction lost) อีก 50% ของความสูงของระดับน้ำในรางระบายซึ่งคำนวณจากสมการของ Camp (Camp's equation) (Reynolds และคณะ, 1989)

ความสูงของระดับน้ำ ณ ตำแหน่งต้นน้ำ$(H_0) = \sqrt{d^2 + \frac{Q^2}{gb^2d}}$

เมื่อ H_0คือ ระดับน้ำในรางระบายน้ำ ณ ตำแหน่งต้นน้ำ (Upstream water depth), ม.

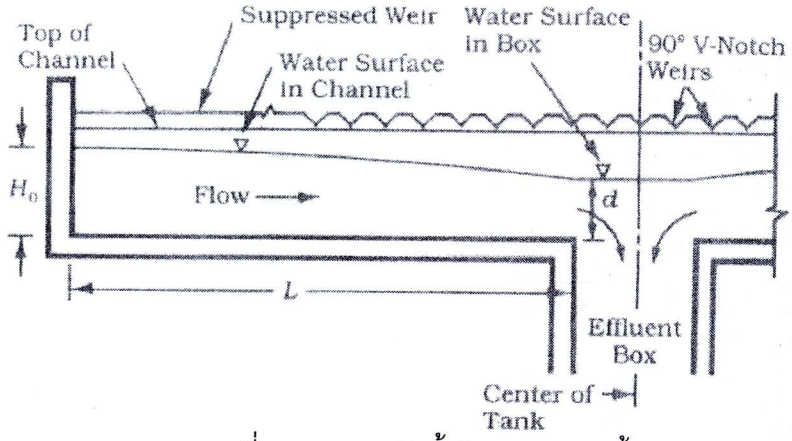
d คือระดับน้ำที่ทางออกของรางระบายน้ำ, ม.ซึ่งคำนวนจาก

$$d = \left(\frac{Q^2}{b^2 g}\right)^{1/3}$$

Q คืออัตราการไหลของน้ำ , ลบ.ม./วินาที

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 ม./วินาที^{2}

b คือความกว้างของรางระบายน้ำ, ม.



ภาพที่ 3.6 แนวระดับน้ำในรางระบายน้ำ

ที่มา: Reynolds และ Richards (1996)

3.3.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้วยวิธีมูลค่าปัจจุบันและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

ในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลด้วยวิธี Electro-coagulation นี้ใช้วิธีมูลค่าปัจจุบันซึ่งเป็นการแสดงมูลค่าเทียบเท่าของกระแสเงินสดในช่วงเวลาที่เราพิจารณาโดยคำนวณ ณ เวลาปัจจุบัน เมื่อทราบค่าของเงินในแต่ละช่วงเวลา อัตราดอกเบี้ย และระยะเวลาของโครงการที่พิจารณาก็จะสามารถคำนวณมูลค่าปัจจุบันได้ดังนี้ (สมบูรณ์ นุชประยูร และวันวิสาข์ สกลภาพ, 2548)

$$P=A\left(\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right)$$

เมื่อ P คือมูลค่าปัจจุบัน (Present value)

A คือมูลค่ารายปีหรือค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา (Annual value)

i คืออัตราดอกเบี้ย (ร้อยละ)

n คือระยะเวลาที่เราพิจารณา (ปี)

การพิจารณาเลือกโครงการมักเลือกโครงการที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนหลังหักค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดรวมกันแล้วมีค่ามากที่สุด แต่สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณามูลค่าปัจจุบันเฉพาะของค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกโครงการที่ให้มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

ในส่วนของการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อมีพารามิเตอร์บางค่าเปลี่ยนแปลงไป สำหรับการวิเคราะห์โครงการต่างๆ มักหมายถึงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven analysis) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางอย่างซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของจุดคุ้มทุนเมื่อราคาไฟฟ้า น้ำประปา และราคาอลูมิเนียมแผ่นมีการเปลี่ยนแปลง ±10% เพื่อวิเคราะห์ว่าการเปลี่ยนแปลงราคานี้จะส่งผลต่อจุดคุ้มทุนอย่างไร สำหรับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนสามารถวิเคราะห์ได้หลายแนวทางเช่นการวิเคราะห์จากมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนจากการลงทุน หรือจะวิเคราะห์โดยการใช้ระยะเวลาคืนทุนแบบง่าย (Simple payback period) ซึ่งเป็นการคำนวณระยะเวลาที่ทำให้ได้รับผลตอบแทนเท่ากับต้นทุนหรือเงินลงทุนดังสมการ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนแบบง่าย} = \frac{\text{เงินลงทุนทั้งหมด}}{\text{ผลประโยชน์ที่ได้รับและผลประหยัดต่อปี}}$$