

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

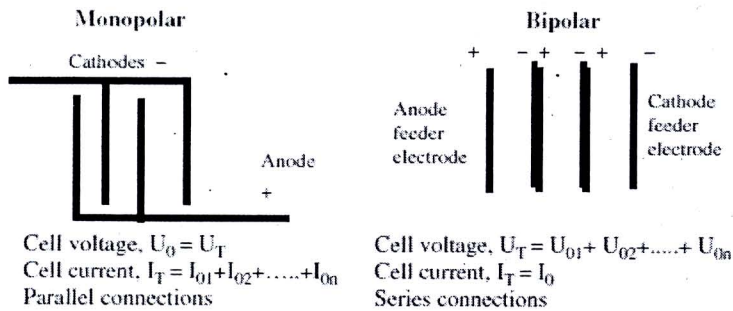
2.1 ความหมายของ Electro-coagulation

Electro-coagulation: EC เป็นกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีที่ทำให้สารแขวนลอยหรือมลสารที่อยู่ในตัวกลางของเหลวเกิดความไม่เสถียรโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะเรียกว่า Sacrificial electrode ซึ่งอาจทำมาจากโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ในบางกรณีอาจใช้ร่วมกับการเป่าอากาศเพื่อให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเรียกว่า Electro-coagulation/flotation :ECF(Emamjomeh และ Sivakumar, 2009)

EC และ ECF ใช้หลักการทางไฟฟ้า-เคมีเช่นเดียวกับ Electrolytic cell โดยกระแสไฟฟ้าจะต่อเข้ากับขั้ว electrode ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (electrolyte) โดยมีกระบวนการหลัก 3 กระบวนการคือ

1. Electrode oxidationที่ขั้วแอโนด
2. เกิดฟองของก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วคาโทด (Gas bubble generation)
3. การจับตัวเกิดเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (Flotation and sedimentation of floc formed)

การต่อขั้วไฟฟ้าโดยทั่วไปมีการต่อ 2 แบบดังแสดงในภาพที่ 2.1 คือ monopolar และแบบ bipolar ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้า กระแส และควบคุมการทดลองด้วยมาตรวัดกระแสไฟฟ้า I_0 และ ศักย์ไฟฟ้า U_0 ผ่านขั้วบวกและลบ ของขั้วไฟฟ้าแต่ละคู่ เป็นจำนวน n คู่ เหมือนกันทั้ง 2 แบบ แต่ต่างกันที่ monopolar จะต่อขั้วไฟฟ้าแบบขนาน ส่วน bipolar จะต่อกันแบบอนุกรม



ภาพที่ 2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าแบบ monopolar และ bipolar

ที่มา: Emamjomeh และ Sivakumar (2009)

โดยมีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากกระบวนการ Electro-coagulation ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะชนิดต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2 การใช้ประโยชน์ของ Electro-coagulation

2.2.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้งานด้วยกระบวนการ Electro-Coagulation

Abuzaid และคณะ(2002) ศึกษาการใช้ Electro-coagulation ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลทางภาคตะวันออกของประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยใช้เหล็ก Stainless เป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง งานวิจัยนี้เน้นเฉพาะการกำจัดความขุ่นของน้ำบาดาล ไม่ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างหรือค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำ(TDS) พบว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 1 A ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 5 นาที ค่าความขุ่นของน้ำลดลง 95% จาก 76 NTU เหลือ 4 NTU และเมื่อเติมสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ลงในน้ำตัวอย่างเพื่อเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าพบว่า เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงเหลือ 2 นาทีโดยมีประสิทธิภาพเท่ากันและยังทำการทดลองต่อโดยลดกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 0.5A และเติมเกลือลงในน้ำตัวอย่าง 1 กรัม/ลิตร โดยทำการทดลองที่เวลา 10, 7 และ 2 นาที พบว่าสามารถในการลดความขุ่นจาก 76 NTU เหลือเพียง 1.6, 2.2 และ 2.2 NTU ตามลำดับโดย Abuzaid และคณะ ได้เสนอว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 1

และ 0.5 A ไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ จึงแนะนำให้ใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 A เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

Malakootian และคณะ(2009) ได้ศึกษาการกำจัดความกระด้างของตัวอย่างน้ำดื่มจากจังหวัด Kerman ประเทศอิหร่านที่มีค่าความกระด้างทั้งหมด 464 mg/l as CaCO_3 โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้า 5, 10 และ 20V ปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่าง เป็น 5.3, 7.2 และ 10.1 พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้การกำจัดความกระด้างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ 20 Volt และ pH เป็น 10.1 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดได้ 95.6% สำหรับการทดลองที่ pH 7.2 ซึ่งเป็นระดับ pH ที่เราสนใจ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 20V ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาทีสามารถกำจัดความกระด้างได้ 80.6% จากผลการทดลอง Malakootian และคณะได้ให้ความเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้างของตัวอย่างน้ำที่ pH 10.1 มีค่าสูงกว่าเนื่องจากที่สภาวะต่างซึ่งมี Hydroxide ในปริมาณมากสามารถรวมกับอลูมิเนียมเกิดเป็นตะกอนที่มีความสามารถจับกับ Ca และ Mg ได้ดี ตะกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่กว่า ตกตะกอนได้ดีกว่าการทดลองที่สภาวะ pH เป็นกรดหรือเป็นกลาง นอกจากนี้การใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ประจุอลูมิเนียมถูกปลดปล่อยจากขั้วไฟฟ้ามากกว่าจึงก่อตะกอนได้ดีกว่า

ต่อมา Malakootian และคณะ(2010) ยังศึกษาการกำจัดความกระด้างของน้ำด้วยกระบวนการ Electrocoagulation โดยใช้แท่งเหล็กทรงกระบอก เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมกับการกวนโดยใช้ใบกวนที่ระดับความเร็ว 400 rpm โดยกำหนดค่า pH ของน้ำตัวอย่างไว้ 3 ค่าคือ 4, 7 และ 10 พบว่าที่ค่า pH 7 สามารถกำจัดความกระด้างทั้งหมดของน้ำได้ดีที่สุดคือ 95.7% จาก 300 mg/l as CaCO_3 โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 Volt และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที เมื่อปรับค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 10 และทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 12 Volt เป็นระยะเวลา 60 นาทีพบว่าสามารถกำจัดความกระด้างของน้ำได้ดีขึ้นเป็น 98.2% และจากการทดลองที่ค่า pH ต่างกันคือ 3, 7 และ 10 พบว่าค่า pH ของน้ำหลังผ่านกระบวนการ Electro-coagulation จะเพิ่มขึ้นจากค่า pH เริ่มต้นเสมอทั้งนี้ Malakootian และคณะได้เสนอแนะเพิ่มเติมว่าการใช้ Electro-coagulation สำหรับน้ำดื่มควรคำนึงถึงชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับร่างกายเช่น เหล็ก อลูมิเนียม และไททานเนียมเนื่องจากเป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ หาง่าย และราคาไม่แพง สำหรับการเลือกใช้เหล็กเป็น

ขั้วไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพดีแต่ก็ต้องมีขั้นตอนกำจัดสีของเหล็กในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำน้ำไปใช้ด้วย

Yi และคณะ(2009) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำทะเลก่อนนำเข้าสู่ระบบทำน้ำจืดด้วยระบบ Reverse Osmosis (RO) โดยนำตัวอย่างน้ำทะเลมาจากทะเล Bohai ประเทศจีนและทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้นด้วยกระบวนการ Electrocoagulation โดยใช้ DSA ($\text{Ti/Ru}_{0.3}\text{Ti}_{0.7}\text{O}_2$) เป็น ขั้ว Anode ใช้เหล็กเป็นขั้ว Cathode ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1-3 Amp สามารถลดค่าความขุ่นของน้ำทะเลจาก 54.1 NTU เหลือ 1 NTU และค่า SDI หรือ Silt Density Index (เป็นดัชนีที่ใช้วัดความสามารถในการกรองของเยื่อกรองจำพวก RO หรือ Nano-filtration ว่าสามารถกรองได้ระยะเวลานานเท่าใดโดยไม่เกิดการอุดตัน) มีค่าลดลงจากที่สูงจนไม่สามารถวัดค่าได้เหลือเพียง 2.04 ที่ระดับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 26.3 mA/cm^2 ซึ่งเป็นน้ำที่มีคุณภาพเหมาะสมที่จะไม่ทำให้ RO membrane อุดตันเร็วเกินไป โดยข้อมูลค่าความขุ่นและ SDI แนะนำโดยผู้ผลิต RO Membrane เท่ากับ 1 NTU และ SDI_{15} ควรมีค่าน้อยกว่า 5 (Lenntech, 2009)

2.2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Electrocoagulation

Drouiche และคณะ(2007) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการ Chemical mechanical polishing (CMP) จากอุตสาหกรรมผลิต Photo Votaic wafer ด้วยกระบวนการ Electrocoagulation เป็นเวลา 5 ชั่วโมงโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยกำหนดระดับแรงดัน 30V ตลอดจนการทดลอง พบว่าสามารถลดค่า COD ได้ 77% จาก 700 mg/l ซึ่งสามารถระบายสู่แหล่งน้ำสาธารณะของประเทศแอลจีเรียได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดโลหะหนักได้ 99% (โครเมียม, ทองแดง, เงิน, อลูมิเนียม และตะกั่ว) โดยน้ำหลังจากการบำบัดแล้วมีลักษณะใสไม่มีสีเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนบำบัดซึ่งมีสีเขียว

Den และคณะ(2008) ศึกษาการกำจัด Silica ออกจากน้ำทิ้งบางส่วนจากกระบวนการ Reverse Osmosis (RO) แบบ 2 ขั้นตอน (2 stages) เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำ recovery ของระบบ RO ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ทั้งหมด 5 ชั้นประกอบด้วย Aluminum 1 ชั้นเป็นขั้ว Anode 3 ชั้นเป็นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นโลหะที่ให้อิเล็กตรอน (Sacrificial anode) และ Stainless

steel 1 ขึ้นเป็นขั้ว Cathode เรียงกันแบบ Bipolar และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงพบว่า เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 A สามารถกำจัด Silica ได้ 69% และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 1-A สามารถกำจัด Silica ได้ 80.8% จากค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 80-200 mg/l นอกจากการทดสอบประสิทธิภาพของ Electro-coagulation Den และคณะ ยังได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแบบ monopolar และ bipolar อีกด้วย โดยทำการทดลองใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 A และ 1 A จ่ายให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่ต่อแบบ monopolar และ bipolar เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา จากผลการทดลองพบว่าการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ bipolar มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาได้ 70% และ 80% ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ monopolar ที่สามารถกำจัดซิลิกาได้ 30% และ 50% เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.5 A และ 1 A ตามลำดับ เนื่องจากการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ bipolar มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามากกว่าการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ monopolar

Ni'am และคณะ(2006) ทดลองบำบัดน้ำเสียที่เตรียมขึ้นจากนม (ความเข้มข้น 700 mg/L) ด้วยกระบวนการ Electrocoagulation ที่ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าโดยต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ปรับระดับกระแสไฟฟ้า 3 ระดับคือ 0.2 A, 0.5 A และ 1 A และใส่แม่เหล็กที่มีระดับความเข้มต่างกันคือ NdFeB 0.55T, SmCo of 0.16T และ AlNiCo 0.08T ซึ่งแม่เหล็กแต่ละอันมีขนาด 50x50x20 mm. กวนน้ำตัวอย่างขณะทดลองด้วยใบพัดที่ความเร็วรอบ 100 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ เมื่อใช้ Electrocoagulation ร่วมกับแม่เหล็กสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นได้ 92.3% และ 81.25% ตามลำดับเปรียบเทียบกับการใช้ Electrocoagulation เพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นได้ 81.25% และ 75.16% ตามลำดับ

Martinez และคณะ(2004) ทดลองสังเคราะห์สารเคมีเพื่อกำจัดแบคทีเรียในหอผึ่งเย็นโดยใช้โลหะเงิน ที่มีความบริสุทธิ์ 99% และทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 100% อย่างละ 2 แผ่น เป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้า 7-8V จุ่มลงในน้ำกลั่นเพื่อผลิตสารละลายที่มีความเข้มข้นของเงินและทองแดงตามต้องการ สำหรับใช้เป็นสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในระบบหมุนเวียนน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองการหมุนเวียนน้ำในหอผึ่งเย็น โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 27 ± 5 °C อัตราการไหล 1.8 GPM เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดปริมาณ Sulfate reducing bacteria และ Iron related bacteria จากการทดลองพบว่า ระดับความเข้มข้นของ Ag:Cu ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียคือ Ag : Cu

เท่ากับ 0.6 mg/L : 1.2 mg/L แต่อย่างไรก็ดี ผู้ศึกษาได้ให้ข้อแนะนำว่าควรจะมีการบำบัดน้ำที่ระบายออกจากหอผึ่งเย็นก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่เงินและทองแดงจะปนเปื้อนสู่ห่วงโซ่อาหาร

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆที่ได้นำ Electro-coagulation มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารแขวนลอย ความขุ่น และความกระด้างของน้ำดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	มลสารที่กำจัด	วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า	ประสิทธิภาพ(%)
Stuart (1946)	Turbidity, Hardness, color	Aluminum	55-74
Bonilla(1947)	Turbidity, Hardness, color	Aluminum	50-70
Sandbank et al. (1973)	Total suspended solid	Graphite และ Fe	80-83
Przhegorlinskii et al. (1987)	Total suspended solid	Al และ Fe	75-80
Zolotukhin (1989)	Mine water : Total suspended solid	Al และ Fe	90-94
Matteson et al. (1995)	Total suspended solid, Kaolinite	ตะแกรงเหล็ก	90-95
Holt et al. (2004,2005)	Turbidity, Potter's clay	Al/Stainless steel	90-95
Sanfan and Qinlai (19987)	Brackish water	AlและFe	40-76
Deneshvar et al. (2003)	Brackish water :hardness,SO ₄ ⁻ , Cl ⁻	FeและSteel	40-90

ที่มา : Emamjormeh และ Sivakumar (2009)

2.3 เทคนิคต่างๆ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

การปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลเพื่อการใช้อุปโภคในปัจจุบันมีหลายขั้นตอนขึ้นกับคุณภาพน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ยกตัวอย่างเช่น การกรองด้วยทราย การตกตะกอนด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนประจุหรือ Ion exchange (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2553) สำหรับโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาได้ใช้ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลคือกรองด้วยทรายและดูดซับด้วยคาร์บอน จากนั้นจะเก็บไว้ในถังเก็บน้ำรวมกับน้ำประปาและจะใช้ระบบแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซินเพื่อกำจัดความกระด้างของน้ำสำหรับเป็นน้ำป้อนในหอผึ่งเย็น ซึ่งรายละเอียดของแต่ละหน่วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีดังนี้

2.3.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย

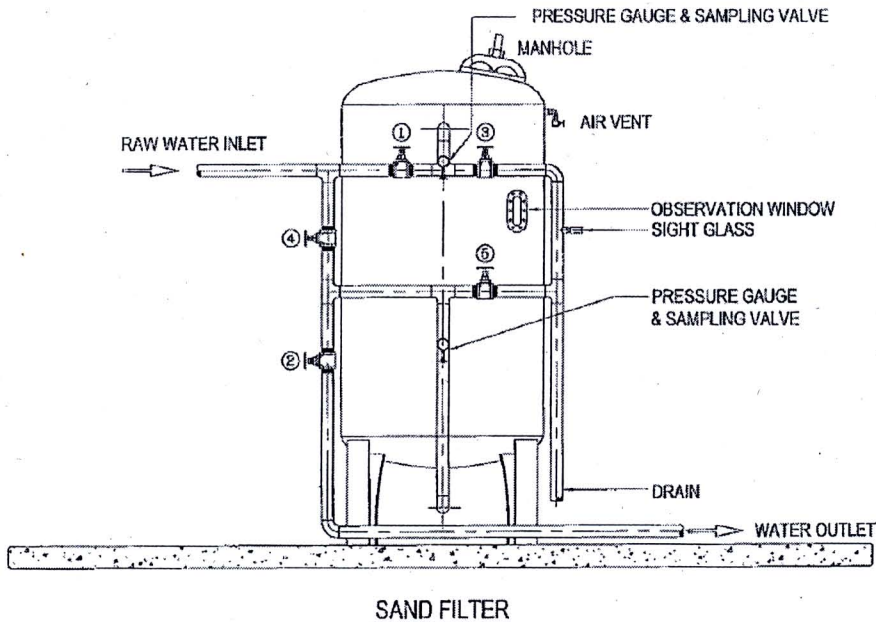
การกรองด้วยทรายเป็นการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (In depth Filtration) ทำให้สารแขวนลอยที่ปนมากับน้ำติดค้างบนสารกรอง ส่วนน้ำและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดของสารกรองออกไป สารกรองที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ ทราย แอนทราไซด์ และถ่าน สารกรองที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือทรายเนื่องจากมีราคาถูกและหาง่ายโดยการใส่สารกรองภายในถังกรองมักใส่เรียงกันเป็นชั้นตามขนาดของเม็ดทราย (ประยูร ฟองสถิตย์กุล, ปิติ พูลชัยศรี และสมทรง อินสว่าง, 2544)

เครื่องกรองทรายจำแนกออกเป็นหลายประเภทเช่น เครื่องทรายกรองช้า เครื่องทรายกรองเร็ว เครื่องทรายกรองภายใต้แรงดัน ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เครื่องทรายกรองเร็วดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

1. ถังกรอง
2. ชั้นทรายกรอง
3. ชั้นกรวดรองรับชั้นทราย
4. ระบบท่อรับน้ำกรอง
5. รางระบายน้ำล้าง
6. ระบบล้างหน้าทรายกรองอาจจะเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติหรือล้างโดยผู้ปฏิบัติงาน



7. ระบบควบคุมการกรองเพื่อควบคุมการเปิด/ปิดเครื่องสูบน้ำ



SIMPLEX TYPE MANUAL SAND FILTER

ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของเครื่องทรายกรองเร็วที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

2.3.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

การแยกสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จากน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ หรือ Activated Carbon อาศัยหลักการดูดซับ (Adsorption) โดยมีกลไก 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกันคือ 1) การเคลื่อนที่ของมลสารผ่านน้ำเข้าสู่ผิวของถ่าน 2) การแพร่กระจายของมลสารเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของถ่าน และ 3) มลสารยึดติดกับถ่านโดยอาศัยแรงทางกายภาพและทางเคมี (Physicochemical force)

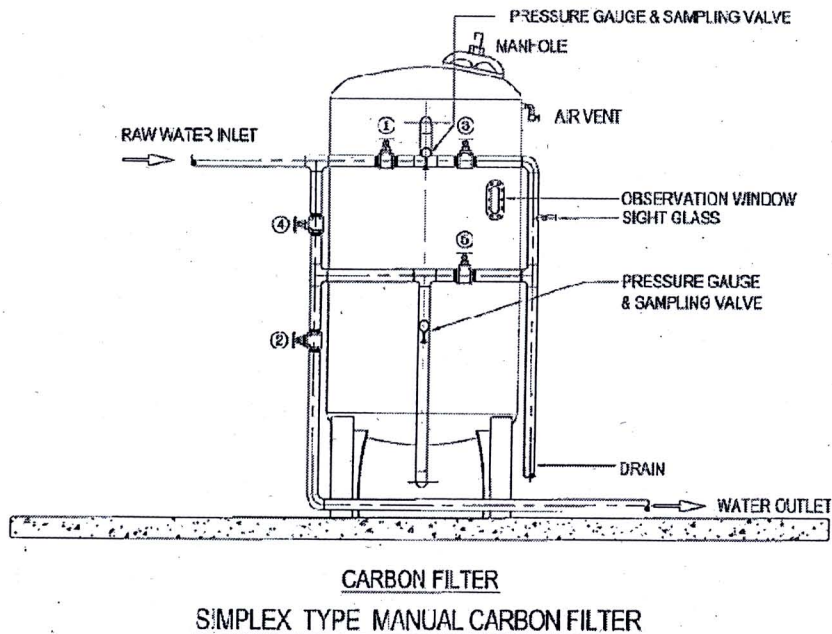
ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้กันมากผลิตมาจากการเผาสารที่มีคาร์บอนสูงเช่น ไม้ กระดูกสัตว์ กะลามะพร้าว ที่อุณหภูมิ $400-600^{\circ}\text{C}$ จากนั้นนำถ่านไปสัมผัสกับไอน้ำที่อุณหภูมิ $750-950^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดรูพรุนบนผิวถ่านโดยกระบวนการเผา (Carbonization) และการสัมผัสไอน้ำที่ควบคุมสภาวะอย่างเหมาะสม (Activation) ทำให้ได้ Activated Carbon ที่มีคุณสมบัติต่างกันโดยแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ



1. แบบเม็ดหรือแบบเกร็ด (Granular Activated carbon) มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 มม.
2. แบบผงมีขนาดเล็กกว่า 50 micron ลงไป

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มักใช้ในการดูดซับสีและกลิ่นไม่พึงประสงค์ของน้ำไม่ว่าจะเป็นน้ำเพื่อใช้ในการบริโภคหรือใช้เพื่อลดสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียแล้วก่อนปล่อยออกนอกโรงงาน สำหรับถังบรรจุถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้มักมีลักษณะคล้ายถังทรายกรองเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 2.3

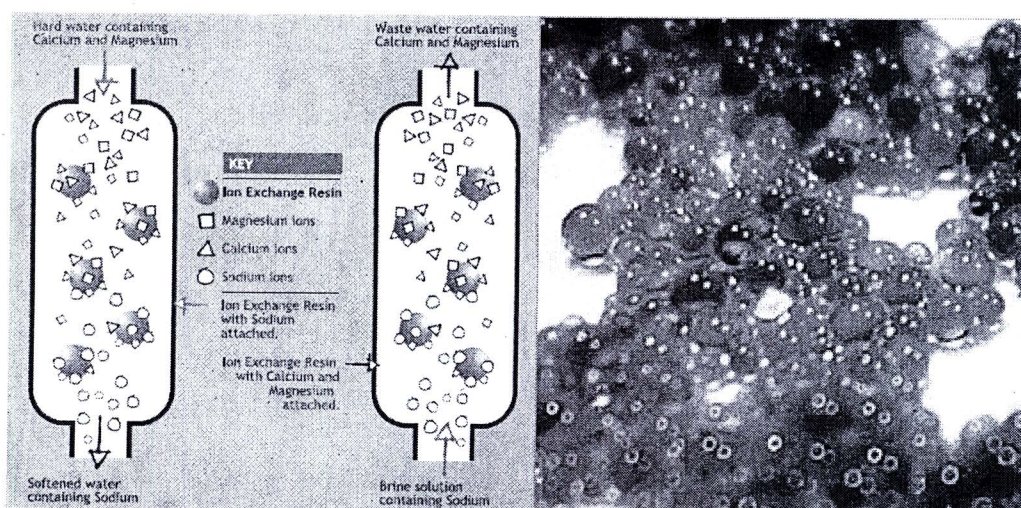
เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งถ่านกัมมันต์จะอุดตันด้วยมลสารต่างๆ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงจึงต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ (Regeneration) โดยการเผาหรือให้ความร้อนทำให้มลสารที่เกาะตามรูพรุนถูกทำลายไป แต่ทั้งนี้อาจสูญเสียปริมาณถ่านกัมมันต์ทำให้ประสิทธิภาพลดลงไปด้วย (ประยูร ฟองสทิธิกุลและคณะ, 2544)



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของถังดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

2.3.3 การปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน

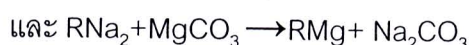
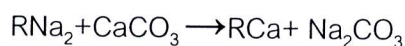
เรซินที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนประจุที่นิยมใช้กันในปัจจุบันผลิตมาจากสารพลาสติกประเภทโคโพลิเมอร์ Styrene และ Divinyl Benzene มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและลบกับสารละลายในน้ำได้และเมื่อหมดสภาพแล้วสามารถฟื้นฟูได้ด้วยการล้างคืนประจุ(Regenerate) เรซินแลกเปลี่ยนประจุมีหลายชนิดโดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือเรซินประจุบวกและเรซินประจุลบโดยสามารถแบ่งย่อยลงไปอีกเป็น ประจุบวกแบบโซเดียม ประจุบวกแบบกรดแก่ และกรดอ่อน ประจุลบแบบต่างแก่และต่างอ่อน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเรซินประจุบวกแบบโซเดียม (Sodium Cation Resin) เนื่องจากเป็นชนิดที่ใช้ในการผลิตน้ำอ่อนหรือ Softener resin



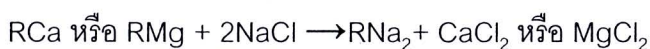
ภาพที่ 2.4 ภาพจำลองการแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน (ซ้าย) และเรซินพลาสติก (ขวา)

ที่มา: www.softenersalt.net และ www.indainion.com (2554)

เรซินประจุบวกแบบสารโซเดียมมีการเคลือบสาร Sulfonic (SO_3^-) รวมตัวอยู่กับ Na ในรูปของ NaSO_3 ขณะที่น้ำกระด้างผ่านเรซินจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ เมื่อกำหนดให้สัญลักษณ์ R แทนเรซินประจุบวก



จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า น้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนประจุเป็นน้ำที่ไม่มีควมกระด้าง แต่ยังคงมีความนำไฟฟ้าและของแข็งละลายทั้งหมดเหลืออยู่ในน้ำเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุที่เกิดขึ้นเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่าง CaCO_3 หรือ MgCO_3 กับ Na^+ ที่ผิวของเรซินเกิดเป็น Na_2CO_3 เมื่อใช้งานเรซินไประยะหนึ่ง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินกับสารละลายจะลดลง จึงต้องมีการฟื้นฟูสภาพเรซินเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุได้ดังเดิมโดยมีขั้นตอนคร่าวๆ คือ การล้างย้อน (Backwash) เป็นการล้างเอาสารแขวนลอยอื่นๆ ที่ติดอยู่ที่ผิวของเรซินให้หลุดออกไป จากนั้นจะทำการล้างคืนประจุ (Regeneration) โดยการปล่อยน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นของเกลือแกง (NaCl) 8-20% ให้ไหลผ่านชั้นเรซิน ในขณะที่ล้างคืนประจุนี้จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



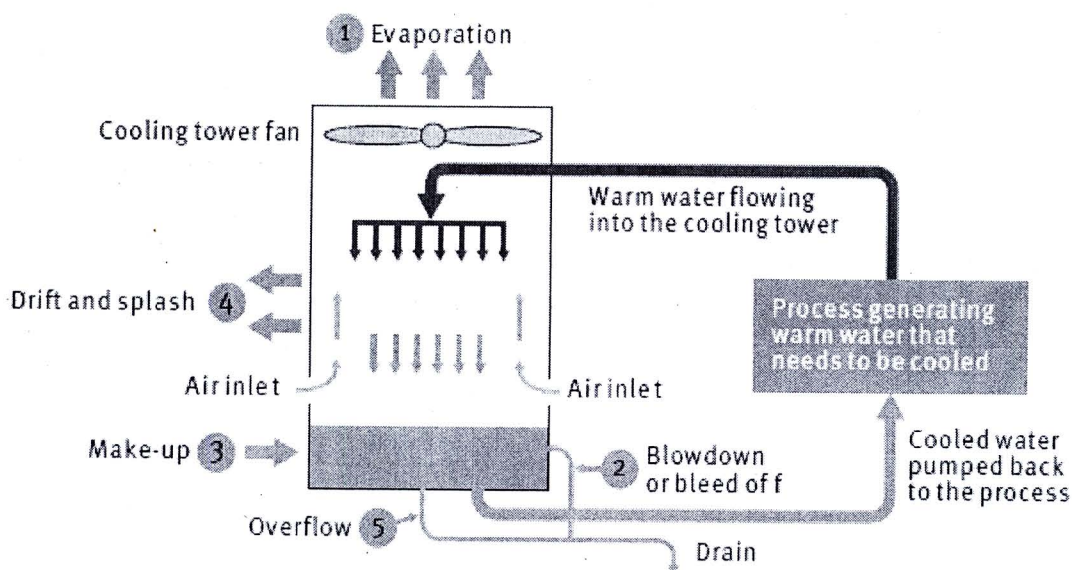
จากนั้นจะปล่อยน้ำให้ไหลผ่านชั้นเรซินอย่างช้าๆ ประมาณ 15-30 นาทีเพื่อให้เกลือที่ค้างอยู่ในระบบให้ออกไปและทำการล้างเร็ว (Fast Rinse) ด้วยน้ำดิบโดยใช้อัตราเดียวกับการกรองประมาณ 20-30 นาทีหรือจนกว่าน้ำที่ออกมาจะเป็นน้ำอ่อนที่ต้องการ (ไพศาลวีรกิจ, 2545)

2.4 การทำงานของหอผึ่งเย็น

หอผึ่งเย็นมักใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนของสารตัวกลางกับอากาศ ในระบบปรับอากาศส่วนใหญ่มักใช้น้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) เนื่องจากน้ำมีค่าความจุความร้อนสูง หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง น้ำจึงสามารถระบายความร้อนออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ 75-80% (Keister, 2008)

จากการระบายความร้อนในหอผึ่งเย็นทำให้มีการสูญเสียปริมาณน้ำที่หมุนเวียนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้ 1. สูญเสียน้ำจากการระเหย (Evaporation) ทำให้มีแร่ธาตุต่างๆ สะสมอยู่ในระบบ 2. น้ำที่กระเด็นออกทางด้านข้างของหอผึ่งเย็นเนื่องจากการไหลผ่านแผงกระจายน้ำสวนทางกับอากาศ (Drift and Splash) 3. การระบายน้ำทิ้งเพื่อลดความเข้มข้นของแร่ธาตุในระบบ และน้ำไหลล้นเพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่ (Blowdown หรือ bleed off

และ Overflow) จากที่กล่าวมาทำให้ต้องมีการเติมน้ำสำหรับเติมหอผึ่งเย็น (Make-up water) (www.ecoefficiency.com.au, 2010) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 สมดุลของน้ำในระบบหอผึ่งเย็น(www.ecoefficiency.com.au, 2010)

จากการสูญเสียน้ำด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้โรงงานที่ทำการศึกษาดำเนินการต้องเติมน้ำเข้าไปทดแทนคิดเป็นปริมาณเฉลี่ย 102.45 ลบ.ม. ต่อวัน (ค่าเฉลี่ย 1 มกราคม – 31 ตุลาคม 53) โดยน้ำที่ระบายทิ้งคิดเป็น 16.67% ของปริมาณน้ำที่สูญเสียไป น้ำที่ใช้เติมควรได้รับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเบื้องต้นและต้องมีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพที่หมุนเวียนในระบบอย่างสม่ำเสมอ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือป้องกันตะกอนและลดการกัดกร่อนของโลหะ

2.5 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำสำหรับหอผึ่งเย็นด้วยดัชนี LSI และ RSI

หอผึ่งเย็น นิยมใช้ดัชนีในการบ่งชี้ว่าน้ำที่นำมาเติมในหอผึ่งเย็นนั้นมีแนวโน้มจะทำให้เกิดตะกอนหรือการกัดกร่อนในระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนคือ ดัชนี Langelier Saturation Index (LSI) และ ดัชนี Ryznar Stability Index (RSI) ซึ่งดัชนีทั้งสองเป็นการคาดการณ์บนพื้นฐานของค่า pH ที่วัดได้จริงเทียบกับค่า pH ของน้ำที่อิ่มตัวด้วยหินปูน (CaCO_3) ซึ่งจะมีค่า pH สูง โดยน้ำอิ่มตัวด้วยหินปูนจะไม่สามารถละลายหินปูนได้อีกและมีแนวโน้มที่หินปูนจะตกผลึกเกิดเป็นตะกอน แต่ถ้าน้ำไม่อิ่มตัวด้วยหินปูน หรือหินปูนสามารถละลายในน้ำได้อีก น้ำจะมีค่า pH

ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเกิดผลในทางตรงกันข้ามคือน้ำนี้มีแนวโน้มเป็นกรดจะทำให้วัสดุเกิดการกัดกร่อน (Rafferty, 1999)

ดัชนี Langelier Saturation Index: LSI และดัชนี Ryznar Stability Index: RSI โดยคำนวณจาก pH ของน้ำที่อิ่มตัวด้วยหินปูนหรือ CaCO_3 ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ โดยดัชนีที่ได้จากการคำนวณจะบ่งชี้ลักษณะของน้ำดังตารางที่ 2.2 และ 2.3

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \tag{2.1}$$

$$\text{RSI} = 2\text{pH}_s - \text{pH} \tag{2.2}$$

ตารางที่ 2.2 ดัชนี Langelier Saturation Index: LSI

ดัชนี LSI	ลักษณะของน้ำ
2.0	มีการก่อตัวของตะกอนเป็นชั้นหนา
0.5	เกิดตะกอนบางๆ
0.0	น้ำอยู่ในลักษณะสมดุลแต่อาจเกิดการกัดกร่อนแบบ Pitting
-0.5	เกิดการกัดกร่อนเล็กน้อยแต่ไม่เกิดตะกอน
-2.0	กัดกร่อนรุนแรง

ที่มา:Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology

ตารางที่ 2.3 ดัชนีค่า Ryznar Stability Index; RSI

ดัชนี RSI	ลักษณะของน้ำ
4.0-5.0	เกิดตะกอนเป็นชั้นหนา
5.0-6.0	เกิดตะกอนบางๆ
6.0-7.0	มีแนวโน้มจะเกิดตะกอนหรือกัดกร่อน
7.0-7.5	มีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อน
7.5-9.0	เกิดการกัดกร่อน
>9.0	เกิดการกัดกร่อนรุนแรง

ที่มา:Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology

การคำนวณค่า pH_s จำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติของน้ำที่เราต้องการศึกษาคือ อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}C$) pH ความเป็นด่าง (M-Alkalinity: mg/l as $CaCO_3$) ความกระด้างแคลเซียม (Ca-Hardness; mg/l as $CaCO_3$) และของแข็งละลายทั้งหมด (TDS: mg/l) สำหรับกรณีที่ไม่มีข้อมูลที่เพียงพออนุโลมให้ใช้ ค่าความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ในการคำนวณค่า pH_s ได้โดยใช้สมการที่ (2.3) ด้านล่าง

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$A = (\log (TDS) - 1)/10$$

$$B = (-13.2 \log (^{\circ}C + 273)) + 34.55$$

$$C = (\log (Ca-Hardness)) - 0.4$$

$$D = \log (M-Alkalinity)$$

ในการปฏิบัติงานจริงการควบคุมค่า LSI และ RSI ให้มีค่าคงที่ทำได้ยากเนื่องจาก ดัชนีดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาเช่น เมื่ออุณหภูมิ ค่า pH หรือแม้แต่สภาพต่างที่ใน น้ำตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ดัชนี LSI และ RSI เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากวัสดุที่ใช้ประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปมักทำด้วยทองแดงหรือเหล็กซึ่ง เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย โดยเฉพาะวัสดุเหล่านี้ต้องสัมผัสกับน้ำและสารทำความเย็นชนิดต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงควรควบคุมคุณภาพน้ำให้มีแนวโน้มไปทางที่จะเกิดตะกอนมากกว่าที่จะให้ เกิดการกัดกร่อน

2.6 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

มีผลการวิจัยในอดีตได้ศึกษาค่าใช้จ่ายของการใช้ Electro-coagulation เพื่อบำบัด น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิงทอโดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำด้วย Electro-coagulation โดยทำการเปรียบเทียบการใช้ลูมินิยมและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแต่ในงานวิจัยทำการ วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในส่วน of Operating cost ที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าและค่า ไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเท่านั้นไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงค่าแรงของผู้ปฏิบัติงาน ค่าใช้จ่ายใน การแยกตะกอน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์อื่นๆ ด้วยโดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น

2 ส่วนคือค่าใช้จ่ายของการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานไฟฟ้า ผลการศึกษาของการใช้กระแสไฟฟ้า 100 A/m^2 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมจะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่าสัดส่วนของค่าใช้จ่ายในการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าจะลดลงแต่ส่วนของค่าไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อคิดค่าใช้จ่ายโดยรวมต่อการกำจัด COD 1 kg พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ $0.1 \text{ US\$}$ ต่อการกำจัด COD 1 kg ส่วนการใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าจะมีค่าใช้จ่าย $0.3 \text{ US\$}$ ต่อการกำจัด COD 1 kg และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นค่าใช้จ่ายในการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้า 50% และ 80% เมื่อใช้เหล็กและอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าตามลำดับ (Bayramoglu และคณะ, 2004)

สำหรับงานวิจัยในรายงานฉบับนี้ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีมูลค่าปัจจุบันโดยตีกรอบการศึกษาเฉพาะขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และวิเคราะห์ความอ่อนไหวของจุดคุ้มทุนในการใช้ Electro-coagulation เพื่อทดแทนระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการกรองทราย ดูดซับด้วยคาร์บอนและแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน เมื่อราคาค่าไฟฟ้า น้ำและอลูมิเนียมมีการเปลี่ยนแปลง