

การกำจัดอิออนจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
และสนามไฟฟ้าสถิตย์

นางสาว อารณั์ ทวีชมไพฑูรย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-533-013-2

การกำจัดอออนจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
และสนามไฟฟ้าสถิตย์

นางสาว อภรณ์ ตวิชมไพศุรีย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-533-013-2

**REMOVAL OF IONS FROM WELL WATER BY USING
ELECTROMAGNETIC AND ELECTROSTATIC FIELDS**

Miss Arporn Tiwitmahaisoon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2001

ISBN 974-533-013-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดอ็อกซาลิกแอซิดจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ปราบริบูรณ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(รองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล)
กรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ)
กรรมการ

.....
(อาจารย์ ดร. สุจิตต์ กรุจิต)
กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพจน์ คำพิศ)
คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อาภรณ์ ติวิธมไพศรุษย์: การกำจัดไอออนจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ
สนามไฟฟ้าสถิตย์ (REMOVAL OF IONS FROM WELL WATER BY USING
ELECTROMAGNETIC AND ELECTROSTATIC FIELDS)

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร. เกษม ปราบริบูรณ์, 63 หน้า, ISBN 974-533-013-2

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดไอออนจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าสถิตย์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดไอออนในน้ำบาดาล เช่น ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ปริมาณความเข้มข้นของไอออนในน้ำ และอุณหภูมิที่เหมาะสม และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องมือเปรียบเทียบกับระหว่าง การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, การใช้สนามไฟฟ้าสถิตย์ และการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริง

จากผลการทดลอง พบว่า ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 0.2T แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ และที่อัตราการไหล 0.23 ลิตรต่อวินาที จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนในน้ำมากที่สุด และพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนในน้ำแปรผันตามความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า

ซึ่งที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้านี้ พบว่าน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนและอุณหภูมิสูง (เฉลี่ย 64 องศาเซลเซียส) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนในน้ำมากกว่าน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนและอุณหภูมิต่ำ โดยจากการทดลองสามารถกำจัดไอออนแคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส ได้เฉลี่ย 43%, 56%, 73% และ 85% ตามลำดับ

การใช้วิธี 3 ขั้นตอน พบว่า วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถกำจัดไอออนรวมได้มากที่สุด โดยกำจัดไอออนแคลเซียมได้ 60% และกำจัดไอออนเหล็กได้ 98% รองลงมาคือ วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับสนามไฟฟ้าสถิตย์ และสุดท้ายคือ วิธีสนามไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งโดยเฉลี่ยปริมาณแคลเซียมและเหล็ก ไม่เกินมาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

**ARPORN TIWITMAHAISOON: REMOVAL OF IONS FROM WELL WATER
BY USING ELECTROMAGNETIC AND ELECTROSTATIC FIELDS.
THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KASEM PRABRIPUTALOONG, Ph.D.,
63 PP. ISBN 974-533-013-2**

The investigation of the removal of ions from well water by electromagnetic and electrostatic fields was carried out. Factors influencing the removal such as magnetic intensity, voltages, ions concentration in water and temperature were studied. It was found that the magnetic intensity of 0.2T or voltages of 40 volts and flow rate of 0.23 L/s gave the best efficiency in removing ions from well water. The efficiency of ions removal varies with magnetic field intensity and electrical voltage.

It was also found that, at this optimum magnetic field intensity and voltage, the iron removal efficiency was the highest when the starting ions concentration and water temperature were high. At water temperature of 64 °C, the removal of calcium, magnesium, iron and manganese ions was found to be 43, 56, 73 and 85%, respectively.

By using a three-stage process, the electromagnetic method was found to be the most efficient in removing ions, i.e. 60% of calcium and 98% of iron. The remaining concentration of calcium and iron in treated well water is well below the standard of Bangkok Metropolitan Water Supply.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ปราบริบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. สุกจิต กระจิต คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- ขอขอบคุณอาจารย์ บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
- ขอขอบคุณพี่ๆ ที่อาคารศูนย์เครื่องมือ F1, F3 และ F5 ที่อำนวยความสะดวกในการสร้างเครื่องมือ และการทดลองวิจัย
- ขอขอบคุณ พี่น้อง ที่ร่วมเรียนปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องทุกคน และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

อาภรณ์ ทิวิธมไพสุรย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	4
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	5
กิตติกรรมประกาศ	6
สารบัญ	7
สารบัญตาราง	9
สารบัญรูป	10
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ปฏิทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย.....	16
3.2 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย.....	19
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	20
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	22
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 ผลกระทบของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออน หลักในน้ำ.....	24
4.2 ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออนหลักในน้ำบาดาล.....	26
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่อตะกอน ของอออน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่.....	30
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่อตะกอน ของอออนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่อตะกอนของอโอนที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่.....	31
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่อตะกอนของอโอนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่.....	32
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหล และอัตราการกำจัดอโอน.....	33
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหล และอัตราการกำจัดอโอน.....	33
4.9 การใช้วิธี 3 ชั้น ลดปริมาณอโอนในน้ำบาดาล.....	38
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป.....	40
รายการอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ก มาตรฐานคุณภาพน้ำ.....	43
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลดิบ.....	47
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ตะกอน.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1. ชนิดของอ็อกซอนและวิธีการวิเคราะห์.....	16
ตารางที่ 3-2. คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างและน้ำบาดาล.....	20
ตารางที่ 3-3. การเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์.....	22
ตารางที่ 4-1. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ (แบบแยกอ็อกซอน).....	25
ตารางที่ 4-2. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ (แบบรวมอ็อกซอน).....	26
ตารางที่ 4-3. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ(แบบแยกอ็อกซอน)....	26
ตารางที่ 4-4. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ(แบบรวมอ็อกซอน)....	27
ตารางที่ 4-5. สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า (X).....	29
ตารางที่ 4-6. สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและแรงดันไฟฟ้า (X)	29
ตารางที่ 4-7. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำตัวอย่างที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T.....	30
ตารางที่ 4-8. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำตัวอย่างที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์	31
ตารางที่ 4-9. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T	32
ตารางที่ 4-10. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์.....	32
ตารางที่ 4-11. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาล ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและอัตราการไหลต่างๆ	34
ตารางที่ 4-12. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลต่างๆ	35
ตารางที่ 4-13. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกซอนในน้ำบาดาลโดยใช้วิธี 3 ชั้น.....	38

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1. สถานะต่างๆของเหล็กที่อยู่ในน้ำ.....	7
รูปที่ 2-2. แผนภาพแสดงตำแหน่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าสถิตย์และแรง.....	8
รูปที่ 2-3. แสดงชนิดของอุปกรณ์แม่เหล็ก (Magnetic Devices) และการติดตั้ง.....	10
รูปที่ 2-4. แสดงรูปแบบของอุปกรณ์แม่เหล็กชั่วคราว (Non-Permanent Magnetic Devices).....	11
รูปที่ 2-5. ชนิดของรูปแบบเครื่องมือบำบัดน้ำโดยใช้สนามแม่เหล็ก MTD's.....	12
รูปที่ 2-6. ทิศทางการหมุนของแรงและสนามแม่เหล็กในเครื่องมือ.....	13
รูปที่ 3-1. การติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 3-2. การติดตั้งสนามไฟฟ้าสถิตย์.....	17
รูปที่ 3-3. แผนภาพการทดลอง.....	19
รูปที่ 3-4. แบบจำลองการใช้น้ำระดับห้องปฏิบัติการ.....	21
รูปที่ 4-1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการบำบัด.....	28
รูปที่ 4-2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการบำบัด.....	28
รูปที่ 4-3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหลและประสิทธิภาพในการบำบัด.....	36
รูปที่ 4-4. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลและประสิทธิภาพในการบำบัด.....	37

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อประมาณศตวรรษที่ 19 ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแม่เหล็กไฟฟ้าและไฟฟ้าสถิตย์มาใช้ในการแก้ปัญหาการเกิดคราบในการทำอาหารและการซักล้าง และในปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีนี้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านอุตสาหกรรม เพื่อแก้ปัญหาการเกิดตะกรันในหม้อต้มหม้อกลั่น ท่อน้ำร้อนและท่อน้ำเย็น ส่วนทางด้านเกษตรกรรม ใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร และตามบ้านเรือนใช้เพื่อป้องกันการเกิดคราบตามสุขภัณฑ์ และภาชนะที่ใช้ในการหุงต้มต่างๆ

การใช้เทคโนโลยีแม่เหล็กไฟฟ้าและไฟฟ้าสถิตย์สามารถควบคุมการเกิดคราบได้โดยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มที่เหมาะสมสามารถทำให้อนุภาคแร่ธาตุต่างๆ ตกตะกอน หรืออยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำได้ ส่วนสนามไฟฟ้าสถิตย์จะทำให้ไอออนบวกและไอออนลบแยกออกจากกันไปรวมอยู่ที่แผ่นอิเล็กโทรดที่มีประจุตรงข้ามกับไอออนแต่ละชนิด ทำให้ไอออน เหล่านี้ไม่รวมตัวเป็นตะกรันเกาะติดตามผิวภาชนะ สุขภัณฑ์ หรือท่อน้ำต่างๆ นอกจากนั้นการใช้เทคโนโลยีนี้ยังช่วยลดแรงดึงผิวและเพิ่มความสามารถในการละลายของน้ำอีกด้วย จากรายงานของ Federal Technology Alerts (1998) กล่าวว่า แม่เหล็กไฟฟ้าและไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมการเกิดคราบ เหมาะสำหรับใช้ตามบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม มีประสิทธิภาพเหมือนกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น Reverse Osmosis, Ion Exchange และ การบำบัดโดยสารเคมี นอกจากนั้นยังพบว่า การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ ช่วยประหยัดพลังงานได้ถึง 10 % สามารถลดค่าใช้จ่ายของเจ้าของบ้านได้เฉลี่ย 7,200 บาทต่อปี

น้ำบาดาล เป็นแหล่งน้ำธรรมชาติแหล่งหนึ่งที่ให้ปริมาณน้ำได้มากแต่มักจะมีปัญหาในเรื่องคุณภาพน้ำทางเคมี ซึ่งมีแร่ธาตุชนิดต่างๆเจือปนอยู่ในระดับเกินมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาเรื่องน้ำกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้ว ยังมีปัญหาที่เกิดจากน้ำมีปริมาณเหล็กและแมงกานีสสูง การที่น้ำบาดาลมี ความกระด้าง, เหล็ก และแมงกานีสสูง จะทำให้เกิดผลเสียหลายอย่าง กล่าวคือ น้ำจะมีสีเหลืองหรือสีแดง, มีรส และ มีกลิ่น เป็นที่น่ารังเกียจแก่การอุปโภคและบริโภค นอกจากนั้นยังก่อให้เกิดคราบนำเกล็ดตามภาชนะ สุขภัณฑ์ และอุปกรณ์ต่างๆที่ผ่านการใช้น้ำนี้ ทำให้อุปกรณ์นั้นมีคราบนำเกล็ดไม่น่าใช้ ดังนั้นในการปรับ

ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อลดปัญหาเรื่อง ความกระด้าง และการมีปริมาณเหล็กและแมงกานีสในน้ำสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ด้วยเหตุนี้การวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้เทคโนโลยีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ โดยมุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำบาดาลเมื่อใช้เทคโนโลยีนี้และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพดังกล่าว เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีให้เหมาะสมกับการนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ เช่น ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ความเข้มข้นของอออนในน้ำบาดาล และ อุณหภูมิ เป็นต้น และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดอออนด้วยวิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าสถิตย์ และใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน

สมมติฐานการวิจัย

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์มีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของอออนในน้ำบาดาล

ข้อตกลงเบื้องต้น

น้ำบาดาลที่ใช้เป็นน้ำบาดาลที่มีความเข้มข้นของอออน เช่น แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส อยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งอยู่ในเขตบ้านหนองปรู อ.เมือง จ.นครราชสีมา

ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ (Lab – scale Unit)
- 2) อออนที่ทำการศึกษา ได้แก่ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส
- 3) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการกำจัดของอออนในน้ำบาดาล เช่น ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออน และอุณหภูมิของน้ำบาดาล
- 4) การทดลองวิจัยครั้งนี้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power Supply) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 6

แอมแปร์ ซึ่งให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า สูงสุดเพียง 0.20T และ 40 โวลต์

บทที่ 2

ปฏิกิริยารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การเกิดคราบของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของหินปูนและหินอ่อน ซึ่งมี ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นสิ่งเจือปนที่สำคัญในหินปูนและทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวยึดเกาะของหินปูน ตะกอนของแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ที่อยู่ในธรรมชาติ จะอยู่ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของแร่โดโลไมท์ ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) หรือแมกนีไซต์ (MgCO_3) ในน้ำมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ละลายอยู่แต่จะมีปริมาณแคลเซียมจำนวนมากละลายอยู่โดยการกระทำของน้ำฝนกับหินปูน น้ำฝนมีสภาพเป็นกรดเพราะเมื่อตกผ่านชั้นบรรยากาศและสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะทำปฏิกิริยากันทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ดังสมการ



เมื่อน้ำฝนตกลงมาสัมผัสกับหินปูนบนผิวโลก หินปูนจะถูกละลายและเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตตามสมการ



ซึ่งกรดคาร์บอนิกสามารถแตกตัวได้เป็น



การเพิ่มไอออน H^+ จากกรดคาร์บอนิกจะทำให้ความเข้มข้นของไอออน CO_3^{2-} ลดลง เพราะไอออน H^+ และ CO_3^{2-} จะรวมกันอยู่ในรูปของ HCO_3^- การลดความเข้มข้นของไอออน CO_3^{2-} ในสาร

ละลายเป็นสาเหตุทำให้ CaCO_3 ละลายอยู่ในรูปของ $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ จนเป็นสารละลายอิ่มตัว ผลจากความเข้มข้น Ca^{2+} และ CO_3^{2-} ให้มีค่าเท่ากับค่าคงที่ในการละลาย (Solubility product, K_{sp})

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = K_{sp} = 1 \times 10^{-9} \text{ ที่ } 25^\circ\text{C} \quad (2-4)$$

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินที่ละลายอยู่ในน้ำผิวดินเป็นผลอันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างช้าๆ ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก ในน้ำตัวอย่างของปฏิกิริยานี้ เช่น ถ้าหินปูน และน้ำกระด้างจากบ่อ $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ที่ละลายอยู่ในน้ำเรียบร้อยแล้วจะเปลี่ยนไปเป็น CaCO_3 เมื่อน้ำได้รับความร้อนจนเดือด ความสามารถในการละลายของ CaCO_3 จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น และจะตกตะกอนในรูปของ CaCO_3 ตามสมการข้างล่าง



ซึ่งสมการนี้เป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการก่อตัวของหินปูนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำความร้อนและหม้อน้ำ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำประกอบด้วย $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ระเหยออกไปและทิ้งคราบ จากปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตได้ดังนี้



แต่อย่างไรก็ตาม MgCO_3 ก็มีความสามารถในการละลายมากกว่า CaCO_3

$$[\text{Mg}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = K_{sp} = 1 \times 10^{-5} \text{ ที่ } 25^\circ\text{C} \quad (2-7)$$

2.1.2 ชนิดของเหล็กและสถานะต่างๆของเหล็กในน้ำ

Walker (1978) ได้แบ่งชนิดของเหล็กที่พบในน้ำเป็น 2 ชนิด คือ

1) เหล็กอินทรีย์ เป็นเหล็กที่พบอยู่ในน้ำบาดาลเป็นส่วนใหญ่ น้ำที่มีเหล็กอินทรีย์นี้เมื่อสูบขึ้นมาใหม่ๆจะมีลักษณะใสมากแต่เมื่อทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศสักครู่ น้ำนั้นก็จะปรากฏ

ความขุ่นให้เห็น เหล็กอินทรีย์ในน้ำบาดาล มักจะพบอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กคาร์บอเนตมากที่สุด เช่น เฟอร์รัสไบคาร์บอเนต $[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]$ รองลงมาอยู่ในรูปของเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) และอาจพบอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กคลอไรด์ (FeCl_2)

2) เหล็กอินทรีย์ เป็นเหล็กที่พบอยู่ในน้ำผิวดินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมักจะพบอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic Complex Compounds) เช่น Humic acid, Fulvic acid หรือ Tannic acid เป็นต้น

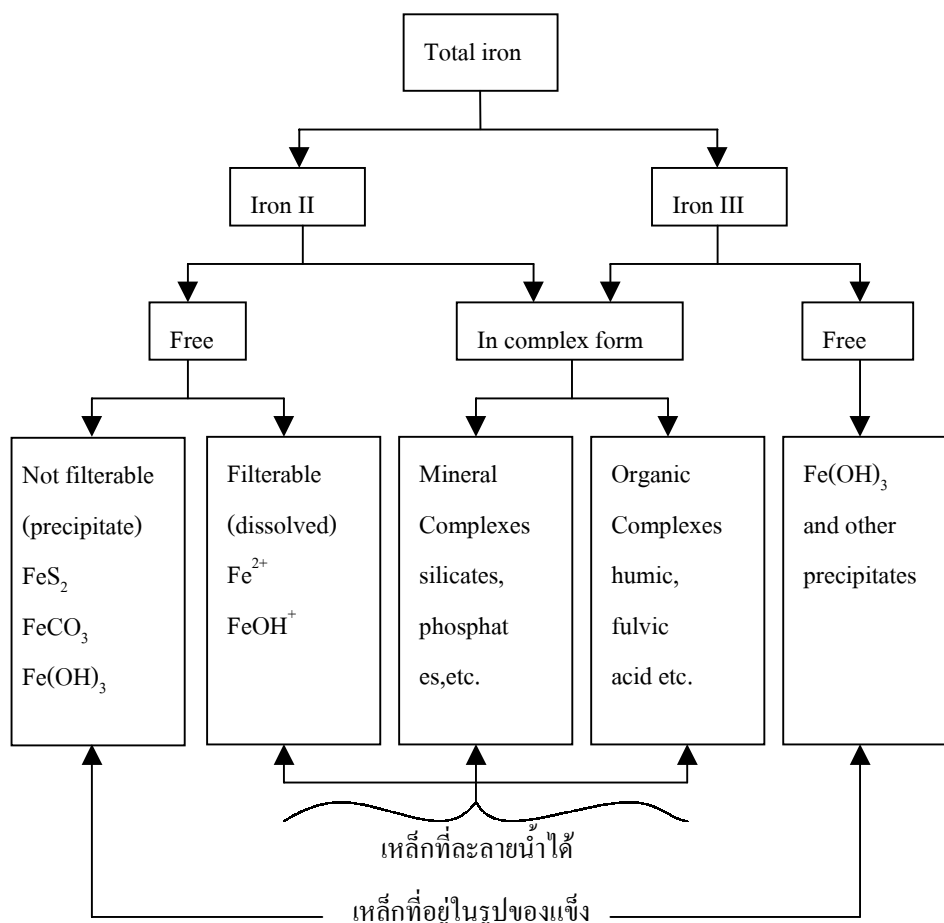
Hauer (1950) ได้แบ่งชนิดของเหล็กในน้ำเป็น 3 ชนิด คือ

- เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่ตกตะกอนได้ทันทีภายหลังการเติมอากาศ
- เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่ไม่ยอมตกตะกอนได้ง่ายๆ ภายหลังการเติมอากาศทั้งนี้ เพราะน้ำบาดาลมีสภาพเป็นกรด
- เหล็กในน้ำบาดาลชนิดที่บางส่วนตกตะกอนได้ แต่บางส่วนไม่ยอมตกตะกอนเลย ภายหลังการเติมอากาศ เหล็กในน้ำบาดาลชนิดนี้จะพบมากที่สุด

ซึ่ง Hauer (1950) ได้กล่าวว่า เหล็กในน้ำบาดาลซึ่งเป็นเหล็กอินทรีย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต $[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]$ และเฟอร์รัสคาร์บอเนต (FeCO_3) สารละลายนี้เกิดจากแร่ธาตุในชั้นหินที่เรียกว่า ลีเตอร์ไรท์ ซึ่งเป็นแร่ที่มีความสามารถในการละลาย (Solubility) ประมาณ 65 มก./ล. ค่าของความสามารถในการละลายนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีกรดคาร์บอนิกมากขึ้น หรือมีคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น เฟอร์รัสไบคาร์บอเนตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ ซึ่งมีความสามารถในการละลายไม่เกิน 7 มก./ล. เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งไม่ละลายน้ำเช่นกัน Hauer (1950) ได้กล่าวต่อไปว่า เหล็กในน้ำที่พบอยู่ในรูปของเฟอร์รัสซัลเฟต มักเกิดจากแร่ไพไรต์ หรือ แร่เฟอร์รัสซัลไฟด์ มักมีความสามารถในการละลายไม่เกิน 5 มก./ล. และแร่เฟอร์รัสซัลไฟด์ มักมีความสามารถในการละลายไม่เกิน 6 มก./ล. ขณะที่แร่ลีเตอร์ไรท์มีความสามารถในการละลายประมาณ 65 มก./ล. จึงเป็นเหตุผลที่สามารถกล่าวได้ว่าเหล็กในน้ำบาดาลส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต หรือเฟอร์รัสคาร์บอเนตมากกว่าเฟอร์รัสซัลเฟต

สถานะต่าง ๆ ของเหล็กที่ปรากฏอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2-1 จากรูปอธิบายได้ว่าเหล็กทั้งหมดในน้ำ (Total Iron) แบ่งเป็น 2 รูป คือ เหล็กในรูป Iron II (Fe^{2+}) กับเหล็กในรูป Iron III (Fe^{3+}) เหล็กในรูป Iron II (Fe^{2+}) อาจจะรวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบที่อาจจะประกอบด้วยธาตุอื่นธาตุเดียว เช่น FeS_2 (ที่ไม่ละลายน้ำ) และ $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (ที่ละลายน้ำได้) เป็นต้น หรือธาตุอื่นมากกว่าสองธาตุซึ่งอยู่ในรูปเชิงซ้อน (Complex form) เช่น mineral complexes และ/หรือ organic complexes เป็นต้น ส่วนเหล็กในรูป Iron III (Fe^{3+}) อาจจะรวมตัวกับธาตุอื่นเป็น

สารประกอบที่อาจจะประกอบด้วยธาตุอื่นธาตุเดียว เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ที่ไม่ละลายน้ำ) เป็นต้น หรือธาตุอื่นมากกว่าสองธาตุซึ่งอยู่ในรูปเชิงซ้อน (Complex form) เช่น mineral complexes และ/หรือ organic complexes เป็นต้น



รูปที่ 2-1. สถานะต่างๆของเหล็กที่อยู่ในน้ำ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2527)

2.1.3 ชนิดของแมงกานีสในน้ำ

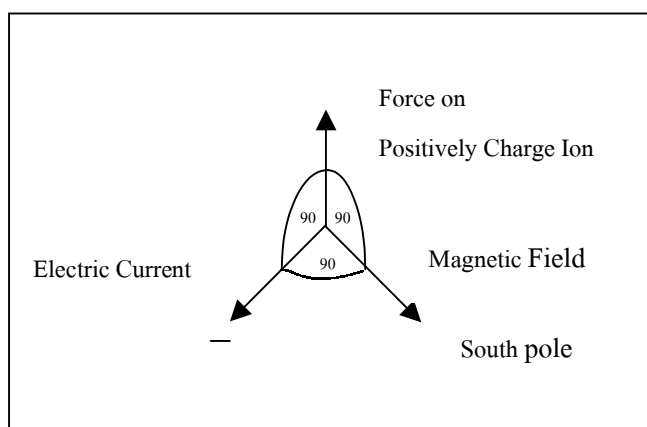
แมงกานีสที่ปรากฏอยู่ตามธรรมชาติในชั้นหินและชั้นดินของเปลือกโลกโดยเฉลี่ยแล้วมีประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุนี้เองแมงกานีสจึงเป็นแร่ธาตุที่อยู่ปริมาณน้อยในน้ำประปาเมื่อเทียบกับเหล็ก แมงกานีสส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปของออกไซด์ (Oxide) และไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) เช่น pyrolusite (MnO_2) และ psilomelane [$\text{BaMn}^{2+}\text{Mn}_8^{4+}\text{O}_{16}(\text{OH})_4$] แต่โดยทั่วไปแล้วแมงกานีสจะเกิดในรูป pyrolusite ผสมกับ manganite [$\text{MnO}(\text{OH})$], braun [$(\text{MnSi})_2\text{O}_3$], hausmanite

(Mn_3O_4) และ psilomelane นอกจากนี้แล้วแมงกานีสยังสามารถเกิดอยู่ในรูป pyrochroite [$Mn(OH)_2$] และ manganosite (MnO) ได้

ภายใต้สภาวะออกซิไดซ์ pH มากกว่า 13.5 แมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชัน +6 จะเป็นไอออนที่สำคัญ แต่อย่างไรก็ตามในธรรมชาติจะเกิดสภาวะนี้ได้ยากมาก ดังนั้นรูปแบบนี้จึงมีความสำคัญน้อยมากในสภาพแวดล้อมของน้ำตามธรรมชาติ แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Manganous (Mn^{2+}) และอยู่ในรูปเชิงซ้อนกับไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}), ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และ ไฮดรอกไซด์ (OH) แมงกานีสที่มีวาเลนซ์ +3 จะละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงถือว่าไม่ละลายน้ำเมื่อเทียบกับแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชัน +2 ส่วนแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชัน +4 จะไม่ละลายน้ำ เพราะฉะนั้นแมงกานีสรวมที่ไม่ละลายน้ำจะพิจารณาจากแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชัน +3 และ +4

2.1.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์เกิดจากผลของแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวราบซึ่งอยู่ในรูปเวกเตอร์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2. แผนภาพแสดงตำแหน่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าสถิตย์และแรง

แรงนี้จะกระทำกับกระแสไอออนที่มีอยู่ อนุภาคที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ในทิศทางตามกฎมือขวา โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์จะแทนด้วยนิ้วมือทั้งสี่ ซึ่งแรงจะแทนด้วยนิ้วหัวแม่มือ ส่วนอนุภาคประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม แรงนี้เกิดจากการผสมกันของของเหลวในขณะที่เกิดความปั่นป่วน แรงนี้จะมีผลต่อไอออนโดยทั่วไป คือ ไอออนประจุบวก เช่น แคลเซียม, แมกนีเซียม และไอออนประจุลบ เช่น คาร์บอเนต, ซัลเฟต ไอออนเหล่านี้จะตรงเข้าหากัน

ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อจำนวนของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการก่อตัวของอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำ โดยรูปแบบของการก่อตะกอนนี้จะแสดงให้เห็นถึงพื้นฐานการเกิดคราบ น้ำที่มีความกระด้างสูงจะมีประสิทธิภาพการสูงด้วย เพราะเมื่อมีไอออนในสารละลายมาก ไอออนแต่ละตัวจะใช้ระยะเวลาในการเดินทางสั้นก่อนที่จะชนกับไอออนประจุตรงกันข้าม

ปฏิกิริยาล้ำๆกันนี้ได้เกิดขึ้นบนพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน แรงที่กระทำกับไอออนเป็นผลมาจากความร้อนที่ใส่ให้กับน้ำ การเพิ่มความร้อนจะทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคไอออนในน้ำเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การยับยั้งความสามารถในการละลายกลับของคราบ (inverse solubility) ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ นั่นคือ ความสามารถในการละลายกลับของคราบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นในจุดที่ร้อนที่สุดของพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน คือ บริเวณผิวหน้าการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งคราบจุดที่ตะกอนสามารถละลายได้น้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณความร้อนก่อให้เกิดกระแสไอออน ไอออนจึงชนกันใกล้ๆพื้นผิว ดังนั้นการก่อตะกอนจึงเป็นรากฐานของการเกิดคราบต่อไป

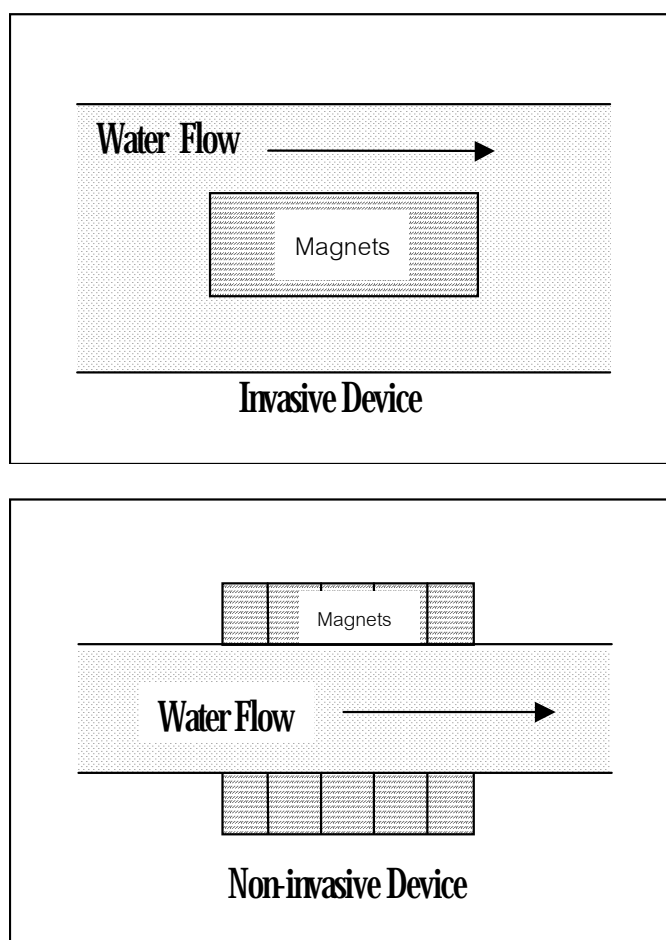
เมื่อปฏิกิริยาการเกิดคราบเกิดขึ้นในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) แร่ธาตุจากคราบโดยทั่วไปเรียกว่า calcite (CaCO_3) เป็นแร่ธาตุที่มีการเกาะติดก่อให้เกิดคราบบนพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนประจุบวกและประจุลบจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ บริเวณที่มีความร้อนจะเกิดขึ้นตามพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ธาตุที่เกิดขึ้นโดยมาก คือ Aragonite (CaCO_3) มันจะไม่เกาะติดกับพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนแต่จะทำให้เกิดเม็ดเล็ก ๆ หรือคราบอ่อนๆ ซึ่งตรงกันข้ามกับการเกาะแน่นเป็นแผ่นถาวร (monolithic sheet) ของคราบโดยทั่วไปในพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเม็ดเล็ก ๆ ทั้งหมดหรือคราบอ่อนจะเกิดขึ้นตามการให้ความร้อนและสามารถถูกพาไปที่ระบบการให้ความร้อน และความเย็น โดยทำให้เกิดความเสียหายน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย คุณสมบัติของการเคลื่อนย้ายนี้ทำให้ธาตุถูกย้ายจากระบบไปยังที่ที่สะดวกในการสะสมและการกำจัดตะกอนของแข็ง

2.1.5 ลักษณะและรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือ

ลักษณะและรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือแม่เหล็กโดยทั่วไปมี 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-3

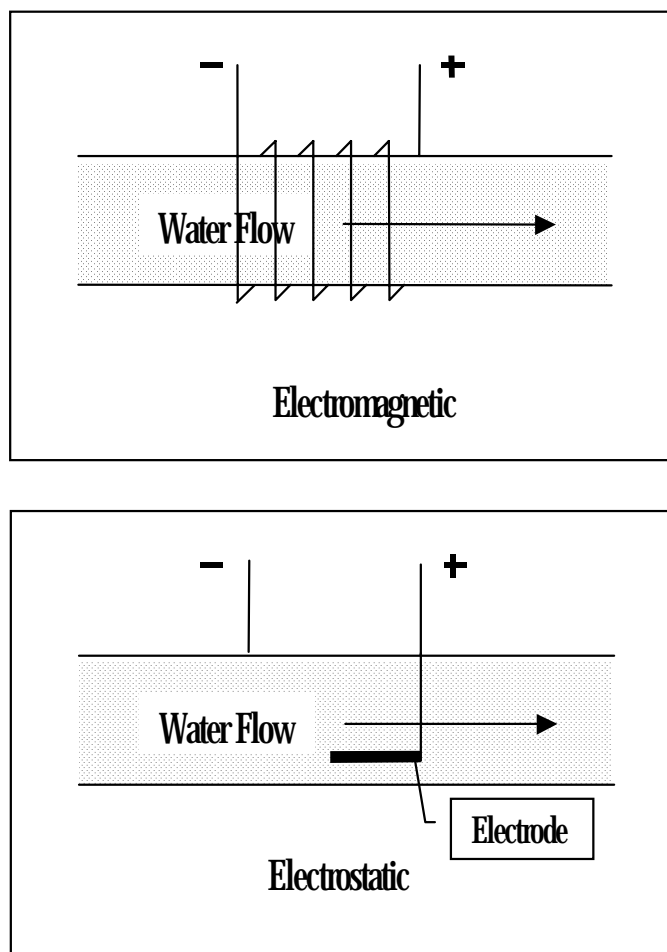
- 1) ติดตั้งแม่เหล็กในสนามการไหลของน้ำ (Invasive) เครื่องมือนี้จะสามารถทำงานได้เมื่อติดตั้งแม่เหล็กในสนามการไหลของน้ำหรือภายในท่อ น้ำซึ่งเครื่องมือนี้จะมีช่วงท่อที่สามารถเลื่อนเข้าออกได้สำหรับสอดีใส่อุปกรณ์ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับเวลาในขณะที่ระบบไม่ทำงานด้วย

- 2) ติดตั้งแม่เหล็กนอกสนามการไหลของน้ำ (Non-invasive) เครื่องมือนี้จะติดตั้งไว้
นอกสนามการไหลของน้ำหรือภายนอกท่อน้ำ และสามารถติดตั้งในขณะที่เครื่อง
กำลังทำงานอยู่ได้



รูปที่ 2-3. แสดงชนิดของอุปกรณ์แม่เหล็ก (Magnetic Devices) และการติดตั้ง

นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเครื่องมืออีก 2 แบบดังแสดงในรูปที่ 2-4



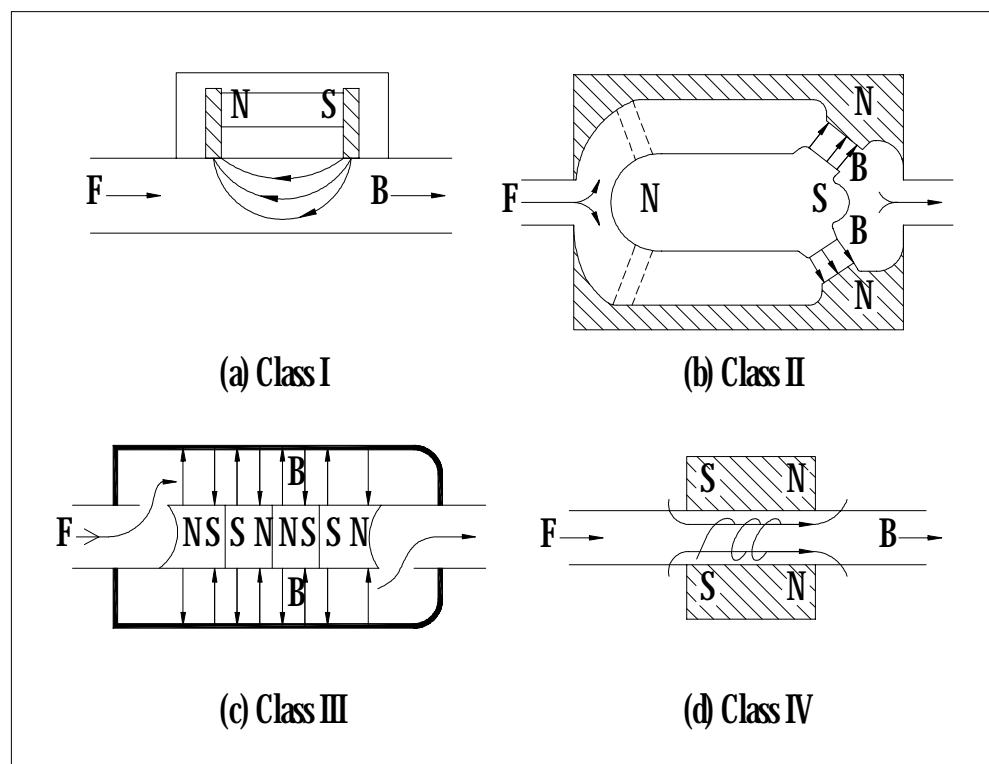
รูปที่ 2-4. แสดงรูปแบบของอุปกรณ์แม่เหล็กชั่วคราว (Non-Permanent Magnetic Devices)

ซึ่งจะพบว่า แม่เหล็กที่ใช้ควรจะเป็นแม่เหล็กถาวรมากกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดทางผ่านของแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนสนามไฟฟ้าสถิตย์จะมีสนามไฟฟ้ารบกวนการไหลของน้ำ ซึ่งจะดึงดูดหรือผลักอิออน ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก

หน่วยไฟฟ้าสถิตย์โดยปกติจะติดตั้งไว้ภายในท่อน้ำ (invasive) ส่วนแม่เหล็กอาจติดตั้งไว้ภายในหรือภายนอกท่อน้ำ และอาจใช้เป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กชั่วคราวก็ได้

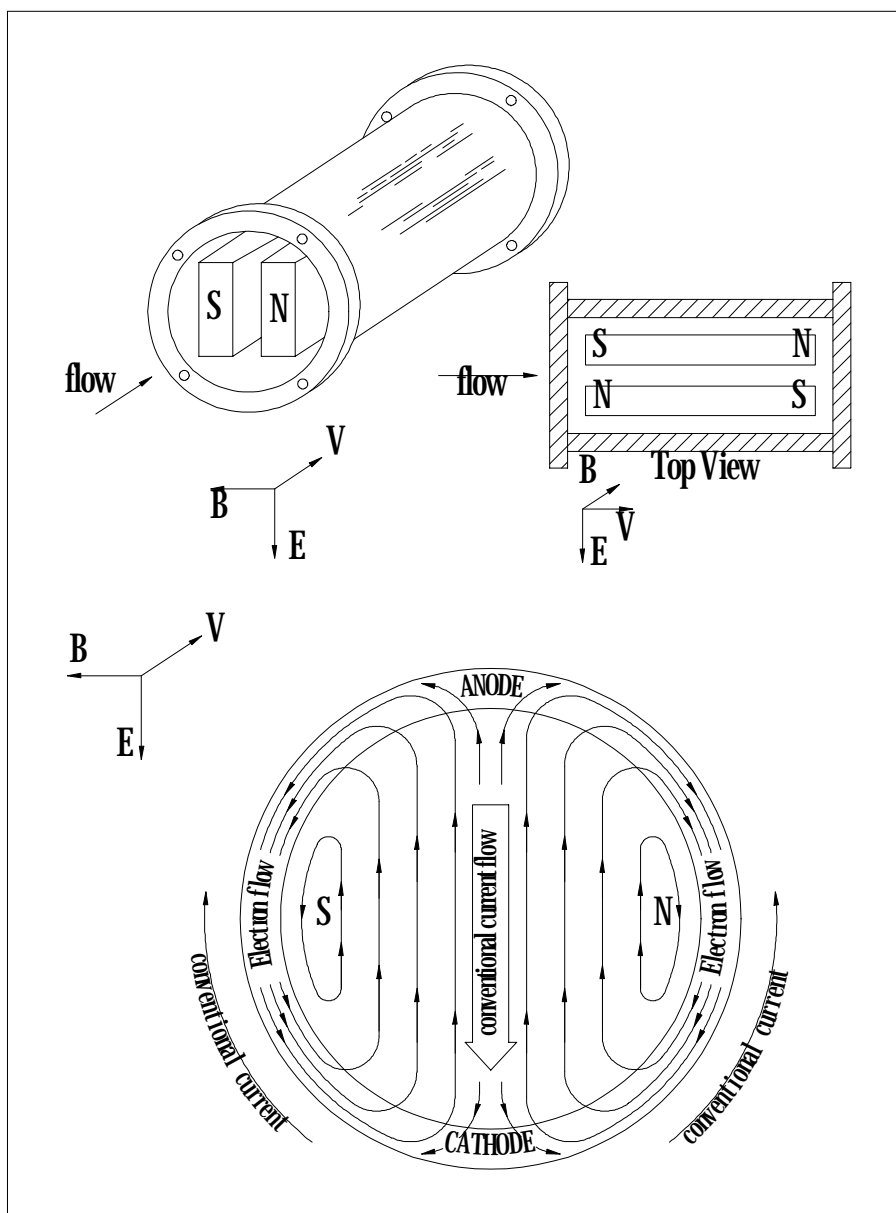
เครื่องมือบำบัดน้ำโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic Treatment Devices: MTD's) มีรูปแบบการจัดวางหลายแบบจากหลายๆผู้ผลิต บางแบบใช้แม่เหล็กไฟฟ้าหลายๆอัน บางแบบใช้อันเดียว หรือใช้แม่เหล็กถาวรที่มีรูปแบบการจัดวางสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไป Gruber and Carda (1981) ได้

แบ่ง MTD's โดยใช้แม่เหล็กถาวรออกเป็น 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-5 แต่ละรูปจะมีการหันสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆกัน บางอันสนามแม่เหล็กจะวางขวางกับทิศทางการไหล เช่น รูป 2-5b และ 2-5c แต่ส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้ขนานกับการไหลในท่อน้ำ เช่นรูป 2-5a และ 2-5d



รูปที่ 2-5. ชนิดของรูปแบบเครื่องมือบำบัดน้ำโดยใช้สนามแม่เหล็ก MTD's
(Gruber and Carda, 1981)

ในรูปที่ 2-6 Busch et al (1986) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงของการหมุนของโมเลกุลในการดูดซับน้ำต่อวัสดุ และการเปลี่ยนแปลง pH เป็นผลมาจากการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยแรง Lorentz โดยลูกศรจะชี้ให้เห็นทิศทางของสนามแม่เหล็ก (B), การไหลของของเหลว (V), สนามไฟฟ้า (E) ในรูปหน้าตัดข้างล่างจะแสดงให้เห็นถึงเส้นทางของกระแสที่อาจเป็นไปได้ในเครื่องมือแม่เหล็กและส่วนที่เป็นขั้วลบและขั้วบวก



รูปที่ 2-6. ทิศทางการหมุนของแรงและสนามแม่เหล็กในเครื่องมือ (Busch et al., 1986)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Grubber and Carda (1981) ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องมือแม่เหล็กแบบที่ 1 (สนามแม่เหล็กขนานกับทิศทางการไหล) และแบบที่ 3 (สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ดังแสดงในรูปที่ 2-6 พบว่าเครื่องมือนี้สามารถลดคราบตะกอนได้ในระบบการไหลทางเดียว เมื่อปล่อยน้ำผ่านเครื่องทำน้ำร้อนเป็นเวลามากกว่า 2 เดือน โดยในการทดลองใช้น้ำประปาที่มีความกระด้าง 192-312 ppm as CaCO_3 ที่ pH 7.6-7.9 โดยใช้อัตราการไหลผ่านเครื่องมือเท่ากับ 130 mL/s และไม่ปรากฏให้เห็นถึงผลของแม่เหล็กต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำและธรรมชาติของการก่อตะกอน

Hasson and Bramson (1985) ได้ทดลองใช้เครื่องมือตามแบบที่ 3 (ดูรูปที่ 2-6) โดยใช้แม่เหล็ก 4 ตัว ใช้น้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ (19-23 °C) มีปริมาณ Ca^{2+} 200-250 ppm as CaCO_3 , อัลคาไลน์ิตี 300-340 ppm as CaCO_3 , Mg^{2+} 165-175 ppm as CaCO_3 และปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 9-10 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเร็วการไหลของน้ำ 2 m/s หลังจากทดลอง 15-35 ชั่วโมง พบว่าเครื่องมือจะมีประสิทธิภาพมากเมื่อเป็นสารละลายอิมิตัว

Gehr et al. (1995) กล่าวว่าในการบำบัดสารละลาย CaSO_4 อิมิตัว ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 4.75T น้ำตัวอย่างหมุนด้วยจำนวนรอบเท่ากับ 1200 rpm เป็นเวลา 2 นาที โดยบำบัดแบบพลศาสตร์ (dynamics) พบว่า การนำไฟฟ้าลดลง 7% การละลายของแข็งลดลง 9% และการเพิ่มของของแข็งทั้งหมด 25% แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรใดๆเกิดขึ้น

Grime (1988) ทำการทดลองโดยใช้ เครื่องมือ HDL Dynamic หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึก CaCO_3 และความแรงสนามแม่เหล็ก พบว่า ขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความแรงแม่เหล็ก และสังเกตเห็นว่า เกิดอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากรวมกันเป็นคราบตะกอน CaSO_4 ในสถานะแวดล้อมเดียวกัน การใช้แม่เหล็กบำบัดระบบของ CaSO_4 จะปรากฏให้เห็นการลดขนาดของผลึกและการไหลรวมกันเป็นคราบตะกอน ซึ่งจะชี้ให้เห็นส่วนประกอบของแอนไอออนที่ทำให้เกิดการก่อตัวของคราบ เช่น CO_3^{2-} เป็น SO_4^{2-} ซึ่งอิทธิพลของแม่เหล็กจะมีผลต่อปรากฏการณ์นี้

Higashitani et al. (1993) ได้ทำการศึกษาผลของการแพร่กระจายของแม่เหล็กในการก่อตัวของผลึก CaCO_3 จากปฏิกิริยาซึ่งเกิดครั้งที่โดยใช้สารละลาย Na_2CO_3 และ CaCl_2 วัดการดูดกลืนแสงแล้วสังเกตโครงสร้างผลึก โดยใช้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กน้อยกว่า 0.3T และมีระยะเวลา

การแพร่กระจายมากกว่า 10 นาที่ พบว่า แม่เหล็กมีผลต่อการก่อตัวของ CaCO_3 และพบว่า สารละลาย Na_2CO_3 มีผลต่อการก่อตัวของ CaCO_3 มากกว่าสารละลาย CaCl_2 และมีผลแม่เหล็กตกค้างในการก่อตัวของ CaCO_3 อย่างน้อยที่สุด 120 ชั่วโมง

Barrett and Parsons (1997) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อการก่อตะกอนของ CaCO_3 โดยใช้สารละลาย CaCl_2 , CaSO_4 และ Na_2CO_3 ไหลผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก ที่มีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.45T เป็นระยะเวลา 30 นาที่ ก่อนที่จะผสมสารละลาย หลังจากนั้นผสมสารละลาย $\text{CaCl}_2/\text{Na}_2\text{CO}_3$ และ $\text{CaSO}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3$ เข้าด้วยกัน พบว่าเกิดผลึกของ CaCO_3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กมีอิทธิพลต่อการก่อตัวของ CaCO_3 และพบว่าแม่เหล็กตกค้างในการก่อตัวของ CaCO_3 อย่างน้อยที่สุด 60 ชั่วโมง

Tombacz et al. (1991) ได้ศึกษาผลของแม่เหล็กต่อการตกตะกอนของเหล็กแขวนลอย โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นของเหล็ก 0.001-0.06 โมลาร์ที่ pH 4.2 ทำการทดลองภายใต้สภาวะน้ำไหล และมีการหมุนเวียนน้ำ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น การตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นด้วย

Kronenberg et al. (1985) ได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กกับน้ำที่กำลังเคลื่อนที่ โดยสังเกต การเปลี่ยนแปลงของน้ำ เมื่อผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไป จากผลการทดลองพบว่า การบำบัดด้วยสนามแม่เหล็กมีผลต่อการแยกตัวของแร่ธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยแร่ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวเป็นตะกอนเล็กๆ เคลื่อนที่ไปกับน้ำในรูปของสารแขวนลอย

การใช้แม่เหล็กกำจัดคราบตะกอนบ่อยครั้งจะได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อนของเหล็กและแผ่นเหล็ก โดยทั่วไปจะเกิดจากการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดโดยแม่เหล็ก (Busch et al., 1986) ได้แสดงแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำสารละลายไหลผ่านเครื่องมือแม่เหล็ก พบว่า ผลจากการนำประจุแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็กในทิศทางขวาไปซ้ายโดยแรงลอเรนซ์ กระแสจะไหลผ่านรอบๆตัวเครื่องมือซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของไอออนที่อยู่ในน้ำบาดาล ซึ่งไอออนที่วิเคราะห์ ได้แก่ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และ แมงกานีส โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods (1995) ดังแสดงในตารางที่ 3-1

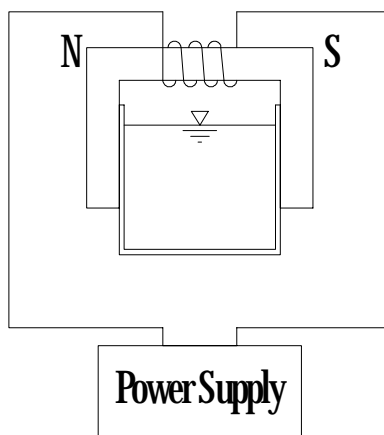
ตารางที่ 3-1. ชนิดของไอออนและวิธีการวิเคราะห์

ชนิดของไอออน	วิธีวิเคราะห์
แคลเซียม (Ca^{2+})	EDTA Titration
แมกนีเซียม (Mg^{2+})	EDTA Titration
เหล็ก (Fe^{2+})	Phenanthroline
แมงกานีส (Mn^{2+})	Persulfate

3.1.2 ศึกษาความสามารถในการละลายของไอออนในน้ำ เมื่อใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ โดยทำการทดลองในสภาวะน้ำนิ่ง (Static Condition) และทำการทดลองแบบแยกไอออนและรวมไอออนโดยแบบแยกไอออนจะใช้น้ำตัวอย่างที่มีไอออนทั้ง 4 ชนิด ละลายอยู่ในน้ำแยกกันแต่ละไอออน ส่วนแบบรวมไอออนใช้น้ำตัวอย่างที่มีไอออนทั้ง 4 ชนิด ละลายอยู่ในน้ำรวมกัน

(1) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

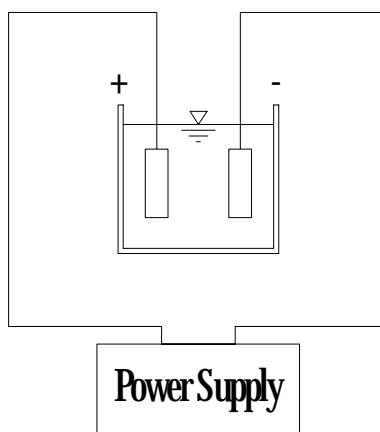
ทำการทดลองโดยใช้น้ำตัวอย่างซึ่งมีไอออนของแร่ธาตุชนิดต่างๆ ละลายอยู่ในปริมาณที่สูงใส่ในกล่องแก้วขนาด 2.25 ลิตร ประมาณ 1.5 ลิตร ติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กล่องแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3-1 แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไป โดยทำการศึกษาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดตะกอน การลดลงของปริมาณไอออนในน้ำ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อหาความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้ความสามารถในการละลายของไอออนในน้ำน้อยที่สุด



รูปที่ 3-1. การติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(2) สนามไฟฟ้าสถิตย์

ทำการทดลองเหมือนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่ไม่ทำปฏิกิริยากันระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ติดตั้งแทนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3-2. เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้ความสามารถในการละลายของอออนในน้ำน้อยที่สุด



รูปที่ 3-2. การติดตั้งสนามไฟฟ้าสถิตย์

3.1.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำต่อการเกิดตะกอน

ทำการทดลองตามข้อ 3.1.2) โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าสถิตย์ และไม่ใช่ทั้งสองอย่าง (ชุดควบคุม) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้น้ำตัวอย่าง A, B, C, D, และ E (ดูตารางที่ 3-2) ซึ่งมี

ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนชนิดต่างๆละลายอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่

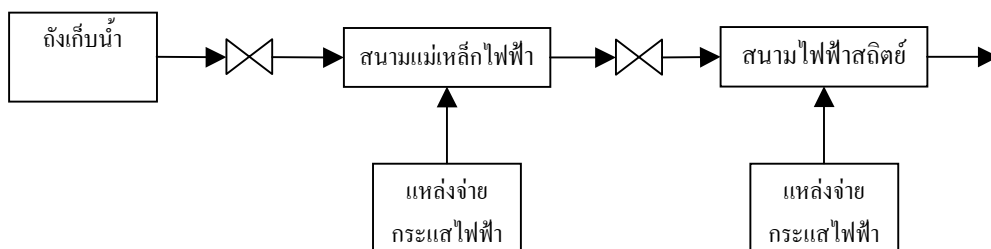
3.1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดตะกอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1.3) ที่อุณหภูมิ 0, 25, 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำตัวอย่าง E

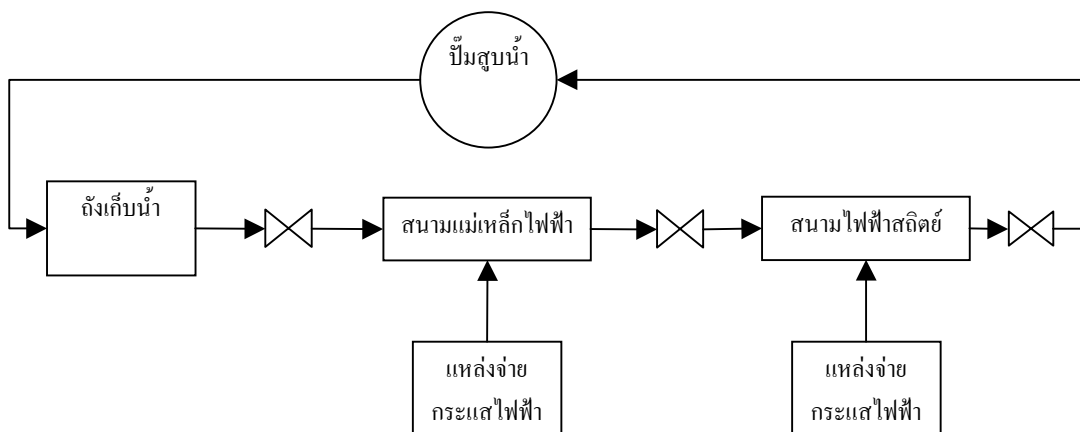
3.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์

ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองการใช้น้ำระดับห้องปฏิบัติการ มีความยาวของท่อน้ำรวมทั้งหมด 4 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพของเครื่องมือซึ่งทำการทดลองในสภาวะน้ำไหล (Dynamic Condition) โดยทำการทดลองดังนี้

- (1) การไหลทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3-3ก. ใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 30 วินาที ซึ่งในการทดลองนี้จะแปรเปลี่ยนอัตราการไหล, ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาอัตราการไหล, ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม
- (2) การหมุนเวียนน้ำขึ้นตอนเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3-3ข. ใช้ระยะเวลาในการหมุนเวียนน้ำ 10 นาที โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าสถิตย์ และใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน เพื่อหาวิธีที่สามารถกำจัดไอออนได้มากที่สุด ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลคงที่
- (3) การหมุนเวียนน้ำ 3 ชั้นตอน ทำการทดลองเช่นเดียวกับการหมุนเวียนน้ำขึ้นตอนเดียว แต่ทำ 3 ครั้ง เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในกำจัดไอออนให้ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน



ก. การไหลทางเดียว



ข. การหมุนเวียนน้ำ

รูปที่ 3-3. แผนภาพการทดลอง

3.2 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และสถานที่ทำการวิจัย

ประชากร กลุ่มตัวอย่าง ประกอบไปด้วย น้ำบาดาล และ น้ำตัวอย่าง A, B, C, D และ E ที่มีปริมาณความเข้มข้นของไอออนสูงแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 3-2 โดยทำการวิจัยที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

ตารางที่ 3-2. คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างและน้ำบาดาล

น้ำตัวอย่าง	ปริมาณความเข้มข้นของไอออนในน้ำ			
	Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)	Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)	Fe ²⁺ (mg /L)	Mn ²⁺ (mg /L)
A	100	102	20.79	10.38
B	204	202	34.53	20.62
C	309	306	43.36	31.25
D	405	408	53.26	44.75
E	505	505	65.26	53.75
น้ำบาดาล	100	90	16.68	0

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- ชุดอุปกรณ์ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย ขดลวดทองแดงพันรอบแกนเหล็ก
- ชุดอุปกรณ์ในการสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ประกอบด้วย แผ่นอิเล็กโทรดจำนวน 2 แผ่นต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
- แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
- แบบจำลองการใช้น้ำระดับห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 3-4 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้
 - เครื่องสูบน้ำ (Pump) ใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง เพื่อสูบน้ำหมุนเวียนในระบบแบบต่อเนื่อง
 - ท่อน้ำ ใช้ท่อ PVC ขนาด ½ นิ้ว
 - ถังเก็บน้ำและถังรับน้ำ ขนาด 35 ลิตรจำนวน 2 ถัง
 - เครื่องกรองน้ำและไส้กรองใยสังเคราะห์ ใช้เพื่อกรองตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.5 ไมโครเมตร
- เครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Gauss Meter)
- เครื่องมือตรวจวัดปริมาณเหล็กและแมงกานีส ในการทดลองนี้ใช้ Spectronic 20
- อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย
 - ขวดเก็บน้ำตัวอย่างขนาด 125 มิลลิลิตร
 - ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร

- ครอบบอกตวง (Cylinder) ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 500 มิลลิลิตร
- Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร



รูปที่ 3-4. แบบจำลองการใช้น้ำระดับห้องปฏิบัติการ

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการทดลองเก็บน้ำตัวอย่างด้วยวิธีจ้วงตัก (Grab Sampling) โดยใช้ปีเปตคิงน้ำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาล และเก็บน้ำที่ผ่านการกรองตะกอนออกแล้วจากปลายก๊อกน้ำในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าสถิตย์ และใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน ไปทำการตรวจวิเคราะห์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่างได้แสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3. การเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

การศึกษา	พารามิเตอร์	วิธีเก็บตัวอย่าง	วัตถุประสงค์
1. การเกิดตะกอนโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์	- ปริมาณอออนชนิดต่าง ๆ ในน้ำ ได้แก่ Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} และ Fe^{2+}	- เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 นาที เป็นเวลา 20 นาที ต่อ 1 ชุดการทดลอง	- เพื่อหาความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และรูปแบบการติดตั้งเครื่องมือที่เหมาะสม
2. ผลของปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำ	- ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า - อัตราการไหล	- เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 นาที เป็นเวลา 20 นาที ต่อ 1 ชุดการทดลอง	- เพื่อศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของอออนในน้ำกับการกำจัดอออน
3. ผลของอุณหภูมิ		- เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 4 นาที เป็นเวลา 20 นาที ต่อ 1 ชุดการทดลอง	- เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดอออนในน้ำ
4. ประสิทธิภาพผลของเครื่องมือ		- เก็บตัวอย่างน้ำหลังจากน้ำไหลผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าสถิตย์แล้ว 30 วินาที ในการทดลองแบบไหลทางเดียว และเก็บทุกๆ 2 นาที เป็นเวลา 10 นาที ในการทดลองแบบหมุนเวียนน้ำ	- เพื่อพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ ค่าเฉลี่ย (Mean) ในการอธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยทั่วไป เช่น ปริมาณออกซิเจนในน้ำ คุณลักษณะดัชนีคุณภาพน้ำต่างๆ เป็นต้น และใช้การวิเคราะห์โดยคิดเป็นร้อยละการกำจัด ซึ่ง

$$\begin{aligned} & \text{ร้อยละการกำจัดออกซิเจนในน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าสถิตย์} \\ & = \frac{\text{ปริมาณออกซิเจนที่ถูกกำจัดไป}}{\text{ปริมาณออกซิเจนในน้ำดิบ}} \times 100 \end{aligned}$$

นอกเหนือจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแล้วยังได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอย และสหสัมพันธ์ (Regression and Correlation) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากับประสิทธิภาพในการบำบัด โดยนำเสนอข้อมูลในรูปแบบตารางและกราฟ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตย์ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพดังกล่าว เช่น ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ความเข้มข้นของอออนในน้ำบาดาล และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยทำการทดลองเปรียบเทียบภายใต้สภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับสภาวะจริง โดยทำการศึกษาในประเด็นต่างๆ ดังนี้ คือ

- ผลกระทบของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออนหลักในน้ำบาดาล
- ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออนหลักในน้ำบาดาล
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่อดอกของอออนที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่อดอกของอออนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่
- ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่อดอกของอออนที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่
- ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่อดอกของอออนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการกำจัดอออน
- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการกำจัดอออน
- การใช้วิธี 3 ชั้น ลดปริมาณอออนในน้ำบาดาล

4.1 ผลกระทบของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออนหลักในน้ำ

4.1.1 แบบแยกอออน

ทำการทดลองที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.10, 0.13, 0.15, 0.17 และ 0.20T โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 104 mg/L as CaCO₃, มีแมกนีเซียม เท่ากับ 107 mg/L as CaCO₃, มี

เหล็ก เท่ากับ 20.76 mg/L และมีแมงกานีส เท่ากับ 10.88 mg/L จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 0.20T ซึ่งมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก, แมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 85 mg/L as CaCO₃, 92 mg/L as CaCO₃, 9.25 mg/L และ 5.47 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 18.27%, 14.02%, 55.44% และ 49.72% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ (แบบแยกอออน)

ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า, T	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
0.10	7.69	4.67	47.64	34.83
0.13	9.62	6.54	48.79	36.76
0.15	11.54	9.35	49.57	39.25
0.17	15.38	11.21	53.18	44.03
0.20	18.27	14.02	55.44	49.72

4.1.2 แบบรวมอออน

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.10, 0.13, 0.15, 0.17 และ 0.20T โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 104 mg/L as CaCO₃, มีแมกนีเซียม เท่ากับ 107 mg/L as CaCO₃, มีเหล็ก เท่ากับ 20.68 mg/L และมีแมงกานีส เท่ากับ 10.88 mg/L จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 0.20T ซึ่งมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 78 mg/L as CaCO₃, 88 mg/L as CaCO₃, 8.22 mg/L และ 5.36 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 22%, 15.38%, 60.25% และ 50.74% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า
ต่างๆ (แบบรวมอออน)

ความเข้มข้นแม่ เหล็กไฟฟ้า, Gauss	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
1035	6	5.77	50.91	36.40
1308	10	7.69	52.27	39.61
1510	14	9.62	53.19	41.73
1738	18	12.50	57.35	46.51
1997	22	15.38	60.25	50.74

4.2 ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าต่อความสามารถในการกำจัดอออนหลักในน้ำบาดาล

4.2.1 แบบแยกอออน

ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 100 mg/L as CaCO₃, มีแมกนีเซียม เท่ากับ 104 mg/L as CaCO₃, มีเหล็ก เท่ากับ 20.68 mg/L และมีแมงกานีส เท่ากับ 10.13 mg/L จากผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 40 โวลต์ ซึ่งมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 84 mg/L as CaCO₃, 90 mg/L as CaCO₃, 12.87 mg/L และ 6.89 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 16%, 13.46%, 37.77% และ 31.98% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ
(แบบแยกอออน)

แรงดันไฟฟ้า, โวลต์	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
10	8	6.73	33.08	27.54
20	12	8.65	34.19	29.12
30	14	10.58	36.51	30.70
40	16	13.46	37.77	31.98

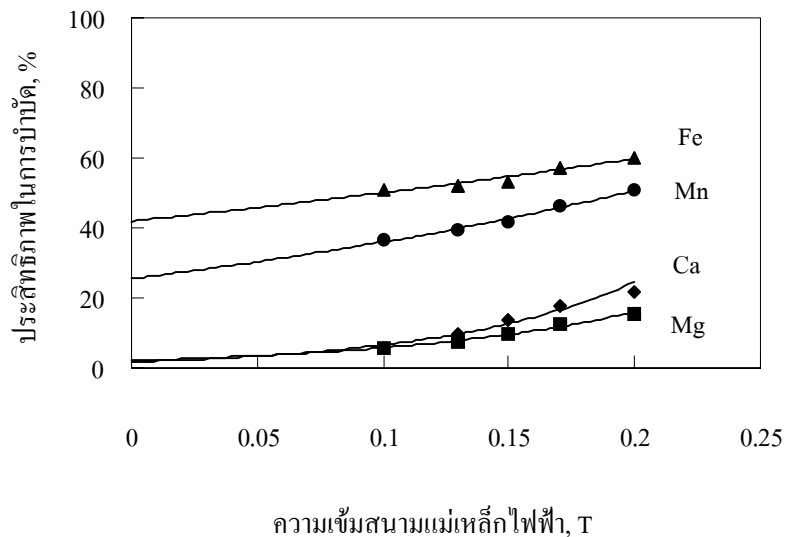
4.2.2 แบบรวมอ็อกอน

ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 100 mg/L as CaCO₃, มีแมกนีเซียม เท่ากับ 104 mg/L as CaCO₃, มีเหล็ก เท่ากับ 20.68 mg/L และมีแมงกานีส เท่ากับ 10.38 mg/L จากผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 40 โวลต์ ซึ่งมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 80 mg/L as CaCO₃, 85 mg/L as CaCO₃, 10.25 mg/L และ 6.28 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกอนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 20%, 18.27%, 50.43% และ 39.50% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-4

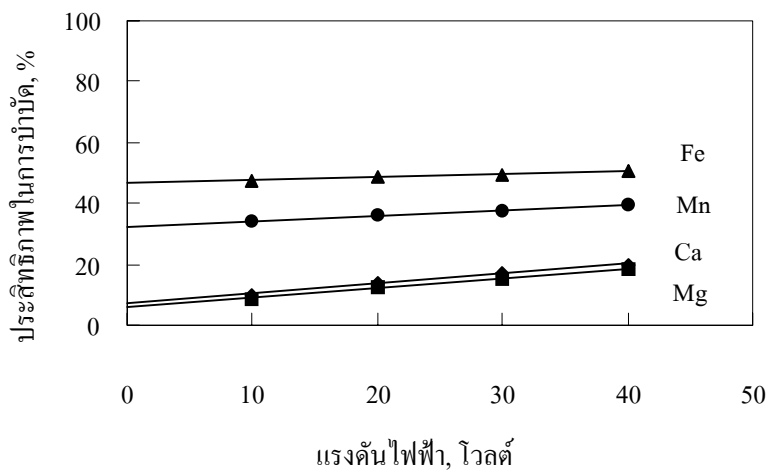
ตารางที่ 4-4. ประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกอนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ (แบบรวมอ็อกอน)

แรงดันไฟฟ้า, โวลต์	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
10	10	8.65	47.68	34.20
20	14	12.50	48.40	36.03
30	17	15.38	49.66	37.76
40	20	18.27	50.43	39.50

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดอ็อกอนหลักในน้ำบาดาล โดยความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สามารถกำจัดอ็อกอนในน้ำบาดาลได้มากที่สุดในการทดลองนี้มีค่า เท่ากับ 0.20T และ 40 โวลต์ ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอ็อกอนหลักในน้ำบาดาลจะแปรผันตามความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4-1 และ 4-2 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกอน แบบรวมอ็อกอนจะมีค่ามากกว่าแบบแยกอ็อกอน



รูปที่ 4-1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการบำบัด



รูปที่ 4-2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการบำบัด

จากรูปที่ 4-1 พบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับประสิทธิภาพการบำบัด และมีค่า R ของ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เท่ากับ

0.982, 0.995, 0.964 และ 0.993 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4-2 พบว่าแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับประสิทธิภาพการบำบัด และมีค่า R ของ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เท่ากับ 0.997, 0.997, 0.994 และ 0.999 ตามลำดับ สมการถดถอยที่แสดงในตารางที่ 4-5 และ ตารางที่ 4-6 อาจนำไปใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดอออนชนิดต่างๆ ในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าแตกต่างจากที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้

ตารางที่ 4-5. สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า (X)

อออน	สมการถดถอย	R
แคลเซียม	$Y = 1.7486 e^{3.228X}$	0.982
แมกนีเซียม	$Y = 2.1044 e^{0.127X}$	0.995
เหล็ก	$Y = 41.922 e^{1.772X}$	0.964
แมงกานีส	$Y = 25.577 e^{3.417X}$	0.993

ตารางที่ 4-6. สมการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดและแรงดันไฟฟ้า (X)

อออน	สมการถดถอย	R
แคลเซียม	$Y = 0.33X+7$	0.997
แมกนีเซียม	$Y = 0.3174X+5.765$	0.997
เหล็ก	$Y = 0.0951X+46.665$	0.994
แมงกานีส	$Y = 0.1763X+32.465$	0.999

การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ เนื่องจากแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้น้ำเกิดความปั่นป่วน และผลของแรงนี้ทำให้อออนที่อยู่ในน้ำทั้งประจุบวกและลบวิ่งเข้าหากันด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้อนุภาคชนกันมากขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนสนามไฟฟ้าสถิตย์นั้นแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อออนประจุบวกและลบแยกออกจากน้ำไปเกาะอยู่ที่แผ่นอิเล็กโทรดที่มีประจุตรงข้ามกัน

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่ตะกอนของอออนที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่

ทำการทดลองที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T โดยใช้น้ำตัวอย่าง A, B, C, D และ E จากผลการทดลองพบว่า น้ำตัวอย่าง E ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนสูงสุดสามารถก่ตะกอนได้ดีกว่าน้ำตัวอย่างอื่นๆ โดยมีปริมาณอออน แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และ แมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 283 mg/L as CaCO₃, 324 mg/L as CaCO₃, 13.36 mg/L และ 16.12 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 43.96%, 35.84%, 79.52% และ 70.01% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำตัวอย่างที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T

น้ำตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
A	15.00	10.78	52.95	41.26
B	19.61	14.85	57.17	45.73
C	27.51	22.55	64.07	52.13
D	33.83	29.41	73.24	60.27
E	43.96	35.84	79.52	70.01

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำกับร้อยละการก่ตะกอนของอออนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่

ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าไฟฟ้า 40 โวลต์ โดยใช้น้ำตัวอย่าง A, B, C, D และ E จากผลการทดลองพบว่า น้ำตัวอย่าง E ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของอออนสูงสุดสามารถก่ตะกอนได้ดีกว่าน้ำตัวอย่างอื่นๆ โดยมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 267 mg/L as CaCO₃, 274 mg/L as CaCO₃, 17.12 mg/L และ 15.45 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 47.13%, 45.74%, 73.76% และ 71.25% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำตัวอย่างที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ
ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์

น้ำตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
A	21.00	18.63	50.07	40.07
B	26.96	24.75	55.49	46.26
C	30.42	28.76	60.91	52.06
D	39.01	37.75	67.18	61.20
E	47.13	45.74	73.76	71.25

จากผลการทดลองที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าหนึ่งๆ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอออน ซึ่งพบว่าน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำสูงด้วย นั่นคือยังมีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำมากเท่าไรก็จะยิ่งกำจัดได้มาก

การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ เนื่องจากที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่น้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนสูงจะทำให้โอกาสของอออนในน้ำที่จะวิ่งชนกันก่อตัวเป็นตะกอนมีมากขึ้น หรือทำให้ปริมาณอออนไปเกาะรวมกันที่แผ่นอิเล็กโทรดได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงหรือมีตะกอนในน้ำเพิ่มขึ้นนั่นเอง

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่อตะกอนของอออนที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T ที่อุณหภูมิ 17, 29.5, 44 และ 61.5 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวอย่าง E จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 61.5 องศา อออนในน้ำสามารถก่อตะกอนได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และแมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 214 mg/L as CaCO₃, 256 mg/L as CaCO₃, 7.48 mg/L และ 10.38 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 57.62%, 49.10%, 88.35% และ 81.67% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T

อุณหภูมิ, องศา	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
17	37.42	29.62	74.71	66.18
29.5	44.36	36.78	80.81	70.42
44	50.89	42.94	85.02	76.50
61.5	57.62	49.10	88.35	81.67

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับร้อยละการก่ตะกอนของอออนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่

ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 13, 28, 47 และ 67 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำตัวอย่าง E จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 67 องศา อออนในน้ำสามารถก่ตะกอนได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีปริมาณ แคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และ แมงกานีส เหลืออยู่เท่ากับ 194 mg/L as CaCO₃, 206 mg/L as CaCO₃, 8.37 mg/L และ 7.95 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแต่ละชนิดคิดเป็นร้อยละ 58%, 59.05%, 86.96% และ 84.82% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์

อุณหภูมิ, องศา	ประสิทธิภาพการบำบัด, %			
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส
13	43.17	40.76	69.54	64.95
28	48.71	46.71	74.07	71.97
47	55.24	53.48	80.61	77.72
67	61.58	59.05	86.96	84.82

จากผลการทดลองที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอออน ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิสูงๆจะมีประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำสูงด้วย โดยในการทดลองนี้อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถกำจัดอออนได้มากที่สุด คือที่อุณหภูมิเฉลี่ย 64 องศาเซลเซียส นั่นคือยิ่งอุณหภูมิในน้ำสูงประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำก็จะสูงมากขึ้นด้วยหรือกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นและทำให้โอกาสที่อ็อกซิเจนจะวิ่งชนกันก็มีมากขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวของตะกอนมากขึ้น นอกจากนั้นการนำน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้อ็อกซิเจนแยกออกจากกันไปเกาะที่แผ่นอิเล็กโทรดได้ง่ายขึ้น

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหล และอัตราการกำจัดอ็อกซิเจน

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.10, 0.13, 0.15, 0.17 และ 0.20T และ อัตราการไหล 0.056, 0.078, 0.14, 0.23 และ 0.34 ลิตรต่อวินาที โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 100 mg/L as CaCO₃ และมีเหล็ก เท่ากับ 10.68 mg/L จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 0.20T และ 0.23 ลิตร ต่อ วินาที ซึ่งมีปริมาณแคลเซียม และ เหล็ก เหลืออยู่เท่ากับ 86 mg/L as CaCO₃ และ 5.79 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกซิเจน คิดเป็นร้อยละ 14% และ 65.29% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-11

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหล และอัตราการกำจัดอ็อกซิเจน

ทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 10, 20, 30 และ 40 โวลต์ และ อัตราการไหล 0.056, 0.078, 0.14, 0.23, 0.34 ลิตร ต่อ วินาที โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 100 mg/L as CaCO₃ และมีเหล็ก เท่ากับ 10.68 mg/L จากผลการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 40 โวลต์ และ 0.23 ลิตร ต่อ วินาที ซึ่งมีปริมาณ แคลเซียม และ เหล็ก เหลืออยู่เท่ากับ 86 mg/L as CaCO₃ และ 8.84 mg/L ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกซิเจน คิดเป็นร้อยละ 14% และ 47% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-12

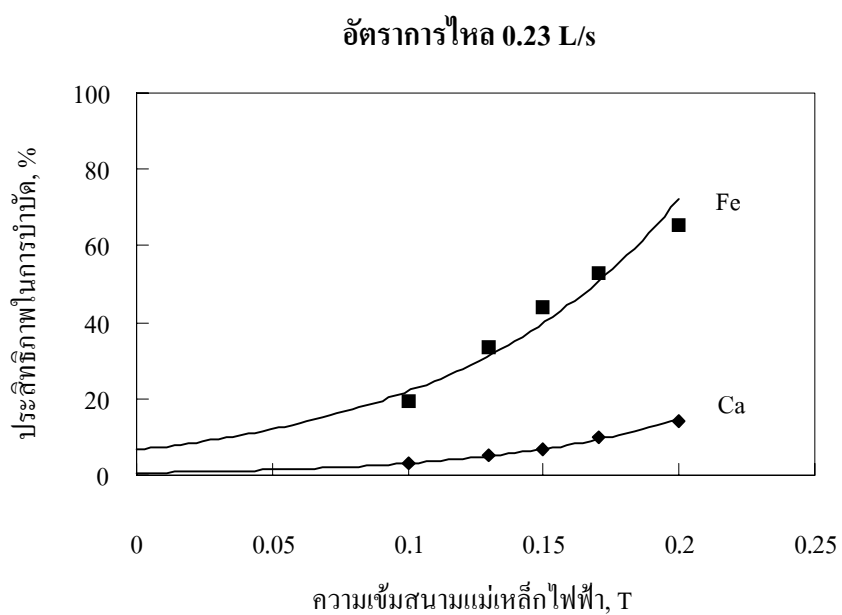
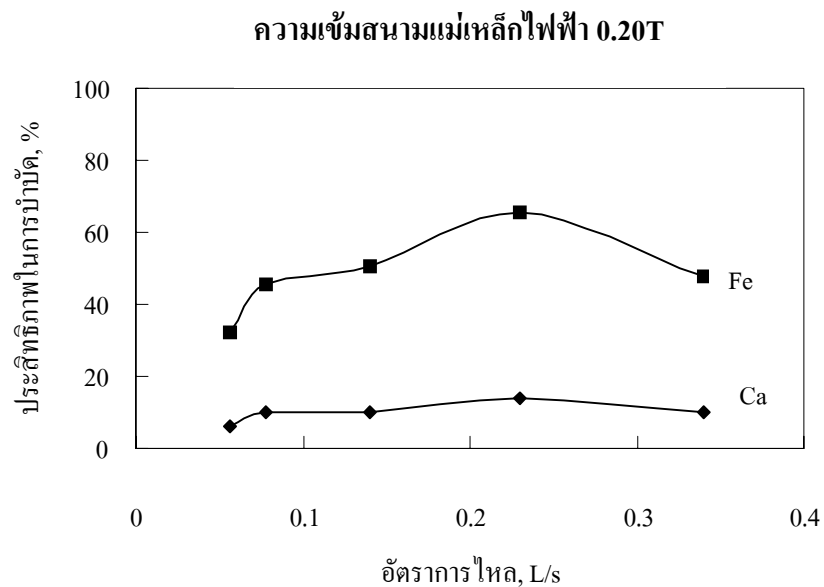
จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T, แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ และ อัตราการไหล 0.23 ลิตร ต่อ วินาที จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกซิเจนในน้ำบาดาลสูงที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการกำจัดอ็อกซิเจนในน้ำบาดาลแปรผันตามความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4

ตารางที่ 4-11. ประสิทธิภาพการกำจัดออกซิเจนในน้ำบาดาล ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและอัตราการไหลต่างๆ

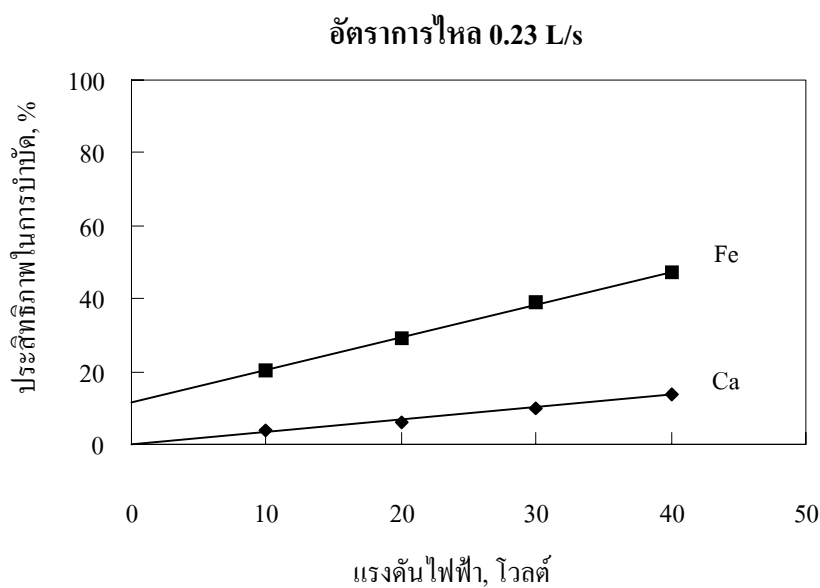
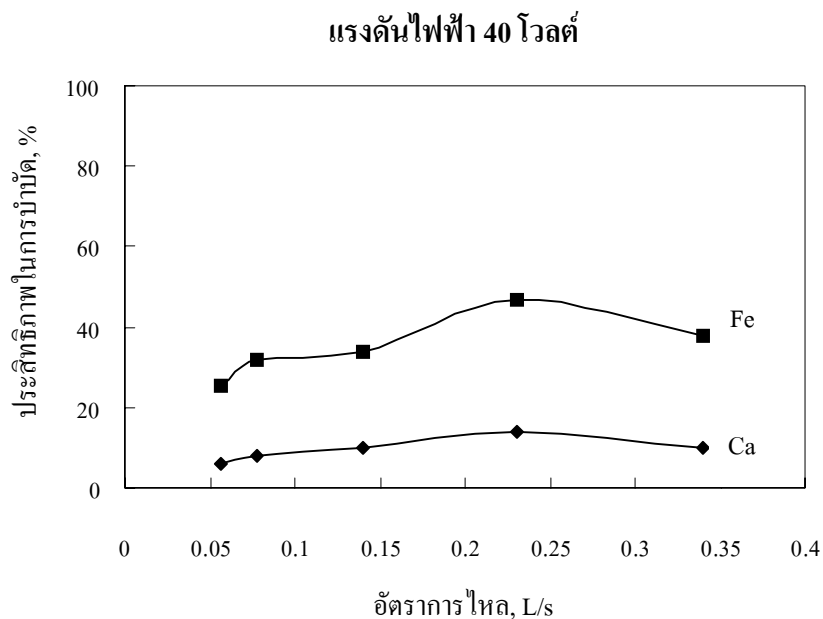
ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า, T	ประสิทธิภาพการบำบัด, %									
	Q1=0.056 l/s		Q2=0.078 l/s		Q3=0.14 l/s		Q4=0.23 l/s		Q5=0.34 l/s	
	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก
0.10	0	9.29	2	10.85	2	12.41	3	19.54	2	14.81
0.13	2	13.25	4	23.50	4	27.40	5	33.75	2	26.62
0.15	2	17.98	6	32.97	6	34.53	7	44.00	4	38.43
0.17	4	27.34	8	38.79	8	45.56	10	52.70	6	42.39
0.20	6	32.13	10	45.56	10	50.30	14	65.29	10	48.02

ตารางที่ 4-12. ประสิทธิภาพการกำจัดออกซิเจนในน้ำบาดาลที่แรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลต่างๆ

ค่าแรงดันไฟฟ้า, โวลต์	ประสิทธิภาพการบำบัด, %									
	Q1=0.056 l/s		Q2=0.078 l/s		Q3=0.14 l/s		Q4=0.23 l/s		Q5=0.34 l/s	
	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก
10	2	8.51	2	10.79	2	14.75	4	20.20	2	16.49
20	4	14.03	4	16.43	4	21.04	6	29.32	6	24.76
30	4	20.32	6	25.00	8	24.28	10	39.21	8	31.29
40	6	25.84	8	32.07	10	33.69	14	47.00	10	37.65



รูปที่ 4-3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหลและประสิทธิภาพในการบำบัด



รูปที่ 4-4. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลและประสิทธิภาพในการบำบัด

จากรูปที่ 4-3 จะพบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับประสิทธิภาพการบำบัด โดยมีค่า R ของแคลเซียมและเหล็กเท่ากับ 0.976 และ 0.996 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-4 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับประสิทธิภาพการบำบัด โดยมีค่า R ของแคลเซียมและเหล็กเท่ากับ 0.989 และ 0.998 ตามลำดับ

การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ เนื่องจากแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้น้ำเกิดความปั่นป่วนอยู่แล้ว อัตราการไหลของน้ำยังช่วยเพิ่มความเร็วของอนุภาคทำให้อนุภาคชนกันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำมากขึ้น หรืออัตราการไหลของน้ำจะช่วยเพิ่มความเร็วของอนุภาคทำให้อนุภาคไปเกาะที่แผ่นอิเล็กโทรดได้มากขึ้น แต่ถ้าอัตราการไหลของน้ำที่มากเกินไปแทนที่จะทำให้อนุภาคชนกันแล้วรวมตัวเป็นตะกอนกลับจะทำให้อนุภาคแยกตัวออกจากกันแพร่กระจายอยู่ในน้ำ หรือ ทำให้ออนประจุบวกและลบไปเกาะที่แผ่นอิเล็กโทรดได้น้อยลงนอกจากนั้นความเร็วของน้ำที่สูงจะทำให้ออนเกาะติดอยู่ที่แผ่นอิเล็กโทรดหลุดออกมาได้ ทำให้น้ำได้รับการปนเปื้อนมากขึ้นด้วย

4.9 การใช้วิธี 3 ชั้น ลดปริมาณอออนในน้ำบาดาล

ทำการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าสถิตย์ และใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยทำการทดลองที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ และอัตราการไหล 0.23 ลิตรต่อวินาที ในการทดลองใช้น้ำ 25 ลิตร โดยเริ่มต้นมีปริมาณแคลเซียมเท่ากับ 100 mg/L as CaCO₃ และมีเหล็ก เท่ากับ 16.68 mg/L จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้การหมุนเวียนน้ำ 3 ชั้นตอน ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดปริมาณอออนแคลเซียม และเหล็ก ในน้ำได้มากที่สุด โดยเฉพาะเหล็ก ซึ่งในชั้นตอนแรกสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของอออนแคลเซียม และเหล็ก เหลือเท่ากับ 64 mg/L as CaCO₃ และ 3.67 mg/L คิดเป็นร้อยละ 36%, 77% ตามลำดับ ในชั้นตอนที่ 2 สามารถลดเหลือเท่ากับ 50 mg/L as CaCO₃ และ 0.66 mg/L คิดเป็นร้อยละ 21%, 82% ตามลำดับ และในชั้นตอนที่ 3 สามารถลดเหลือเท่ากับ 40 mg/L as CaCO₃ และ 0.24 mg/L คิดเป็นร้อยละ 20%, 63% ตามลำดับ และคิดเป็นร้อยละรวมทั้งหมดเท่ากับ 60%, 98% ดังแสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13. ประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยใช้วิธี 3 ชั้น

ชั้นตอนที่	ประสิทธิภาพการบำบัด, %					
	Magnetic		Electrostatic		Magnetic & Electrostatic	
	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก	แคลเซียม	เหล็ก
1	36	77	28	6	31	70
2	21	73	16	49	17	51
3	20	75	16	58	17	66
ทั้งหมด	60	98	50	92	53	95

จากผลการทดลองใช้วิธี 3 ชั้น พบว่า วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถลดปริมาณไอออนในน้ำบาดาลได้สูงสุด รองลงมาคือ ใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน และสุดท้ายคือ วิธีสนามไฟฟ้าสถิตย์ จากมาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง (ภาคผนวก ก.) กำหนดให้มีปริมาณแคลเซียมและเหล็กทั้งหมดในน้ำได้ไม่เกิน 75 mg/L as CaCO₃ และ 0.5 mg/L เพราะฉะนั้นการใช้วิธี 3 ชั้น โดยวิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดปริมาณ แคลเซียม และเหล็ก ได้ต่ำกว่ามาตรฐานสามารถนำมาใช้ในการอุปโภคได้

การที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ อาจเป็นไปได้ว่า วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ไอออนบวกตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ส่วนวิธีสนามไฟฟ้าสถิตย์ เมื่อใช้ไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง ไอออนที่เกาะที่ผิวอิเล็กโทรด จะทำให้แผ่นอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อนได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำได้รับการปนเปื้อน เนื่องจากการกัดกร่อนของไอออน จะทำให้มีแร่ธาตุละลายในน้ำเพิ่มขึ้น และในการบำบัดแบบ 3 ชั้น น้ำซึ่งมีปริมาณเหล็กและแคลเซียมอยู่มากจะค่อยๆถูกกำจัดออกไปในแต่ละชั้นจนกระทั่งสามารถกำจัดให้ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการวิจัยครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 0.20T และ 40 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดอออนในน้ำแปรตามความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่วนแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น และประสิทธิภาพในการกำจัดอออนแบบรวมอออนมีค่ามากกว่าแยกอออน

2. ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำ มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอออน ซึ่งพบว่าร้อยละการก่อกองของอออนเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอออนในน้ำ

3. ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่ ประสิทธิภาพการกำจัดอออนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิสูงๆจะมีประสิทธิภาพการกำจัดอออนมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ

4. อัตราการกำจัดอออนเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ แรงดันไฟฟ้า กับอัตราการไหล ซึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T และ แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ ที่อัตราการไหล 0.23 ลิตร ต่อ วินาที จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำสูงสุด

5. การใช้วิธี 3 ชั้น พบว่า วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถกำจัดอออนได้มากที่สุด โดยเฉพาะเหล็ก รองลงมาคือ วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับสนามไฟฟ้าสถิตย์ และสุดท้ายคือ วิธีสนามไฟฟ้าสถิตย์

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

1. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำบาดาลที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าการทดลองนี้ โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า 6 แอมแปร์ หรือจัดทำเครื่องมือแม่เหล็กหลายๆชุด แล้วต่ออนุกรมกัน

2. การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอออนในน้ำบาดาลที่มีปริมาณอออนสูงกว่าการทดลองนี้

รายการอ้างอิง

มันสิน ดัชนีกุลเวศม์.(2527). **วิศวกรรมประปา** (เล่มที่2). พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ:

โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

American Public Health Association. (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th ed., New York.

Barrett, R. A. and Parsons, S.A. (1997). The influence of magnetic fields on calcium carbonate precipitation. **Water Research**. 32(3): 609-612.

Busch, K. W., Busch, M. A., Parker, D. H., Darling, R. E., and McAtee, J. L. (1986). Studies of a water treatment devices that uses magnetic fields. **Corrosion**. 42: 211-221.

Federal Technology Alerts, (1998). Non-Chemical Technologies for Scale and Hardness Control, Available: [http:// www.pnl.gov/fta/11_non.htm](http://www.pnl.gov/fta/11_non.htm).

Gehr, R., Zhai, Z.A., Finch, J.A. and Rao, R. (1995). Reduction of soluble mineral concentrations in CaSO₄ saturated water using a magnetic field. **Water Research**. 29(3): 933-940.

Grimes, S. M. (1988, March). Magnetic field effect on crystals. **Tube Int**. 111-118.

Gruber, C.E. and Carda, D.D. (1981). Performance analysis of permanent magnet type water treatment devices. WSA Research report, Water Quality Association.

Hasson, D. and Bramson, D. (1985). Effectiveness of magnetic water treatment in suppressing CaCO₃ scale deposition. **Ind. Engng Chem. Process Des. Dev.** 24: 588-592.

Hauer, G. E. (1950). Iron and Carbon Dioxide Removal. **Journal Amer. Water Works Assoc.** 42,6: 555-561.

Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K. and Hatade, S. (1993.) Effects of magnetic field on formation of CaCO₃ particles. **J. Colloid Interface Sci.** 152: 125-131.

Kronenberg K.J. (1985). Experimental evidence for effects of magnetic field on moving water. **IEEE Trans. Magnetism**. 21(5): 2059-2061

Lloyd, D. J. (1991). Blockage of piggery effluent pipes: a magnetohydrodynamic solution. **Water (Australia)**. 18: 39-40.

Tombacz, E., Ma, C., Busch, K. W. and Busch, M. A. (1991). Effect of a weak magnetic field on hematite sol. In stationary and flowing systems. **Coll. Polym. Sci.** 226: 278-289.

Walker, R. (1978). **Water Supply Treatment and Distribution**. Englewood cliffs, New Jersey: Pentice-Hall.

ภาคผนวก ก
มาตรฐานคุณภาพน้ำ

ตารางที่ ก-1. มาตรฐานคุณภาพน้ำการประปาครหลวง

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด
1. คุณลักษณะทางกายภาพ	
สี (หน่วยแพลตตินัม-โคบอลท์)	5
รส (Taste)	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
กลิ่น (Odor)	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
ความขุ่น (หน่วยซีลิกา)	ไม่เกิน 5
ความเป็นกรด-ด่าง (p H)	6.5 ถึง 8.5
2. คุณลักษณะทางเคมี (มก./ลบ.ดม.)	
ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solid)	500
เหล็ก (Fe)	0.5
แมงกานีส (Mn)	0.3
เหล็กและแมงกานีส	0.5
ทองแดง (Cu)	1.0
สังกะสี (Zn)	5.0
แคลเซียม (Ca)	75
แมกนีเซียม (Mg)	50
ซัลเฟต (SO ₄)	200
คลอไรด์ (Cl)	250
ฟลูออไรด์ (F)	0.7
ไนเตรท (NO ₃)	45
อัลคิลเบนซิล ซัลโฟเนต (alkylbenzyl sulfonates, ABS)	0.5
สารประกอบฟีนอล (phenolic substances, as phenol)	0.001
3. สารเป็นพิษ (มก./ลบ.ดม.)	
ปรอท (Hg)	0.001

ตารางที่ ก-1. (ต่อ)

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด
ตะกั่ว (Pb)	0.05
อาร์เซนิก (As)	0.05
เซลีนียม (Se)	0.01
โครเมียม (Cr VI)	0.05
ไซยาไนด์ (CN)	0.2
คัสดเมียม (Cd)	0.01
บาเรียม (Ba)	1.0
4. คุณลักษณะทางจุลชีววิทยา	
แสดนดาร์ค เฟลตเคานต์ (โคโลนีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	500
เอ็มพีเอ็น (โคลิฟอร์มอร์แกนนิสซั่ม ต่อ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร)	น้อยกว่า 2.2
อี.โคไล (E. Coli)	ไม่มี

ตารางที่ ก-2. มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

Standard of Drinking Water (WHO)				
(Physical and Chemical)				
Toxic Substance	Maximum Allowable mg/l			
Lead (as Pb)	0.05			
Selenium (as Se)	0.01			
Arsenic (as As)	0.05			
Chromium (as Cr hexavalent)	0.05			
Cyanide (as CN)	0.2			
Cadmium	0.01			
Substances Affecting the Potability of Water Substance				
	Max. Acceptable		Max. Allowable	
Total Solids	500	mg/l	1500	mg/l
Color	5	Units	50	Units
Turbidity	5	Units	25	Units
Taste	Unobjectionable		-	
Odor	Unobjectionable		-	
Iron (Fe)	0.3	mg/l	1	mg/l
Manganese (Mn)	0.1	mg/l	0.5	mg/l
Copper (Cu)	1	mg/l	1.5	mg/l
Zinc (Zn)	5	mg/l	15	mg/l
Calcium (Ca)	75	mg/l	200	mg/l
Magnesium (Mg)	50	mg/l	150	mg/l
Sulfate (SO ₄)	200	mg/l	400	mg/l
Chloride (Cl)	200	mg/l	600	mg/l
Phrange	7-8.5			
Magnesium + Sodium Sulfate	500	mg/l	1000	mg/l
Phenolic Substances (as Phenol)	0.001	mg/l	0.002	mg/l
Carbon Chloroform Extract	0.2	mg/l	0.5	mg/l
Alkyl Benzyl Sulfonates	0.5	mg/l	1	mg/l
Standard of Bacteriological Quality				
90% of Samples in year negative for Coliforms i.e.				
90% of Samples MPN < 1.0				
No. Samples MPN > 10				
MPN 8 – 10 not to occur in Consecutive Sample				

ภาคผนวก ข
ตารางข้อมูลดิบ

ตารางที่ ข-1. ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการก่อตะกอนของอิออน (แบบแยกอิออน)

ความ เข้มข้น	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของอิออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet
0.10	0	104	104	107	107	20.76	20.76	10.88	10.88
	4	100	100	107	104	18.76	14.37	10.88	10.75
	8	100	100	107	104	18.18	13.11	10.75	10.37
	12	100	100	107	104	17.76	12.74	10.75	9.87
	16	100	96	104	102	17.63	11.63	10.63	8.13
	20	100	96	104	102	17.39	10.87	10.63	7.09
0.13	0		104		107		20.76		10.88
	4		100		104		13.47		10.63
	8		100		102		12.84		10.13
	12		96		102		13.37		9.21
	16		95		100		10.95		7.89
	20		94		100		10.63		6.88
0.15	0		104		107		20.76		10.88
	4		100		104		13.05		10.50
	8		96		102		12.79		9.92
	12		96		102		11.00		8.64
	16		94		100		10.57		7.36
	20		92		97		10.47		6.61
0.17	0		104		107		20.76		10.88
	4		96		103		12.30		9.98
	8		94		100		11.14		9.4
	12		92		98		10.25		8.12
	16		90		96		9.92		6.84
	20		88		95		9.72		6.09
0.20	0		104		107		20.76		10.88
	4		96		101		11.83		9.47
	8		93		98		10.57		8.89
	12		91		96		9.78		7.61
	16		87		94		9.35		6.33
	20		85		92		9.25		5.47

ตารางที่ ข-2. ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการก่ตะกอนของอิออน (แบบรวมอิออน)

ความ เข้มข้น	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของอิออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet
0.10	0	100	100	104	104	20.68	20.68	10.88	10.88
	4	100	99	104	104	20.58	13.96	10.88	10.63
	8	100	97	104	102	20.21	12.73	10.63	10.37
	12	100	96	104	100	20.21	12.12	10.63	9.42
	16	100	95	104	100	20.1	11.08	10.5	8.25
	20	100	94	104	98	19.89	10.15	10.5	6.92
0.13	0		100		104		20.68		10.88
	4		98		102		13.87		10.5
	8		96		100		12.68		9.12
	12		94		100		11.53		8.41
	16		92		98		10.47		7.43
	20		90		96		9.87		6.57
0.15	0		100		104		20.68		10.88
	4		98		102		13.74		10.37
	8		94		100		12.56		9.44
	12		90		98		11.48		8.57
	16		88		96		10.32		7.26
	20		86		94		9.68		6.34
0.17	0		100		104		20.76		10.88
	4		94		101		12.88		9.85
	8		91		98		11.70		8.92
	12		88		96		10.62		8.05
	16		84		94		9.46		6.74
	20		82		91		8.82		5.82
0.20	0		100		104		20.76		10.88
	4		93		100		12.28		9.39
	8		90		97		11.10		8.46
	12		86		94		10.02		7.59
	16		82		91		8.86		6.28
	20		78		88		8.22		5.36

ตารางที่ ข-3. แรงดันไฟฟ้ากับการก่อตะกอนของอ็อกไซด์ (แบบแยกอ็อกไซด์)

แรงดันไฟฟ้า, โวลต์	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของอ็อกไซด์							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Elect.	Elect.	Non-Elect.	Elect.	Non-Elect.	Elect.	Non-Elect.	Elect.
10	0	100	100	104	104	20.68	20.68	10.13	10.13
	4	100	98	104	104	19.84	19.42	9.88	9.88
	8	100	98	102	102	19.36	18.86	9.88	8.97
	12	100	96	102	100	18.18	17.43	9.88	8.46
	16	100	94	100	98	17.76	15.97	9.88	7.76
	20	100	92	100	97	17.24	13.84	9.88	7.34
20	0		100		104		20.68		10.13
	4		96		102		19.29		9.88
	8		94		100		17.56		8.74
	12		92		98		16.14		8.02
	16		90		96		14.45		7.41
	20		88		95		13.61		7.18
30	0		100		104		20.68		10.13
	4		94		102		19.12		8.88
	8		92		100		18.39		8.38
	12		90		97		17.29		7.5
	16		88		95		15.08		7.38
	20		86		93		13.13		7.02
40	0		100		104		20.68		10.13
	4		92		100		19.02		8.67
	8		90		98		18.18		8.26
	12		88		94		16.61		7.64
	16		86		92		14.97		7.12
	20		84		90		12.87		6.89

ตารางที่ ข-4. แรงดันไฟฟ้ากับการก่ตะกอนของอ็อกไซด์ (แบบรวมอ็อกไซด์)

แรงดันไฟฟ้า, โวลต์	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของอ็อกไซด์							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.
10	0	100	100	104	104	20.68	20.68	10.88	10.88
	4	100	98	104	102	20.68	18.39	10.38	9.63
	8	100	96	104	100	20.29	16.52	9.75	8.63
	12	100	94	104	98	20.29	14.26	9.75	8.27
	16	100	92	104	97	19.87	12.53	9.25	7.16
	20	100	90	102	95	19.55	10.82	9.25	6.83
20	0		100		104		20.68		10.38
	4		96		100		17.98		9.43
	8		92		98		16.13		8.72
	12		90		96		13.61		8.19
	16		88		94		12.36		7.04
	20		86		91		10.67		6.64
30	0		100		104		20.68		10.38
	4		96		100		17.65		9.31
	8		92		97		15.86		8.65
	12		87		94		13.42		7.79
	16		85		92		11.97		6.81
	20		83		88		10.41		6.46
40	0		100		104		20.68		10.38
	4		94		98		17.26		9.18
	8		90		95		15.34		8.53
	12		88		92		13.16		7.47
	16		84		87		11.75		6.48
	20		80		85		10.25		6.28

ตารางที่ ข-5. ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออน กับการก่ตะกอนของไอออน ที่ความเข้มข้น
แม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T

น้ำตัวอย่าง	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของไอออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet
A	0	100	100	102	102	20.79	20.79	10.38	10.88
	4	100	97	100	100	20.29	14.84	10.38	9.14
	8	100	94	100	97	20.1	13.68	9.75	8.63
	12	100	90	100	95	19.89	12.42	9.75	7.55
	16	100	87	100	93	19.24	11.57	9.25	6.88
	20	98	85	100	91	18.38	9.84	9.25	6.39
B	0	204	204	202	202	34.53	34.53	20.62	20.62
	4	204	192	202	197	33.79	27.22	19.38	18.69
	8	202	185	199	192	31.63	22.79	18.45	17.19
	12	200	178	199	184	30.1	19.42	17.29	15.94
	16	196	171	197	176	29.42	17.84	16.67	13.81
	20	196	164	197	172	28.36	14.79	15.53	11.19
C	0	309	309	306	306	43.36	43.36	31.25	31.25
	4	309	292	304	289	40.63	36.58	29.75	28.63
	8	305	276	301	267	42.63	31.24	28.56	25.88
	12	305	254	301	253	41.58	25.21	26.75	21.13
	16	297	238	296	242	40.32	19.05	25.25	17.88
	20	297	224	296	237	39.79	15.58	23.25	14.96
D	0	405	405	408	408	53.26	53.26	44.75	44.75
	4	405	387	408	391	51.26	46.26	41.25	39.42
	8	401	342	406	364	48.65	35.08	38.75	33.31
	12	401	323	406	335	47.21	28.05	36.52	27.44
	16	393	296	401	307	45.83	20.26	34.25	23.81
	20	393	268	399	288	44.13	14.25	32.16	17.78
E	0	505	505	505	505	65.26	65.26	53.75	53.75
	4	505	479	504	465	63.26	54.31	50.25	44.56
	8	497	421	498	427	60.89	47.16	47.48	35.94
	12	497	373	484	382	58.47	35.78	44.79	28.56
	16	489	314	469	368	55.42	22.89	40.64	20.19
	20	489	283	459	324	52.79	13.36	37.75	16.12

ตารางที่ ข-6. ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนกับการก่อก้อนของไอออน ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์

น้ำตัวอย่าง	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของไอออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.
A	0	100	100	102	102	20.79	20.79	10.38	10.38
	4	100	96	100	98	20.29	17.58	10.38	9.38
	8	100	92	100	96	20.1	15.21	9.75	8.88
	12	100	88	100	90	19.89	13.58	9.75	8.13
	16	100	82	100	86	19.24	11.53	9.25	7.48
	20	96	79	100	83	18.38	10.38	9.25	6.52
B	0	204	204	202	202	34.53	34.53	20.62	20.62
	4	204	192	202	194	33.79	26.26	19.38	18.88
	8	202	180	199	185	31.63	23.11	18.45	16.63
	12	200	169	199	173	30.1	19.32	17.29	14.84
	16	196	157	197	164	29.42	17.26	16.67	12.63
	20	196	149	197	152	28.36	15.37	15.53	11.08
C	0	309	309	306	306	43.36	43.36	31.25	31.25
	4	309	285	304	290	40.63	37.26	29.75	27.75
	8	305	267	301	277	42.63	33.84	28.56	24.38
	12	305	242	301	253	41.58	26.95	26.75	20.63
	16	297	228	296	231	40.32	21.74	25.25	18.38
	20	297	215	296	218	39.79	16.95	23.25	14.98
D	0	405	405	408	408	53.26	53.26	44.75	44.75
	4	405	374	408	383	51.26	42.68	41.25	33.25
	8	401	332	406	346	48.65	37.16	38.75	27.75
	12	401	306	406	319	47.21	31.79	36.52	23.25
	16	393	279	401	279	45.83	25.53	34.25	20.63
	20	393	247	399	254	44.13	17.47	32.16	17.36
E	0	505	505	505	505	65.26	65.26	53.75	53.75
	4	505	436	504	448	63.26	56.05	50.25	41.38
	8	497	361	498	378	60.89	45.58	47.48	35.85
	12	497	327	484	332	58.47	33.47	44.79	24.13
	16	489	294	469	295	55.42	25.37	40.64	18.63
	20	489	267	459	274	52.79	17.12	37.75	15.45

ตารางที่ ข-7. อุณหภูมิกับการก่ตะกอนของอออน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T โดยใช้ตัวอย่าง E

อุณหภูมิ, องศา	เวลา, นาที	ปริมาณอออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet	Non-Magnet	Magnet
17	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	493	469	493	483	44.58	55.36	51.37	45.75
	8	470	423	479	456	42.45	46.21	49.98	37.75
	12	453	381	464	421	40.12	34.1	48.18	30.25
	16	426	349	448	393	39.56	23.16	46.73	26.75
	20	405	316	435	354	38.14	16.24	45.13	19.15
29.5	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	485	451	487	464	55.31	52.36	51.07	43.46
	8	459	409	476	422	50.87	41.74	49.22	36.01
	12	440	368	462	387	45.25	33.1	47.33	28.06
	16	421	307	439	349	38.76	20.47	45.58	22.81
	20	395	281	410	318	34.12	12.32	44.66	16.75
44	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	469	438	482	448	49.42	48.31	50.38	41.63
	8	445	377	469	403	44.52	37.63	48.38	33.29
	12	431	335	442	365	32.76	25.15	46.88	24.31
	16	392	282	417	324	25.16	17.42	45.36	18.25
	20	364	248	392	287	18.45	9.63	44.39	13.31
61.5	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	463	419	475	421	46.68	45.32	49.88	40.36
	8	429	365	440	394	46.42	34.63	47.63	32.38
	12	396	312	419	361	33.21	21.78	46.38	23.13
	16	377	253	394	296	29.23	14.78	45.13	16.83
	20	358	214	363	256	17.11	7.48	44.12	10.38

ตารางที่ ข-8. อุณหภูมิกับการก่อตะกอนของไอออนที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์โดยใช้น้ำตัวอย่าง E

อุณหภูมิ , องศา	เวลา, นาที	ปริมาณความเข้มข้นของไอออน							
		Ca ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Mg ²⁺ (mg /L as CaCO ₃)		Fe ²⁺ (mg /L)		Mn ²⁺ (mg /L)	
		Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.	Non-Electro.	Electro.
13	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	498	483	498	488	60.58	57.01	51.88	46.88
	8	472	426	482	447	57.45	45.74	49.63	40.13
	12	458	375	476	379	54.39	36.05	48.38	36.38
	16	432	328	455	335	51.37	29.95	47.63	25.28
	20	419	287	439	298	48.84	19.56	46.38	18.36
28	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	487	472	487	469	59.79	55.16	51.38	44.88
	8	463	418	479	415	55.34	43.58	49.38	37.63
	12	442	364	464	358	50.23	32.37	47.88	26.88
	16	426	312	442	316	46.38	21.79	46.13	19.38
	20	408	259	413	268	42.79	16.65	45.39	14.68
47	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	467	455	485	459	56.31	53.16	50.83	42.38
	8	441	406	467	411	50.14	42.26	48.83	36.88
	12	428	357	438	365	49.47	33.16	47.63	24.38
	16	389	285	414	292	43.26	19.05	45.88	17.63
	20	355	226	388	234	39.18	12.45	44.26	11.67
67	0	505	505	503	503	64.21	64.21	52.38	52.38
	4	456	424	468	439	52.68	46.36	49.88	40.63
	8	418	376	435	357	48.42	37.35	47.38	31.3
	12	387	313	412	324	41.21	24.32	45.63	20.63
	16	362	258	389	263	37.26	15.42	43.88	14.38
	20	345	194	356	206	31.53	8.37	41.38	7.95

ตารางที่ ข-9. ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า อัตราการไหล และการกำจัดอออนในน้ำบาดาล

ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า, Gauss	Q1=0.056 l/s		Q2=0.078 l/s		Q3=0.14 l/s		Q4=0.23 l/s		Q5=0.34 l/s	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
Control	100	16.68	100	16.68	100	16.68	100	16.68	100	16.68
1035	100	15.13	98	14.87	98	14.61	97	13.42	98	14.21
1308	98	14.47	96	12.76	96	12.11	95	11.05	98	12.24
1510	98	13.68	94	11.18	94	10.92	93	9.34	96	10.27
1738	96	12.11	92	10.21	92	9.08	90	7.89	94	9.61
1997	94	11.32	90	9.08	90	8.29	86	5.79	90	8.67

ตารางที่ ข-10. แรงดันไฟฟ้า อัตราการไหล และ การกำจัดอออนในน้ำบาดาล

แรงดันไฟฟ้า, โวลต์	Q1=0.056 l/s		Q2=0.078 l/s		Q3=0.14 l/s		Q4=0.23 l/s		Q5=0.34 l/s	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
Control	100	16.68	100	16.68	100	16.68	100	16.68	100	16.68
10	98	15.26	98	14.88	98	14.22	96	13.31	98	13.93
20	96	14.34	96	13.94	96	13.17	94	11.79	94	12.55
30	96	13.29	94	12.51	92	12.63	90	10.14	92	11.46
40	94	12.37	92	11.33	90	11.06	86	8.84	90	10.40

ตารางที่ ข-11. อัตราการไหลกับการกำจัดอออนในน้ำบาดาลโดยวิธีต่างๆ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์

อัตราการไหล, L/s	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
0.056	100	16.68	94	12.25	98	13.42	96	12.65
0.078	100	16.68	92	11.20	95	11.34	93	11.23
0.14	100	16.68	90	10.52	94	10.79	91	10.76
0.23	100	16.68	85	8.81	92	9.47	88	8.92
0.34	100	16.68	88	10.13	96	10.36	90	10.28

ตารางที่ ข-12. การหมุนเวียนน้ำแบบขั้นตอนเดียว ที่แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์, อัตราการไหล 0.23 L/s, ใช้น้ำปริมาตร 25 ลิตร

ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.15T

ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	100	16.68	90	9.08	84	8.83	88	8.42
4	98	16.63	88	8.33	82	8.14	85	7.94
6	96	16.45	84	7.48	80	7.65	82	7.23
8	96	16.50	80	6.37	77	6.84	80	6.65
10	94	16.32	76	5.44	75	5.79	77	6.02

ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.17T

ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	100	16.63	85	8.29	85	8.55	86	8.12
4	98	16.45	82	7.46	83	8.01	82	7.63
6	96	16.18	80	6.63	80	7.58	78	6.94
8	96	16.05	77	5.32	78	6.95	76	6.07
10	94	15.92	72	4.21	76	5.66	73	5.28

ความเข้มข้นแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T

ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	100	16.63	80	6.18	84	8.29	82	7.37
4	98	16.58	76	5.53	82	7.76	80	6.71
6	96	16.32	72	5.13	79	7.12	77	6.06
8	96	16.05	68	4.47	76	6.34	73	5.54
10	94	15.79	64	3.67	72	5.56	69	4.87

ตารางที่ ข-13. การหมุนเวียนน้ำแบบ 3 ชั้น โดยใช้วิธีต่างๆ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.20T
แรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์, อัตราการไหล 0.23 L/s, ใช้น้ำปริมาตร 25 ลิตร

ชั้นตอนที่ 1

ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	100	16.63	80	6.18	84	8.29	82	7.37
4	98	16.58	76	5.53	82	7.76	80	6.71
6	96	16.32	72	5.13	79	7.12	77	6.06
8	96	16.05	68	4.47	76	6.34	73	5.54
10	94	15.79	64	3.67	72	5.56	69	4.87

ชั้นตอนที่ 2

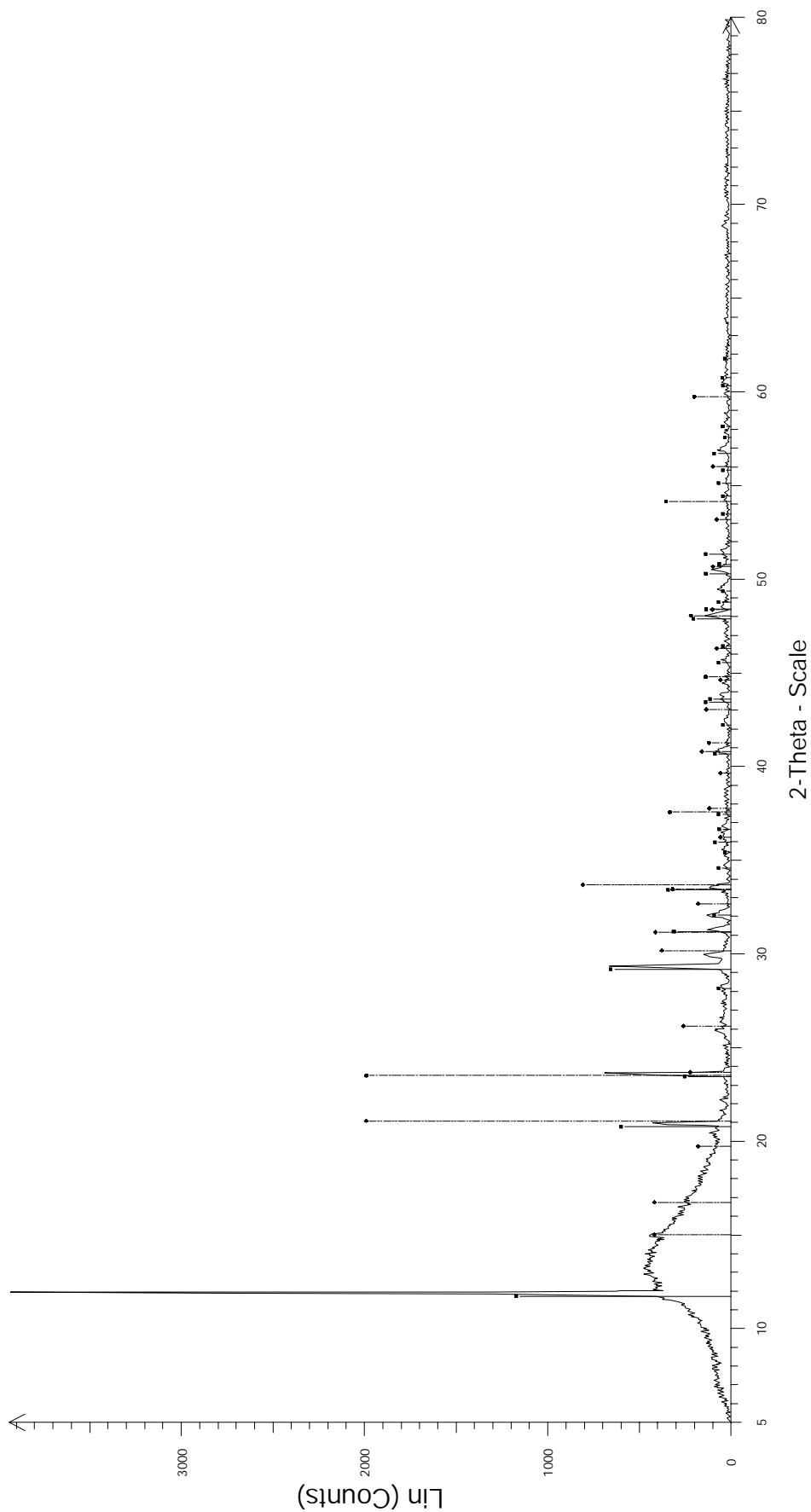
ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	94	15.68	62	2.24	70	4.34	67	3.83
4	92	15.39	58	1.97	68	4.08	65	3.24
6	92	15.27	56	1.45	66	3.72	62	3.03
8	90	15.12	54	1.25	62	3.14	60	2.74
10	90	14.95	50	0.96	60	2.81	57	2.35

ชั้นตอนที่ 3

ระยะเวลาการ หมุนเวียนน้ำ, นาที	Control		Magnetic		Electrostatic		Magnet & Elect	
	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)	Ca(mg/L as CaCO ₃)	Fe(mg/L)
2	90	14.87	48	0.53	58	2.32	54	2.11
4	88	14.74	46	0.42	55	2.18	52	1.71
6	87	14.61	44	0.34	53	1.84	50	1.45
8	86	14.21	42	0.29	51	1.32	48	1.05
10	84	14.08	40	0.24	50	1.18	47	0.79

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ตะกอน

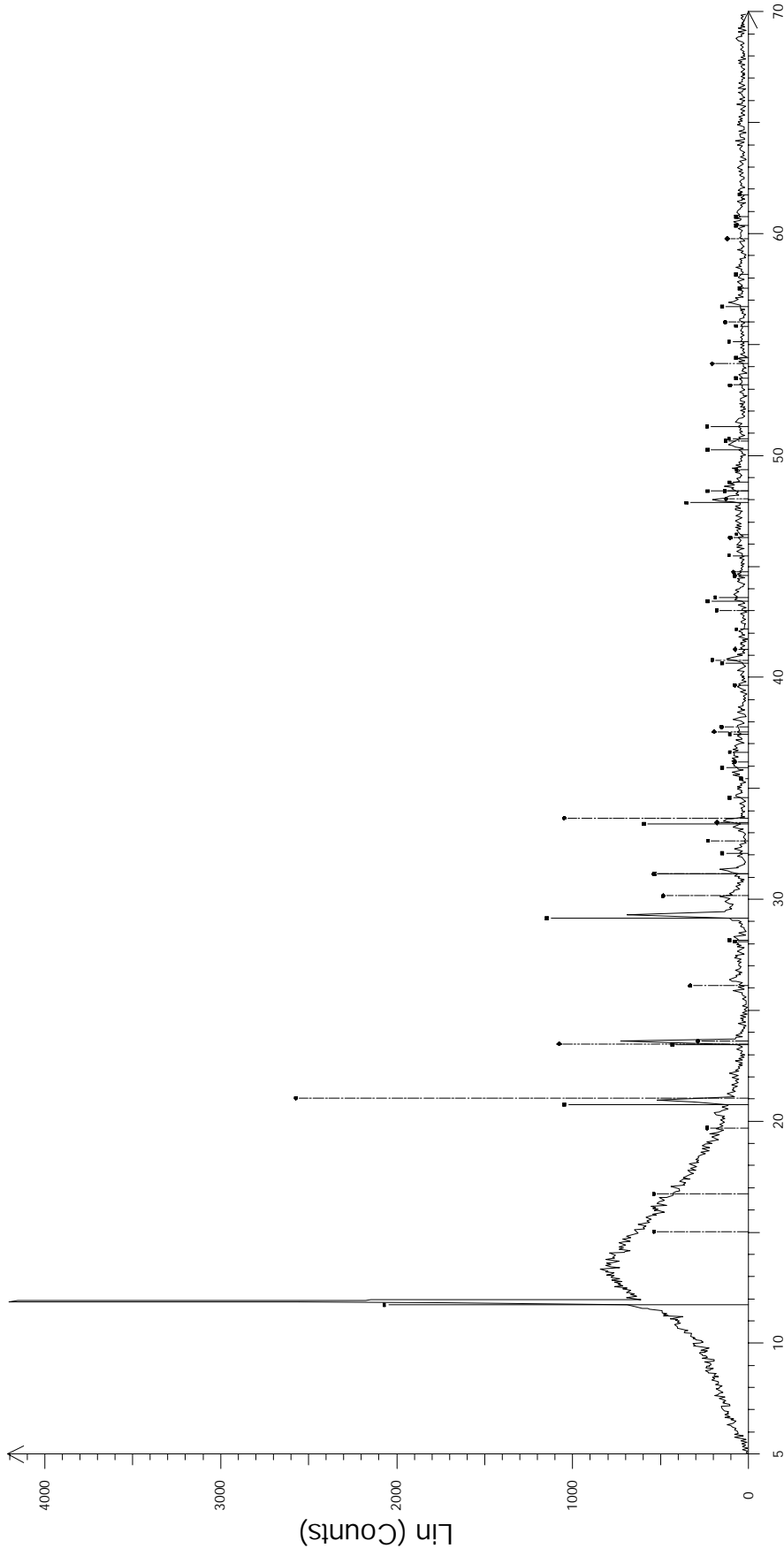
non-elect



File: nonelectro.RAW - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.5 s - Anode: Cu - Creation: 02/15/00 10:57:58
Operations: Smooth 0.050 | Background 0.017,1.000 | Import

- CaSO₄·2H₂O - Y: 29.17% - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 06-0046 (D) - Gypsum
- MgSO₄·7H₂O - Y: 50.00% - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 01-0399 (D) - Epsomite
- Fe(OH)₃ - Y: 50.00% - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 46-1436 (*) - Bernalite

elect



File: elect.RAW - Start: 5.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.6 s - Anode: Cu - Creation: 02/15/00 11:54:01

Operations: Y Scale Mul 1.375 | Smooth 0.050 | Background 0.000.1.000 | Import

CaSO4·2H2O - Y: 48.48 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 06-0046 (D) - Gypsum

Fe(OH)3 - Y: 25.00 % - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 46-1436 (*) - Bernalite

MgSO4·7H2O - Y: 60.00% - d x by: 1.000 - WL: 1.54056 - 01-0399 (D) - Epsomite

ประวัติผู้เขียน

นางสาว อภรณ์ ตีวิธมไพศุรย์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มีนาคม พ.ศ. 2518 ที่อำเภอเวียงน้อย จังหวัด ขอนแก่น เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2540 ภายหลังสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีจึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี