การบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ELEPHANT URINE TREATMENT AND POTENTIAL PHOSPHORUS RECOVERY BY ELECTROCOAGULATION PROCESS

สุจินันท์ หงษ์สร้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

สุจินันท์ หงษ์สร้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า Elephant Urine Treatment and Potential Phosphorus Recovery by Electrocoagulation Process
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสุจินันท์ หงษ์สร้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐนียา รังษีสุริยะชัย, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์กุลยา สาริชีวิน, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ขนาบแก้ว, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์, วศ.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐนียา รังษีสุริยะชัย, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.)
วันที่ 17 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวสุจินันท์ หงษ์สร้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาตราจารย์ฐนียา รังษีสุริยะชัย
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และ 2) หาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นปุ๋ย

ในการทดลองนี้ได้ใช้ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยทำการแปรเปลี่ยนชนิดของขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้ซึ่งจะประกอบไปด้วยการใช้ขั้วบวกและขั้วลบขั้วอะลูมิเนียม - อะลูมิเนียม (Al-Al) และขั้วเหล็ก - เหล็ก (Fe-Fe) แปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 15 และ 20 โวลต์ และระยะเวลาในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ 15 30 45 60 และ 90 นาที ทำการทดลองโดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็คโทรดเท่ากับ 5 ซม.

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วอะลูมิเนียม - อะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งละลายน้ำสูงสุดที่สภาวะความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลาในการบำบัดที่ 60 นาที เท่ากับ 99.14 88.09 และ 8% ตามลำดับ และขั้วเหล็ก - เหล็ก มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งละลายน้ำสูงสุดที่สภาวะความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลาในการบำบัดที่ 90 นาที เท่ากับ 97.35 88.69 และ 30% ตามลำดับที่ ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้เมื่อนำผลึกที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและรูปแบบการวิเคราะห์ความเป็นผลึกบนการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าการบำบัดที่ใช้แผ่นขั้วอลูมิเนียมมีความเป็นไปได้ที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากกว่าแผ่นขั้วเหล็ก

คำสำคัญ: การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ขั้วอลูมิเนียม ขั้วเหล็ก ปัสสาวะช้าง

Thesis Title	Elephant Urine Treatment and Potential Phosphorus Recovery By Electrocoagulation Process
Name-Surname	Miss.Sujinan Hongsoi
Program Subject	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thaneeya Rangseesuriyachai, Ph.D.
Academic Year	2022

ABSTRACT

The objectives of this study were to: 1) determine the optimal conditions for wastewater treatment from elephant urine to achieve the best treatment efficiency by electrocoagulation process and 2) explore the potential of phosphorus recovery for fertilizer production

. In this experiment, the series of electromagnetic precipitation approach were used with different types of electrodes, namely anode and cathode, Aluminum-Aluminum (Al-Al), and Iron-Iron (Fe-Fe), by setting variable voltage at 10, 15 and 20 V and electrolytic precipitation time at 15, 30, 45, 60 and 90 min. The experiments were carried out with a distance of 5 cm between the electrodes.

The results from the experiment revealed that when applying electrocoagulation process with Al-Al electrodes, the efficiency of phosphate, ammonia nitrogen, and dissolved solids removal was achieved at a voltage difference of 20 V and the treatment time of 60 min, accounting for 99.14%, 88.09%, and 8%, respectively. For Fe-Fe electrodes, the efficiency of phosphate, ammonia nitrogen, and dissolved solids removal was achieved at a voltage difference of 20 V and the treatment time of 90 min, accounting for 97.35%, 88.69% and 30%, respectively. In both conditions, when the crystal forms were analyzed for morphology and crystallinity in X-ray diffraction pattern, it was found that the treatments using aluminum electrode plates were more likely to produce struvite crystals than the treatments using iron electrode plates

Keyword: electrocoagulation, aluminum electrode, iron electrode, elephant urine

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.ฐนียา รังษีสุริยะชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนข้อมูลเกี่ยวกับการทำโครงงานวิจัย วัตถุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ทั้งนี้ขอขอบคุณอีกหลายท่านซึ่งมิได้ระบุชื่อในที่นี้ ซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบคุณบุพการีที่เป็นกำลังใจหลักให้คณะผู้จัดทำมีแรงกายแรงใจจนสามารถทำให้โครงการนี้ผ่านไปได้ด้วยดี และทางผู้จัดทำโครงงานหวังอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจมากพอสมควร

สุจินันท์ หงษ์สร้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย 4

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ 5

กิตติกรรมประกาศ 6

สารบัญ 7

สารบัญตาราง 9

สารบัญรูป 10

บทที่ 1 บทนำ 12

1.1 ที่มาและความสำคัญ 12

1.2 วัตถุประสงค์ 14

1.3 ขอบเขต 14

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 15

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16

2.1 ฟอสฟอรัส (phosphorus) 16

2.2 กระบวนการบำบัดฟอสฟอรัส 17

2.3 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation หรือ EC) 18

2.4 ปัสสาวะ 23

2.5 ช้าง (Elephant) 25

2.6 สตรูไวท์ (Struvite) 27

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 32

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 32

3.2 ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 33

3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 35

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 36

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำตัวอย่าง 39

3.6 สถานที่ในการทดลองการศึกษา 39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 40

4.1 คุณลักษณะของน้ำเสีย 40

4.2 ผลการทดลองค่าความเป็นกรด - ด่าง ในระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 41

4.3 การศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียปัสสาวะช้าด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 44

4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 57

4.5 การหาศักยภาพในนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 58

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 62

5.1 สรุปผลการทดลอง 62

5.2 ข้อเสนอแนะ 63

บรรณานุกรม 64

ภาคผนวก 67

ภาคผนวก ก 68

ภาคผนวก ข 70

ภาคผนวก ค 72

ประวัติผู้เขียน 75

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 20
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง 39
ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากปัสสาวะช้าง 40
ตารางที่ 4.2 ช่วงค่าที่เหมาะสมในการบำบัด 58
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะช้าง 60
ตารางที่ ก 1 ประสิทธิภาพของการกำจัด (%) 69
ตารางที่ ข 1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ 71

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus cycle) 17
รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย 19
รูปที่ 2.3 แสดงระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าเบื้องต้น 21
รูปที่ 2.4 แสดงเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย 22
รูปที่ 2.5 สีของปัสสาวะ 24
รูปที่ 2.6 การเกิดผลึกในรูปแบบต่างในสารละลายที่มีแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เป็นองค์ประกอบ 28
รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า 33
รูปที่ 3.2 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC supply) 34
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นขั้วอิเล็คโทรดชนิดขั้วเหล็ก 35
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำ 36
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วอะลูมิเนียม 37
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วเหล็กและขั้วเหล็ก 38
รูปที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม 42
รูปที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก 43
รูปที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างในสภาวะต่าง 44
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียม 46
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก 47
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในสภาวะต่างๆ 48
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม 49
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก 50
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในสภาวะต่างๆ 51
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม 52
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก 53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในสภาวะต่างๆ 54
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำ ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม 55
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำ ขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก 56
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำในสภาวะต่างๆ 57
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของผลึกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าจากน้ำเสียปัสสาวะช้าง
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 59
รูปที่ ค 1 ผลการส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป 73
ของการใช้แผ่น Al-Al ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาบำบัด 60 นาที
รูปที่ ค 2 ผลการส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป 74
ของการใช้แผ่น Fe-Fe ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาบำบัด 90 นาที

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหามลพิษทางน้ำถือว่าเป็นปัญหาที่มีมาอย่างยาวนาน ซึ่งปริมาณของน้ำเสียนี้เกิดขึ้นจากหลายๆ กิจกรรม เช่น น้ำเสียอุตสาหกรรม น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากการเกษตร เป็นต้น โดยแต่ละกิจกรรมก็ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียซึ่งโดยทั่วไปน้ำเสียที่ปล่อยออกจากภาคอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชนนั้นมีกฎหมายบังคับที่จำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สาธารณะ โดยน้ำเสียทางการเกษตรนั้นซึ่งประกอบด้วยการปศุสัตว์ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด การเพาะปลูก หรือบางกิจกรรมก็มีค่าความสกปรกที่สูง เช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกร หรือปศุสัตว์อื่นๆ น้ำเสียที่เกิดจากการกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ก็ถูกจัดเป็นกลุ่มน้ำเสียซึ่งอยู่ในกลุ่มของเกษตรกรรม ที่มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ทั้งที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และมักเป็นมลสารจำพวกธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ในปริมาณที่มาก โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเสียประเภทนี้มักจะพบสารจำพวกฟอสเฟตในปริมาณที่สูง ฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารที่กำจัดได้ยากจึงต้องการระบบบำบัดน้ำเสียที่มีเทคโนโลยีในการกำจัดที่สูง โดยคุณสมบัติเฉพาะของฟอสเฟตมีความจำเป็นอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของ ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งเป็นสารที่ให้พลังงานสูงในสิ่งมีชีวิตและเป็นองค์ประกอบของสารพันธุกรรม DNA และ RNA ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึมและการถ่ายทอดพันธุกรรมของ [2] ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์ที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นจะต้องมีการบำบัดผ่านกรรมวิธีกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และวิธีการบำบัดน้ำเสียก็มีอยู่หลากหลายวิธี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียนั้น การนำฟอสเฟตจากน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรมจึงเป็นอีกแนวทางเลือกที่น่าสนใจ โดยงานวิจัยที่ผ่านมามีการนำฟอสเฟตจากน้ำเสียตกผลึกให้กลายเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ที่สามารถนำไปใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนอื่นๆ เพิ่มเติม

ช้างถือว่าเป็นสัตว์ที่มีประวัติศาสตร์กับประเทศไทยมายาวนาน โดยช้างจัดเป็นประเภทเลี้ยงลูกด้วยน้ำนม มีลักษณะที่รักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ โดยจะใช้พลังงานความร้อนที่เกิดจากเมทาโปลิซึมภายในร่างกาย (endothermic) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม โดยส่วนใหญ่ช้างจะกินพืชเป็นอาหารและใช้เวลากินมากถึง 16 ชั่วโมง จึงทำให้การขับถ่ายของเสียนั้นมีปริมาณมาก การขับถ่ายในรูปปัสสาวะของช้างนั้นจะมีการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นยูเรีย (Ureal) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อร่างกายสามารถอยู่ในร่างกายได้นานๆ [3]

และยังมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ถ้ามีมากเกินไปก็จะทำให้พวกสาหร่ายสีเขียวเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเมื่อสาหร่ายตายก็จะไปเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทำให้มีความสกปรกเน่าเสีย [4] และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกมากมาย อย่างไรก็ตามการรวบรวมน้ำเสียปัสสาวะของช้างเป็นเรื่องที่มีความท้าทายที่จะต้องนำไปพิจารณาต่อไป อย่างไรก็ดีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดการปนเปื้อนน้ำเสียที่มีมลสารสูงนี้ลงสู่น้ำใต้ดินได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ยังคงต้องรีบดำเนินการในอนาคตอันใกล้นี้

ด้วยวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่หลากหลายวิธีนั้น จึงมีความจำเป็นเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้หลายลักษณะ ส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีนี้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมัน และน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนด้วยสีย้อม เป็นต้น [5] แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับน้ำเสียประเภทอื่นๆ ได้ ทั้งนี้น้ำเสียก็ยังจะต้องผ่านการบำบัดก่อนจะนำสู่ลงแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ การตกตะกอนทางไฟฟ้ามีหลักการเบื้องต้น คือให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า โดยมีการจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายไฟไปยังขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดไอออน ซึ่งไอออนจะทำลายเสถียรภาพอนุภาคต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ส่วนปฏิกิริยารีดอกซ์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำให้ไอออนหลุดออกมา และเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดซึ่งทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น โดยที่แก๊สไฮโดรเจนนั้นจะนำพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและทำให้กำจัดออกได้ง่าย [6] จากงานวิจัยที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาของการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการการตกตะกอนทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ โดยนิยมใช้ขั้วอิเล็คโทรดเป็นขั้วเหล็กและอะลูมิเนียมเนื่องจากหาง่าย ราคาถูกและมีประสิทธิภาพดีในการบำบัด โดยขั้วเหล็กจะเกิดการสร้างตัวเป็นโครงข่ายคล้ายกับโพลิเมอร์ไรซ์ในรูปต่าง ๆ ซึ่งมีสมบัติในการจับเกาะสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดี รวมถึงเกิดการเกาะรวมตัวเป็นอนุภาคกลุ่มใหญ่และแยกออกจากได้ง่าย ส่วนขั้วอะลูมิเนียม จะเกิดโพลิเมอไรเซชัน และเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรัสที่มีประจุหลากหลาย ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับดี แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่น้ำเสียด้วย โดยมีการศึกษาการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการย้อมคราม ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าให้ประสิทธิภาพซีโอดีถึง 76.75 [7] และยังศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในการบำบัดสีย้อมที่ละลายน้ำและสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ โดยเปรียบเทียบการใช้ขั้วอิเล็คโทรดที่เป็นขั้วเหล็กและขั้วอะลูมิเนียม พบว่า การใช้ขั้วอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพบำบัดสีมากกว่าขั้วเหล็ก ร้อยละ 97.44 – 99.84 [8] และจากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมยังพบว่า ผลึกที่ตกตะกอนจากการบำบัดโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เป็น struvite ได้ ซึ่งการศึกษาการควบคุมธาตุอาหาร เป็นการศึกษานี้มุ่งเน้นการแยกธาตุอาหารจากปัสสาวะของมนุษย์

(Urine) จากน้ำเสียชุมชนโดยโพแทสเซียมเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของปัสสาวะมนุษย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการตกตะกอนของ K-struvite (เป็นเกลือที่ละลายน้ำในตระกูลของ struvite) เพื่อควบคุมและแยกธาตุอาหาร โดยการทดลองพบว่า มีปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยา ที่ pH 10 และมีประสิทธิภาพการแยกโพแทสเซียมเพิ่มสูงสุด 87% โดยใช้ปริมาณ Mg และ P ที่มากกว่าร้อยละ 100 ทั้งน้ำตัวอย่างและน้ำสังเคราะห์ [9] และยังมีการศึกษาด้วยวิธีการตกผลึกทางไฟฟ้าเคมีแบบง่าย โดยเป็นการดึงฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมออกมาให้อยู่ในรูปของ K-struvite ใช้ความหนาแน่นกระแสสูงสุด 3.5 mA/cm^2 แต่โดยรวมแล้วงานศึกษานี้ก็ให้วิธีที่ประหยัดต้นทุนในการดึงคืนฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากปัสสาวะ ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาของเศรษฐกิจหมุนเวียน สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไฟฟ้าเคมี [10]

ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ดีที่สุดโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า และยังหาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยจะช่วยลดมลพิษทางน้ำที่ปนเปื้อนจากการเลี้ยงสัตว์และสามารถนำไปใช้ในการลดภาระของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยทำการบำบัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำก่อนในขั้นต้น รวมถึงเป็นวิธีการบำบัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดปัสสาวะของช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสจากปัสสาวะของช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสในปัสสาวะช้างกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

1.3 ขอบเขต

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริง โดยเป็นน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างจากปางช้าง ได้แก่ วังช้างอยุธยา แลเพนียด อำเภอเมืองพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

1.3.2 การทดลองนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยเป็นการทดลองการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีมีขนาดชุดทดลองขนาด 1.5 ลิตร โดยขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้เป็นแผ่นเหล็กและแผ่นอะลูมิเนียมที่มีขนาด 9x6.5 เซนติเมตร

1.3.3 ในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะทำการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 15 และ 20 โวลต์ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 15 30 45 60 และ 90 นาที

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในระหว่างการเดินระบบ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีโอดี ของแข็งละลายน้ำ แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสเฟต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสจากปัสสาวะของช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้า

1.4.2 ทราบสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดปัสสาวะของช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้า

1.4.3 ทราบศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสในปัสสาวะช้างกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

1.4.4 ลดมลสารที่อยู่ในน้ำจำพวกฟอสเฟตป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น

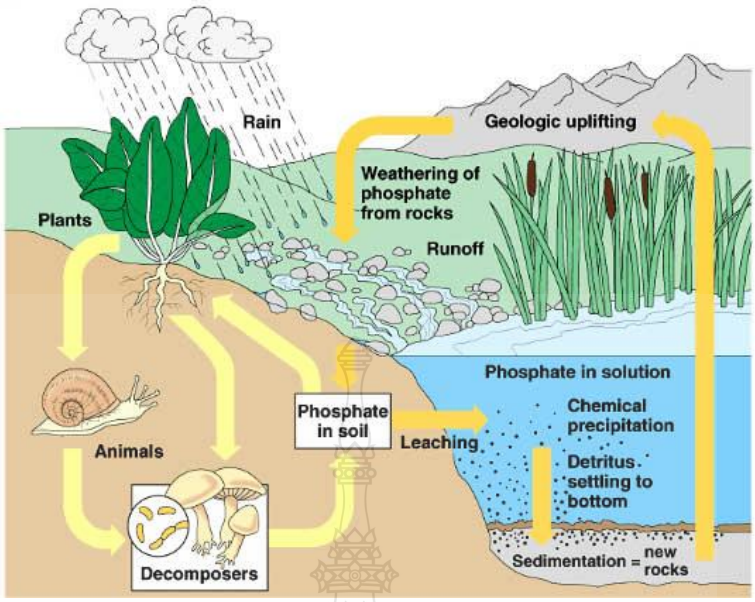
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอสฟอรัส (phosphorus)

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของฟอสเฟต ซึ่งฟอสเฟตเหล่านี้อาจจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือในรูปของซากพืชซากสัตว์ ฟอสเฟตจะถูกพืชนำไปใช้ได้ดีที่สุด จึงทำให้พืชน้ำโดยเฉพาะแพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เป็นการเพิ่มความสมบูรณ์แก่แหล่งน้ำ แต่ถ้าแพลงก์ตอนพืชมีปริมาณมากเกินไปก็อาจทำให้สภาวะเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ ที่เรียกกันว่า ยูโทรฟิเคชั่น จะเป็นลักษณะของน้ำที่เปลี่ยนสีตามแพลงก์ตอนที่อยู่ในน้ำ มีสีเขียวและสีแดง แต่ถ้าพบว่าน้ำมีสีเขียวก็แสดงว่าแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณฟอสฟอรัสมาก โดยสามารถเจอฟอสฟอรัสได้ในลักษณะของสารแขวนลอย และสารละลาย แบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ (1) ออโธฟอสเฟต เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ดี (2) โพลีฟอสเฟต พบมากในน้ำเสียที่มาจากการซักล้าง เช่น ผงซักฟอก (3) อินทรีย์ฟอสเฟต จะได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทั้งในพืช และในสัตว์

2.1.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus cycle)

ฟอสฟอรัส จัดเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการดำรงชีวิต ซึ่งที่มีอยู่ในธรรมชาตินั้นหาพบได้น้อยมาก ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงถูกหมุนเวียนอยู่ในสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต โดยการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทั้งในหิน ดิน น้ำ และสิ่งมีชีวิต จากระบบหนึ่งไปสู่ระบบหนึ่ง หมุนเวียนเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 2.1 พืชสามารถนำไปใช้และถ่ายทอดไปในระบบนิเวศตามห่วงโซ่อาหาร เมื่อตายลงก็จะถูกย่อยสลายด้วยพอสฟาไท



ที่มา: (Teerapan L, 2557)

รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus cycle)

2.2 กระบวนการบำบัดฟอสฟอรัส

การบำบัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียเป็นปัจจัยสำคัญในการไม่ให้ขาดออกซิเจนในน้ำผิวดิน ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการมีส่วนร่วมของการเกิดยูโทรฟิเคชั่นที่เพิ่มขึ้นในน้ำธรรมชาติ ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำที่มากมาย ส่วนการกำจัดฟอสเฟต ส่วนใหญ่จะบำบัดโดยการตะกอนด้วยสารเคมี ซึ่งจะมีราคาที่แพงและยังเพิ่มปริมาณของกากตะกอนได้ถึง 40% อีกด้วย โดยรูปแบบของฟอสฟอรัสที่พบในสารละลาย ได้แก่ ออร์โธฟอสเฟต จะบำบัดได้ดีโดยการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งไม่ต้องบำบัดอีก และโพลีฟอสเฟต จะย่อยสลายกลับไปอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต ซึ่งจะมีขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้า

การกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่เกี่ยวข้องกับการรวมตัวของฟอสเฟตในของแข็งทั้งหมดที่ละลายและกำจัดภายหลังจากของแข็ง ฟอสฟอรัสสามารถรวมอยู่ทั้งในของแข็งชีวภาพ เช่น จุลินทรีย์ หรือตะกอนเคมี ซึ่งฝนฟอสเฟตจะใช้ในการบำบัดอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยนอกเหนือจากการตกตะกอนและผสมของน้ำเสียและการตกตะกอนไอออนของโลหะ multivalent ที่ใช้กันมากที่สุดคือ แคลเซียม อะลูมิเนียม และเหล็ก ส่วนแคลเซียมมักจะเข้ามาในรูปแบบของกรดทำปฏิกิริยากับด่างธรรมชาติ ในการบำบัดน้ำเสียในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นหลักในการช่วยการกำจัดของแข็งแขวนลอย ส่วนอะลูมิเนียมกับเหล็กจะใช้กันอย่างแพร่หลายในการตกตะกอนฟอสเฟตและอะลูมิเนียมฟอสเฟต และตัวคลอไรด์เฟอริกซัลเฟต หรือเฟอรัสซัลเฟต จะใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดฟอสฟอรัส

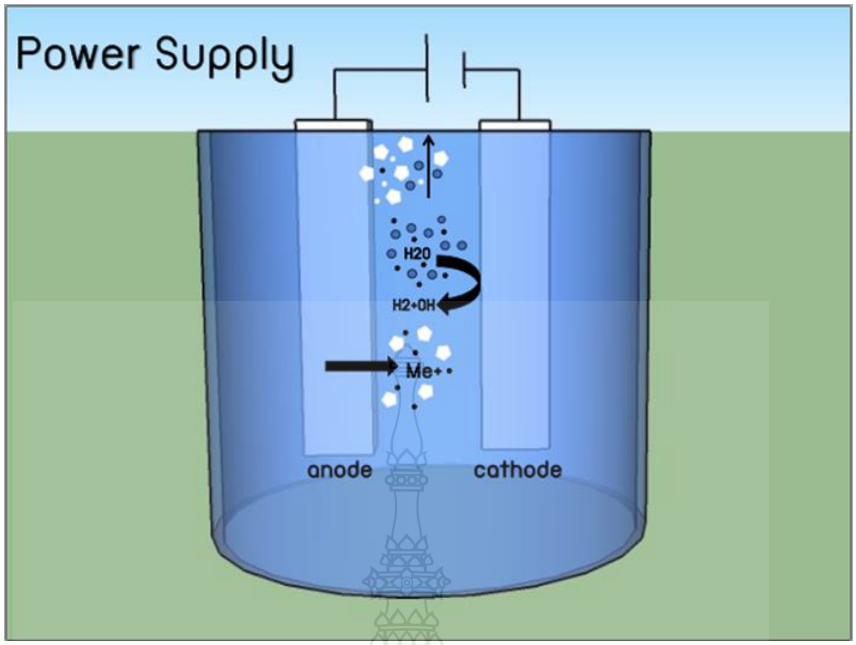
กระบวนการในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหลักๆ ที่นิยมใช้กัน คือ กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นแรก หรือการบำบัดเบื้องต้น เป็นการบำบัดเพื่อแยกประเภททราย กรวด และของแข็งขนาดใหญ่ ออกจากน้ำเสีย ส่วนกระบวนการบำบัดขั้นสุดท้ายโดยใช้วิธีทางชีวภาพ เป็นการบำบัดน้ำเสียที่จะใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส และกระบวนการบำบัดโดยใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับปฏิกิริยาทางเคมีหรือการรวมตะกอน เป็นการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีที่มีการใช้สารเคมีหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น เพื่อรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กในน้ำเสียให้มีขนาดโตพอที่จะตกตะกอนได้ง่าย โดยจะบำบัดร่วมกับวิธีทางกายภาพ

2.3 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation หรือ EC)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของเสียได้หลากหลายลักษณะ โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เพื่อกำจัดสารแขวนลอยหรือสารที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น น้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ เป็นต้น

2.3.1 หลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

โดยหลักการของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า คือการให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนดละลายออกมาเป็นไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนที่อยู่ในน้ำคือทำให้สารปนเปื้อนมีการหักล้างประจุจนกลายเป็นกลางทางไฟฟ้า และเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอน หรือการลอยตะกอน เซลล์ที่ใช้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบง่ายที่ประกอบด้วยขั้วแอโนด และขั้วแคโทด (รูปที่ 2.2) ซึ่งขั้วทั้งสองอาจจะใช้ชนิดเดียวกันหรือต่างกัน โดยที่นิยมกันมากจะเลือกใช้ได้ทั้งที่เป็นอะลูมิเนียม (Al) หรือเหล็ก (Fe) ส่วนกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้นจะเริ่มจากเกิดออกซิเดชั่นที่ขั้วแอโนด (ทำให้ไอออนขอโลหะชนิดนั้นๆ หลุดออกมา) และเกิดรีดักชั่นที่ขั้วแคโทด (ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน) โดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคที่อยู่ในน้ำนั้นจะจับตัวรวมกันกับไอออนหลุดออกมาจากขั้วแอโนด ทำให้ประจุมีสภาพเป็นกลางจึงสามารถเกาะตัวรวมกันได้ง่ายขึ้น จึงกลายเป็นตะกอนและแยกออกได้อย่างง่าย โดยที่อนุภาคที่รวมตัวกันใหญ่ขึ้นจะถูกกำจัดออก โดยการตกตะกอนในระหว่างกระบวนการจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วแคโทด ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นจะพาตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำและทำให้กำจัดตะกอนได้ง่ายขึ้น



ที่มา: (https://www.imperial.ac.uk)

รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

2.3.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

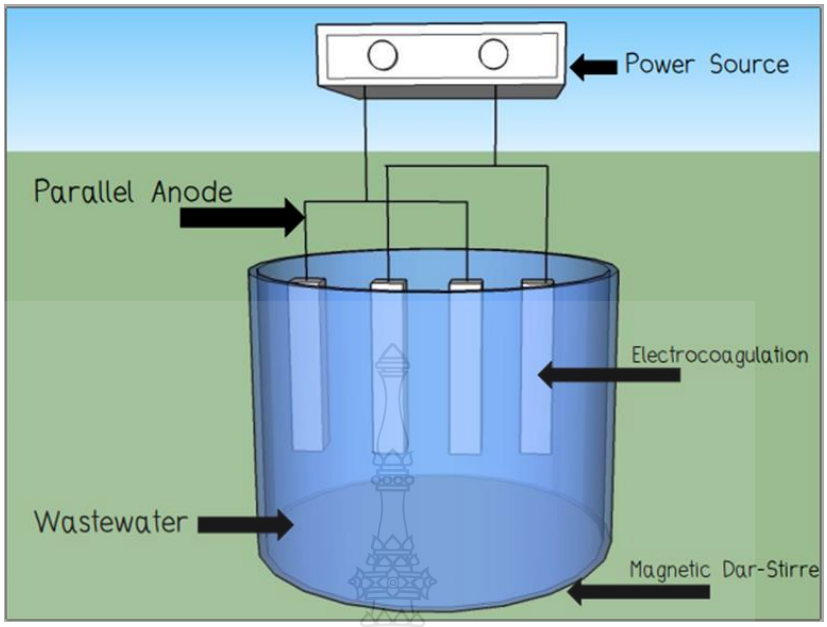
การเลือกใช้กระบวนการในการบำบัดน้ำเสีย ต้องขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย และปัจจัยอื่นๆ ซึ่งแต่ละกระบวนการก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่ให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีข้อดีและข้อเสีย ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ข้อดี	ข้อเสีย
• ทำให้เกิดประสิทธิภาพของการแยกสารปนเปื้อนได้มากกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี	• ขั้วแอโนดจะถูกกัดกร่อนและเกิดการละลายของขั้วไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และอาจจะทำให้เกิดคราบที่ผิวขั้วไฟฟ้า จึงมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลง
• ทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี	• ถ้าไอออนของอะลูมิเนียมและเหล็ก ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความเข้มข้นสูงมาก ต้องมีการกำจัดในส่วนนี้ก่อนจะปล่อยน้ำทิ้ง
• ไม่จำเป็นต้องคุม ค่ากรด-ด่าง	
• ใช้สารเคมีน้อย และใช้ต้นทุนต่ำ	
• เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ซับซ้อน	

2.3.3 การทำงานของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การทำงานของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีอยู่สองลักษณะ คือ ขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด ซึ่งขั้วทั้งสองจะถูกนำมาเพื่อใช้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าแขวนลอยอยู่ในคอลลอยด์ ที่มีสภาวะทางไฟฟ้าเป็นกลาง โดยจ่ายกระแสให้กับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทั้งสอง เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดไอออนของอะลูมิเนียมหรือไอออนของเหล็ก ด้านขั้วบวกจะถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาอาโนดิก เกิดอิออนของโลหะ ในขณะที่ด้านขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาคาโทดิก เกิดไฮดรอกไซด์อิออน อิออนที่ถูกปล่อยออกมาจะทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ามีประจุลดลงจนเป็นกลางและอนุภาคจะรวมตัวกัน ซึ่งการต่อขั้วไฟฟ้าจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของการตกตะกอนเป็นอย่างมาก โดยมีลักษณะการต่อมีอยู่ 2 แบบหลัก ได้แก่ แบบขั้วเดี่ยว และแบบขั้วคู่ ดังรูปที่ 2.3



ที่มา: (https://sites.google.com)

รูปที่ 2.3 แสดงระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าเบื้องต้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการรันของระบบ (การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า)

1) เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด จะทำให้ขั้วแอโนดมีไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) ละลายออกมาในน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนี้

$$Fe \; Fe^{2}+ 2e^{-} \qquad (2.1)$$

และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^{-}) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังนี้

$$2H_2O + 2e^{-} \; 2OH^{-} + H_2(g) \qquad (2.2)$$

เนื่องจากที่ขั้วแคโทดเกิด OH^{-} ขึ้น ทำให้น้ำเสียค่อย ๆ มีค่าความเป็นด่างเพิ่มมากขึ้น หรือ OH^{-} บางส่วนรวมตัวกับ Fe^{2+} ในน้ำเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ และกลายเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ ดังนี้

$$Fe2+ + 2OH- \; Fe(OH)2(s) \qquad (2.3)$$

โดยเขียนปฏิกิริยารวม (สมการ 2-1) – (สมการ 2-3) ได้เป็น

$$Fe + 2H_2O \; Fe(OH)_2(s) + H_2(s) \qquad (2.4)$$

ถ้าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว มี O_2 อยู่ด้วย Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์ได้เป็น $Fe(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำเขียนเป็นปฏิกิริยาได้เป็น

$$4Fe^{2+} + 10H_2O + O_2(g)\ 4Fe(OH)_3(s) + 8H^+ \quad (2.5)$$

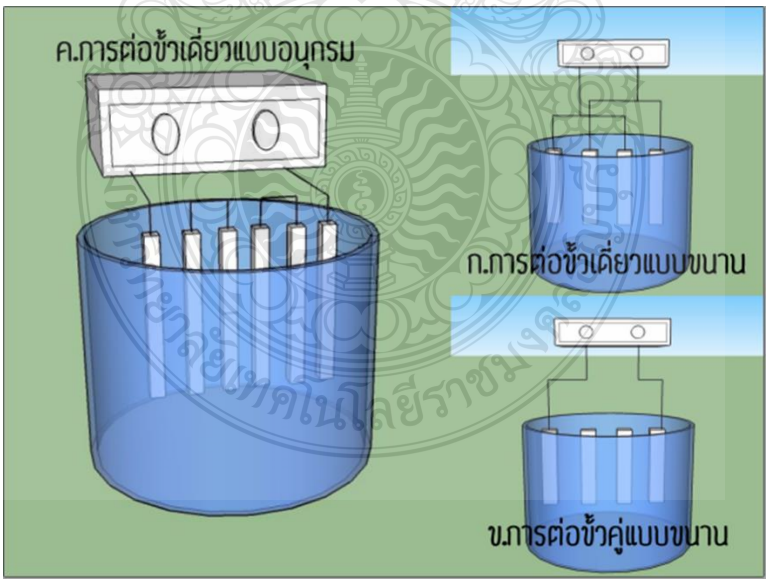
และ H^+ ที่เกิด ก็จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น H_2 ที่ขั้วแคโทด

$$8H^+ + 8e^-\ 4H_2(g) \quad (2.6)$$

ดังนั้น ปฏิกิริยารวมที่ประกอบด้วยปฏิกิริยา (2.5) – (2.6) เขียนได้ดังนี้

$$4Fe^{2+} + 10H_2O + O_2(g) + 8e^-\ 4Fe(OH)_3(s) + 4H_2(g) \quad (2.7)$$

ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า จะเกิด $Fe(OH)_2$ เป็นตะกอนปะปนกับ $Fe(OH)_3$ ซึ่งแยกออกมาจากน้ำเสียได้นั้น โดยที่ตะกอนพวกนี้จะอยู่ปะปนกับไอออนของเหล็ก และสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กกับไอออนไฮดรอกไซด์ในรูปต่าง ๆ ได้แก่ Fe^{3+}, $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_3$ และ $Fe(OH)_4^-$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ เช่น ค่า pH อยู่ระหว่าง 3-7 ไอออนของเหล็กไฮดรอกไซด์จะเกิดการสร้างตัวเป็นโครงข่ายคล้ายกับโพลิเมอร์ไรซ์ของ $Fe^2(OH)_2^{4+}$ และ $Fe^2(OH)_4^{2+}$ เป็นต้น โดยทั้งโครงข่ายแบบโพลิเมอร์ และไอออนของเหล็กในรูปต่าง ๆ มีสมบัติในการดูดซับ และจับเกาะสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดี



ที่มา: ดร.สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ (2551)

รูปที่ 2.4 แสดงเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

2) เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

ในกรณีที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จะมีการละลายไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) เช่นเดียวกับการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า (สมการ 2-8)

$$Al^{3+} + 3e^{-} \quad (2.8)$$

และปฏิกิริยาที่แคโทดจะให้ OH^- และแก๊ส H_2 ดังนี้

$$3H_2O + 3e^{-} 3OH^{-} + 3/2H_2(g) \quad (2.9)$$

เมื่อ Al^{3+} ละลายออกมาในน้ำ บางส่วนรวมตัวกับ OH^- เป็นโมโนเมอร์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปะปนในน้ำเช่น $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_3$ และ $Al(OH)^{4-}$ โดยขึ้นกับค่า pH ของตัวกลาง ในตัวกลางที่มีค่า pH เป็นด่างจะพบโมโนเมอร์ที่มีประจุบวกมาก โมโนเมอร์ดังกล่าวสามารถเกิดโพลิเมอไรเซชันเป็น $Al2(OH)24^{+}$, $Al6(OH)153^{+}$, $Al7(OH)174^{+}$, $Al8(OH)204^{+}$, $Al13O4(OH)247^{+}$ และ $Al13(OH)345^{+}$ ได้บางส่วนจะอยู่ในรูปโมโนเมอร์ และในที่สุดจะกลายเป็น $Al(OH)_3$ ที่ไม่ละลายน้ำ (2.10)

$$Al + 3H_2O\ Al(OH)_3(s) + 3/2H_2(g) \quad (2.10)$$

ขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้านั้นที่ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะค่อย ๆ ละลายไป ส่วน OH^- ที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าเป็นด่างจะกัดเซาะที่ขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาให้แก๊ส H_2 ขึ้น (2.11)

$$Al + 3H_2O + OH^{-}\ Al(OH)_4^{-} + 3/2H_2(g) \quad (2.11)$$

ส่วนการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า OH^- ที่เกิดขึ้นจะไม่กัดเซาะที่ขั้วไฟฟ้าและจะเกิดเป็น $Fe(OH)_4^-$ เหมือนกับที่เกิดในขั้วอะลูมิเนียม ดังนั้น การใช้ขั้วเหล็กจะทนทานมากกว่าการใช้ขั้วอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตามการใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าก็มีข้อดี ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ต้องพิจารณาถึงข้อดี-ข้อด้อยของวัสดุ รวมทั้งชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำ และคุณลักษณะของน้ำเสียนั้นด้วย

2.4 ปัสสาวะ

ปัสสาวะ เรียกทั่วไปว่า “ฉี่” เป็นของเสียที่ขับถ่ายออกมาในรูปของเหลว โดยผ่านไตซึ่งจะกรองของเสียออกจากเลือดและขับถ่ายอกทางท่อปัสสาวะ ถ้าไตเกิดไม่ทำงานหรือผิดปกติก็จะทำให้ของเสียนั้นค้างอยู่ในเลือดและทำให้เกิดอาการผิดปกติต่างๆ

2.4.1 ลักษณะของปัสสาวะ

ปัสสาวะ มีสีที่แตกต่างกันตั้งแต่สีใสจนสีอัมพันเข้ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการดื่มน้ำหรือระดับความอิ่มน้ำ (hydration) ของร่างกายและองค์ประกอบอื่นๆ ถ้าเราดื่มน้ำน้อยปัสสาวะของเราจะเป็นสีเข้มถึงสีอัมพันเข้ม (ก) แต่ถ้าเราดื่มน้ำมาก ปัสสาวะเราก็จะมีสีอ่อนลงถึงกับไม่มีสีเลย (ข) ทั่วไปจะไม่เป็นพิษ ถ้าปัสสาวะมีการผ่านกระบวนการการกรองที่เหมาะสม ก็จะสามารถกรองและสกัดน้ำออกเป็นน้ำดื่มได้ เช่น น้ำดื่มของนักบินอวกาศ เป็นต้น

(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 สีของปัสสาวะ

2.4.2 การตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะ

- การตรวจคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical examination) ได้แก่ สี ความขุ่น และความถ่วงจำเพาะ
- การตรวจคุณสมบัติทางเคมี (Chemical examination) ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าโปรตีน ค่าน้ำตาล ค่าคีโตน เม็ดเลือด ลิรูบิน ยูโรบิลิโนเจน เลือด ไนไตรท์ และเม็ดเลือดขาว

2.4.3 ปัสสาวะของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม

โดยทั่วไปสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมนั้นจะมีการรักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่แม้สภาพอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยการใช้พลังงานความร้อนที่เกิดจากเมทาโบลิซึมภายในร่างกาย (endothermic) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของสัตว์เลือดอุ่น เช่น สุนัข ช้าง ลิง เสือ เป็นต้น ซึ่งการขับถ่ายในรูปปัสสาวะของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม จะมีการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นยูเรีย (Ureal) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อร่างกายสามารถอยู่ในร่างกายได้นานๆ สำหรับก๊าซแอมโมเนียที่เกิดจากปัสสาวะจะเป็นก๊าซไม่มีสี ส่วนประกอบหลักจะเป็นน้ำกับยูเรีย และสารอื่นๆ เช่น โซเดียม คลอไรด์ ฟอสฟอรัส เป็นต้น

2.5 ช้าง (Elephant)

เป็นสัตว์ชนิดเลี้ยงลูกด้วยนม มีอยู่ 3 สปีชีส์ คือ ช้างแอฟริกา , ช้างป่าแอฟริกาและช้างเอเชีย โดยสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จะมีลักษณะที่แตกต่างจากสัตว์ชนิดอื่น ๆ อย่างชัดเจน และมีการแบ่งเพศที่เห็นได้อย่างชัดเจน

ช้าง มีลักษณะเด่น คือ งวงยาว หูกางขนาดใหญ่ ขาใหญ่ และผิวหนังที่หนาแต่มีความละเอียดอ่อน มีงวงที่ใช้ในการหายใจ หยิบอาหารและเอาน้ำเข้าปาก มีงาที่ใช้เป็นอาวุธและใช้สำหรับเคลื่อนย้อยของ มีหูกางขนาดใหญ่ช่วยในการคงที่อุณหภูมิของร่างกาย ช้างเป็นสัตว์ที่กินพืช ช้างจะไม่มีต่อมน้ำตาหลักและไม่มีท่อระบายน้ำตา จะไม่มีถุงน้ำดี มีแต่ท่อลำเลียงน้ำดี ช้างจะไม่มีช่องระหว่างปอดกับกระดูกซี่โครง มีลูกอัณฑะ แต่จะอยู่ในช่องท้อง มีเต้านม 1 คู่ อยู่ที่อกและระหว่างขาคู่หน้า และมีต่อมเหงื่ออยู่ที่บริเวณโคนเล็บ

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของช้าง

- ช้างจะดำรงชีวิตที่เหมือนกัน โดยจะอาศัยอยู่ด้วยกันเป็นฝูง โดยที่หนึ่งฝูงจะมีช้างประมาณ 5 - 10 เชือก โดยทั่วไปจะใช้แรงงานช้างเฉพาะตอนเช้าตั้งแต่ 06.00 – 12.00 น. แต่ช่วงบ่ายต้องให้ช้างได้หยุดทำงาน เนื่องจากช้างเป็นสัตว์ที่มีโรคภัยเบียดเบียนได้ง่าย

- นิสัยของช้าง ถ้าได้นำมาฝึกเพื่อทำงานนั้น จะมีนิสัยที่ฉลาด และสุภาพ จะยกเว้นช่วงที่ช้างตกมัน ซึ่งจะเป็นแค่ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยตอนตกมันนั้นช้างจะมีนิสัยที่ดุร้าย และยังสามารถทำร้ายพวกกันเองได้อีกด้วย

- การกินการนอน ช้างจะใช้เวลาในการนอนแค่ 3-4 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งอาการง่วงนอนและนอนกรนจะคล้ายกับมนุษย์ โดยจะใช้เวลาที่เหลือในการกินอาหารแทน ช้างเชือกหนึ่งจะกินอาหาร และหญ้าคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 250 กิโลกรัมใน 1 วัน

2.5.2 ลักษณะทางกายภาพของช้าง

- งวง มีลักษณะร่วมกับจมูกและริมฝีปากบน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญและมีประโยชน์มากที่สุด สามารถยกของที่มีน้ำหนักได้มากถึง 250 กิโลกรัมมีหน้าที่หายใจและใช้ดมกลิ่น ใช้หยิบจับสิ่งของต่าง ๆ รวมทั้งน้ำและอาหาร

- งา เป็นฟันตัดคู่ที่ 2 จะมีความโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะใช้ในการขุดหาน้ำและยังใช้เป็นอาวุธอีกด้วย

- ฟัน ช้างมีฟันทั้งหมด 28 ซี่ และจะมีการเปลี่ยนแปลงหมุนเวียนฟันเกิดขึ้นตลอดชีวิต

- ผิวหนัง มีความหนาประมาณ 2.5-3 เซนติเมตร มีสีของผิวหนังเป็นสีเทา

- ขาและเท้า ขาจะมีรูปร่างใหญ่คล้ายเสาและฝีเท้าที่ใหญ่ และมีเท้ารูปร่างทรงกลม มีใต้กระดูกของเท้าที่ทำหน้าที่กันกระแทก

- หู มีความสำคัญต่อการรักษาสมดุลอุณหภูมิร่างกาย ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่ มีหนังเป็นชั้นที่บางมาก

2.5.3 พฤติกรรมของช้าง

- พฤติกรรมทางสังคม การใช้ชีวิตในสังคมของช้างเพศผู้และเพศเมียมีความแตกต่างกันมาก

- สติปัญญา สมองของช้างมีมวลมากกว่า 5 กิโลกรัม คิดเป็นสมองของสัตว์บกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ลักษณะพฤติกรรมของช้างที่สอดคล้องกับสติปัญญาของมันนั้นมีอย่างกว้างขวาง รวมไปถึงการมีความเศร้าโศก การทำเสียงดนตรี ศิลปะ การเห็นแก่ประโยชน์ส่วนรวม เป็นต้น

- ประสารทสัมผัส ช้างมีงวงที่มีเส้นประสาทดี และมีประสาทการได้ยินและดมกลิ่นที่ดีเยี่ยม หน่วยรับความรู้สึกการได้ยินนั้นไม่เพียงแต่จะมีอยู่ในหูเท่านั้น แต่ยังมีอยู่ในงวงซึ่งสามารถสัมผัสถึงแรงสั่นสะเทือนได้

- อาหาร ช้างเป็นสัตว์กินพืชเป็นอาหาร และใช้เวลากินมากถึง 16 ชั่วโมงต่อวัน อาหารของช้างนั้นมีความหลากหลาย ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแหล่งที่อยู่และพื้นที่ ส่วนใหญ่แล้วช้างจะอาหารเป็นพวกใบไม้ เปลือกไม้ และผลไม้ของต้นไม้ เป็นต้น ช้างที่ตัวเต็มวัยจะบริโภค 140-270 กิโลกรัมต่อวัน

2.6 สตรูไวท์ (Struvite)

2.6.1 การเกิดสตรูไวท์

สตรูไวท์ (แมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต) เป็นแร่ฟอสเฟตที่มีสูตรทางเคมี $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$ โดยสตรูไวท์นั้นตกผลึกในระบบ orthorhombic ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวกับสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอ่อนหรืออยู่ในรูปแบบไมกา สตรูไวท์เป็นแร่ธาตุที่มีความแข็งอ่อนตามสเกลของโมลอยู่ที่ 1.5 -2 และมีความถ่วงจำเพาะต่ำอยู่ที่ 1.7 สามารถละลายน้ำได้บางสภาวะในสภาพที่เป็นกลางและด่าง แต่พร้อมที่จะละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรด สตรูไวท์ นั้นจะมีอัตราสัดส่วนของแมกนีเซียม แอมโมเนียและฟอสเฟตเป็น 1:1:1

เนื่องจากสตรูไวท์ มีองค์ประกอบที่ประกอบไปด้วยแมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต จึงนำไปทำเป็นปุ๋ยโดยสามารถใช้เป็นแหล่งอาหารให้แก่พืชได้ ประกอบไปด้วย ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) ไนโตรเจน (Nitrogen, N) และธาตุอาหารรองได้แก่ แมกนีเซียม(Magnesium, Mg) ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ช่วยในการสังเคราะห์แสง เป็นต้น

การผลิตตัวผลึก MAP จากน้ำเสียเป็นการควบคุมแมกนีเซียม แอมโมนีย และฟอสเฟต ให้เกิดการรวมตัวกันแล้วตกผลึกและตกตะกอนลงมาดังสมการ (2.12) ซึ่งควบคุมความค่าพีเอช และอัตราส่วนของโมลต่างๆ ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

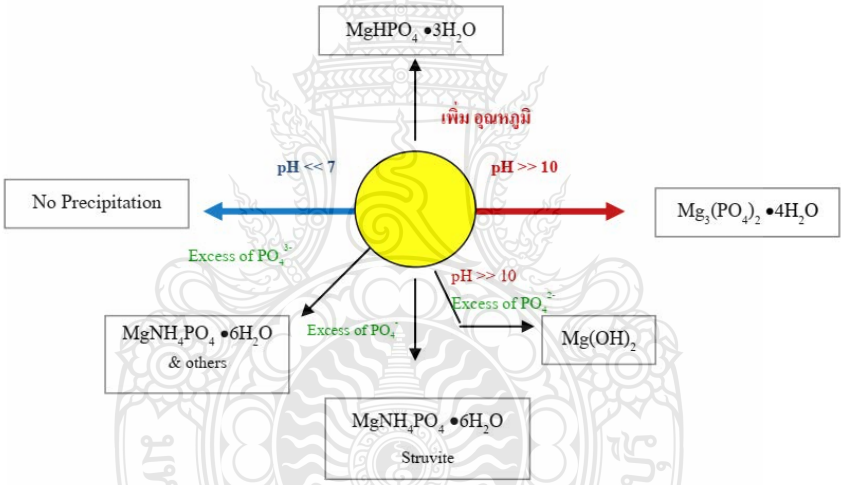
$$Mg^{2+} + NH^{4+} + PO_4{}^{3+}\ 6H_20 \longrightarrow MgNH_4PO_46H_20 + H^- \qquad (2.12)$$

2.6.2 ปัจจัยของการเกิดผลึกแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต

การกำจัดหรือแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย โดยการตกตะกอนผลึก MAP เป็นการใช้กระบวนการตกตะกอนหรือตกผลึกทางเคมี (Precipitation / Crystallization process) มีจุดมุ่งหมายเพื่อกำจัดฟอสเฟต ($PO_4{}^{3-}$) และแอมโมเนียม ($NH_4{}^+$) ออกจากน้ำเสีย โดยใช้แมกนีเซียม (Mg^{2+}) เป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกจากน้ำปัจจัยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพีเอชของน้ำอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมและสิ่งเจือปน

1) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของน้ำ มีผลต่อการละลายน้ำ และการตกผลึกของ แมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต ดังนั้น ในน้ำเสียที่มีสารจำพวกนี้เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอาจจะทำให้เกิดสารประกอบได้ในหลายรูปแบบ นอกจากผลึก MAP ($MgNH_4PO_46H_2O$) อาทิเช่น Mg^{2+}, $MgOH^+$,$MgH_2PO_4^+$, $MgHPO_4$, H_3PO_4, $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}, $MgPO_4^-$, NH_3 (aqueous) รูปที่ 2.6 เป็นแสดงช่วงค่าพีเอชมีผลต่อการเกิดสารประกอบต่างๆ จะสามารถเห็นได้ว่า เมื่อพบค่าพีเอชของน้ำที่มีค่าน้อยกว่า 7 สารประกอบ แมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต จะสามารถละลายน้ำได้ดี จึงไม่จับตัวกันเป็นผลึกสตรูไวท์ แต่เมื่อพีเอชมีค่าสูงมากว่า 10 ขึ้นไป จะเกิดสารประกอบในรูปอื่น เช่น $Mg_3(PO_4)_2$•$4H_2O$ หรือ $Mg(OH)_2$ และเมื่อพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง ประมาณ 7 ถึง 9 จะเป็นช่วงที่เหมาะสมของการเกิดตะกอนผลึก MAP ดังนั้น ในการสร้างตะกอนผลึกสตรูไวท์จึงต้องการการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมก่อน เพื่อที่จะสามารถทำให้เกิดตะกอนผลึกสตรูไวท์ ให้เป็นสัดส่วนมากที่สุด



ที่มา: Choi, 2007

รูปที่ 2.6 การเกิดผลึกในรูปแบบต่างในสารละลายที่มีแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ

กลไกการเกิดผลึก MAP ต้องการอัตราส่วนโมลเหมาะสม ระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต คือ อัตราส่วน [Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}] เท่ากับ 1:1:1 ดังนั้น ปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยสำคัญหรือข้อจำกัดในการเกิดการควบคุมการเกิดผลึก MAP

2) สิ่งเจือปนในน้ำเสีย

ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนผลึก MAP ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย ปริมาณไอออนต่างๆ ในน้ำ ซึ่งปัจจัยทุกอย่างนั้นจะมีผลต่อการตกตะกอนของผลึกชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลกฤษณ์ จิตร์ และคณะฯ [11] ได้ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมสีแดงประเภทสีย้อมแอสิด และหาประสิทธิภาพการบำบัด โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์แบบกะขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด 3.5 X 15.0 ตารางเซนติเมตร พื้นที่จมน้ำ 105 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าพี่เอชเริ่มต้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรด และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ผลการศึกษาพบว่า ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 4 - 8 เมื่อเดินระบบบำบัดค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น ในขณะด่าพีเอชเริ่มต้นที่ 9 ค่าพีเอชลดลงเล็กน้อย และเข้าสู่สภาพสมดุลในช่วงพี่เอช 7 -9 ภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียคือที่ค่าพีเอชเริ่มตันที่ 7 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วไฟฟ้ 80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลาในการบำบัด 40 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีร้อยละ 95 และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีร้อยละ 79 ทั้งนี้ไม่สามารถวัดปริมาณไอออนของเฟอร์ริกหรือเฟอร์รัสได้

วรรษวรรณ เที่ยงวรรณกานต์ [12] ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมีที่ไม่ผ่านและหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าซึ่งจะปรับเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม และแสตนเลส จากผลการทดลองพบว่า การใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างเดียวสามารถกำจัดสีได้ดีร้อยละ 96 ขึ้นไป จึงไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 55

Philip Isaac Omwene et al. [13] ได้ศึกษาผลกระทบของ pH = 4.0-7.0 ความหนาแน่นกระแส (10-40 A/m^3) ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้นที่ 5.01-52.13 มก./ลิตร และเวลาการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (10-100 นาที) ในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียในครัวเรือนโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยใช้ไฮบริด (อะลูมิเนียม – เหล็ก) ซึ่งการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ได้ประสิทธิภาพเป็น 99.99% ในสภาวะที่เหมาะสม (pH = 4, j = 20 A/m2 และ EC เวลา = 80 นาที) และสรุปได้ว่า การใช้ขั้วแบบไฮบริด มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสที่เท่ากับใช้ขั้วอะลูมิเนียมหรือขั้วเหล็กเพียงอย่างเดียว

สุรางคณา อินชู [8] ได้ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของ EC และ CC ในการบำบัดสีย้อมของสีย้อมที่ละลายน้ำ และสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ และเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขั้วเหล็ก และขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า ระบบ EC มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ทั้งสีย้อมละลายไม่ละลายน้ำและละลายน้ำ และระบบ EC ที่ใช้ขั้วอะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 97.44 - 99.84 ส่วนใช่ขั้วเหล็ก มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 87.40 - 91.90 ซึ่งเห็นได้ว่าระบบ EC ที่ใช้ขั้วอะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมากกว่าที่ใช้ขั้วเหล็ก ส่วนการทดลองระบบ CC ที่ใช้ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กพบว่าระบบ CC มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมที่ละลายน้ำ และสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ อยู่ในช่วงร้อยละ 80.42 - 92.87 และร้อยละ 96.03 - 96.37

สันติ รักษาวงศ์ [14] ได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการกำจัดความกระด้างจากน้ำบาดาลด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียม และนำน้ำบาดาลของมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงซึ่งเป็นตัวแทนน้ำกระด้างจังหวัดราชบุรี เนื่องจากมีลักษณะการเกิดเหมือนกัน โดยมี pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และความกระด้างรวม ซึ่งคำนวณด้วยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ 7.29 + 0.02, 997.0 + 2.1, 495 + 4.5 mg L และ 6/5.0 : 3.8 mg L ตามลำดับ มาผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5 - 24 V โดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และเวลาการทำปฏิกิริยา พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 7.2 + 0.3 A ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 1 cm และเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าการนำไฟฟ้า และความกระด้างรวมได้ร้อยละ 79.2, 75.0 และ 95.1 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมของน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

sık Kabda¸slı et al. [9] เป็นการการประเมินการตกตะกอนของ K-Struvite ในปัสสาวะของมนุษย์ โดยประเมินจากธาตุอาหารที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำ จึงนำไปสู่การศึกษาการควบคุมธาตุอาหาร ซึ่งการศึกษานี้มุ่งเน้นการแยกธาตุอาหารจากปัสสาวะของมนุษย์ (Urine) จากน้ำเสียชุมชน โดยโพแทสเซียมเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของปัสสาวะมนุษย์ อย่างไรก็ตาม การศึกษาการกำจัดหรือการแยกโพแทสเซียมมีอยู่ค่อนข้างจำกัดและเป็นข้อมูลทางอ้อม เช่น การใช้ zeolites ในการกำจัดแอมโมเนีย สำหรับ K-struvite ($MgKPO_4$ $6H_2O$) เป็นเกลือที่ละลายน้ำในตระกูลของ struvite ซึ่งมีศักยภาพเป็นตัวกลางการแยกโพแทสเซียมและฟอสเฟตในปัสสาวะ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการตกตะกอนของ K-struvite เพื่อควบคุมและแยกธาตุอาหาร โดยทำการทดลองในตัวอย่างที่เตรียมและปัสสาวะสังเคราะห์ เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณสัมพันธ์ และอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการแยกโพแทสเซียม จาก

การศึกษาพบว่า ประสิทธิของกระบวนการและชนิดของแข็งที่ตกตะกอนร่วมกับ K-struvite มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเข้มข้นโพแทสเซียมเริ่มต้น, ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยา ที่ pH10 มีประสิทธิภาพการแยกโพแทสเซียมเพิ่มสูงสุด 87% โดยใช้ปริมาณ Mg และ P ที่มากกว่าร้อยละ 100 ทั้งน้ำตัวอย่างและน้ำสังเคราะห์ ในทางกลับกันที่ความเข้มข้นโพสแทสเซียมที่มากเกินไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการแยกของโพแทสเซียม อุณหภูมิส่งผลต่อการละลายของ K-struvite อย่างไม่มีนัยสำคัญในช่วงอุณหภูมิ 24-90 °C และการวิเคราะห์สถานะของแข็งยืนยันได้ว่า K-struvite ตกตะกอนร่วมกับ $Mg_3(PO_4)_2$, $MgNaPO_4{\cdot}7H_2O$ หรือ $MgHPO_4{\cdot}7H_2O$ ขึ้นอยู่กับ pH และปริมาณสารสัมพันธ์แทนที่จะเป็นสารประกอบบริสุทธิ์

Jinhua Shan et al. [10] เป็นการศึกษาการตกผลึกทางไฟฟ้าเคมีสำหรับการกู้คืนฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากปัสสาวะเป็น K-struvite กับแมกนีเซียมที่ขั้วบวก โดยวิธีการตกผลึกทางไฟฟ้าเคมีแบบง่ายถูกสร้างขึ้นเพื่อกู้คืนฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากปัสสาวะจำลองโดยใช้แมกนีเซียมที่ละลายเป็นแอโนด Mg_2^+ และ OH^- ถูกจ่ายที่แอโนดและแคโทด ตามลำดับ เพื่อสร้าง $MgKPO_4{\bullet}6H_2O$ ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ 35.4% ของโพแทสเซียมและฟอสฟอรัส 88.5% ถูกกู้คืนด้วยที่ความหนาแน่นกระแสสูงสุด 3.5 mA/cm^2 และ K/P 1:0.6 ส่วนที่นำกลับมาใช้ใหม่มีลักษณะเฉพาะเป็น K-struvite ที่มีรูปทรงแท่งเป็นหลักและมีสิ่งเจือปนบางส่วนเช่น $MgNaPO_4$ และ $Ca_3(PO_4)_2$. ซึ่งความหนาแน่นกระแสที่สูงขึ้นส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของส่วนนั้นลดลง เพื่อเพิ่มการตกผลึก และช่วยเพิ่มการฟื้นตัวของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม 1.6 และ 1.4 เท่า เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยรวมแล้วงานนี้ให้วิธีที่ประหยัดต้นทุนในการกู้คืนฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากปัสสาวะซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาของเศรษฐกิจหมุนเวียน สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไฟฟ้าเคมี

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงานในการบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิธีการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Merck, Germany

3.1.2 อุปกรณ์

1) เครื่อง EC (รุ่น Switching DC Power Supply Operation Manual V1.3 ยี่ห้อ Twintex , Voltage 30 V, Current 50 A)

2) แผ่นเหล็ก/แผ่นอะลูมิเนียม ขนาด 9x6.5 cm.

3) บีกเกอร์ขนาด 1,000 ml

4) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S

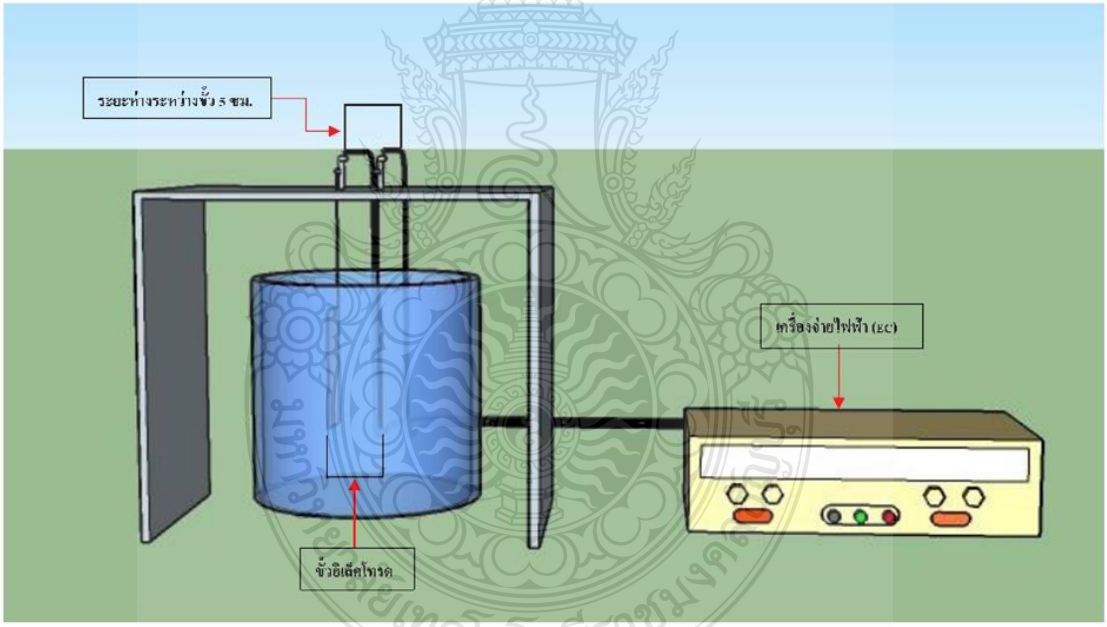
5) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA2102

6) กระดาษทราย

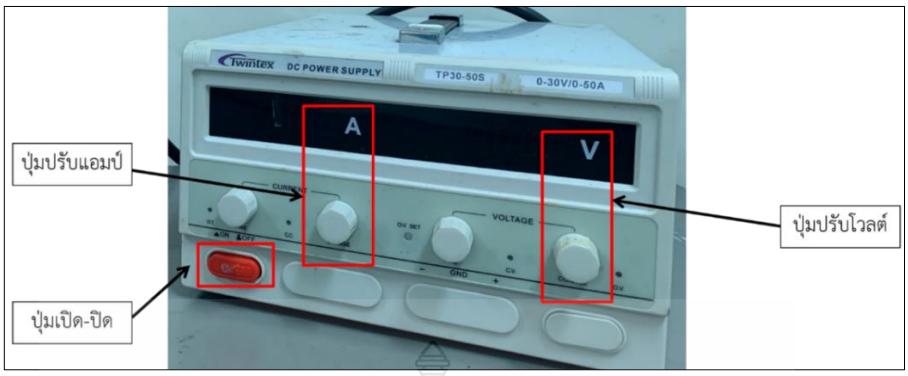
3.2 ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

3.2.1 การเตรียมชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

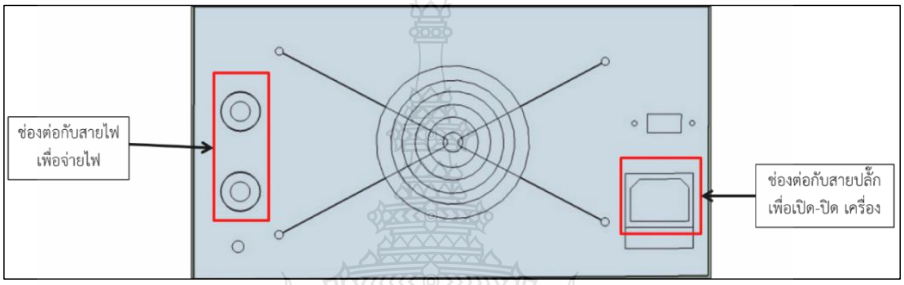
การศึกษาในครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยชุดการทดลองจะประกอบไปด้วยส่วนของถังปฏิกรณ์ที่ใช้โหลแก้วขนาด 2 L และทำการติดตั้งชุดจ่ายกระแสไฟและขั้วอิเล็คโทรดโดยทำจากอะคริลิคและทำการเจาะรูด้านบนเพื่อยึดชุดขั้วอิเล็คโทรดและทำการต่อกระแสไฟเข้ากับขั้วโดยใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแส (DC supply) ที่ด้านบนของโครงอะคริลิค ขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วย ขั้วที่ทำจากเหล็ก และอะลูมิเนียม ที่มีขนาดแผ่น 9x6.5 cm (ยาว × กว้าง) และมีความหนา 4 cm แผ่นโลหะจะถูกจุ่มลงไปในน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างที่มีปริมาตร 1.5 L โดยห่างจากก้นถังประมาณ 2-3 cm โดยแสดงรูปชุดการทดลองดังรูปที่ 3.1 และรูปเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC supply) ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า



ก. ด้านหน้าของเครื่อง

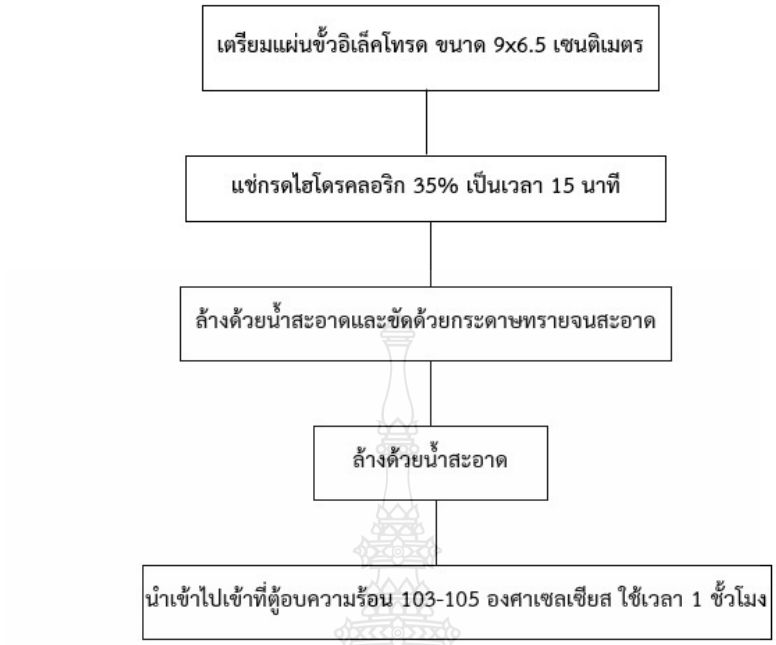


ข. ด้านหลังของเครื่อง

รูปที่ 3.2 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC supply)

3.2.2 การเตรียมแผ่นโลหะที่ใช้เป็นขั้วอิเล็คโทรด

การทดลองนี้จะใช้แผ่นโลหะเป็นขั้วอิเล็คโทรด โดยใช้ขั้วที่ทำจากแผ่นเหล็กและแผ่นอะลูมิเนียมที่มีขนาด 9x6.5 cm และมีความหนา 4 mm โดยมีขั้นตอนการเตรียมขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้ในการทดลอง (เตรียมเฉพาะชนิดขั้วเหล็ก) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นขั้วอิเล็คโทรดชนิดขั้วเหล็ก

3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

การศึกษานี้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดปัสสาวะช้างและศักยภาพการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยที่เก็บน้ำเสียจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียฉี่ช้างจะขึ้นกับอาหารทำให้การสังเคราะห์น้ำเสียจะมีช่วงในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่กว้างเกินไป รวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตในการขยายขนาดจึงได้เลือกทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการทดลองและในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำเสียในการกำจัดมลสารในน้ำเสียโดยเฉพาะการกำจัดฟอสฟอรัสที่อยู่ในปัสสาวะของช้าง โดยในการสุ่มเก็บน้ำในแต่ละรอบจะได้คุณลักษณะน้ำเสียที่ไม่เหมือนกัน ในการทดลองนี้จึงได้ทำการรวบรวมน้ำเสียแบบครั้งเดียว โดยทำการเก็บตัวอย่างปัสสาวะจากช้างเพศผู้ ที่มีอายุ 3-4 ปี และการเก็บตัวอย่างน้ำใช้จำนวนช้าง 3 ตัว ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียภายใน 1 วัน ซึ่งจะได้น้ำเสียประมาณ 20 ลิตรต่อวัน และทำการผสมน้ำเสียเป็นตัวอย่างเดียวกันเพื่อให้ได้ลักษณะน้ำเสียแบบรวม ซึ่งคุณลักษณะของน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับอาหารที่ช้างบริโภคเข้าไป การเก็บตัวอย่างน้ำเสียดำเนินการเก็บ ณ สถานที่เก็บตัวอย่างจะอยู่ที่ หมู่ 3 ตำบลสวนพริก อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และทำการแช่เย็นให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

(ก) การเก็บปัสสาวะของช้าง

(ข) การรักษาสภาพน้ำเสีย

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

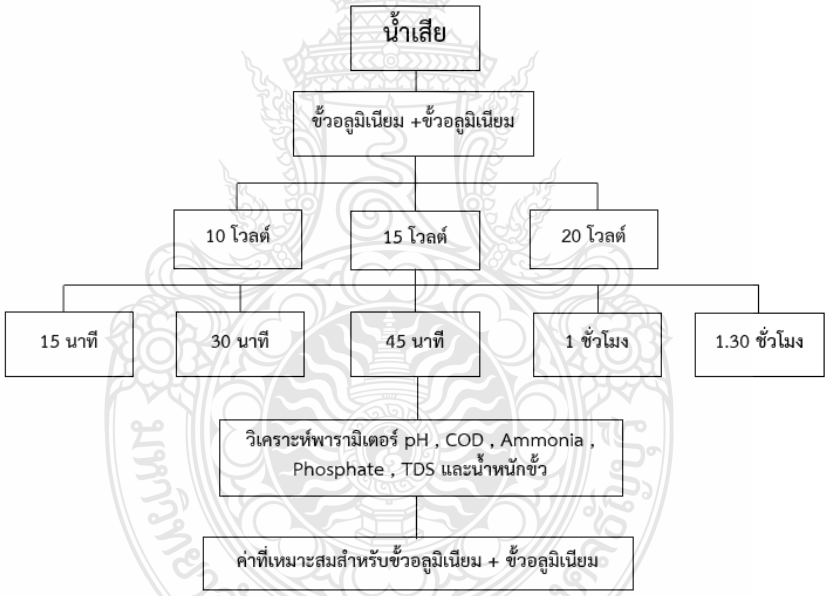
การศึกษานี้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสจากปัสสาวะของช้างโดยกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะใช้น้ำเสียจริง (ปัสสาวะช้าง) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสและมลสารอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.4.1 การศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

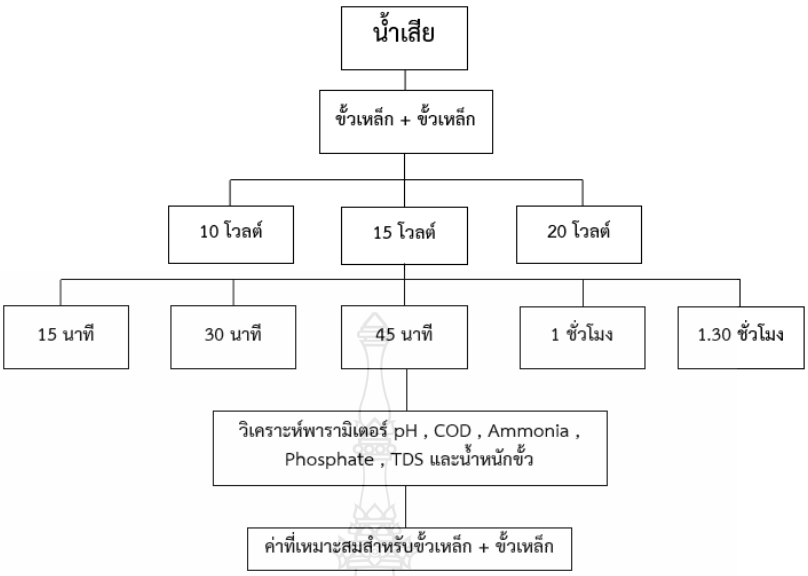
ในการทดลองนี้จะใช้ผลการทดลองในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า จากขั้นตอนที่ผ่านมาเพื่อนำมาทำการทดลองและทำการหาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน ซีโอดี และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด เพื่อใช้ในการพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้ จะทำการแปรเปลี่ยนชนิดของขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการใช้ขั้วบวกและขั้วลบเป็นขั้วเหล็ก-เหล็กและขั้วอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม แปรเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการทำความสะอาดขั้วอิเล็คโทรดทุกครั้งก่อนการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.2 และทำการชั่งน้ำหนักของแผ่นอิเล็คโทรดทุกครั้งก่อนและหลังการทดลอง จากนั้นจุ่มขั้วแต่ละชนิดลงไปในน้ำเสีย ทำการปรับตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเล็คโทรดเพื่อเริ่มการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการกำหนดระยะเวลาในการทดลองพิจารณามาจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ [11] ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาจะเก็บน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช ซีโอดี แอมโมเนีย ฟอสเฟต และของแข็งละลายน้ำ โดยในระหว่างการทดลองจะทำการตักฟองที่เกิดขึ้นทิ้งไป ดังแสดงขั้นตอนการทดลองในแต่ละขั้วอิเล็คโทรดในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า
โดยใช้ขั้วเหล็กและขั้วเหล็ก

3.4.3 การศึกษาหาศักยภาพในนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ในการทดลองนี้จะใช้ผลการทดลองในการหาสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา และ pH เริ่มต้นของกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มาทำการทดลองแล้วนำผลึกที่ได้จากการทดลองไปส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยายสูง Resolution และกำลังขยายภาพตั้งแต่ X15 เท่า - X200,000 เท่า เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบและสัณฐานทางวิทยาของผลึกว่ามีความเป็นไปได้ในการเกิดเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ที่สามารถนำไปใช้งานในด้านการเกษตรได้

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำตัวอย่าง

ในการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยได้แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และวิธีการที่ทำการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
พีเอช	เครื่อง pH Meter รุ่น AD11 ยี่ห้อ ADWA
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	เครื่อง Conductivity Meter รุ่น DIGICON CD-439SD
ของแข็งทั้งหมด (TS)	อบด้วยถ้วยกระเบื้อง ณ อุณหภูมิ 103-105 องศา
ของแข็งแขวนลอย (SS)	กรองด้วยกระดาษกรองใยแสง อบ ณ อุณหภูมิ 103-105 องศา
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	อบด้วยถ้วยกระเบื้อง ณ อุณหภูมิ 180 องศา
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	Azide modification
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	Closed - Reflux Method
แมกนีเซียม (Magnesium)	Direct Air-Acetylene Flame Method (3111 B)
โพแทสเซียม (Potassium)	Direct Air-Acetylene Flame Method (3111 B)
แอมโมเนีย (Ammonia)	Phenate Method (4500-NH_3F)/เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Genesys20,ชุดคิด Method photometric 100683
ฟอสเฟต (Phosphate)	เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Prove300/ชุดคิด Test 114842

3.6 สถานที่ในการทดลองการศึกษา

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานของงานวิจัยนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะของช้าง และหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า รวมถึงการหาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยขั้วอิเล็คโทรดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นขั้วที่ทำจากอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กทั้งขั้วแคโทดและแอโนด เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของขั้วที่ควรนำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำผลึกที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ในรูปปุ๋ยสตรูไวท์ประเภทต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดของงานต่อไปนี้

4.1 คุณลักษณะของน้ำเสีย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบลักษณะของน้ำเสียก่อนการทดลองจากปัสสาวะช้างที่เก็บรวมรวมมาซึ่งเป็นน้ำเสียจริงตามรายละเอียดการเก็บน้ำเสียตัวอย่างในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3 เพื่อนำไปบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว และเป็นการหาศักยภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียเพื่อนำไปให้ประโยชน์ในการเป็นปุ๋ยสตรูไวท์ โดยจะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเพื่อให้มีประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมที่ดีที่สุด และสามารถทำให้เกิดการตกผลึกที่อาจเกิดเป็นสตรูไวท์ได้ โดยพิจารณาจากคุณลักษณะของน้ำเสียจากปัสสาวะช้างดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากปัสสาวะช้าง

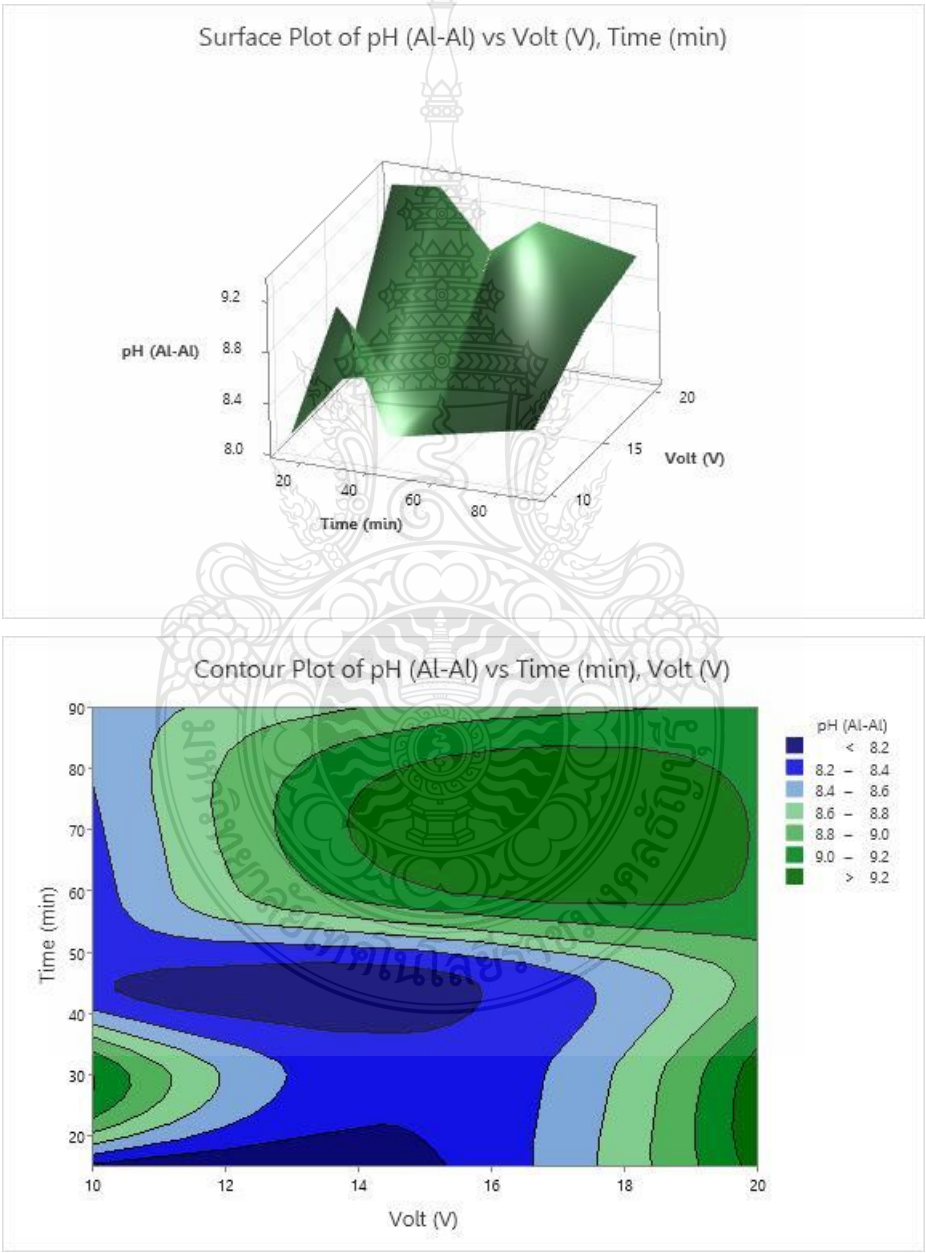
พารามิเตอร์	ค่าคุณลักษณะของน้ำเสีย	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [15,25]
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	9	5.5-9.0
ของแข็งทั้งหมด (TS) (mg/L)	26,560	ไม่เกิน 50 mg/l
ของแข็งแขวนลอย (SS) (mg/L)	1,245	ไม่เกิน 30 mg/l
ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) (mg/L)	24,470	ไม่เกิน 3,000 mg/l
ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)	12.90	-
ซีโอดี (mg/L)	68,000	120
บีโอดี (mg/L)	14,325	ไม่เกิน 20 mg/l
ฟอสเฟต (mg/L)	557.5	2
แมกนีเซียม (mg/L)	76.30	-
โพแทสเซียม (mg/L)	3,961	-
แอมโมเนีย (mg/L)	4,279	0.50

จากตารางที่ 4.1 น้ำเสียจากปัสสาวะของช้างมีความสกปรกที่ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะค่าของแข็งละลายน้ำที่มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน โดยมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งถึง 8 เท่า โดยการบำบัดของแข็งละลายน้ำที่อยู่ในน้ำเสียทำได้ยากต้องใช้ระบบบำบัดขั้นสูงซึ่งมีราคาแพง นอกจากนี้ค่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียก็มีค่าสูงเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน และสุดท้ายเมื่อพิจารณาค่าต่างๆ ที่เป็นธาตุอาหารและมีความเป็นไปได้ในการนำไปตกผลึกเป็นสตรูไวท์ จำพวกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต หรือ MAP นั้นพบว่ามีปริมาณที่มากพอและล้วนเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งเป็นอย่างมากจะทำให้มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องมีการเพิ่มระบบในการบำบัดธาตุอาหารหรือถ้าลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า ปรากฏการ์ยูโทรฟิเคชั่น ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการมีธาตุอาหารในน้ำเป็นจำนวนมากและทำให้เกิดสาหร่ายในน้ำที่ทำให้น้ำเสีย โดยเมื่อพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมในน้ำเสียมีปริมาณที่ก่อให้เกิดความเป็นไปได้ในการตกผลึกสตรูไวท์ได้ นอกจากนี้ในส่วนประกอบของปัสสาวะช้างมีองค์ประกอบของค่าโพแทสเซียมค่อนข้างสูงซึ่งสามารถตกผลึกเป็นสตรูไวท์อีกรูปแบบหนึ่งได้ คือ โพแทสเซียมสตรูไวท์ หรือ K-struvite ได้อีกด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะของการบำบัดฟอสเฟตว่ามีสภาวะแบบใด ดังนั้นเมื่อเทียบค่าลักษณะของน้ำเสียจากปัสสาวะช้างกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งสามารถสรุปได้ว่ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะซึ่งไม่พบการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ในประเทศไทยในปัจจุบันนี้

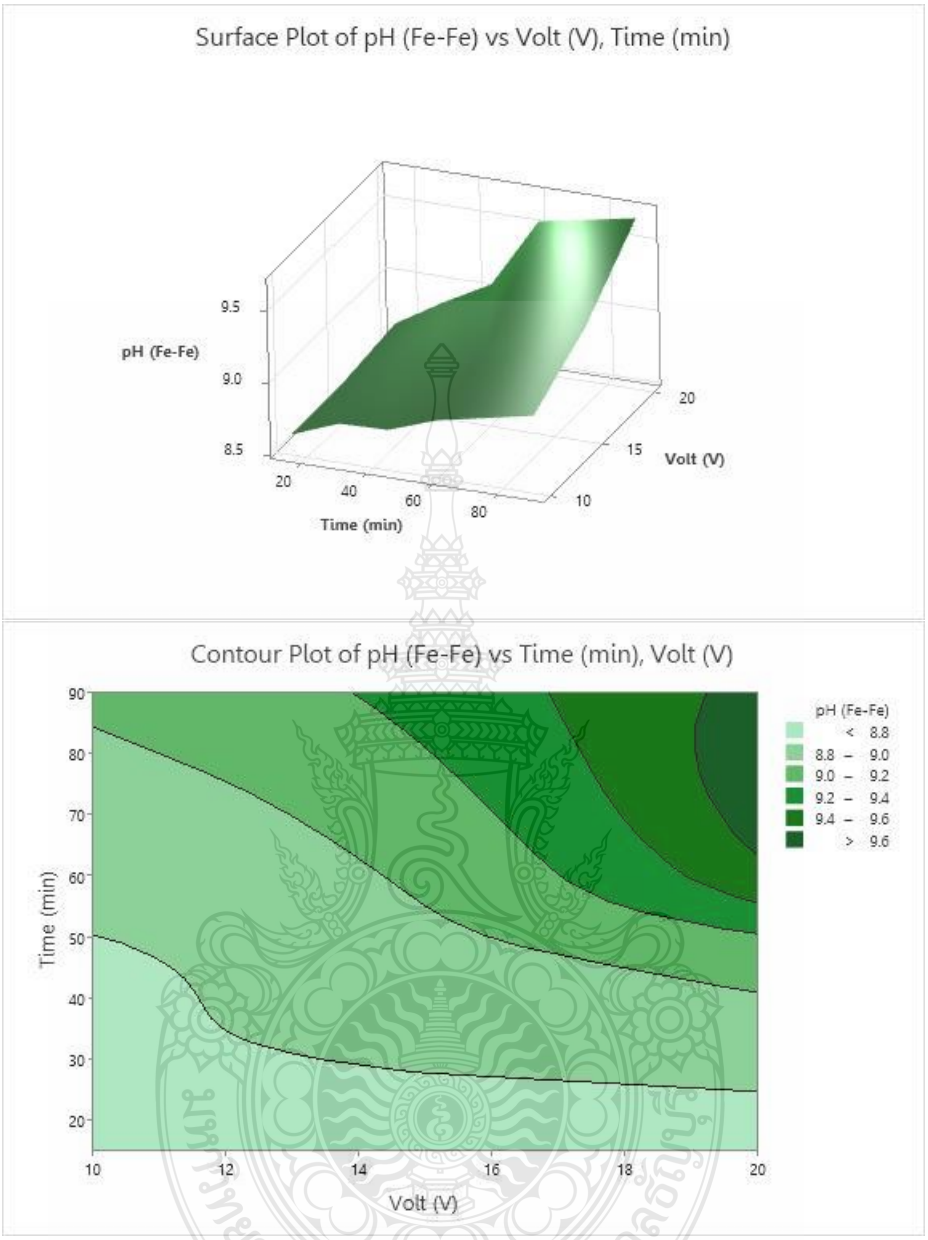
4.2 ผลการทดลองค่าความเป็นกรด - ด่าง ในระบบตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ได้ใช้น้ำเสียจากปัสสาวะช้างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 9 ซึ่งเป็นสภาวะที่เป็นด่างอ่อนและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ตามการรายงานผลการศึกษาวิจัยในงานที่ผ่านมาพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7-11 เป็นช่วงที่ก่อให้เกิดผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด [16] ในการทดลองนี้จึงไม่ได้ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะในการทำให้เกิดผลึกอยู่แล้วและสามารถทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วย โดยในระหว่างการทดลองที่ระยะเวลาการตกตะกอนไฟฟ้าต่างๆ ได้ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังแสดงผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระยะเวลาต่างๆ ในการตกตะกอนไฟฟ้า ของขั้วชนิดต่างๆ ที่ให้ค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันจากการทดลองในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่างขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กในรูปที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างในการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะช้างที่ใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียมที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 10 และ 20 โวลต์ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดในช่วง 15 – 30 นาที จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ช่วงค่า pH ที่ 9.32) แต่เมื่อระยะเวลาในช่วง 45 - 90 นาที เกิดแนวโน้มต่ำลงและเมื่อที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์ จะมีค่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพีเอชตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด เนื่องจากจะมีการละลายไอออนของอะลูมิเนียม บางส่วนไปรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ และทำให้เกิดเป็นโมโนเมอร์ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปะปนในน้ำ โดยขึ้นกับค่า pH

โดยที่มีค่า pH เป็นด่างจะพบโมโนเมอร์ที่มีประจุบวกมากโมโนเมอร์ดังกล่าวก็สามารถเกิดโพลิเมอไรเซชันได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติในการดูดซับของตะกอนได้ดีอีกด้วย [17] ส่วนที่ใช้แผ่นขั้วเหล็กในการทดลองพบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในทุกช่วงค่าจะเกิดค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด และเมื่อพิจารณาถึงสภาวะที่มีความเป็นไปได้ของการเกิดผลึกสตรูไวท์ค่อนข้างมากสำหรับขั้วอะลูมิเนียมนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่มากเพียงพอซึ่งในการทดลองนี้จะอยู่ในช่วง 10-20 โวลต์ แต่เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากเกินไปก็จะทำให้สภาวะเข้าสู่ความเป็นกรดอีกครั้ง [7] และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานในช่วงระหว่าง 60-90 นาที โดยในช่วงค่าความต่างศักย์และระยะเวลาดังกล่าว

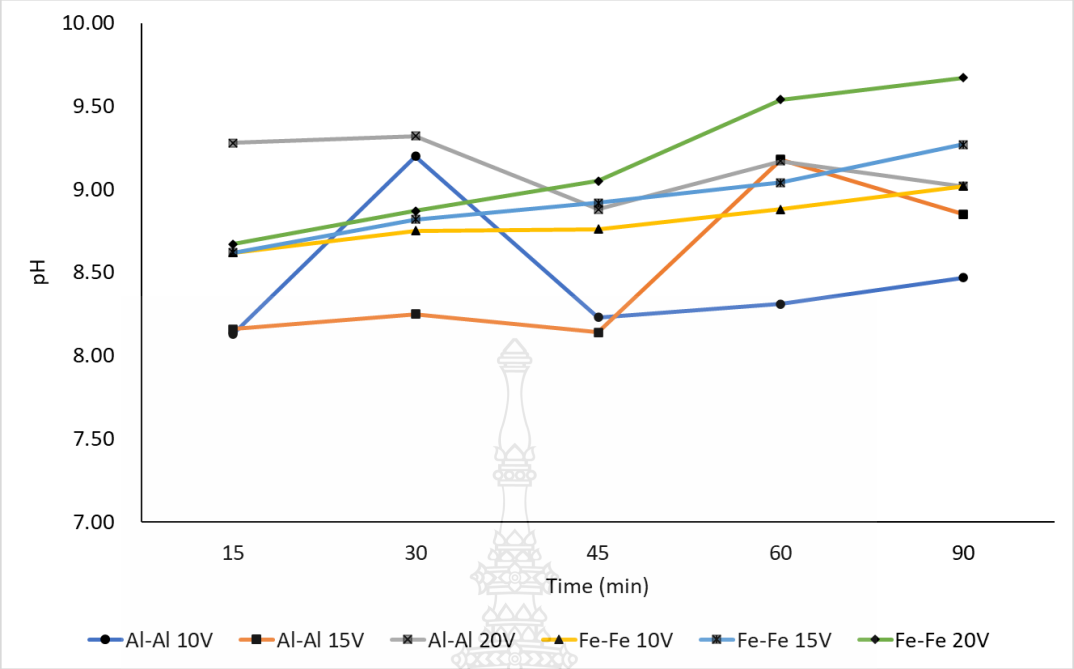


รูปที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม



(ข) Fe - Fe

รูปที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก



รูปที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างในสภาวะต่างๆ

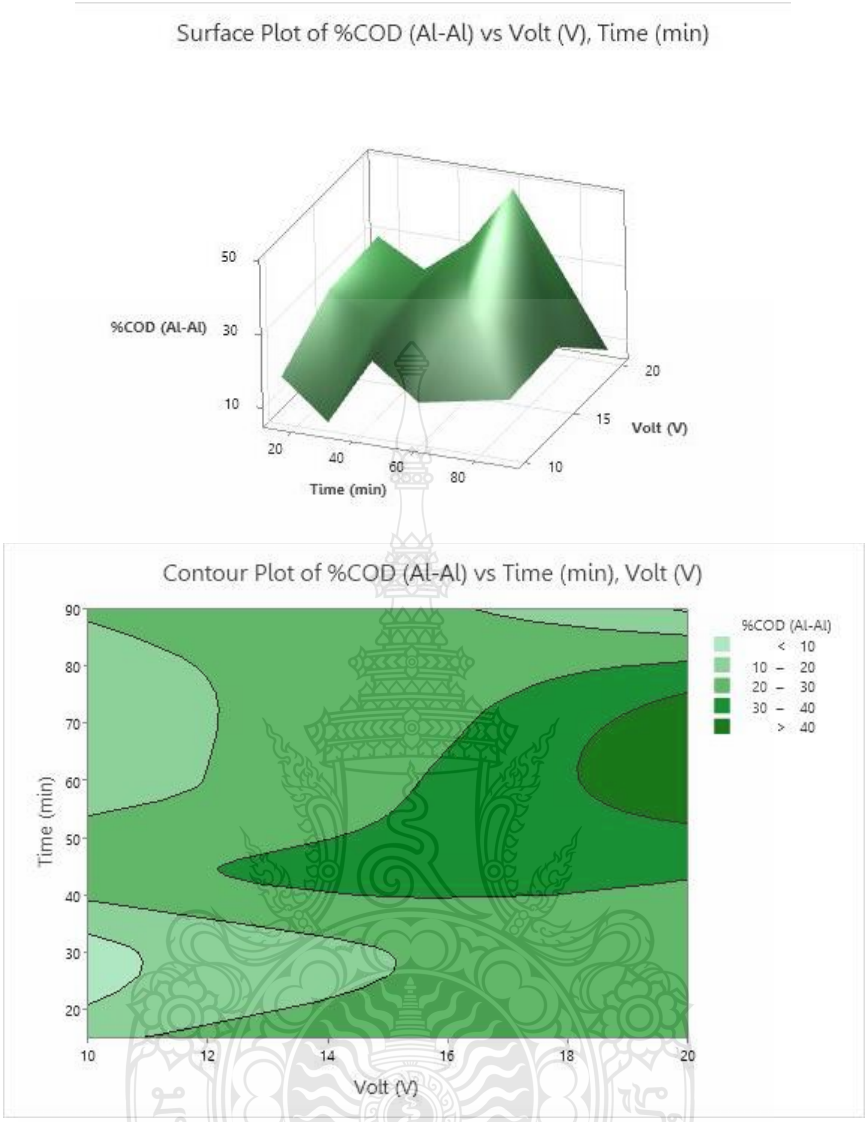
จะทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 8.5 ถึงมากกว่า 9.2 ซึ่งเหมาะสมในการเกิดเป็นผลึกสตรูไวท์ ส่วนขั้วเหล็กนั้นเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็ก ซึ่งไอออนของเหล็กในรูปต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำเสียนั้นมีคุณสมบัติในการดูดซับ และจับเกาะสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดี [18]

4.3 การศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียปัสสาวะช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

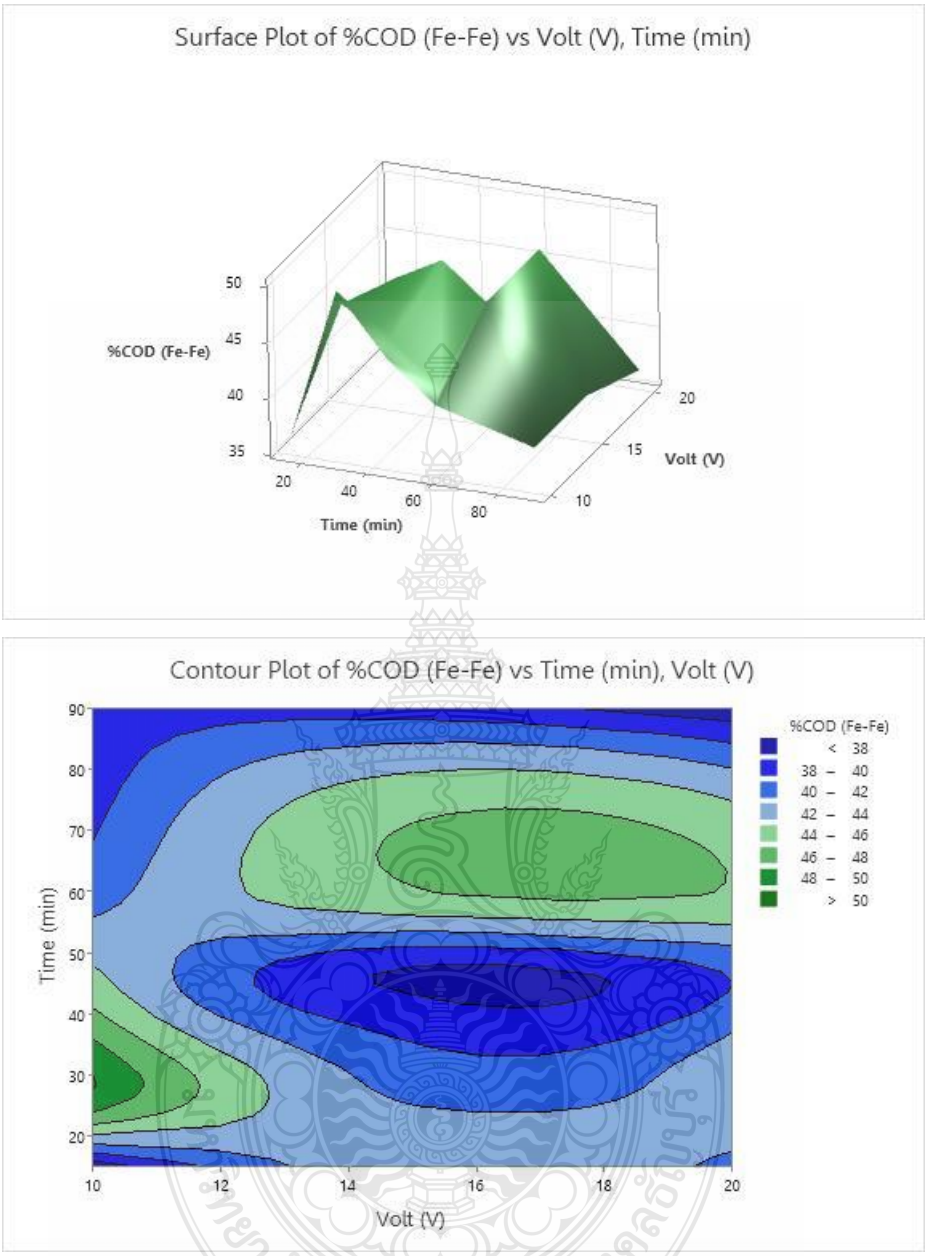
ในการทดลองบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญในน้ำเสีย ได้แก่ ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ฟอสเฟตและของแข็งละลายน้ำ โดยได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (10 15 และ 20 โวลต์) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (15 30 45 60 และ 90 นาที) และเปรียบเทียบค่าการกำจัดระหว่างการใช้ขั้วอิเล็คโทรดสองชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al - Al) และเหล็ก (Fe - Fe) เพื่อใช้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ดังรายละเอียดประสิทธิภาพการกำจัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี

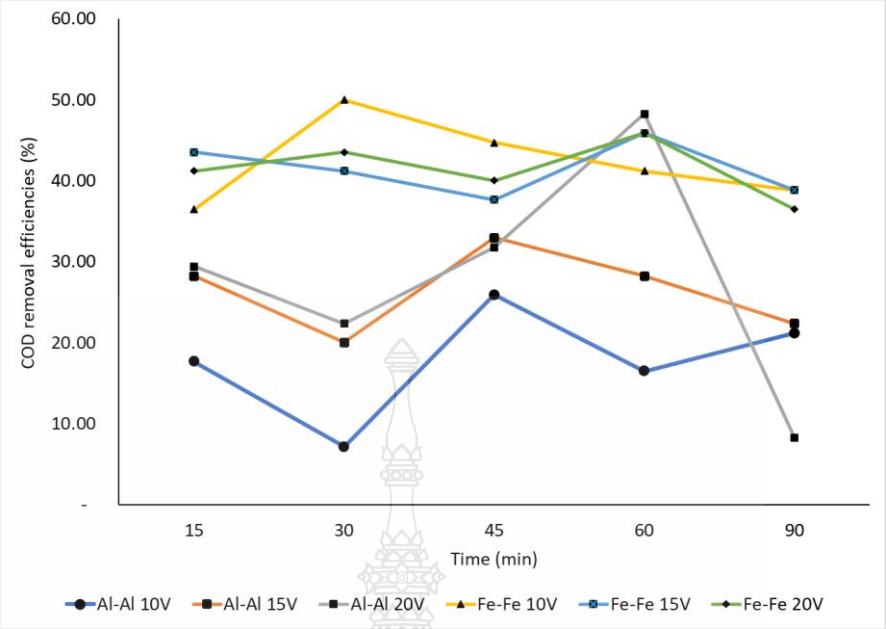
รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการกำจัดค่าซีโอดีของปัสสาวะช้าง โดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าชุดการทดลองที่ใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะอยู่ในช่วง 16 - 32 % และพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก จะอยู่ในช่วง 36 - 50 % จะเห็นได้ว่า การใช้ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก ที่สภาวะช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ ระยะเวลา 90 นาที และการใช้ขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียม สภาวะช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ ระยะเวลา 60 นาที นั้นมีประสิทธิภาพที่มากกว่าที่สภาวะอื่นๆ เนื่องจากเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่สามารถดูดซับมลสารในปัสสาวะช้างได้ดี แต่ถ้ามีการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการบำบัดที่มากกว่านี้ขึ้นอีก ก็ยิ่งทำให้เกิดปริมาณของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มากขึ้น และยิ่งทำให้ถูกกำจัดออกได้มากขึ้น [18] ทั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีปัจจัยหลักส่วนใหญ่จะเป็นการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลา จึงจะสามารถลดปริมาณซีโอดีได้ [11] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดในพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์นม ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์ และที่ระยะเวลาบำบัด 60 นาทีนั้น สามารถกำจัดปริมาณของซีโอดีได้ถึงร้อยละ 98.84 ซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า [26]



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียม



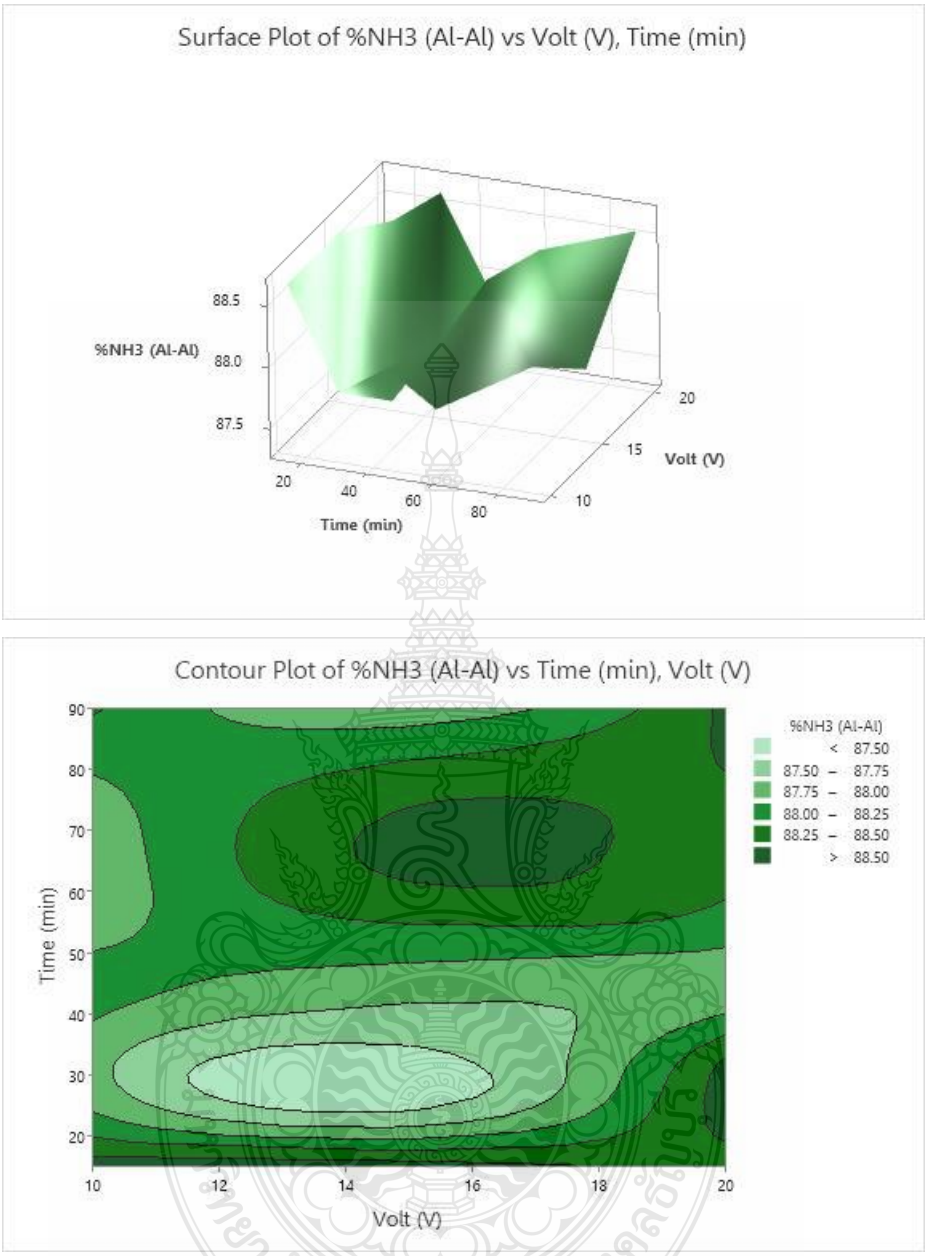
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก



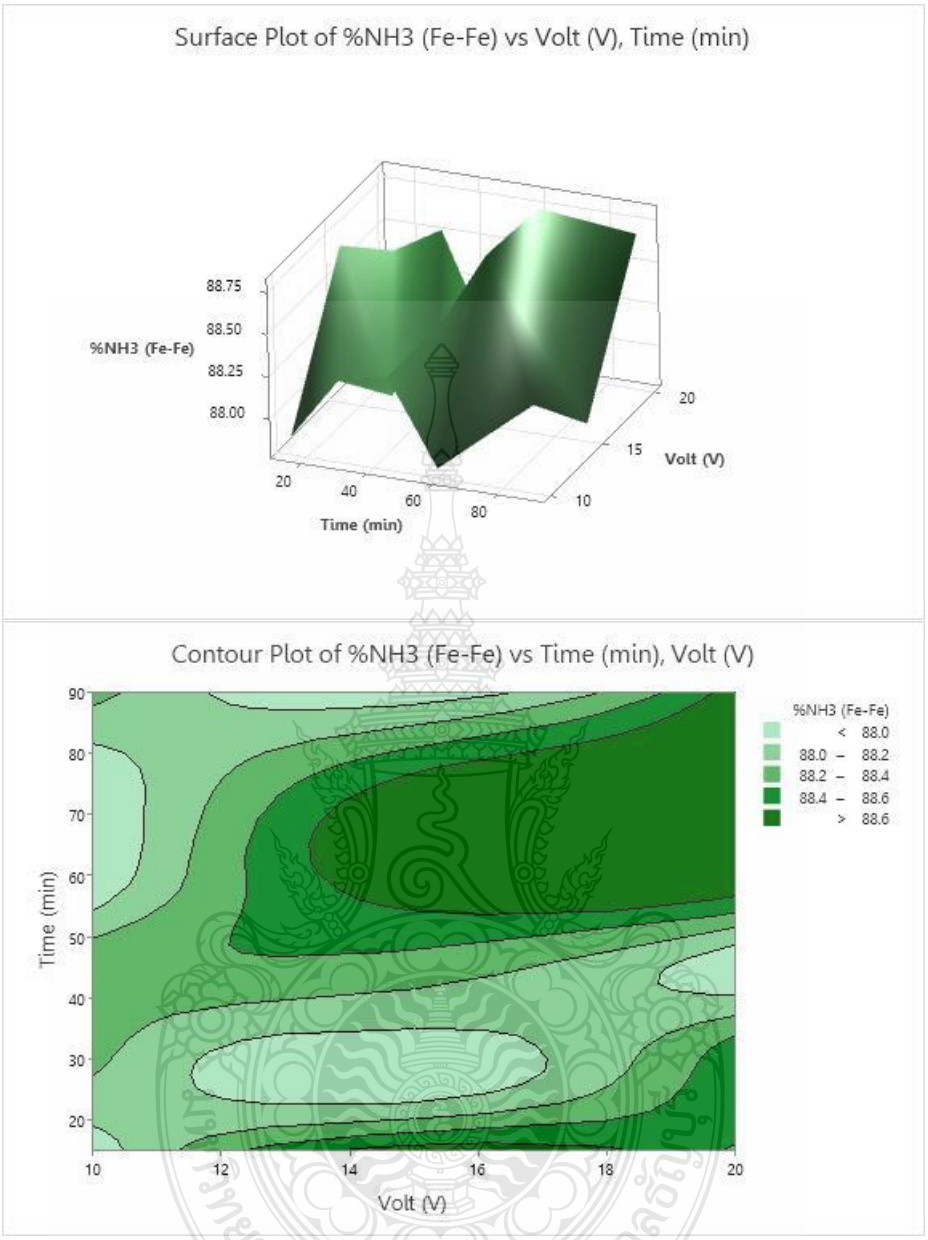
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในสภาวะต่างๆ

4.3.2 ประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

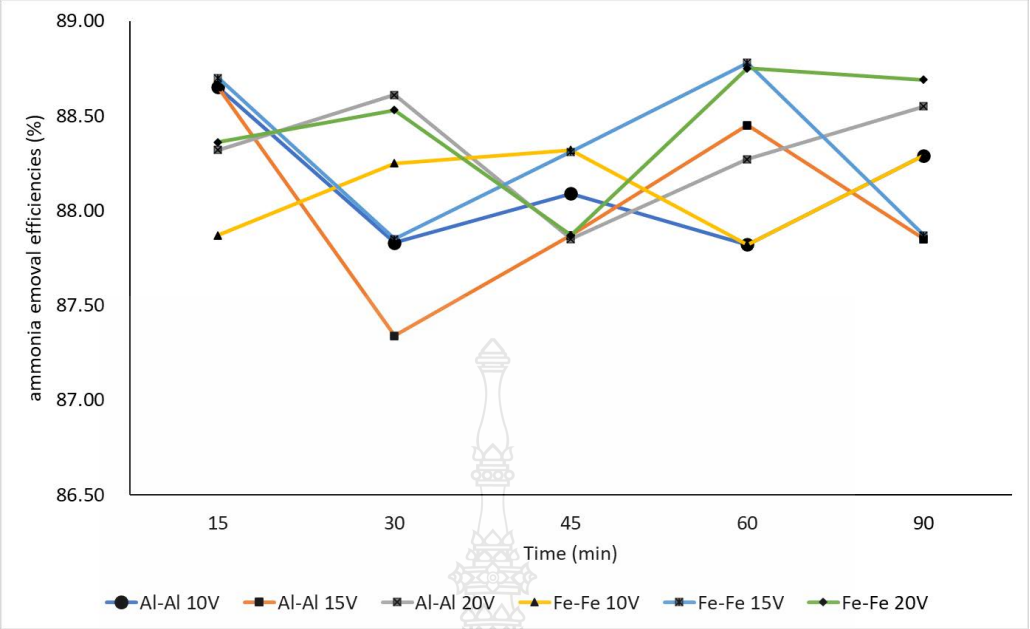
จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ในขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม มีการกำจัดที่ต่ำกว่าขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก ที่อยู่ในช่วง 87.34 % เนื่องจากขั้วเหล็กเป็นขั้วที่จะคงทนมากกว่าการใช้ขั้วอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตามขั้วอะลูมิเนียมก็มีข้อดีที่มีการเกิดโพลิเมอไรเซชัน และเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรัสที่มีประจุหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับดีเช่นกัน นอกจากนี้การใช้ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่ายิ่งมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาบำบัดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียปัสสาวะช้างในช่วง 88.69 % เป็นผลมาจากน้ำเสียมีแอมโมเนียในปริมาณที่สูงมาก ดังนั้น จึงทำให้มีตะกอนเกิดขึ้นเป็นจำนวนที่เยอะ และ เมื่อเกิดการละลายของขั้วอิเล็กโทรดลงไปในน้ำเสียจากระยะเวลาของการบำบัดที่เหมาะสม จะทำให้มีการจับตัวเป็นก้อนและไฮดรอกไซด์ของโลหะ จะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคหรือตกตะกอน ที่ช่วยดูดซับสิ่งปนเปื้อนและสิ่งสกปรกในน้ำเสียได้ [4]



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม



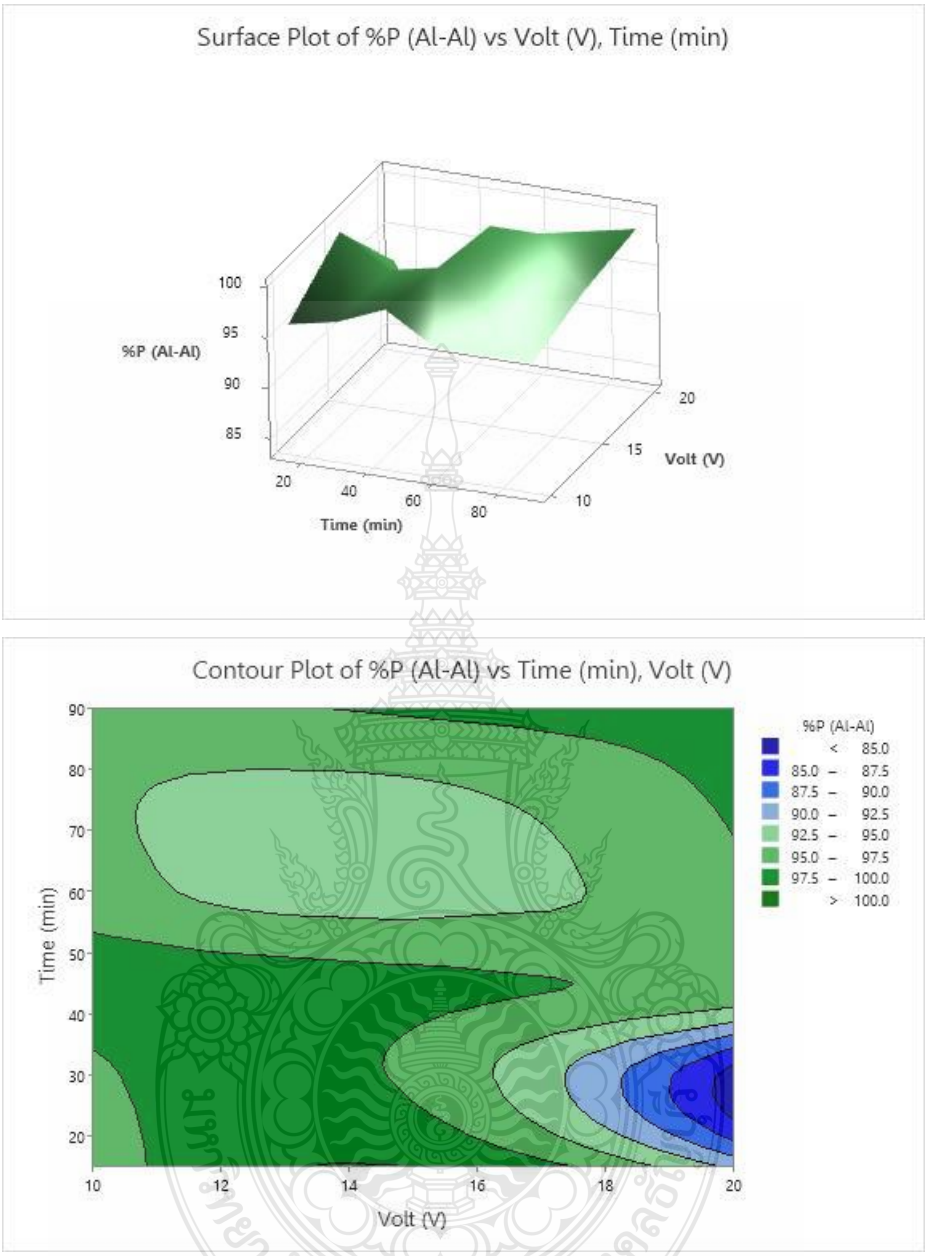
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก



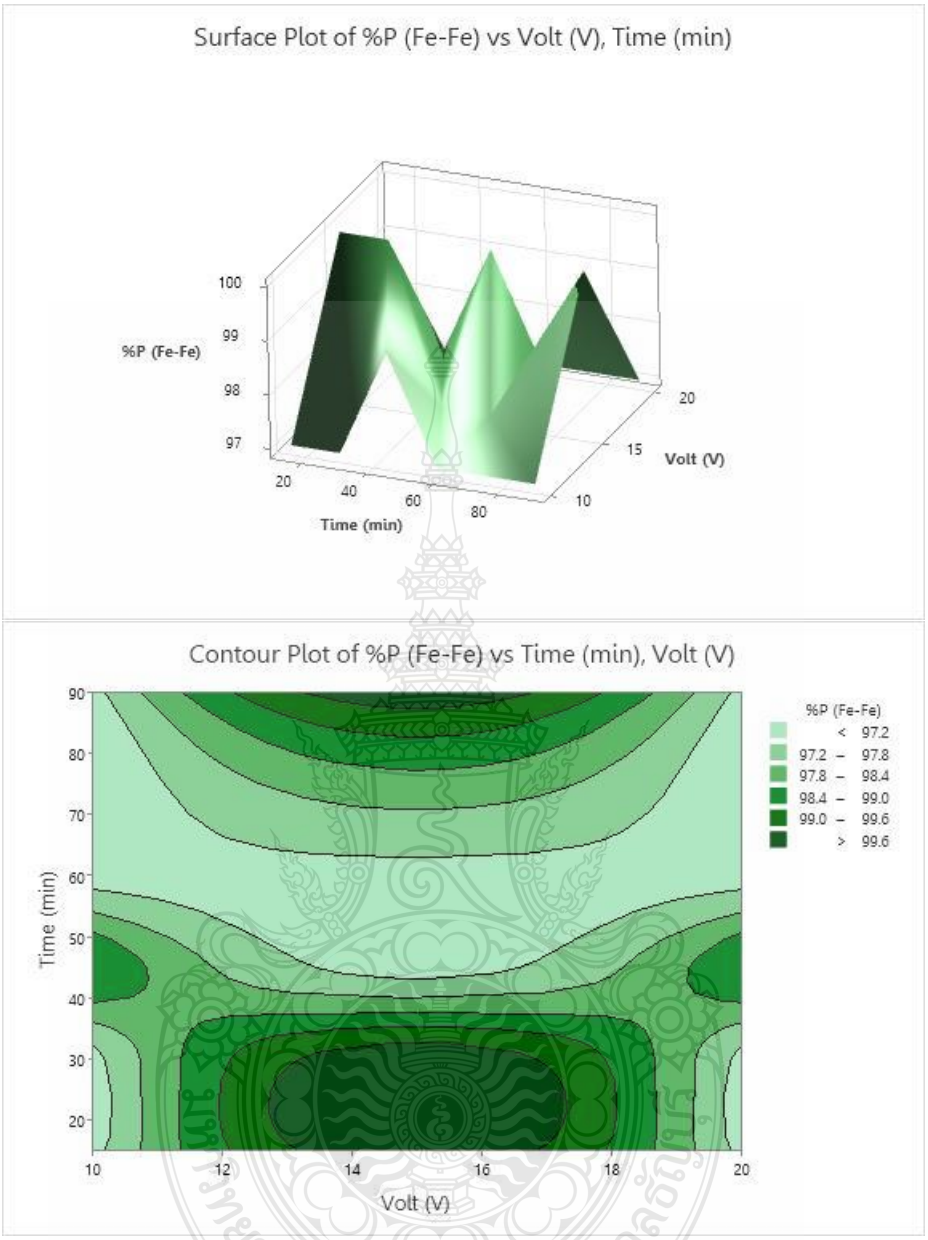
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในสภาวะต่างๆ

4.3.3 ประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟต

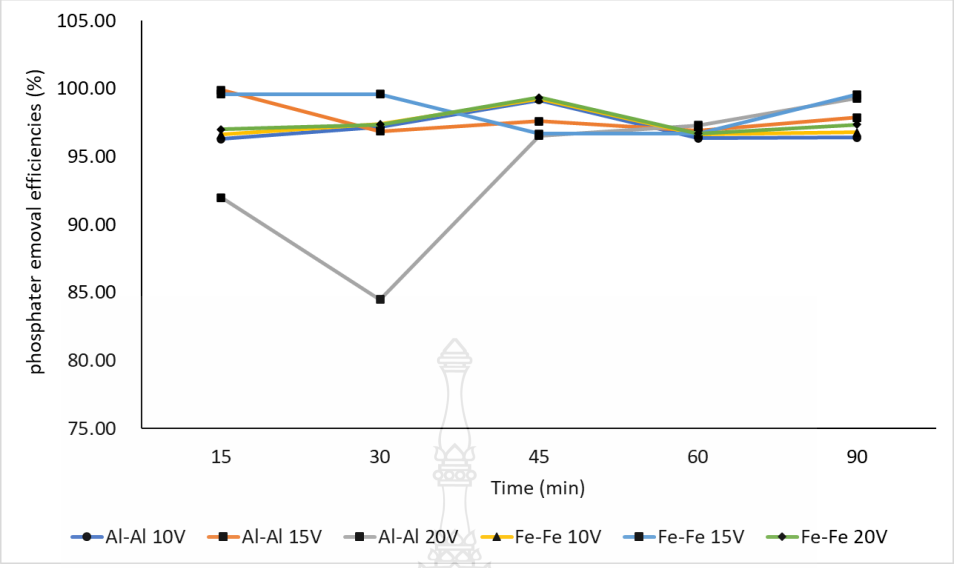
จากการทดสอบประสิทธิภาพขั้วอิเล็คโทรดระหว่างขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก โดยเริ่มต้นของการบำบัดด้วยไฟฟ้ามีค่า pH คงที่อยู่ในช่วง 8 - 9 ซึ่งทดลองด้วยน้ำเสียที่เป็นปัสสาวะช้าง ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม พบว่าที่ช่วงสภาวะของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วง 99.89 % แต่เมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นยังส่งผลต่อการกำจัดอีกด้วย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมไฮดรัสที่มีประจุหลากหลายรูปแบบกว่า จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทรดจะช่วยทำให้คอลลอยด์ที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น และสามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้งจากผิวน้ำ ส่วนผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก พบว่าเมื่อทำการจ่ายไฟที่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นที่ช่วง 15 - 20 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไปที่ช่วง 60 และ 90 นาที สามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียปัสสาวะได้ดีที่ 99 % สามารถทำการบำบัดได้ดีกว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ และระยะเวลาในการบำบัดที่สั้น เนื่องจากในน้ำเสียปัสสาวะช้างนั้น มีฟอตเฟสในปริมาณที่สูง ถึง 557.5 mg/L และเกิดเป็นตะกอนค่อนข้างเยอะ ซึ่งไอออนของเหล็ก ไฮดรอกไซด์จะเกิดการสร้างตัวเป็นโครงข่ายคล้ายกับโพลิเมอร์ไรซ์ไอออนของเหล็กในรูปต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะช่วยในการดูดซับ และจับเกาะสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดี ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เกิดการดูดซับและเกาะรวมตัวเป็นอนุภาคก้อนใหญ่มากขึ้น และสามรถแยกออกได้ง่าย [17] ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม



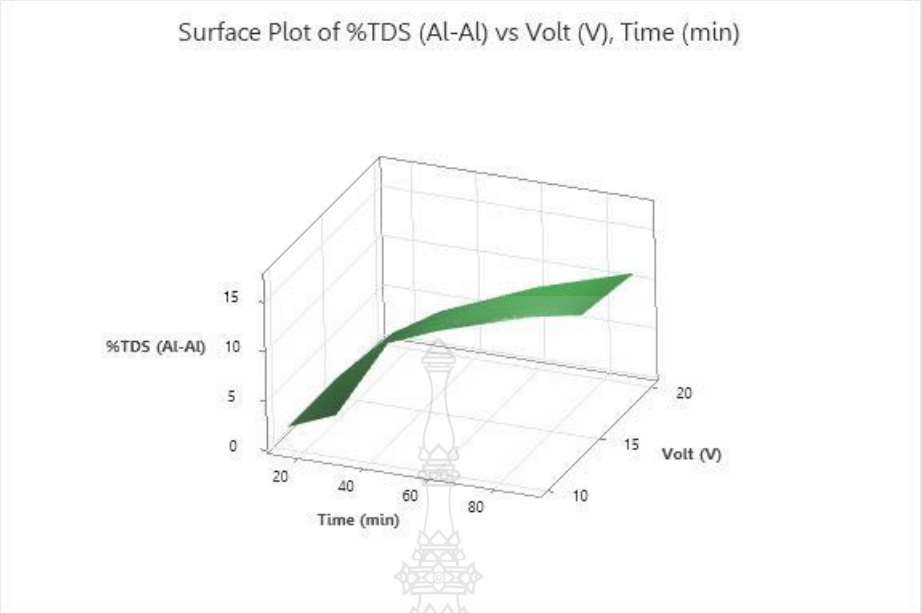
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต ขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็ก

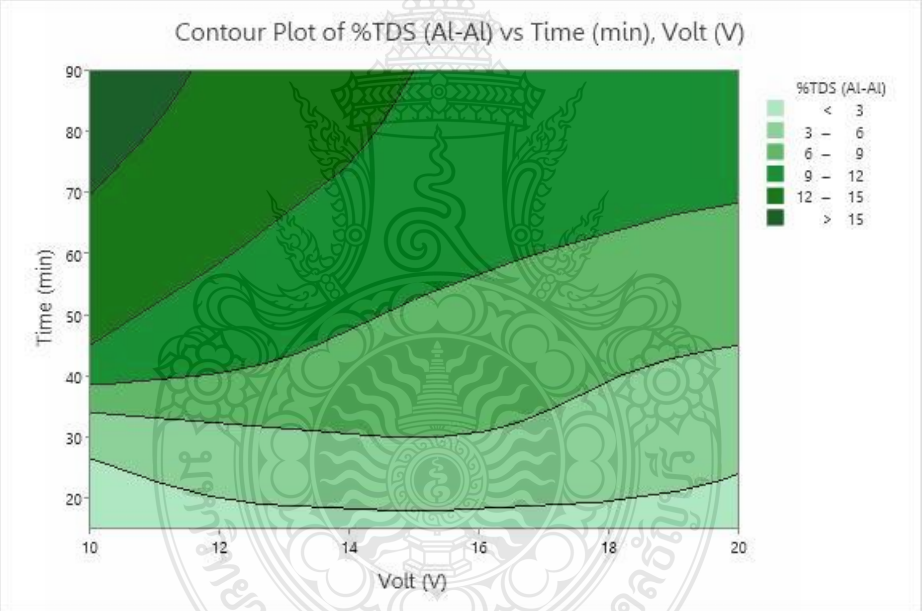


รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในสภาวะต่างๆ

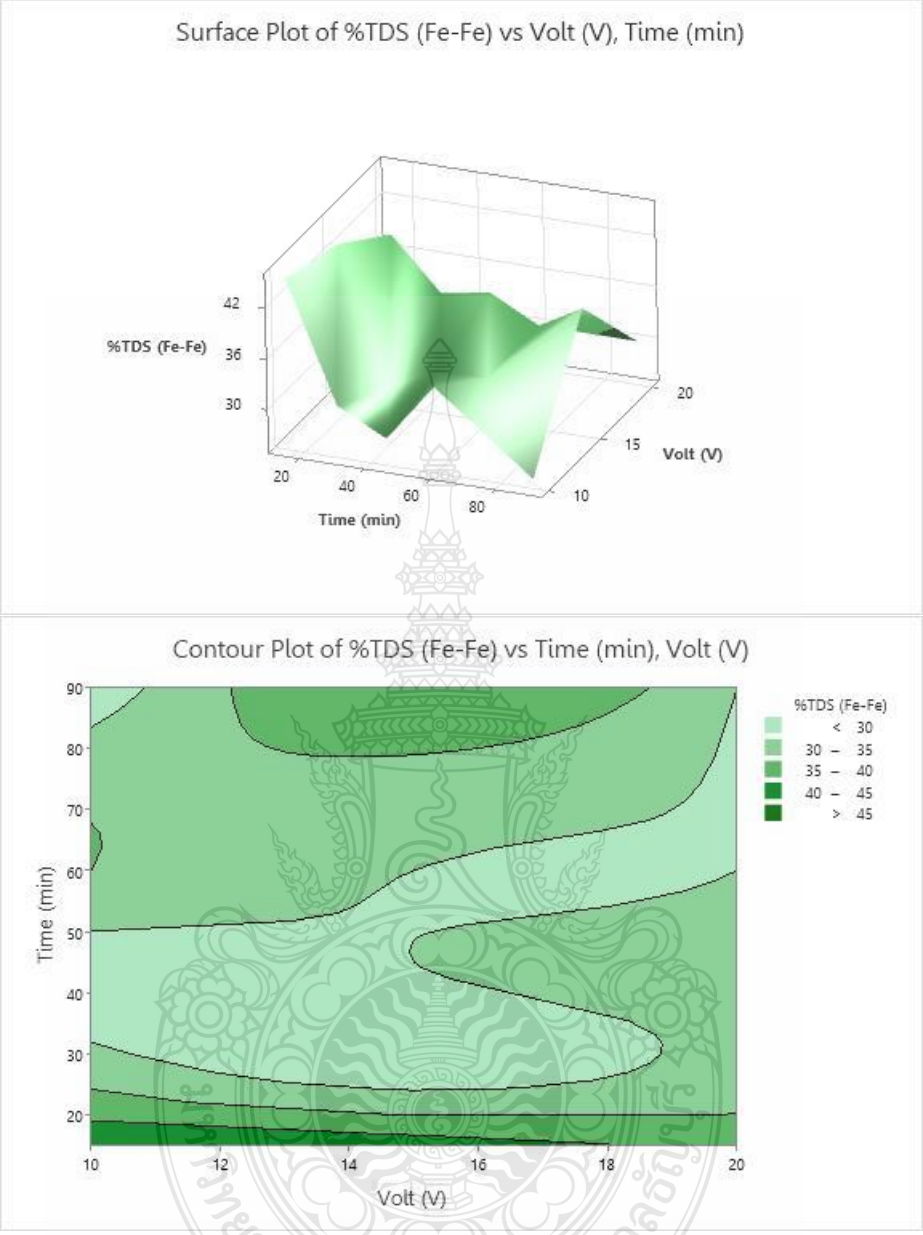
4.3.4 ประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งละลายน้ำ

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงอย่างสม่ำเสมอในช่วงแรกและมีแนวโน้มค่อย ๆ คงที่หลังจากระยะเวลาของการบำบัดเพิ่มขึ้นที่แผ่นขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม [14] เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงอย่างรวดเร็วขึ้น เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้มากจึงทำให้การรวมตัวเป็นตะกอนเกิดขึ้นได้ดีทำให้การลดลงของของแข็งที่ละลายน้ำอย่างรวดเร็ว และสามารถลดลงได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 17 เนื่องจากประจุที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นได้ทำปฏิกิริยารวมตัวกับ OH^- ,CO_3^{2-} หรือสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในการบำบัดเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มตกตะกอน เมื่อแยกตะกอนออกไปน้ำที่เหลือก็จะมีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำลดลงและยังพบว่าที่แผ่นขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำดีในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ ระยะเวลาบำบัดที่ 15 นาที สามารถลดลงได้มากที่สุดประมาณร้อยละ 45และหลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงต่ำสุดที่ร้อยละ 26 อย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

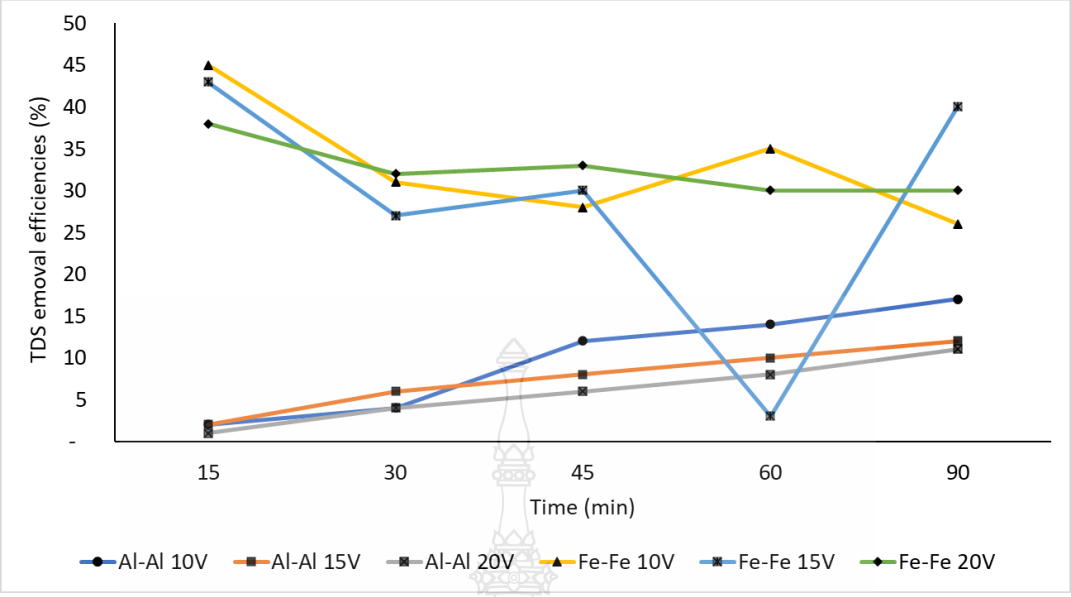




รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำ ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำ ขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำในสภาวะต่างๆ

4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดนั้นได้นำมาพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อพิจารณาการบำบัดน้ำเสียในทุกพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.2 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 15-18 โวลต์ ที่ระยะเวลา 50-60 นาที สำหรับขั้วอะลูมิเนียม และ 14-16 โวลต์ ที่ระยะเวลา 15-40 นาที สำหรับขั้วเหล็ก และเมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการได้มาซึ่งผลึกสตรูไวท์ซึ่งควรพิจารณาค่าการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นหลักนั้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณาอยู่ที่ค่าความต่างศักย์ 14 โวลต์ ระยะเวลา 60 นาที สำหรับขั้วอะลูเนียม และ 14 โวลต์ ที่เวลา 15 นาที มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลึกสตรูไวท์ได้มากที่สุด ซึ่งมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [19] ในการตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าโดยทำการทดลองแบบกะ โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าสูงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 11.9 โวลต์ ทำการทดลองที่ระยะเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนเท่ากับ 93.6% และ 79.4% สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการทดลองดังกล่าวสามารถตกผลึกสตรูไวท์ได้ ซึ่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัย ที่จะช่วยตัดสินใจในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้แก่กระบวนการนั้นๆ และเมื่อทำการทดลอง โดยหาน้ำหนักที่ลดลงของขั้วอิเล็คโทรด พบว่า หลังการทดลองในแต่ละครั้งน้ำหนักของขั้วอิเล็กโทรดจะลดลงตามความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาในการบำบัด ซึ่งขั้วไฟฟ้าจะมีความหนา 4 มิลลิเมตร ที่เท่ากันทั้งสองชนิด เมื่อใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียมในการทดลอง พบว่าเกิดการกัดกร่อนเล็กน้อย มีค่าเฉลี่ยในการลดลงของน้ำหนัก เท่ากับ

5 กรัม แต่เมื่อใช้แผ่นขั้วเหล็ก – ขั้วเหล็กในการทดลอง พบว่า เกิดการกัดกร่อนในปริมาณที่มาก มีค่าเฉลี่ยในการลดลงของน้ำหนัก เท่ากับ 19 กรัม เมื่อเปิดระบบและจ่ายกระแสไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) หรือไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) ทางด้านขั้วบวกจะถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาอาโนดิก เกิดอิออนของโลหะ (Fe^{2+}, Fe^{+} หรือ Al^{3+}) ในขณะที่ทางด้านขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาคาโทดิก เกิดไฮดรอกไซด์อิออน (OH^{-}) อิออนที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ามีประจุลดลงจนเป็นกลางและอนุภาคจะรวมตัวกันจนเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ดังนั้น การเลือกใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้าก้ต้องขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย และสิ่งที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ รวมถึงผลดีและผลเสียของวัสดุไฟฟ้าอีกด้วย [17]

ตารางที่ 4.2 ช่วงค่าที่เหมาะสมในการบำบัด

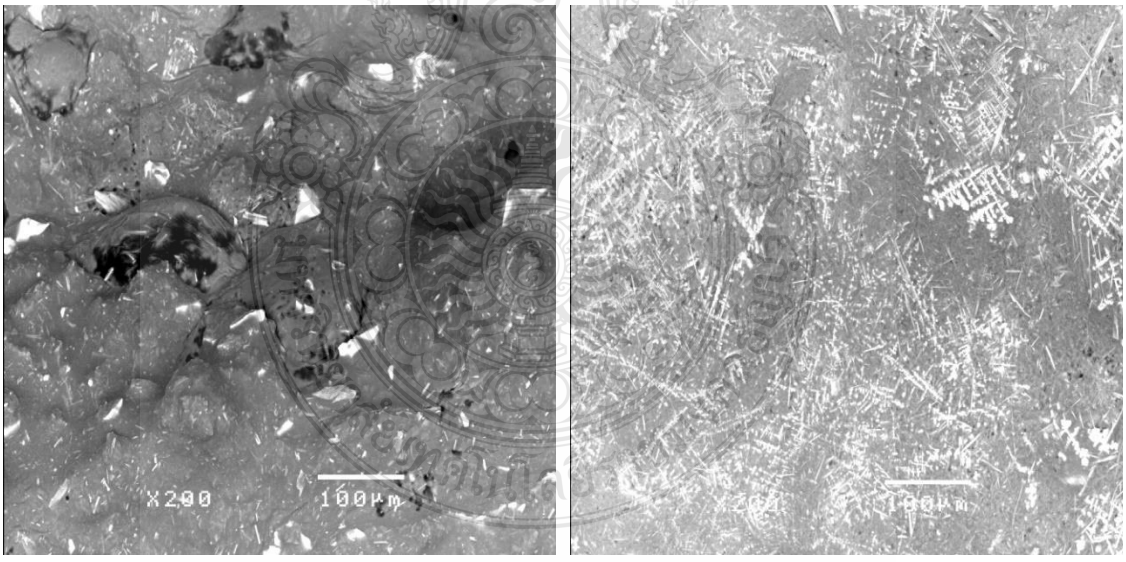
พารามิเตอร์	ช่วงค่าที่เหมาะสมในการบำบัด			
	Al-Al		Fe-Fe	
	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลา (นาที)
ซีโอดี	18-20	50-70	10-12	20-40
ฟอสเฟต	14-15	15-60	14-16	15-30
แอมโมเนีย	14-18	60-70	14-18	15-20
ของแข็งละลายน้ำ	10-15	90	10-15	15

4.5 การหาศักยภาพในนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

4.5.1 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และกำหนดองค์ประกอบของธาตุด้วย X-Ray spectroscopy (EDS)

การหาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค Element and Chemical Analysis เป็นเทคนิคที่ใช้การยิงลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบกับพื้นผิววัสดุที่จะส่อง เมื่อกระทบต่อวัสดุนั้นจะ อิเล็กตรอนก็จะสะท้อนกลับเข้ามายังตัวรับสัญญาณ เพื่อจำแนกอิเล็กตรอนตัวนั้นว่ามาจากตำแหน่งใด นอกจากนี้ยังสามารถวัดระดับพลังงานของรังสีที่คายออกจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้อีกด้วย จากการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบของธาตุที่พบในสารตัวอย่าง จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ามีก่อตัวของธาตุแมกนีเซียม โดยการแสดงลักษณะเฉพาะการรวมตัวของอนุภาคทรงกลมที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จากตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะช้าง องค์ประกอบธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ EDS พบว่า มีธาตุประกอบแมกนีเซียมของผลึกในรูปของของแข็งได้ในปริมาณที่ 1.45 % จากแผ่น

ขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในผลึกของแผ่นขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็กที่พบเพียงธาตุแมกนีเซียมจากการบำบัดเพียง 1.15 % ซึ่งจากการหาองค์ประกอบของธาตุนั้น พบธาตุแมกนีเซียมเป็นหลัก โดยที่ธาตุแมกนีเซียมเป็นส่วนนึงของการเกิดผลึกแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (Magnesium ammonium phosphate hexahydrate,MAP) ที่สามารถพบการสะสมผลึกสตรูไวท์ MAP ในรูปของตะกรันตามชิ้นส่วนต่างๆในระบบบำบัดน้ำ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมานั้นมีความสอดคล้องที่พบ แมกนีเซียม ในการศึกษาการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต [20] และพบว่าเมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า 7.5 จะเกิดการรวมตัวกันและตกผลึกลงมา แต่เมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่าต่ำกว่า 7.5 จะทำให้สารประกอบต่างๆ ในน้ำ ละลายน้ำได้ดี และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนทำให้ไม่จับตัวกันเป็นตะกอนผลึก MAP ดังนั้นการตกผลึก แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (MAP) จึงเป็นเทคโนโลยีที่แยกสารอาหารของพืชที่อยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นปุ๋ยที่ใส่ในการทำการเกษตรกรรม และอื่นๆ ที่กำลังจะหาได้ยากขึ้นในอนาคต ซึ่งการตกผลึกสตรูไวท์นั้นได้ผลดี และค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ไม่สูงมาก จึงทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และเป็นการสร้างมูลค่าโดยการแยกสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกจากน้ำเสีย และยังช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากปัญหาการปนเปื้อนจากธาตุอาหารของพืชในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน [21]



(ก) (ข)

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของผลึกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าจากน้ำเสียปัสสาวะช้าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
(ก) ผลึกจากขั้วอะลูมิเนียม – ขั้วอะลูมิเนียม (ข) ผลึกจากขั้วเหล็ก **–** ขั้วเหล็ก

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะช้าง

องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะที่ใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม									
ธาตุ	C K	O K	Mg K	Al K	S K	Cl K	K K	Fe K	Totals
Weight%	38.26	36.58	1.45	1.41	1.90	1.50	18.64	0.27	100
องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะที่ใช้แผ่นขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก									
ธาตุ	C K	O K	Mg K	Al K	S K	Cl K	K K	Fe K	Totals
Weight%	41.89	26.69	1.15	0.55	1.97	5.37	21.65	0.72	100

4.5.2 การตกผลึก แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (MAP)

เทคโนโลยีการแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียที่เป็นที่ให้ความสนใจ และทำการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง คือ การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยการตกตะกอนผลึก (Phosphorus precipitation or crystallization) ผลึกที่ได้เรียกว่า แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต (Magnesium ammonium phosphate, MAP) หรือสตรูไวท์ (Struvite) การตกตะกอนผลึก แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต หรือ MAP เป็นการควบคุม แมกนีเซียม (Magnesium, Mg^{2+}) แอมโมเนีย (Ammonium, NH_4^+) และฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ให้รวมตัวเกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกมา โดยทำความควบคุมอัตราส่วนโมลของสารต่างๆ ค่าพีเอช หรือค่าความเป็นกรด – ด่างของน้ำ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการตกผลึก จากการศึกษางานวิจัยของ [22] ที่ผ่านมามีการศึกษาน้ำเสียที่นามาพิจารณาในการตกผลึก MAP ได้แก่ น้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ น้ำบ่อสุดท้าย และกากตะกอนน้ำเสีย จากโรงงานแห่งหนึ่ง พบว่าจะตกตะกอน MAP ได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอชคือ 9 ซึ่งสามารถลดสารอาหาร แมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต ได้ 66.67%, 50.87% และ 33.40% ตามลำดับ และได้ผลึก MAP 0.1331 กรัม

4.5.3 การหาศักยภาพในนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การหาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบในเบื้องต้นด้วยการศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะของผลึกรวมถึงองค์ประกอบของธาตุที่เกิดขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer: SEM-EDS) โดยเลือกผลึกจากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.3 โดยจากการทดลองพบว่าการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะของช้างด้วยขั้วอิเล็คโทรด ที่เป็นขั้วอะลูมิเนียม - ขั้วอะลูมิเนียม ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที และขั้วเหล็ก - ขั้วเหล็ก ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่ 90 นาที มีความเป็นไปได้ในการเกิดผลึกสตรูไวท์ได้มากกว่าสภาวะอื่นๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต และแอมโมเนียได้สูงสุด และมีแนวโน้มที่เกิดการตกผลึกของ pH ช่วง 7 – 9 ดังนั้น จึงได้นำไปวิเคราะห์ผลึกและพบว่าผลึกที่ได้มีความเป็นไปได้ในการเป็นผลึก K-sturvite เนื่องจากในผลึกที่ได้มีส่วนประกอบของค่าแมกนีเซียมโพแทสเซียม ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเกิดของสตรูไวท์ของงานวิจัยของ [9] ซึ่งมีการกำจัดโพแทสเซียมสตรูไวท์หรือ K-struvite ในปัสสาวะสังเคราะห์ของมนุษย์ โดยที่ pH 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมสตรูไวท์ ถึง 87% ดังนั้นงานวิจัยต่อไปควรมีการควบคุมอัตราส่วนโมลของสารต่างๆ ค่าพีเอช หรือค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการตกผลึก เพราะเนื่องจากผลึก MAP ที่ได้แยกออกมาจากน้ำเสียนั้น สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizer) ในการทำการเกษตร หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม เป็นต้น [21] ทั้งนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ และพัฒนาการบำบัดน้ำเสียในรูปแบบน้ำเสียประเภทอื่นๆ แต่ยังคงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายเรื่องของไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายอื่นๆ เมื่อนำไปงานจริง

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำเสียจากปัสสาวะช้างด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและเพิ่มศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำและหาประสิทธิภาพในการบำบัดในพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ รวมถึงการหาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์จากกระบวนการดังกล่าว สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ฟอสเฟต และของแข็งละลายน้ำ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อมีการใช้ขั้วอะลูมิเนียม เท่ากับ 32.94 , 88.65 , 100 และ 17% ตามลำดับ และขั้วเหล็กมีประสิทธิภาพของการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 50.00 , 88.78 , 100 และ 45% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการตกตะกอนไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสเฟตทั้งขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก และแนวโน้มของการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่นานขึ้น และปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย และอีกหลายๆ ปัจจัยที่จะส่งผลต่อการบำบัด เมื่อนำผลของประสิทธิภาพการกำจัดในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความต่างศักย์และระยะเวลาในการตกตะกอนไฟฟ้าโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพโดยรวมในการบำบัดทุกพารามิเตอร์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 15-18 โวลต์ ที่ระยะเวลา 50-60 นาที สำหรับขั้วอะลูมิเนียม และ 14-16 โวลต์ ที่ระยะเวลา 15-40 นาที สำหรับขั้วเหล็ก สุดท้ายเมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการได้มาซึ่งผลึกสตรูไวท์การพิจารณาสภาวะที่ก่อให้เกิดการตกผลึกจะมาจากค่าการกำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นหลักสภาวะที่เหมาะสมจึงมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ 14 โวลต์ ระยะเวลา 60 นาที สำหรับขั้วอะลูเนียม และ 14 โวลต์ ที่เวลา 15 นาที ที่จะก่อให้เกิดความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลึกสตรูไวท์ได้มากที่สุด โดยในนำผลึกที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบพบองค์ประกอบของธาตุ พบว่า Mg K ที่ขั้วอะลูมิเนียม อยู่ที่ 1.45% และที่ขั้วเหล็ก อยู่ที่ 1.15% โดยที่ Mg K เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของ K-struvite ($MgKPO_4$ $6H_2O$) ที่เป็นเกลือละลายน้ำในตระกูลของ struvite ซึ่งมีศักยภาพเป็นตัวกลางการแยกโพแทสเซียมและฟอสเฟตในปัสสาวะให้กลายเป็นปุ๋ยละลายช้าที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงอื่นๆ ที่เหมาะสมกับคุณลักษณะน้ำเข้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเปรียบเทียบของการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

5.2.2 ทำการขยายขนาดทดลอง เพื่อให้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานได้จริง และเกิดประโยชน์มากกว่าเดิม

5.2.3 ควรศึกษาการปรับค่าเริ่มต้นของค่าพีเอชเพื่อหาศักยภาพในการนำฟอสฟอรัสในปัสสาวะข้างกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดเป็นผลึก MAP

บรรณานุกรม

[1] พงศ์ลัดดา เผ่าศิริ วีระศักดิ์ สืบเสาะ และชาญชัยณรงค์ ทรงคาศรี, **การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือแมกนีเซียม**, ว.มรม. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1, 2555

[2] กองตรวจสอบคุณภาพสินค้าประมง , กรมประมง , **สารประกอบฟอสเฟตใกล้ตัวกว่าที่คิด**

[3] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) , 2560

[4] กฤษณ์ เฑียรฆประสิทธิ์ และบุษยมาส มุ่งธัญญา, **การกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชนโดยการแลกเปลี่ยนไอออน**, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(ภาษาไทย) ปี 10 ฉบับที่ 2 , 2545

[5] I. Chakchouk, N. Elloumi, C. Belaid, S. Mseddi, L. Chaari1 and M. Kalle, **a combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for dairy wastewater,** Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 34, No. 01, pp. 109 - 117, 2017.

[6] วาทิต ภักดี และกิตติพล รัตนพงศ์, **ผลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็คโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่อง**, Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 33, No. 2, 2016

[7] ทรงพล ประโยชน์มี พนมชัย วีระยุทธศิลป์ และ กัลยกร ขวัญมา , **การใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมในกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเพื่อบำบัดน้ำเสียย้อมคราม** , วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ , July – December 2020; 6(2) : 147 – 159

[8] สุรางคณา อินชู , **การบำบัดสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง** , 2562

[9] I¸sık Kabda¸slı , Sezen Ku¸sçuo˘glu , Olcay Tünay and Alessio Siciliano , **Assessment of K-Struvite Precipitation as a Means of NutrientRecovery from Source Separated Human Urine** , 2565

[10] Jinhua Shan, Hongbo Liu, Shiping Long, Haodong Zhang, Eric Lichtfouse, **Electrochemical crystallization for recovery of phosphorusand potassium from urine as K-struvite with a sacrificial magnesium anode** , Environmental Chemistry Letters , 2022

บรรณานุกรม (ต่อ)

[11] พลกฤษณ์ จิตร์โต ธิญาดา ชัยกระทาง และวรนันต์ นาคบรรพต , **การบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า** , J. Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning Vol. 7 No. 2 (2016) , 2555

[12] วรรษวรรณ เที่ยงวรรณกานต์ , **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า และการตกตะกอนทางเคมี** , 2546

[13] Philip Isaac Omwenea, Mehmet Kobyaa, Orhan Taner Canb , **Phosphorus removal from omestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes** , Ecological Engineering 123 (2018) 65-73

[14] สันติ รักษาวงศ ศศิธร สายแก้ว และสิริประภัสสร์ ระย้าย้อย, **Removal of Hardness from Groundwater by Electrocoagulation Using Aluminum Plates as Electrodes**, ปีที่ 1 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2563

[15] กรมควบคุมมลพิษ , มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน

[16] Saba Daneshgar , Armando Buttafava , Doretta Capsoni , Arianna Callegari and Andrea G. Capodaglio , **Impact of pH and Ionic Molar Ratios on Phosphorous Forms Precipitation and Recovery from Different Wastewater Sludges** , 2018

[17] ดร.ศุภมาส ด่านวิทยากุล, **การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสีย**, บทความของห้องปฏิบัติการวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสารอันตราย หน่วยวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, เมษายน - มิถุนายน 2557

[18] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา , **การบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตัน** , 256

[19] Kyösti Rajaniemi, Tao Hu , Emma-Tuulia Nurmesniemi , Sari Tuomikoski and Ulla Lassi , **Phosphate and Ammonium Removal from Water through Electrochemical and Chemical Precipitation of Struvite** , 2021

[20] นางสาวพิชญ์ภัค เจียรพันธ์ , **ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมตอการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต** , 2552

[21] บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมเนจเมนท์ จำกัด , **การผลิตปุ๋ยแมกนีเซียม-แอมโมเนียม-ฟอสเฟต** , 2565

[22] ดร.รอบรู้ รังสิเวค , **การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและชฟาร์มสุกร ,** 2560

บรรณานุกรม (ต่อ)

[23] Ellen Wiedner, A. Rick Alleman and Ramiro Isaza, **Urinalysis in Asian Elephants (Elephas maximus),** Journal of Zoo and Wildlife Medicine, Vol. 40, No. 4 (Dec., 2009), pp. 659-666.

[24] S. M. Didar-Ul Islam, **Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatmen and pollutants removal**, Sustain. Water Resour. Manag., (2019), 5:359–380

[25] กระทรวงอุตสาหกรรม , กรมโรงงานอุตสาหกรรม , กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน

ภาคผนวก ก

ตารางประสิทธิภาพของการกำจัด (%)

ตารางที่ ก 1 ประสิทธิภาพของการกำจัด (%)

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลาในการบำบัด (นาที)	pH		ประสิทธิภาพ (%)							
				ซีโอดี		ฟอสเฟต		แอมโมเนียไนโตรเจน		ของแข็งละลายน้ำ	
		Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe
	15	8.13	8.62	17.65	36.47	96	97	88.65	87.87	2	45
	30	9.2	8.75	7.14	50.00	97	97	87.83	88.25	4	31
10 V	**45**	8.23	8.76	25.88	44.71	99	99	88.09	88.32	12	28
	60	8.31	8.88	16.47	41.18	96	97	87.82	87.82	14	35
	90	8.47	9.02	21.18	38.82	96	97	88.29	88.29	17	26
	15	8.16	8.62	28.24	43.53	100	100	88.65	88.70	2	43
	30	8.25	8.82	20.00	41.18	97	100	87.34	87.85	6	27
15 V	**45**	8.14	8.92	32.94	37.65	98	97	87.87	88.31	8	30
	60	9.18	9.04	28.24	45.88	94	97	88.45	88.78	10	30
	90	8.85	9.27	22.35	38.82	98	100	87.85	87.87	12	40
	15	9.28	8.67	29.41	41.18	92	97	88.32	88.36	1	38
	30	9.32	8.87	22.35	43.53	84	97	88.61	88.53	4	32
20 V	**45**	8.88	9.05	31.76	40.00	97	99	87.85	87.87	6	33
	60	9.17	9.54	48.24	45.88	97	97	88.27	88.75	8	30
	90	9.02	9.67	8.24	36.47	99	97	88.55	88.69	11	30

ภาคผนวก ข

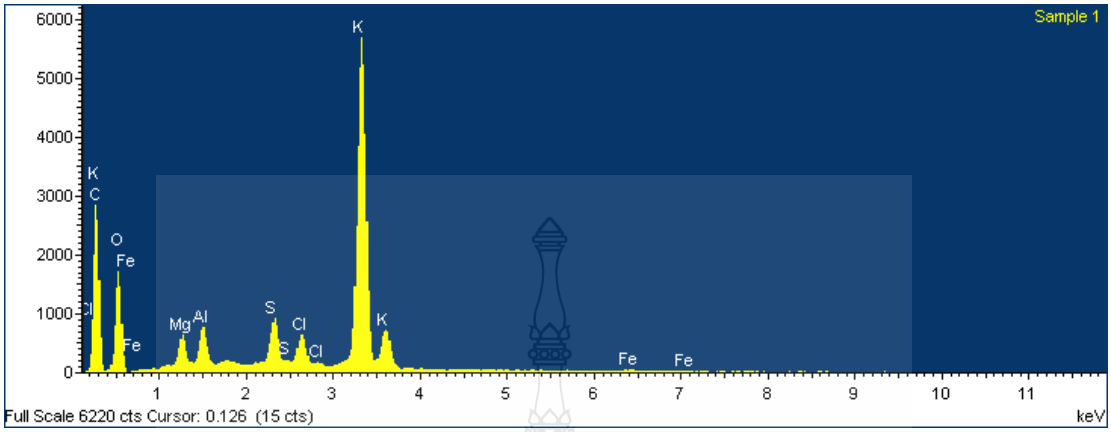
ตารางผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

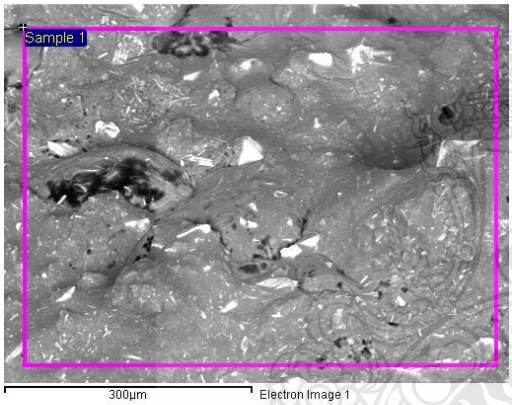
ตารางที่ ข 1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลาในการบำบัด (นาที)	pH		TDS (mg/l)		COD (mg/l)		Phosphate (mg/l)		ammonia (mg/l)	
		Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe	Al – Al	Fe - Fe
	15	8.13	8.62	25,040	13,480	56,000	43,200	20.7	18.8	485	519
	30	9.2	8.75	23,890	16,930	52,000	34,000	15.7	14.6	521	503
10 V	45	8.23	8.76	21,450	17,630	50,400	37,600	4.8	4.2	510	500
	60	8.31	8.88	24,340	15,800	56,800	40,000	20.4	18.8	521	521
	90	8.47	9.02	23,120	18,200	53,600	41,600	20.0	17.9	501	501
	15	8.16	8.62	23,970	13,990	48,800	38,400	0.6	2.2	485	483
	30	8.25	8.82	23,650	17,960	54,400	40,000	17.5	2.3	542	520
15 V	45	8.14	8.92	24,610	17,100	45,600	42,400	13.3	18.5	519	500
	60	9.18	9.04	23,530	17,250	48,800	36,800	34.0	15.4	494	480
	90	8.85	9.27	22,530	14,740	52,800	41,600	11.9	2.4	520	519
	15	9.28	8.67	120,190	15,140	48,000	40,000	44.7	16.7	500	498
	30	9.32	8.87	24,780	16,580	52,800	38,400	86.5	14.7	487	491
20 V	45	8.88	9.05	24,720	16,420	46,400	40,800	19.3	3.6	520	519
	60	9.17	9.54	26,770	17,020	35,200	36,800	15.1	18.4	502	481
	90	9.02	9.67	26,720	17,050	62,400	43,200	3.9	14.8	490	484

ภาคผนวก ค
ผลการส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุ
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป

TARA Business Co.,Ltd. 8/11/2022 8:49:42 AM





Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 5

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM
K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	38.26	51.65
O K	36.58	37.08
Mg K	1.45	0.97
Al K	1.41	0.85
S K	1.90	0.96
Cl K	1.50	0.69
K K	18.64	7.73
Fe K	0.27	0.08
Totals	100.00	

Project Notes:
SEM, micrograph by JEOL Scanning Electron Microscope : SEM model JSM-5410LV and EDS, Element and Chemical Analysis by Oxford Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS model INCA-350 Do SEM Services 24hrs. www.tarabusiness.com

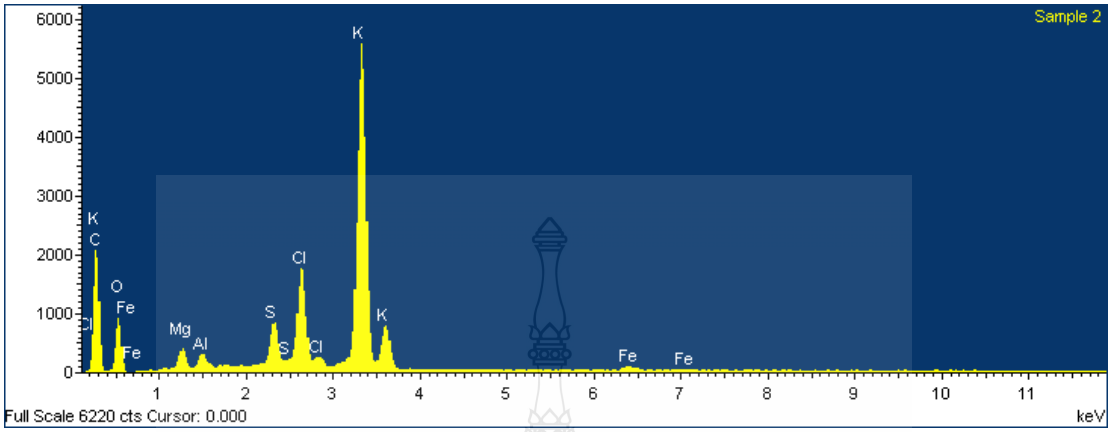
Customer Notes:
TARA Business Co.,Ltd. 35/87 Moo.2 Klongsam, Klong Laung, Pathumtani 12120

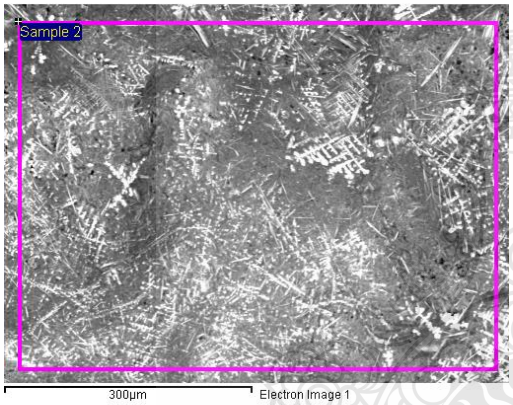
Comment:

ภาพที่ ค 1 ผลการส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป ของการใช้แผ่น Al-Al ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาบำบัด 60 นาที

TARA Business Co.,Ltd.

8/11/2022 8:58:25 AM





Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 6

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM
K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	41.89	58.09
O K	26.69	27.79
Mg K	1.15	0.79
Al K	0.55	0.34
S K	1.97	1.03
Cl K	5.37	2.52
K K	21.65	9.23
Fe K	0.72	0.22
Totals	100.00	

Project Notes:
SEM, micrograph by JEOL Scanning Electron Microscope : SEM model JSM-5410LV and EDS, Element and Chemical Analysis by Oxford Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS model INCA-350 Do SEM Services 24hrs. www.tarabusiness.com

Customer Notes:
TARA Business Co.,Ltd. 35/87 Moo.2 Klongsam, Klong Laung, Pathumtani 12120

Comment:

ภาพที่ ค 2 ผลการส่องหาปริมาณ (%) ของธาตุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป ของการใช้แผ่น Fe-Fe ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ระยะเวลาบำบัด 90 นาที

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นางสาวสุจินันท์ หงษ์สร้อย
วัน เดือน ปีเกิด	11 มกราคม 2540
ที่อยู่	28/350 หมู่ที่ 2 ตำบลคลองสาม อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12150
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	นักวิชาการสิ่งแวดล้อม บริษัท เอส ที เอส กรีน จำกัด พ.ศ.2562 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	096 – 8897206
อีเมล์	sujinana_h@mail.rmutt.ac.th