

การบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์
ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

PHOSPHATE TREATMENT AND CALCIUM PHOSPHATE PRECIPITATION
FROM HUMAN URINE ELECTROCHEMICAL PROCESS

เก่งกาจ จันทร์กวีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์
ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

เก่งกาจ จันทร์กวิภูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์
ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

Phosphate Treatment and Calcium Phosphate Precipitation from
Human Urine Electrochemical Process

ชื่อ - นามสกุล

นายเก่งกาจ จันทร์กวีกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐนียา รังษีสुरิยะชัย, วศ.ด.

ปีการศึกษา

2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(อาจารย์กุลยา สาริชีวิน, วศ.ด.)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ชนากแก้ว, วศ.ด.)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์จรุงวิทย์ บุญไธรัตน์, วศ.ด.)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฐนียา รังษีสुरิยะชัย, วศ.ด.)

กรรมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์, Ph.D.)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
ชื่อ - นามสกุล	นายเก่งกาจ จันทร์กวีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญา รังษีสुरิยะชัย, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

การบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตจากปัสสาวะของมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่สามารถทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้วิธีการบำบัดด้วยไฟฟ้าเคมีจากขั้วอิเล็กโทรดระหว่างอะลูมิเนียม และขั้วอิเล็กโทรดเหล็กโดยใช้สื่อกลางในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเป็นน้ำเสียปัสสาวะสดจากมนุษย์ปราศจากการชำระล้างน้ำ

การทดลองได้ทำการออกแบบสภาวะการทดลองด้วยวิธี Box – Behnken ที่มี 3 ปัจจัยประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าในระบบ (X1) ระยะเวลาในการทดลอง (X2) และระยะห่างระหว่างแผ่นขั้ว (X3) จากผลการทดลองพบว่าขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำ ที่สภาวะขั้วอะลูมิเนียมกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 12 แอมป์ ระยะเวลาการทดลอง 60 นาที และระยะห่างของขั้วอะลูมิเนียมที่ 9 เซนติเมตร ผลการกำจัดฟอสเฟตพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 99.99 และสภาวะของขั้วเหล็กที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 8 แอมป์ ระยะเวลาการทดลอง 30 นาที และระยะห่างของขั้วอะลูมิเนียมที่ 9 เซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 99.37

จากสภาวะที่เหมาะสมได้ทำการนำตัวอย่างผลึกไปตรวจสอบแคลเซียมฟอสเฟตเบื้องต้นจากสัณฐานวิทยาและรูปแบบการวิเคราะห์ความเป็นผลึกบนการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าการบำบัดของขั้วอะลูมิเนียมมีความเป็นไปได้ที่เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (amorphous calcium phosphate : ACP)

คำสำคัญ กระบวนการไฟฟ้าเคมี ขั้วอะลูมิเนียม ขั้วเหล็ก แคลเซียมฟอสเฟต ปัสสาวะมนุษย์

Thesis Title	Phosphate Treatment and Calcium Phosphate Precipitation from Human Urine Electrochemical Process
Name-Surname	Mr. Kengkad Chankawikun
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thaneeya Rangseesuriyachai, Ph.D.
Academic Year	2022

ABSTRACT

Phosphate treatment and calcium phosphate precipitation from human urine by using electrochemical process. The objective was to determine the optimum conditions and efficiency of phosphate removal from human urine with electrochemical processes that can produce calcium phosphate crystals with electrochemical treatment from the electrodes between the aluminum and iron electrodes using electron exchange medium into fresh human urine waste water without purification.

The experimental conditions were designed using the Box-Behnken method with three factors: system current (X1), experiment time (X2), and distance between pole plates (X3). According to the experiment, it was found that the aluminum terminal and iron electrodes are effective for removing phosphate from water at the aluminum electrode conditions up to 12 amps. The experimental duration was 60 minutes, and the distance between aluminum electrodes was 9 cm. The phosphate removal results showed that the removal efficiency was up to 99.99%. In the condition of the iron pole with an electric current of 8 amps, the experimental period of 30 min, and the distance of the aluminum pole at 9 cm, it was found that the phosphate removal efficiency was 99.37%.

In appropriate conditions, crystal samples were taken for initial determination of calcium phosphate based on morphology and X-ray diffraction crystallinity analysis patterns. It was found that the treatment of aluminum electrodes was possible to produce calcium phosphate crystals which is in the form of amorphous calcium phosphate (ACP).

Keywords: electrochemical process, aluminum electrode, iron electrode, calcium phosphate, human urine

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.ฐนินยา รังษีสุริยะชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนข้อมูลเกี่ยวกับการทำโครงการวิจัย วัตถุประสงค์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ทั้งนี้ขอขอบคุณอีกหลายท่านซึ่งมิได้ระบุชื่อในที่นี้ ซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบคุณบุคลากรที่เป็นกำลังใจหลักให้คณะผู้จัดทำมีแรงกายแรงใจจนสามารถทำให้โครงการนี้ผ่านไปได้ด้วยดี และทางผู้จัดทำโครงการหวังอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจมาพอสมควร

เก่งกาจ จันทร์กวีกุล



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขต.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ฟอสฟอรัส.....	15
2.2 แคลเซียมออร์โทฟอสเฟต.....	17
2.3 การตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต.....	17
2.4 กระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	19
2.5 ปัสสาวะมนุษย์.....	21
2.6 การออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง.....	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 แผนงานและขั้นตอนการดำเนินการ.....	33
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.2 การเตรียมชุดการทดลอง.....	34
3.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box – Behnken.....	34
3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์.....	36
3.5 สถานที่ในการทดลองการศึกษา.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	38
4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจริงจากปัสสาวะของมนุษย์.....	38
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยกระบวนการ ตกตะกอนไฟฟ้าเคมี.....	39
4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	51
4.4 สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณฟอสเฟตจากน้ำปัสสาวะ มนุษย์.....	69
4.5 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน (SEM) และกำหนดองค์ประกอบของ ธาตุด้วย X-Ray spectroscopy (EDS).....	73
4.6 การตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต.....	76
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก ก.....	86
ผลการทดลองโดยใช้ข้าวอะลูมิเนียม.....	87
ภาคผนวก ข.....	91
ผลการทดลองโดยใช้ข้าวเหล็ก.....	92
ภาคผนวก ค.....	96
พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	21
ตารางที่ 2.2	สารประกอบที่เลือกในปัสสาวะของมนุษย์ที่มีสุขภาพดี.....	22
ตารางที่ 2.3	ปริมาณฟอสฟอรัสในอุจจาระและปัสสาวะ.....	23
ตารางที่ 3.1	การกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ตารางที่ 3.2	สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	36
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี.....	37
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์ก่อนบำบัด.....	39
ตารางที่ 4.2	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จาก การออกแบบการทดลองแบบ BBD.....	41
ตารางที่ 4.3	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกไป.....	54
ตารางที่ 4.4	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ซีโอดีที่ถูกกำจัดออกไป.....	56
ตารางที่ 4.5	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายใน น้ำที่ถูกกำจัดออกไป.....	58
ตารางที่ 4.6	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป.....	60
ตารางที่ 4.7	การยืนยันแบบจำลองของซั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม.....	61
ตารางที่ 4.8	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกไป.....	63
ตารางที่ 4.9	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ซีโอดีที่ถูกกำจัดออกไป.....	65
ตารางที่ 4.10	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณสารอนินทรีย์และ สารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป.....	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า	
ตารางที่ 4.11	การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณ ของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป.....	69
ตารางที่ 4.12	ช่วงค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทดลอง.....	70
ตารางที่ 4.13	องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะ.....	75
ตารางที่ ก.1	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณซีโอดีจากแผ่นขี้อะลูมิเนียม.....	87
ตารางที่ ก.2	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยจากแผ่นขี้ อะลูมิเนียม.....	88
ตารางที่ ก.3	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยละลายน้ำได้ จากแผ่นขี้อะลูมิเนียม.....	89
ตารางที่ ก.4	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณฟอสเฟตจากแผ่นขี้อะลูมิเนียม.....	90
ตารางที่ ข.1	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณซีโอดีจากแผ่นขี้เหล็ก.....	92
ตารางที่ ข.2	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยจากแผ่นขี้เหล็ก.....	93
ตารางที่ ข.3	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยละลายน้ำได้ จากแผ่นขี้เหล็ก.....	94
ตารางที่ ข.4	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณฟอสเฟตจากแผ่นขี้เหล็ก.....	95

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	วัฏจักรของฟอสฟอรัส..... 15
รูปที่ 2.2	รูปของฟอสฟอรัสและการแตกตัวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ..... 18
รูปที่ 2.3	การถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วอิเล็กโทรดและการสะสมของ ไอออนที่บริเวณผิวหน้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย..... 20
รูปที่ 2.4	ปริมาณธาตุอาหารจากการใช้น้ำของมนุษย์..... 23
รูปที่ 2.5	การปรับเสถียรในการย่อยสลายยูเรีย..... 24
รูปที่ 2.6	พื้นผิวดอบบแบบ 3 มิติ..... 26
รูปที่ 2.7	การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคนแบบสามตัวแปรอิสระ..... 27
รูปที่ 4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม..... 43
รูปที่ 4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต จากแผ่นขั้วเหล็ก..... 44
รูปที่ 4.3	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จากแผ่นขั้วเหล็ก..... 45
รูปที่ 4.4	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม 46
รูปที่ 4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม..... 47
รูปที่ 4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนละลายน้ำได้ จากแผ่น ขั้วอะลูมิเนียม..... 48
รูปที่ 4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย จากแผ่นขั้วเหล็ก..... 49
รูปที่ 4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยละลายน้ำได้ จากแผ่น ขั้วเหล็ก..... 50
รูปที่ 4.9	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณฟอสเฟต ที่ถูกกำจัดออก..... 53
รูปที่ 4.10	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณซีโอดี ที่ถูกกำจัดออก..... 55
รูปที่ 4.11	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออก..... 57
รูปที่ 4.12	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ ของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออก..... 59

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ ฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออก.....	62
รูปที่ 4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ ซีโอดีที่ถูกกำจัดออก.....	64
รูปที่ 4.15 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ สารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออก.....	66
รูปที่ 4.16 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณ ของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออก.....	68
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพปริมาณการกำจัดฟอสเฟตที่สภาวะ ที่ต่างกันจากขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม.....	71
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพปริมาณการกำจัดฟอสเฟตที่สภาวะ ที่ต่างกันจากขั้วอิเล็กโทรดขั้วเหล็ก.....	72
รูปที่ 4.19 รูปพื้นผิวผลึกแคลเซียมฟอสเฟตที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	74
รูปที่ 4.20 แคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน.....	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การขาดแคลนฟอสฟอรัสกำลังเป็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจแบบทุนนิยมก่อให้เกิดการอุปโภคบริโภคที่มากขึ้นรวมถึงจำนวนประชากรที่มากขึ้นด้วย ทำให้ทรัพยากรต่างๆ ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งบางชนิดก็สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้อีกแต่บางชนิดก็ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ ประเทศไทยถือได้ว่าเป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญของโลกจึงมีความต้องการในการใช้ฟอสฟอรัสเป็นจำนวนมาก โดยฟอสฟอรัสถือเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการหมุนเวียนของฟอสฟอรัสในธรรมชาตินั้นจะแตกต่างไปจากธาตุอื่นๆ เนื่องจากฟอสฟอรัสจะไม่มีการหมุนเวียนผ่านรูปแบบที่เป็นแก๊ส ทำให้ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในธรรมชาติมีน้อยมาก การหมุนเวียนของฟอสฟอรัสระหว่างสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิตจึงมีปริมาณที่จำกัด โดยแหล่งผลิตฟอสฟอรัสที่สำคัญมาจากหินที่เรียกว่าหินฟอสเฟต (Phosphate rock) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ โดยมีการประมาณการว่าฟอสฟอรัสที่ใช้ในการเกษตรประมาณร้อยละ 60 มาจากหินฟอสเฟต [1] เนื่องจากหินฟอสเฟตมีธาตุฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืชเป็นองค์ประกอบอยู่ จึงเหมาะสำหรับนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมีฟอสเฟตในทางอุตสาหกรรม และนำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อปุ๋ยเหล่านี้ถูกชะล้างจากพื้นที่เกษตรกรรมลงสู่แหล่งน้ำ ฟอสฟอรัสที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ก็จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำ ทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำตามมา [2]

การกำจัดฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจึงเป็นวิธีการที่ดีในการควบคุมปัญหามลพิษ โดยระบบบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น ระบบตะกอนเร่ง ระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ ระบบบึงประดิษฐ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังคงมีวิธีการในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียก่อนที่จะนำไปบำบัดตามวิธีการทั่วไปโดยสามารถช่วยในการลดภาระการบำบัดฟอสฟอรัสซึ่งมีความยุ่งยากและต้องใช้วิธีการขั้นสูง แล้วยังได้ปุ๋ยฟอสเฟตซึ่งใช้ในการเกษตรได้อีกด้วยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกำจัดฟอสฟอรัสขั้นต้นนี้ วิธีการดังกล่าวได้แก่การตกผลึกฟอสเฟตในรูปของปุ๋ยละลายช้าที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำได้น้อยกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไปและเหมาะกับพืชในการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่า โดยวิธีทั่วไปที่เป็นที่นิยมได้แก่การตกผลึกเป็นปุ๋ยสตรูโวท์ หรือ แมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต แต่อย่างไรก็ตามในการตกผลึกสตรูโวท์จำเป็นต้องเติมแมกนีเซียมเข้าไปเพื่อก่อผลึก MAP ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเนื่องจากในน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีปริมาณของแมกนีเซียมไม่มากพอจะตกผลึกได้เป็นปริมาณมาก [3] นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาในน้ำเสียมักจะโดนสารจำพวกแคลเซียมที่มีปริมาณมากกว่าก่อผลึกกับฟอสเฟตไปก่อนซึ่งมีปุ๋ยอีกชนิดที่เกิดขึ้นและสามารถใช้เป็นปุ๋ยได้เช่นเดียวกับ MAP ได้แก่ แคลเซียมฟอสเฟต (CaP) โดยแคลเซียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่อยู่ในหินฟอสเฟตที่นำมาผลิตเป็นปุ๋ยโดยทั่วไปอยู่แล้ว ซึ่งในแหล่งน้ำโดยทั่วไปรวมถึงน้ำเสียจะมีปริมาณแคลเซียมอยู่มากพอสมควรทำให้ไม่มีความจำเป็นในการเติมแคลเซียมเพื่อจับตัวกับฟอสเฟตกลายเป็นผลึก CaP หรือถ้าจำเป็นต้องเติมแคลเซียมก็มีสารชนิดนี้ที่

อยู่ในธรรมชาติโดยทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้นการกำจัดฟอสเฟตด้วยการตกผลึกเป็น CaP จึงเป็นทางเลือกที่ น่าสนใจในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียอีกวิธีหนึ่ง โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทำการตกผลึก CaP จาก น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำเสียประเภทต่างๆ เช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกรและสัตว์ประเภทอื่นๆ [1], [4], [5], [6] ซึ่งเป็นมูลค่าเพิ่มที่เกิดขึ้นจากการสามารถที่จะกำจัดสารมลพิษในน้ำและได้ประโยชน์ทาง การเกษตรอีกด้วย

การนำของเสียไปใช้ประโยชน์เป็นการมูลค่าให้กับสิ่งที่ไม่ต้องการและยังช่วยลดภาระ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้อีกด้วย โดยในปัจจุบันมีงานวิจัยและศึกษาในเรื่องการนำธาตุอาหารจากของ เสียกลับมาใช้ใหม่ทั้งจากน้ำเสีย ขยะ รวมถึงจากกอกุจจาและปัสสาวะของมนุษย์ จากการศึกษาวิจัย พบว่าในปัสสาวะประกอบไปด้วยไนโตรเจนถึงร้อยละ 90 ฟอสฟอรัสร้อยละ 50-65 และโพแทสเซียม ร้อยละ 50-80 [7] มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำปัสสาวะของมนุษย์มาทำเป็นปุ๋ยที่มี ศักยภาพทางการเกษตรโดยนำมาตกผลึกเป็นปุ๋ยสูตรสูง ซึ่งวิธีที่ใช้หลายวิธี เช่น การตกผลึกทาง เคมี การแลกเปลี่ยนไอออน และการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี เป็นต้น [8], [9], [10] อย่างไรก็ตามยังขาด ข้อมูลในการศึกษาการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะของมนุษย์ด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมีเพื่อ นำไปใช้เป็นปุ๋ย ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยลดการใช้สารเคมีจากแมกนีเซียมซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับ เกษตรกรได้อีกทางหนึ่งด้วย

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียที่มาจากปัสสาวะมนุษย์ โดยการตกผลึกให้เป็นแคลเซียมฟอสเฟต โดยทำการศึกษาค้นคว้าหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของ การกำจัดฟอสเฟตในน้ำปัสสาวะจริงของมนุษย์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยทำการศึกษาโครงสร้าง และรูปแบบของผลึกที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะสามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ทางการเกษตรได้ เพื่อช่วยลดภาระ การบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียและป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่เกิดในแหล่งน้ำจาก ฟอสฟอรัสปริมาณมากในแหล่งน้ำได้ ซึ่งจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้อยู่อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตจากปัสสาวะของมนุษย์ด้วย กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่สามารถทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต

1.3 ขอบเขต

1. ชุดการทดลองเป็นระดับปฏิบัติการ (lab-scale experiment) โดยทำการทดลองด้วยน้ำเสีย จริงจากปัสสาวะของมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วจากวัสดุ สองชนิด ได้แก่ เหล็กและอะลูมิเนียม
2. การหาสภาวะที่เหมาะสมได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา โดยออกแบบการทดลองโดยโดยใช้วิธี พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) และออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design (BBD)

3. ศึกษาโครงสร้างของผลึกและองค์ประกอบของผลึกด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และองค์ประกอบของผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-RAY DIFFRACTION: XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตโดยการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากของเสียของมนุษย์
2. เป็นแนวทางในการลดภาระการบำบัดน้ำเสียด้วยการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียก่อนเข้าระบบโดยได้ปุ๋ยที่สามารถใช้ทางการเกษตรได้ลดการซื้อสารเคมีจากต่างประเทศ



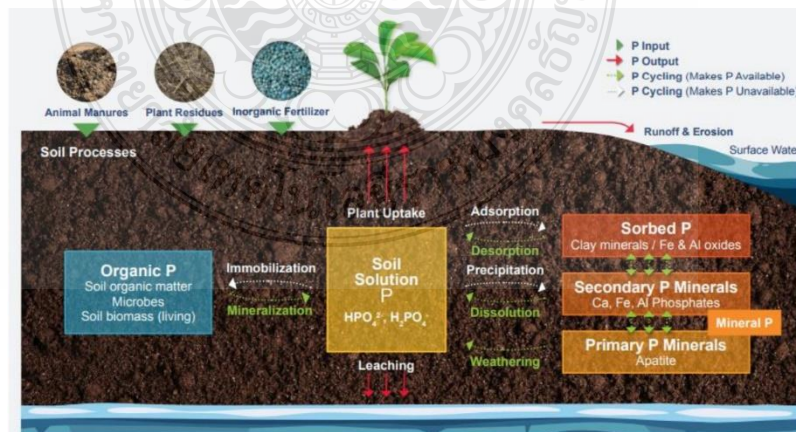
บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม

ในบทนี้เป็นข้อมูลในการศึกษาและค้นคว้าในการบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียม ฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ ฟอสฟอรัส และแคลเซียม ลักษณะต่างๆ ของแคลเซียมฟอสเฟตและปัสสาวะมนุษย์ การออกแบบการ ทดลองด้วยวิธีการฟื้นผิวดอบสนอง ตลอดจนถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ ไฟฟ้าเคมี และงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชเช่นเดียวกับไนโตรเจนและ โปแทสเซียม โดยฟอสฟอรัสถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม macronutrient เพราะพืชต้องการในปริมาณสัมพัทธ์ที่ ค่อนข้างสูงเพื่อใช้ในการกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ของเซลล์พืช เช่น การสังเคราะห์โปรตีนและ กระบวนการถ่ายเทพลังงาน เป็นต้น โดยวัฏจักรฟอสฟอรัสจะเริ่มต้นมาจากฟอสฟอรัสในดิน หรือที่ เรียกว่า หินฟอสเฟต เพราะฟอสฟอรัสที่คงสถานะอยู่บนโลกส่วนใหญ่มาจากแหล่งของหินเป็นหลัก ก่อนที่จะมีการแตกย่อย และปลดปล่อยเป็นฟอสฟอรัสในดิน น้ำ และในพืช และสัตว์ต่อไป โดยหิน ฟอสเฟต หมายถึง หินที่มีองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต หรือ ที่เรียกว่า แร่ฟอสฟอไรต์ (Phosphorites) $[\text{Ca}_3\text{PO}_4]_2$ เป็นหลัก ซึ่งฟอสเฟตมักพบในรูป $\text{Ca}_5[(\text{PO}_4)_3(\text{F})]$ หรือ แร่อะพาไทต์ (Apatite) โดยวัฏจักรฟอสฟอรัสจะมีความแตกต่างกับไนโตรเจนเนื่องจากการคงสภาพของฟอสฟอรัส ในสภาพก๊าซจะเกิดขึ้นน้อยมากในบรรยากาศทำให้พืชไม่สามารถตรึงฟอสฟอรัสได้เช่นเดียวกับ ไนโตรเจน ดังนั้นพืชจะได้รับฟอสฟอรัสจากดินหรือหินเป็นหลัก โดยแสดงรูปวัฏจักรของฟอสฟอรัสดัง รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของฟอสฟอรัส [1]

2.1.1 ฟอสฟอรัสในน้ำ สารประกอบฟอสฟอรัสที่พบในน้ำ สามารถพบได้ในรูปของแข็งหรือสารแขวนลอย และสารละลาย มี 3 ประเภท ดังนี้

- 1) ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรือ ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่ละลายได้ดีในน้ำ จัดเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีความสำคัญต่อแพลงก์ตอนพืชสำหรับนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต
- 2) คอนเดนส์ฟอสเฟต (Condentphosphate) หรือ โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่พบมากในแหล่งน้ำเสียที่มาจากส่วนผสมของสารซักล้าง และทำความสะอาดต่างๆ ทั้งจากครัวเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อแตกตัวจะได้สารออร์โธฟอสเฟตออก
- 3) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) เป็นสารประกอบชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทั้งในพืช และในสัตว์

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปต่างในแหล่งน้ำ และแหล่งน้ำเสียจะถูกแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้สำหรับกระบวนการเจริญเติบโต และการแพร่จำนวน ซึ่งมักพบปรากฏการณ์ที่เกิดจากปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำมากเกินไปที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอชของน้ำเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมคุณสมบัติของสารประกอบฟอสเฟตรวมถึงอุณหภูมิของน้ำด้วย โดยคอนเดนส์ฟอสเฟตสามารถถูกไฮโดรไลซิสเป็นออร์โธฟอสเฟตในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง และพีเอชต่ำ และในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วฟอสเฟตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต การแตกตัวของฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆในน้ำธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับพีเอชของแหล่งน้ำนั้น

2.1.2 ฟอสฟอรัสในสัตว์ และมนุษย์ ฟอสฟอรัสที่พบในร่างกายสัตว์ และมนุษย์จะพบมากเป็นส่วนประกอบของกระดูก และฟัน ซึ่งจะอยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นส่วนใหญ่ รองลงมาจะพบในรูปของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ฟอสโฟโปรตีน กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟลิปิด และเฮกโซสฟอสเฟต ในเนื้อเยื่อต่างๆของร่างกาย

หน้าที่ของฟอสฟอรัสในร่างกาย

- เป็นส่วนประกอบของกระดูก และฟัน
- ช่วยในการดูดซึมวิตามินดี และกระตุ้นการทำงานของวิตามินดีในร่างกาย
- เป็นสารบัฟเฟอร์ รักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างในร่างกาย
- เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก ที่เป็นสารถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรม
- ทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต
- เป็นองค์ประกอบสำคัญในเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับระบบกระแสประสาท
- กระตุ้นการทำงานของน้ำย่อยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน

เมื่อร่างกายสัตว์ และมนุษย์ตายไป และถูกย่อยสลาย ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์ และฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่แทรกตัวอยู่ในดิน และน้ำ ต่อไป

2.2 แคลเซียมออร์โธฟอสเฟต (calcium orthophosphates)

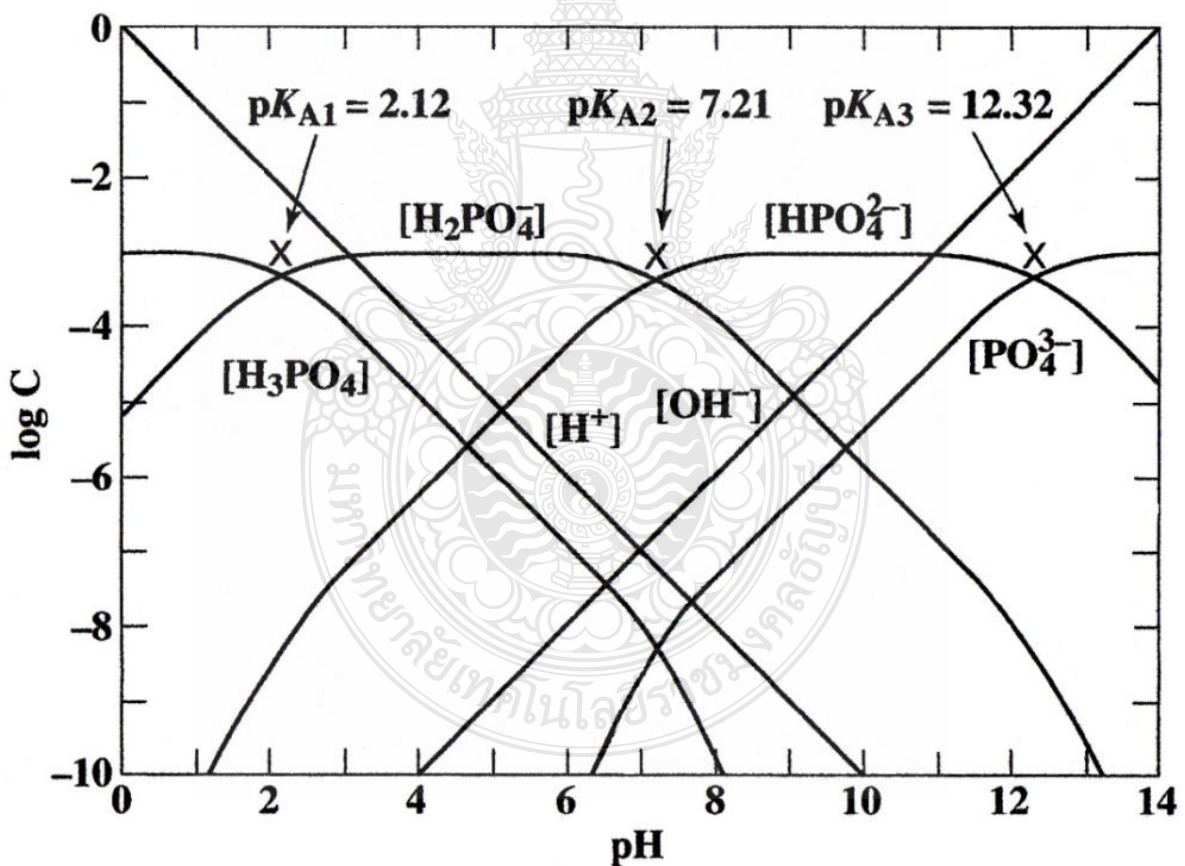
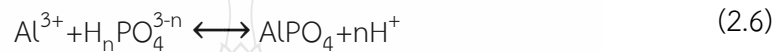
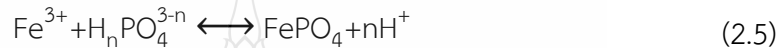
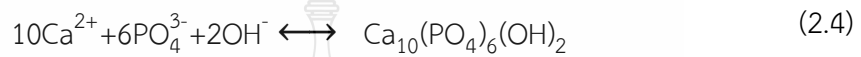
แคลเซียมออร์โธฟอสเฟตประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลักสามประการ: แคลเซียม ฟอสฟอรัส และออกซิเจน โดยเป็นส่วนหนึ่งของไอออนออร์โธฟอสเฟต องค์ประกอบทางเคมีทั้งสามนี้มี อยู่บนพื้นผิวโลกของเราซึ่งออกซิเจนเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่แพร่หลายที่สุดของพื้นผิวโลก (47 %) แคลเซียมอยู่ในอันดับที่ห้า (3.3–3.4 %) และฟอสฟอรัส (0.08–0.12 %) เป็นหนึ่งในกลุ่มแรก องค์ประกอบทางเคมีที่สี่ชนิดที่แพร่หลายมากที่สุดในโลกของเรา นอกจากนี้สารเคมีองค์ประกอบของ แคลเซียมออร์โธฟอสเฟตหลายชนิดรวมถึงไฮโดรเจน ไม่ว่าจะเป็นในรูปของไอออนออร์โธฟอสเฟตที่เป็น กรด (ตัวอย่างเช่น HPO_4^{2-} หรือ H_2PO_4^-) หรือเป็นน้ำที่รวมเข้าไว้ด้วยกัน (ตัวอย่างเช่น $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) การรวมกันของออกไซด์ของแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่หลากหลาย (ทั้งในที่ที่มีน้ำและไม่มีน้ำ) ให้ แคลเซียมฟอสเฟตที่หลากหลาย ซึ่งจำแนกตามประเภทของไอออนฟอสเฟต : ortho- (PO_4^{3-}), meta- (PO_3^-), pyro- ($\text{P}_2\text{PO}_7^{4-}$) และ poly- ($(\text{PO}_3)_n^-$) ในกรณีของประจุลบที่มีหลายประจุ (ออร์โธฟอสเฟต และไพโรฟอสเฟต) แคลเซียมฟอสเฟตจะมีความแตกต่างกันด้วยจำนวนไฮโดรเจนไอออนที่ติดอยู่กับ ประจุลบ ตัวอย่าง ได้แก่ mono- ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), di- (CaHPO_4), tri- ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และ tetra- ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) แคลเซียม ฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการพิจารณาเฉพาะแคลเซียมออร์โธฟอสเฟตและ การจัดเรียงอะตอมของแคลเซียมออร์โธฟอสเฟตถูกสร้างขึ้นรอบ ๆ เครือข่ายของกลุ่มออร์โธฟอสเฟต (PO_4) ซึ่งทำให้โครงสร้างทั้งหมดมีความเสถียร แคลเซียมออร์โธฟอสเฟตส่วนใหญ่ละลายได้น้อยในน้ำ อย่างไรก็ตามทั้งหมดสามารถละลายได้ง่ายในกรด แต่ไม่ละลายในสารละลายอัลคาไลน์ แคลเซียมออร์โธ ฟอสเฟตบริสุทธิ์ในทางเคมีทั้งหมดจะเป็นผลึกสีขาว และมีความแข็งปานกลาง อย่างไรก็ตาม แร่ธาตุ ธรรมชาติของแคลเซียมออร์โธฟอสเฟตมักจะมีสีเนื่องจากสิ่งเจือปนที่แพร่หลายที่สุดคือไอออนของธาตุ เหล็กและธาตุหายาก แคลเซียมออร์โธฟอสเฟตที่ก่อตัวทางชีวภาพเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อที่ กลายเป็นหินของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทั้งหมด ในขณะที่แคลเซียมออร์โธฟอสเฟตตามธรรมชาติเป็น วัสดุดิบหลักสำหรับปุ๋ยที่มีฟอสฟอรัส[40]

2.3 การตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (CaP precipitation)

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำรูปต่างๆ แตกตัวเป็นไอออนของกรดออร์โธฟอสฟอริกดังแสดงใน สมการที่ (2.1)-(2.3) ในช่วงพีเอช 0-2 จะพบในรูป H_3PO_4 ช่วงพีเอช 2-7 จะพบในรูป H_2PO_4^- ช่วงพี เอช 7-12 จะพบในรูป HPO_4^{2-} และช่วงพีเอช 12-14 จะพบในรูป PO_4^{3-}



การเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนของฟอสฟอรัสกับโลหะจำพวก แคลเซียม (Ca^{2+}) เหล็ก (Fe^{3+}) และอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะขึ้นอยู่กับพีเอช โดยช่วงพีเอช 5-7 จะทำปฏิกิริยากับแมงกานีส เหล็ก และอะลูมิเนียม ส่วนช่วงพีเอช 7-10 จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอน แคลเซียมและแมกนีเซียม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และมีสมการการเกิดปฏิกิริยาที่ (2.4) (2.5) และ (2.6) โดยอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยากับฟอสเฟต ในรูป Hydroxylapatite เหล็กเกิดในรูปเฟอรัสฟอสเฟตและแคลเซียมเกิดในรูปแคลเซียมฟอสเฟต ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 รูปของฟอสฟอรัสและการแตกตัวที่ระดับพีเอชต่าง ๆ [39]

ข้อดีและข้อเสียของปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟต [39]

ข้อดี

- กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย
- ผลิตภัณฑ์ที่ได้แคลเซียมฟอสเฟตหรืออะพาไทท์ สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยและเป็นวัตถุเติมในการผลิตปุ๋ย
- ไม่ต้องคำนึงถึงสิ่งเจือปนและโลหะหนักในน้ำเสีย
- การขนส่งทำได้สะดวก เนื่องจากอยู่ในรูปตะกอนผลึก
- ลดการปนเปื้อนของธาตุอาหารลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ

ข้อเสีย

- เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีแคลเซียมและฟอสเฟต
- ค่าใช้จ่ายจากการเติมสารเคมี
- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบและถังปฏิกรณ์
- ต้องการการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการตกผลึก

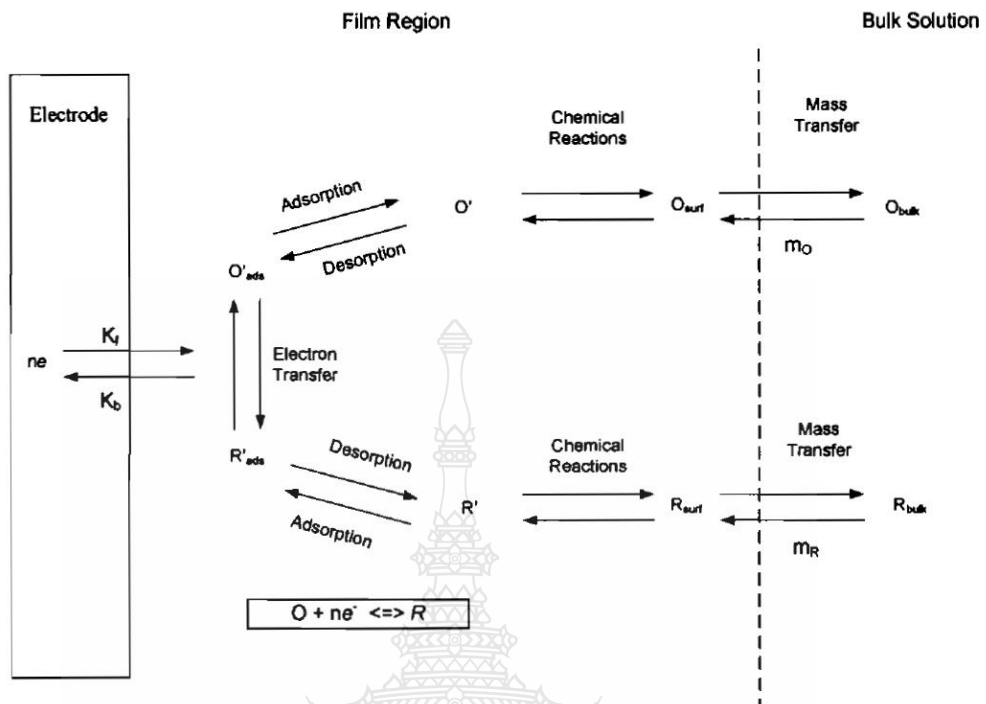
2.4 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเคมี เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมี การใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายรูปแบบรวมถึงการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อตกตะกอนหรือตกผลึกของสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ เช่น โลหะหนัก ธาตุอาหาร เป็นต้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ปฏิกิริยานี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของสาร ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสามารถแยกออกเป็นปฏิกิริยาย่อยได้ 2 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาย่อยเรียกว่า ครึ่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนจะเรียกว่า เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งถ้าปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน จะเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งต้องเกิดขึ้นในสารละลายที่เรียกว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าได้เนื่องจากมีไอออนเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลาย การเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นโดยผ่านอุปกรณ์ที่สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์แล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น เรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) โดยปกติในเซลล์ไฟฟ้าที่นิยมใช้โดยทั่วไปจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วเสมอ ได้แก่ [8]

- 1) ขั้วแอโนด (Anode) คือขั้วที่เกิดออกซิเดชัน หรือ ขั้วบวก
- 2) ขั้วแคโทด (Cathode) คือขั้วที่เกิดรีดักชัน หรือ ขั้วลบ

และส่วนประกอบที่สำคัญของอิเล็กโทรไลต์เซลล์ (Electrolytic Cell) ประกอบด้วย

- 1) แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก
- 2) ขั้วไฟฟ้า
- 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วอิเล็กโทรดและการสะสมของไอออนที่บริเวณผิวหน้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

- 1) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)
- 2) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
- 3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- 4) อุณหภูมิ (Temperature)
- 5) อิเล็กโทรด (Electrode)

ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี [8]

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none">— เป็นระบบที่ง่ายต่อการเดินระบบและบำรุงรักษา ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย ไม่จำเป็นต้องบุคลากรที่เชี่ยวชาญในการดูแลระบบ และใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อย	<ul style="list-style-type: none">— ขั้วโลหะจะมีการสึกกร่อนเมื่อใช้ไปในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่าย และต้องใช้แรงงานในการเปลี่ยนขั้วโลหะ และอาจไม่ปลอดภัยเมื่อเป็นน้ำเสียที่มีเชื้อโรคหรือการกัดกร่อนมาก
<ul style="list-style-type: none">— ไม่ต้องใช้สารเคมี ทำให้ไม่ต้องปรับสภาพหลังการบำบัด	<ul style="list-style-type: none">— ระบบนี้จำเป็นต้องมีค่าการนำไฟฟ้าที่เพียงพอ
<ul style="list-style-type: none">— ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะดันตะกอนให้ลอยขึ้นมา ด้านบนทำให้กำจัดตะกอนได้ง่าย	
<ul style="list-style-type: none">— Floc ที่เกิดขึ้นเป็นส่วนประกอบของออกไซด์/ไฮดรอกไซด์ของโลหะ มีขนาดใหญ่ มีความเสถียร สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย	
<ul style="list-style-type: none">— น้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีค่า TDS น้อย เนื่องจากไม่ต้องมีการเติมสารเคมี ทำให้ต้นทุนในการบำบัดน้อย	
<ul style="list-style-type: none">— สนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่เร็วยิ่งขึ้น เกิดการรวมตัวมากขึ้น เป็นประโยชน์ในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กมากๆ	

2.5 ปัสสาวะมนุษย์

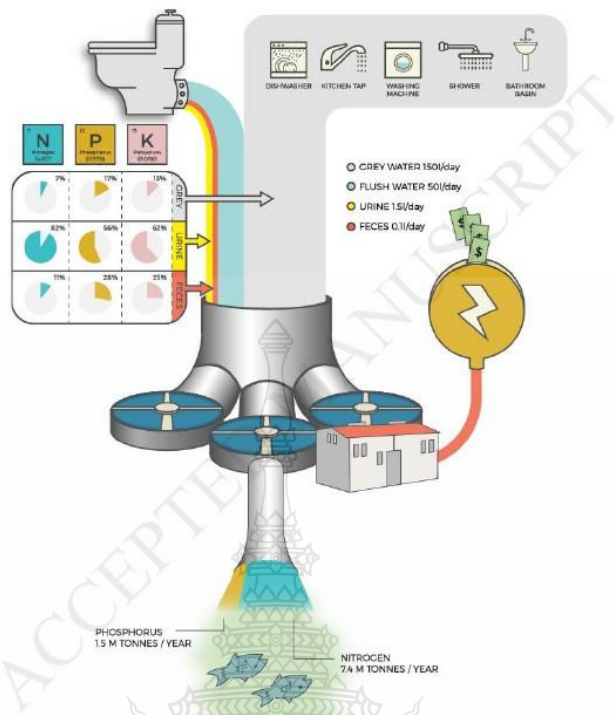
ปัสสาวะของมนุษย์เป็นของเหลวที่ไตหลั่งออกมาโดยรวมไว้ภายในกระเพาะปัสสาวะและขับออกทางท่อปัสสาวะ โดยในปัสสาวะที่ขับถ่ายออกมาจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 91-96 ซึ่งขึ้นอยู่กับร่างกายและสภาพของของเหลวในร่างกายแต่ละบุคคล น้ำหนักตัว สภาพแวดล้อม อาหารที่กิน และอายุ โดยที่เกลือจะประกอบไปด้วยเกลืออนินทรีย์ ได้แก่ เกลือของไอออนบวก (Cation) เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} และเกลือของไอออนลบ (Anion) เช่น Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- เป็นต้น ยูเรีย สารประกอบอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยในแต่ละวันมนุษย์จะขับถ่ายปัสสาวะออกมาประมาณ 0.6-2.6 ลิตรต่อคนต่อวัน น้ำหนักของปัสสาวะแห้งวัดได้ประมาณ 4.7-10.4 กรัมต่อลิตร โดยเป็นปริมาณของแข็งแขวนลอยประมาณ 21 มิลลิกรัมต่อลิตร และของแข็งละลายน้ำ 31.4 มิลลิกรัมต่อกรัม สารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบระหว่างร้อยละ 65 ถึง 85 ของของแข็งแห้งในปัสสาวะโดยประกอบไปด้วยของแข็งที่ระเหยได้ประมาณร้อยละ 75-85 ของของแข็งทั้งหมด (TS) [37]

โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มักจะพบในปัสสาวะสดอยู่ระหว่าง 6-7 และเมื่อเก็บไว้ใน อุณหภูมิห้องจะมีความเป็นด่างมากขึ้นโดยมีค่าประมาณ 9 โดยเกิดจากกระบวนการยูเรียไฮโดรไลซิส (urea hydrolysis) และในปัสสาวะจะพบโลหะหนักได้เช่นกันแต่จะมีปริมาณน้อยกว่าที่พบในอุจจาระ [34] โดยแสดงส่วนประกอบของสารต่างๆ ที่อยู่ในปัสสาวะของมนุษย์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่เลือกในปัสสาวะของมนุษย์ที่มีสุขภาพดี[39]

คุณสมบัติและ ส่วนประกอบ	น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/ โมล)	ช่วงค่าในมนุษย์ (อ้างอิงตามอายุในหน่วยปี)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)		4.5-8.0
ยูเรีย (CH ₄ N ₂ O)	60.06	10-35 g/d (ทุกวัย)
โซเดียม (Na ⁺)	22.99	41-227 mmol/d (ทุกวัย)
โพแทสเซียม (K ⁺)	39.10	17-77 mmol/d (ทุกวัย)
แอมโมเนียม (NH ₄ ⁺)	18.05	15-56 mmol/d (18-77)
แคลเซียม (Ca ²⁺)	40.08	เพศชาย: <250 mg/d เพศหญิง: <200 mg/d (18-77)
แมกนีเซียม (Mg ²⁺)	24.31	51-269 mg/d (18-83)
คลอไรด์ (Cl ⁻)	35.45	40-224 mmol/d (ทุกวัย)
ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	96.06	7-47 mmol/d (ทุกวัย)
ฟอสเฟต (PO ₄ ²⁻)	94.97	20-50 mmol/d (>18)
ออกซาเลต (C ₂ O ₄ ²⁻)	88.02	0.11-0.46 mmol/d (ทุกวัย)

น้ำเสียจากปัสสาวะของมนุษย์มีสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 1 ของปริมาณน้ำเสียทั้งหมด โดยปัสสาวะของมนุษย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากมีธาตุอาหารที่สำคัญอยู่ โดยการแยกน้ำเสียจากปัสสาวะจะทำให้ง่ายต่อการจัดการน้ำเสีย ซึ่งปริมาณธาตุอาหารจากห้องส้วมที่เกิดขึ้นและปริมาณธาตุอาหารจากการใช้น้ำของมนุษย์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปริมาณธาตุอาหารจากการใช้น้ำของมนุษย์

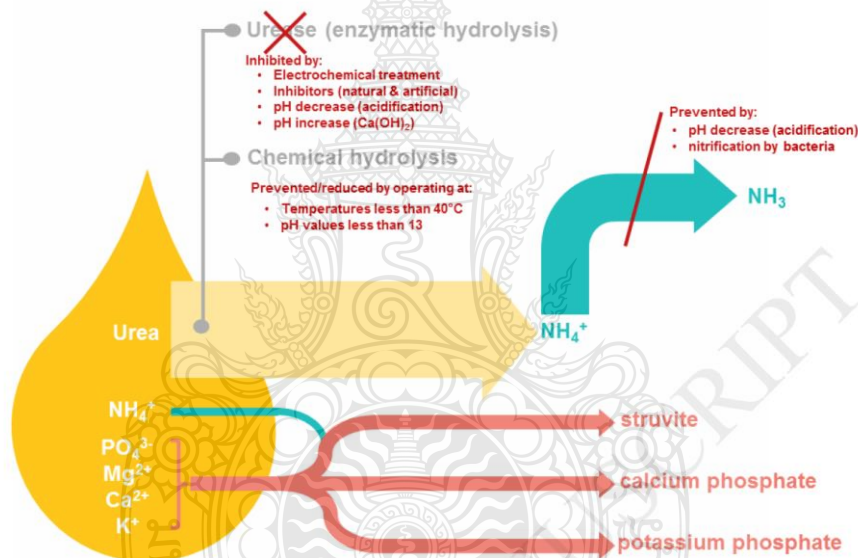
มีการคาดการณ์ในปี พ.ศ. 2554 พบว่าฟอสฟอรัสจากปัสสาวะและอุจจาระของมนุษย์เพียงอย่างเดียวสามารถให้ปริมาณฟอสฟอรัสได้ถึงร้อยละ 22 ของความต้องการ P ทั่วโลก โดยตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสที่มีการคาดการณ์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ได้แก่อุจจาระและปัสสาวะในเขตเมืองและชนบทของโลกในปี 2552 และ 2593 (ประมาณ 50% ของฟอสฟอรัสอยู่ในปัสสาวะของสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ดังนั้นมวลของฟอสฟอรัสในอุจจาระจะเท่ากับมวลที่ระบุไว้ในปัสสาวะ) [30]

ตารางที่ 2.3 ปริมาณฟอสฟอรัสในอุจจาระและปัสสาวะในเขตเมืองและชนบทของโลกในปี 2552 และ คาดการณ์ในปี 2593

ปี พ.ศ.	พื้นที่	ฟอสฟอรัสทั้งหมดใน อุจจาระ (เมตริกตัน)	ฟอสฟอรัสทั้งหมดใน ปัสสาวะ (เมตริกตัน)
2552	ทั้งหมด	3,358,048	1,678,744
	เขตเมือง	1,755,942	877,691
	ชนบท	1,601,546	800,493
2593	ทั้งหมด	4,329,417	2,164,429
	เขตเมือง	3,055,623	1,527,532
	ชนบท	1,273,234	636,337

นอกจากนี้ยังมีวิธีการในการนำกลับของเสียมาใช้ใหม่จากปัสสาวะของมนุษย์มีด้วยกันหลายวิธี ทั้งระบบที่ตั้งอยู่ในที่และแบบรวบรวมน้ำเสียมาบำบัดยังระบบบำบัดส่วนกลาง โดยมีกระบวนการที่ใช้ในการนำของเสียที่เป็นธาตุอาหารหลักที่อยู่ในปัสสาวะมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การปรับเสถียร การทำชั้น การตกผลึก เป็นต้น อาทิเช่น[33]

- การปรับเสถียรในการย่อยสลายยูเรีย (Stabilization for urea hydrolysis)
- การทำชั้นปัสสาวะ (Urine concentration) ยูเรียมีความสามารถในการละลายสูง โดยพบว่าในปัสสาวะก่อนจะนำไปทำการตกผลึกจำเป็นต้องกำจัดน้ำออกถึงร้อยละ 98 โดยวิธีการที่ง่ายและประหยัดได้แก่การระเหยน้ำออกด้วยแสงอาทิตย์
- การนำไนโตรเจนกลับมาใช้ใหม่ (Nitrogen recovery)
- การนำฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมกลับมาใช้ใหม่ (Phosphorus and potassium recovery)



รูปที่ 2.5 การปรับเสถียรในการย่อยสลายยูเรีย

กลไกในการนำกลับผลิตภัณฑ์ของแข็งจากฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากปัสสาวะโดยทั่วไปคือการตกผลึกด้วยการปรับ pH เพื่อให้เกิดผลึกที่แตกต่างกันด้วยถึงหลายรูปแบบ เช่น ถึงปฏิกิริยาฟลูอิดไรต์ เบด ถึงตกตะกอนไฟฟ้าเคมี และถึงตกตะกอนแบบธรรมดาทั่วไป ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีวิธีการใหม่ๆ ในการนำกลับธาตุอาหารเหล่านี้ เช่น เมมเบรนการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับปฏิกิริยาไฟฟ้าชีวภาพ และกระบวนการร่วมระหว่างเมมเบรนและออสโมซิส เป็นต้น เพื่อให้เกิดผลึกสตรูไวท์

2.6 การออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface design)

ในการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสำหรับการบำบัดน้ำปัสสาวะมนุษย์โดยการใช้ขี้ไฟฟ้าเคมีนั้น จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทดลอง และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงคณิตศาสตร์ และสถิติเพื่อให้ได้มาเพื่อข้อสรุปที่มีความสมเหตุสมผล อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลมาออกแบบสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematic model) สำหรับใช้ในการทำนายผลลัพธ์ในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายท่านนิยมใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาหาสภาวะและประสิทธิภาพในการทดลองในหลากหลายท่าน การใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการทดลองเพื่อสภาวะที่เหมาะสมได้ใช้วิธีการแบบบ็อก - เบห์นเคน และได้สร้างสมการคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการทำนายปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัด

2.6.1 พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) วิธีการแสดงผลของการตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่ถือว่ามีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา เนื่องจากสามารถสร้างรูปแบบการทดสอบโดยผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ (independent variables) ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการหาจุดที่มีความเหมาะสม (optimization) ต่อผลลัพธ์ที่ได้ และในการนำเสนอในรูปแบบของผลลัพธ์พื้นที่ผิวตอบสนอง ยังคงมีการออกแบบการทดลองที่ค่อนข้างเหมาะสม โดยการทดลองนั้นจำเป็นต้องอาศัยตัวแปรอิสระ ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป และมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัว ที่เป็นเชิงปริมาณ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองที่มักจะนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบนั้นได้แก่ Box – Behnken Design, Factorial Design, Composite Design ซึ่งข้อมูลของตัวแปรอิสระนั้นจะสัมพันธ์กับข้อมูลของผลลัพธ์ และสามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองในทางคณิตศาสตร์ ในด้านการทำนายผล หรือกระบวนการทดลองให้มีความเหมาะสมได้[2]

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.7)$$

โดยกำหนดปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ϵ คือค่าความผิดพลาดของผลลัพธ์ของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.8)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ซึ่งการแสดงพื้นผิวจะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อใช้ในการมองเห็นลักษณะของพื้นผิวได้มากขึ้น ในการพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลลัพธ์ แต่ปัญหาคือจะไม่ทราบว่าจะถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์กับตัวแปรอิสระ

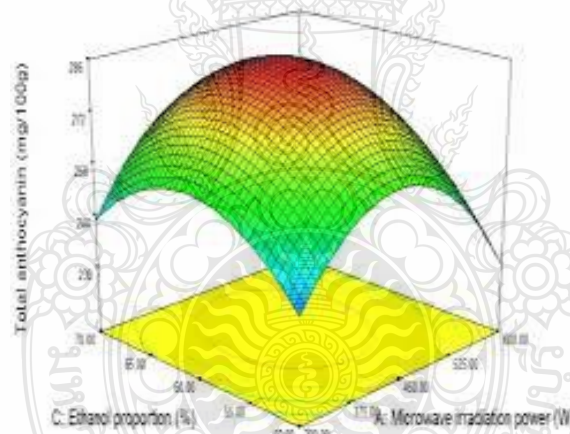
ซึ่งในขั้นตอนแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่สามารถใช้เป็นตัวแทนสำหรับการแสดงความสัมพันธ์แท้จริงระหว่าง y และตัวแปรอิสระ จากสมการที่ 2.9 แบบจำลองของผลลัพธ์ที่ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันกำลังหนึ่งที่ใช้เป็นแบบจำลอง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.9)$$

แต่ถ้าความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งจะต้องใช้ฟังก์ชันแบบกำลังสองที่สูงขึ้น ดังสมการที่ 2.10

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.10)$$

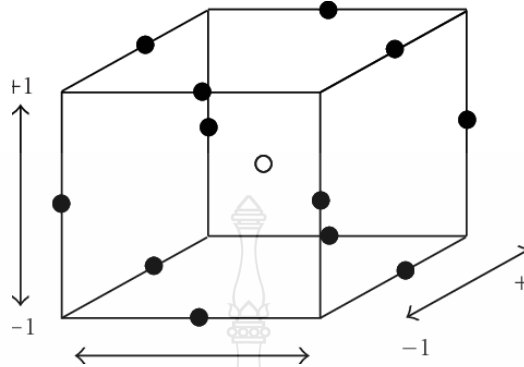
นอกจากนี้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับวิธีการที่ซับซ้อน ของพื้นผิวตอบสนอง ทำให้ง่ายในการอธิบายผลมากกว่าวิธีอื่น[12] ซึ่งจะสามารถช่วยลดจำนวนของชุดทดลองที่ใช้ในการประเมินตัวแปรได้หลายตัว รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรนั้น และช่วยประหยัดเวลาได้มากกว่าวิธีอื่นที่ต้องการสถานะที่เหมาะสม



รูปที่ 2.6 พื้นผิวตอบแบบ 3 มิติ

2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคน (Box - Behnken experimental design) การออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำไปใช้การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ในทางสถิติให้ได้ข้อสรุปของผลลัพธ์ที่มีความสมเหตุสมผล ในการออกแบบการทดลองจะเป็นออกแบบ 3 ปัจจัย เพื่อใช้สำหรับการหาผลลัพธ์ของคำตอบของแบบจำลองกำลังสอง ข้อดีวิธีการนี้คือ การออกแบบมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบเป็นรูปทรงกลมที่ทุกจุดจะวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ ดังรูปที่ 2.7

โดยการออกแบบในรูปแบบนี้จะมีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่มุมของลูกบาศก์จะรวมเอาปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ หรืออาจจะเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากมีข้อจำกัดของการทดลอง[21]



รูปที่ 2.7 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคนแบบสามตัวแปรอิสระ[21]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาในการดูดซับ และค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต และทำการทดสอบการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก[7]

การศึกษากำหนดปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของแคลเซียมฟอสเฟตจากน้ำเสียโดยการบูรณาการด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและการตกผลึก โดยจะทำการแยกไอออนฟอสฟอรัสด้วยเมมเบรนออกมาให้มีความเข้มข้นสูงก่อนที่จะทำการตกผลึก ในการทดลองได้ทำการแบ่งห้องการทำงานของระบบเป็น 4 ห้อง ได้แก่ การล้างอิเล็กโทรด การเติม การเกิดผลิตภัณฑ์ และกระแสน้ำเกลือ โดยประกอบไปด้วยชุดเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุลบสามชั้น (PC-SA), เมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุลบชนิดโมโนโวลเลนต์สามชั้น (PC-MVA) และเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวกสี่ชั้น การทดลองพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยมีประสิทธิภาพในการแยกเกลือออกจากน้ำเสียได้สูงถึงร้อยละ 87 ความเข้มข้นของฟอสเฟตในผลิตภัณฑ์สามารถเข้าถึง 16 mM โดยมีความบริสุทธิ์ 44% นอกจากนี้ในการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตนั้นมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 82.7 ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 [43]

การศึกษากลไกการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของการเคลือบแคลเซียมฟอสเฟตในระบบอิเล็กโทรไลต์ Ca – P แบบเจือจาง โดยในการศึกษาควบคุมพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ได้แก่ อุณหภูมิ ความหนาแน่นของกระแส และระยะเวลา จากการศึกษาการเคลือบสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในอุณหภูมิและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน อุณหภูมิมีผลต่อการตกตะกอน และพลังงานในการทำให้เกิดการตกตะกอนที่ 174.9 kJmol^{-1} ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการก่อตะกอน[20]

จากการศึกษาการใช้ไฟฟ้าเคมีในการตกตะกอนของน้ำเสียสีย้อมผ้า โดยใช้ขั้วเหล็กที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 โวลต์ และกำหนดระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30, 60 และ 90 นาที จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาในการบำบัดที่ 90 นาทีนั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำให้เกิดตะกอนจากการน้ำเสียสีย้อมผ้า [52]

การศึกษาการใช้ขั้วแอโนดและแคโทดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไฟฟ้าเคมีให้ได้ฟอสฟอรัสในรูปแบบของตะกอนของแข็ง โดยควบคุมปัจจัยซึ่งได้แก่ ชนิดของขั้วแผ่นโลหะ ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วแอโนด และแคโทด ค่าพีเอชของน้ำเสีย พื้นที่หน้าตัดของแผ่นขั้ว และกระแสไฟฟ้าในการส่งจ่าย ผลจากการทดลองพบว่าแผ่นโลหะแพตินัมเคลือบด้วยรูเทเนียม ที่ระยะห่างของแผ่นในแกน Y ที่ 3 เซนติเมตร การส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า 28 แอมป์ต่อตารางเมตร นั้นสามารถทำให้เกิดตะกอนของฟอสฟอรัสมากกว่าโลหะชนิดอื่น ในการทดลองนั้นปัจจัยที่ทำให้เกิดตะกอนได้สูงต้องอาศัยการควบคุมค่า พีเอช (pH) ของน้ำเสียระหว่างการทดลอง หากค่าพีเอชนั้นต่ำเกินไปก็สามารถส่งผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบ[26]

การศึกษาเทคโนโลยีการนำของเสียจากน้ำเสียมาใช้ใหม่ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งแร่ธาตุบางชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้นได้ถูกใช้จนหมดไปและไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ การทำเทคโนโลยีไฟฟ้าเคมีสำหรับการคืนสภาพแร่ธาตุนั้นๆจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าใช้ในปัจจุบัน การทำงานและการควบคุมที่ค่อนข้างสะดวกไม่เปลืองการใช้สารเคมี โดยในการคืนสภาพโดยไฟฟ้าเคมีจะใช้กระบวนการรีดอกซ์และการตกตะกอนที่เกิดจากไฟฟ้า[24]

จากการศึกษาการสร้างแบบจำลองและจำลองระบบไฟฟ้าเคมีสำหรับนำธาตุอาหารกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเทคนิคไฟฟ้าในการนำสิ่งปฏิกูล หรือของเสีย นั้นนำมาใช้ใหม่ให้เกิดแหล่งธาตุอาหารอย่างฟอสฟอรัส ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการตกตะกอนของสตรูโวท ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จุดสนใจของงานคือการจำลองพฤติกรรมของ พีเอช (pH), ดัชนีการอิมิตัว และร้อยละการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่บนแผ่นฟิล์มของขั้วคาโทด และสารละลายรวม ซึ่งผลจากการทดลองได้นำผลเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่ผ่านการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี ผลสรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 10 % และในส่วนผลจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีพบว่ามีปริมาณการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 99.6 % [10]

การศึกษาการนำปัสสาวะมนุษย์มาแปลงสภาพให้เป็นปุ๋ย พบว่าปัสสาวะมนุษย์อุดมไปด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชสูงกว่าปัสสาวะของสัตว์ แต่สำหรับการนำไปใช้นั้นยังคงเป็นอุปสรรคในเรื่องของการจัดการแยกธาตุอาหารหลักโดยตรงจากปัสสาวะ ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการนำปัสสาวะมนุษย์มาหมักให้เกิดปุ๋ยโดยการดักสารอาหารที่จำเป็นต่อพืชในปัสสาวะ พบว่าหลังจากทำการหมักปัสสาวะนั้นมีค่าอุณหภูมิที่สูงในช่วง 38-50 C° และค่าพีเอช(pH) อยู่ในค่อนข้างคงที่ในช่วง 7.96 – 8.02 [5]

ในการวิจัยเกี่ยวกับ CaP biomineralization และสารละลายเคมีที่เกี่ยวข้องร่วมกับการศึกษาทางพลศาสตร์ของพื้นผิวผลึกของฟอสเฟตในดินและการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล ในการสร้างแบบจำลองระดับโมเลกุลจะช่วยให้พารามิเตอร์ของจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์มีค่าที่คงตัวและส่งผลให้เกิด CaP ในรูปแบบของสารละลายหรือของแข็งได้ [47]

การศึกษาการนำฟอสฟอรัสกลับคืนโดยการตกผลึกในรูปของสตรูโวไลท์จากสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำแล้ว โดยผ่านการชะละลายด้วยกรด และทำให้ตกผลึกทางเคมี ผลการทดลองพบว่า สลัดจ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรมีปริมาณฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างสูงถึง 13 % โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพการชะละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นที่ 1 โมลาร์ในอัตราส่วนสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม ที่เวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการชะละลายของฟอสฟอรัสที่ 99.9 % และสถานะในการตกผลึกที่มากที่สุดคืออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 จะให้เกิดผลึกที่ 0.4138 กรัมต่อเถ้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม สามารถนำกลับคืนมาใช้ใหม่ได้ถึง 90.16 % และเมื่อใช้การจำลองโดยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 มาใช้ในการคำนวณหาสถานะที่เกิดการตกผลึกได้มากที่สุด ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอช เท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูโวไลท์น้ำหนัก 0.44 กรัมต่อเถ้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม ดังนั้นการชะละลายด้วยกรดและการตกผลึกสตรูโวไลท์สามารถนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[9]

การก่อตัวของลักษณะพื้นผิว ACP บนพื้นผิว Mg ทำได้โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดสองขั้วและอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยสารละลายในน้ำที่มี $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.32 โมลาร์และ KH_2PO_4 0.19 โมลาร์ อิเล็กโทรดที่ใช้ในการตั้งค่าการทดลองนี้ประกอบด้วยตาข่ายลวดแพลตตินัม (แอโนด) และขั้วสเตรต Mg ที่ใช้เป็นแคโทด แหล่งจ่ายไฟ DC สำหรับห้องปฏิบัติการมาตรฐาน [GW INSTEK GPS-2303] ถูกใช้เพื่อจ่ายช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการด้วยความหนาแน่นกระแสสูงสุด 60 mA/cm² ในโหมดไดนามิก การศึกษาได้ดำเนินการในช่วงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2 ถึง 7 โวลต์ และในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 30 วินาที ถึง 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 1 °C มีการปฏิบัติตามขั้นตอนแรงดันไฟฟ้า/เวลาสองขั้นตอน: 1) แรงดันไฟฟ้าคงที่ (6 V) และเวลาผันแปร (30 วินาทีถึง 5 นาที) และ 2) เวลาคงที่ 3 นาทีและแรงดันไฟฟ้าตัวแปร (2 ถึง 7 V) พบว่าทั้งสองขั้นตอนให้ข้อมูลการทดลองเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ หลังจากการทดลองแต่ละครั้ง สารตั้งต้นจะถูกปล่อยออกจากอิเล็ก

โทรไลต์ที่ล้างด้วยน้ำ Milli-Q® แล้วผึ่งลมให้แห้งก่อนจะจัดเก็บพร้อมสำหรับการกำหนดลักษณะเฉพาะ
ชั้นสูง โครงสร้างคล้ายหลอดแคลเซียมฟอสเฟตอสถฐานเกิดขึ้นบนพื้นผิวแมกนีเซียมโดยใช้
กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ตรงไปตรงมา ผลของแรงดันไฟ เวลา และผลการวิวัฒนาการของก๊าซไฮโดรเจน
นั้นพบว่ามีส่วนรับผิดชอบต่อการแกะสลักโครงสร้างคล้ายท่อที่ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมด การสแกนด้วย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและสเปกโทรสโกปีกระจายพลังงานถูกใช้เพื่อหาปริมาณขนาด รูปร่าง
โครงสร้างและองค์ประกอบของโครงสร้างคล้ายหลอด การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ถูกใช้เพื่อ
พัฒนาแบบจำลองเพื่ออธิบายกลไกเบื้องหลังการก่อตัวของโครงสร้างคล้ายหลอด นอกจากนี้ ยังได้ศึกษา
เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้ในการเปลี่ยนโครงสร้างแคลเซียมฟอสเฟตอสถฐานให้เป็นไฮดรอกซีอะพา
ไทต์ ทั้ง X-ray diffraction spectroscopy และ Fourier Transform Infrared spectroscopy ถูกใช้
เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของกระบวนการแปลง [48]

ในบทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของสารอินทรีย์ธรรมชาติ และผลกระทบต่อการตกตะกอน
ของ CaP ตรงกันข้ามกับการศึกษาที่สารอินทรีย์ธรรมชาติ ชัดขวางการตกตะกอนของ CaP ผลลัพธ์
แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันของสารอินทรีย์ธรรมชาติ กับ CaP ช่วยการกำจัดฟอสเฟต โดยไม่
ขึ้นอยู่กับประเภทของสารอินทรีย์ การกำจัดฟอสเฟตที่ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $43.8 \pm 4.9\%$ เป็น $58.5 \pm$
 1.2% เมื่อมี 1.0 มก. L 1 สารอินทรีย์ธรรมชาติขึ้นอยู่กับสีเหลืองของผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์ธรรมชาติ
CaP จะตกตะกอนร่วม pH ของสารละลายและไม่มีบัฟเฟอร์ ซึ่งมีผลแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงต่อ
กระบวนการตกตะกอน หากไม่มีบัฟเฟอร์ CaP จะตกตะกอนบนพื้นผิวแคโทดในช่วง pH กว้าง (pH 4.0
- 10.0) อย่างไรก็ตาม กระบวนการตกตะกอนจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์เมื่อสารละลายจำนวนมากถูก
บัฟเฟอร์ที่ pH 4.0 และ 6.0 นี่อาจเป็นเพราะการทำให้เป็นกลางของไอออน โดยบัฟเฟอร์ ไม่ว่าจะจะมี
หรือไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ และ pH ของสารละลาย ผลิตภัณฑ์ที่กู้คืนส่วนใหญ่จะเป็น CaP ที่ไม่เป็น
รูปเป็นร่าง เว้นแต่เวลาอิเล็กโทรลิซิสจะเพิ่มขึ้นเป็น 7 วันด้วย ซึ่ง CaP ที่เป็นผลึกก่อตัวขึ้น การค้นพบนี้
ช่วยพัฒนาความเข้าใจของเราเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ของสปีชีส์ Ca, ฟอสเฟต และ สารอินทรีย์ธรรมชาติ
สำหรับการประยุกต์ใช้วิธีเคมีไฟฟ้าสำหรับการกู้คืนฟอสเฟตจากน้ำเสียจริง [28]

จากการศึกษาการเกิดอะพาไทต์บนพื้นผิวไททาเนียมด้วยไฟฟ้าเคมี การสะสมในสารละลาย
แคลเซียมฟอสเฟตที่แพร่กระจายได้ อิเล็กโทรดที่ใช้งานคือไททาเนียมบริสุทธิ์ขนาด 15 มม. · 10 มม. ·
1.0 มม. และอิเล็กโทรดที่เป็นเพลทแพลตตินัม 20 มม. · 10 มม. · ขนาด 0.2 มม. ระยะห่างระหว่าง
อิเล็กโทรดทำงานและอิเล็กโทรดเคาน์เตอร์ตั้งไว้ที่ 3 ซม. พื้นผิวของพื้นผิวไททาเนียมถูกขัดเงาโดยใช้
แผ่นเพชร เบอร์ 400 เพื่อขจัดชั้นออกไซด์แบบพาสซีฟ เราใช้อิเล็กโทรไลต์สองชนิดในการศึกษานี้ ทำ
ให้เกิดชั้นอะพาไทต์ขึ้นบนพื้นผิวไททาเนียมได้สำเร็จโดยการสะสมด้วยไฟฟ้าเคมีในสารละลายแคลเซียม
ฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งมีความเข้มข้นของไอออน 1.5 เท่าของของเหลวในร่างกายที่จำลองตามปกติ แต่
ไม่มี $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่ 41 C เป็นเวลา 40 หรือ 60 นาทีที่ 13 ม. พบว่าแมกนีเซียมไม่ได้ยับยั้งการดูดซับ
แคลเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน แต่ยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมฟอสเฟตอสถฐานเป็น
ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ กระแสไฟฟ้าไม่มีผลกระทบอย่างมากต่อขนาดผลึกของอะพาไทต์ แต่ความหนา

ของชั้นอะพาไทต์สามารถควบคุมได้โดยสภาวะการสะสม เช่น อุณหภูมิอิเล็กโทรไลต์ กระแส และเวลาสะสม คาดว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีจะเป็นประโยชน์ในกระบวนการเคลือบอะพาไทต์อย่างรวดเร็วสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ [31]

จากการศึกษาการนำระบบไฟฟ้าเคมีที่ปราศจากเมมเบรนที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดและกู้คืน P เป็นแคลเซียมฟอสเฟต (CaP) วิธีนี้อาศัยการก่อตัวของไฮดรอกไซด์ไอออนในแหล่งกำเนิดโดยการลดน้ำด้วยไฟฟ้าที่พื้นผิวแคโทดไททาเนียม ค่า pH ในแหล่งกำเนิดที่เพิ่มขึ้นที่แคโทดให้สภาพแวดล้อมในท้องถิ่นที่ CaP จะมีความอิ่มตัวสูง ดังนั้นนิวเคลียสที่เป็นเนื้อเดียวกันและต่างกันของ CaP เกิดขึ้นใกล้และที่พื้นผิวแคโทด เนื่องจากค่า pH สูงในน้ำเสีย ลักษณะการกำจัดฟอสเฟต จึงไม่ไวต่อ pH ของสารละลายจำนวนมาก ดังนั้น การกำจัดฟอสเฟตอย่างมีประสิทธิภาพจึงถูกสังเกตพบในสารละลายที่มีค่า pH 4.0 (56.1%), 8.2 (57.4%) และ 10.0 (48.4 %) หลังจากเวลาตอบสนอง 24 ชั่วโมง แม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต จะไม่ได้รับผลกระทบจาก pH ของสารละลายจำนวนมาก แต่คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของของแข็ง CaP ที่เก็บรวบรวมบนแคโทดยังคงเกี่ยวข้องกับค่า pH ของสารละลาย และได้รับการยืนยันโดยการกำหนดลักษณะโครงสร้าง ค่า pH ของสารละลายตั้งต้นที่สูง จะส่งเสริมการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลึกมากขึ้นด้วยอัตราส่วน Ca/P โมลาร์ที่ค่อนข้างสูง อัตราส่วนโมลาร์ Ca/P เพิ่มขึ้นจาก 1.30 (pH 4.0) เป็น 1.38 (pH 8.2) และเพิ่มขึ้นอีกเป็น 1.55 (pH 10.0) การก่อตัวของตะกอน CaP เป็นกระบวนการตกผลึกโดยทั่วไป โดยมีเฟสอสัณฐานเกิดขึ้นในระยะเริ่มแรก จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นเฟสผลึกที่เสถียรที่สุด นั่นคือไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งอนุมานจากอัตราส่วน Ca/P โมลาร์ที่เพิ่มขึ้นจาก 1.38 (วันที่ 1) เป็นไปตามทฤษฎี 1.76 (วันที่ 11) และโดยการก่อตัวของผลึกคล้ายเข็ม ประสิทธิภาพของระบบนี้สำหรับน้ำเสียจริง พบว่าวิธีทางเคมีไฟฟ้าสามารถทำงานที่ pH เป็นกลุ่มต่ำ โดยไม่ต้องใช้สารเคมีและไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการแยก เน้นที่การประยุกต์ใช้วิธีการไฟฟ้าเคมีสำหรับการกำจัดและการกู้คืนฟอสเฟตได้ [51]

ในการกำจัดและกู้คืนฟอสฟอรัสจากไนโตรโลทริส (กรดเมทิลีนฟอสโฟนิก) (NTMP) พร้อมกันโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี พบว่า CeN และพันธะ CeP ของ NTMP ถูกแยกออกที่ขั้วบวก ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของออร์โธฟอสเฟตและกรดฟอริก ในขณะที่เดียวกันออร์โธฟอสเฟตที่บำบัดแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนที่อยู่ร่วมกันและตกตะกอนบนแคโทดเป็นของแข็งแคลเซียมฟอสเฟตที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากบริเวณ pH สูงที่เกิดจากไฟฟ้าเคมีใกล้กับแคโทด การกำจัดด้วยไฟฟ้าเคมีของ NTMP (30 มก./ลิตร) มีประสิทธิภาพมากกว่าน้ำทิ้งของโรงบำบัดน้ำเสีย (89% ใน 24 ชั่วโมง) มากกว่าการให้การยับยั้งกับสารละลายสังเคราะห์ 1.0 mM Ca และ 50 mM Na₂SO₄ (43% ใน 168 ชั่วโมง) ในขณะที่ใช้ความหนาแน่นกระแส 28 A/m² และใช้ Pt anode และ Ti cathode ประสิทธิภาพการกำจัด NTMP ที่สูงขึ้นในน้ำเสียจริงเกิดจากการมีคลอไรด์ไอออน ซึ่งส่งผลให้เกิดคลอรีนแบบขั้วบวก การศึกษานี้กำหนดแนวทางขั้นตอนเดียวสำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสและการกู้คืนแคลเซียมฟอสเฟตจากสารที่ไม่ใช่ออร์โธฟอสเฟตในเวลาเดียวกัน[29]

บทที่ 3

แผนงานและขั้นตอนการดำเนินการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการศึกษาและทำการศึกษาลักษณะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟตในน้ำปัสสาวะจริงของมนุษย์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิธีการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ในการศึกษาการทดลองครั้งนี้ได้มีการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบและวิเคราะห์โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ และส่วนของชุดการทดลองกระบวนการไฟฟ้าเคมี ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
2. ตู้อบความร้อน (Air Oven)
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)
4. เตาเผา (Incinerator)
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
6. กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
7. หลอดทดลอง
8. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM EDS)

3.1.2 ชุดการทดลองกระบวนการไฟฟ้าเคมี

1. เครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Supply)
2. แผ่นขั้วอะลูมิเนียม และแผ่นขั้วเหล็ก
3. โหลแก้วขนาดความจุ 5 ลิตร

3.2 การเตรียมชุดการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้รับรวบรวมน้ำเสียจริงจากปัสสาวะของมนุษย์ที่ไม่ได้ผ่านการชำระล้าง โดยทำการรวบรวมน้ำเสียจากเพศชายอายุประมาณ 20 – 30 ปี ตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ระหว่างการรวบรวมน้ำเสียจะทำการแช่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำไปทำการทดลองในขั้นต่อไป ก่อนทำการทดลองจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ในการทดลองการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะของมนุษย์โดยใช้โดยใช้ปัสสาวะจริง จะดำเนินการทดลองโดยใช้โหลแก้วขนาด 5 ลิตร เติมน้ำเสียปัสสาวะในโหลแก้วประมาณ 4 – 4.5 ลิตร โดยการทดลองจะทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก ขนาดพื้นที่หน้าตัด กว้าง 5 ซม. ยาว 10 ซม.หนา 5 มม. ระยะเหนือจากก้นภาชนะไม่น้อยกว่า 10 ซม. แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะมาจากเครื่อง Power Supply ดังแสดงชุดการทดลอง กระบวนการไฟฟ้าเคมีในรูปที่ 3.1 การกำหนดสถานะในการทดลองมาจากการออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE) ด้วยวิธีการออกแบบโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) และออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design (BBD) ด้วยโปรแกรม Minitab Version 20.0 ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3 ต่อไป



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองกระบวนการไฟฟ้าเคมี

3.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box – Behnken

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตจากปัสสาวะของมนุษย์ ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่สามารถทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต ใช้วิธีการออกแบบ Box – Behnken ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าในระบบ (X1) ระยะเวลาในการทดลอง (X2) และระยะห่างระหว่างแผ่นขั้ว (X3)

3.4.1 การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลอง การกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยจะกำหนดปัจจัยที่ใช้ไว้ 3 ระดับ คือ ระดับที่น้อยสุด (-1) ระดับปานกลาง (0) และระดับสูงสุด (1) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Factor	ค่าระดับ		
	-1	0	1
กระแสไฟฟ้าในระบบ (X1), แอมป์	4	8	12
ระยะเวลาในการทดลอง (X2), นาที	30	60	90
ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้ว (X3), เซนติเมตร	3	6	9

จากตารางที่ 3.1 สามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 15 การทดลอง โดยแบ่งเป็นการทดลองของแผ่นขั้วอะลูมิเนียมและแผ่นขั้วเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3.3 (สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง)

3.4.2 จากนั้นจะนำข้อมูลจากออกแบบการทดลองจากตารางที่ 3.2 มาใช้ในการทดลองตามสภาวะที่ได้กำหนด โดยทำการเติมน้ำเสียปัสสาวะในโหลแก้วประมาณ 4 – 4.5 ลิตร แล้วบรรจุแผ่นขั้วอิเล็กโทรดระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งแผ่นขั้วจะรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่องจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power Supply) โดยต่ออนุกรมกับวงจร เพื่อดูค่ากระแสไฟฟ้า โดยปรับให้ค่ากระแสอยู่ที่ 3, 6 และ 12 แอมป์ ตามลำดับ นอกจากนี้แต่ละค่ากระแสไฟฟ้าจะมีระยะเวลาในการทำให้เกิดตะกอนในชุดทดลอง โดยจะกำหนดระยะเวลาที่แตกต่างกันที่ 30 60 และ 90 นาที ในแต่ละช่วงระยะเวลาจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียอย่างน้อย 1 - 1.5 ลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.4 และตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะของแข็งหลังจากบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างของแข็งอย่างน้อย 50 – 100 มก./ลิตร เพื่อให้เพียงพอต่อการทดสอบของแข็งโดยผ่านกระบวนการทำให้เป็นตะกอนแห้งโดยคัดเลือกจากผลการวิเคราะห์ปริมาณของฟอสเฟตที่ถูกกำจัดมากที่สุด และปริมาณของผงตะกอนแห้งที่เกิดขึ้น และนำไปทดสอบหาข้อมูลด้านพื้นระของของแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) และที่ใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS) ทดสอบสัณฐานวิทยาของของแข็งด้วย และทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

ตารางที่ 3.2 สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	กระแสไฟฟ้าใน	ระยะเวลาในการ	ระยะห่างระหว่าง
	ระบบ (แอมป์)	ทดลอง (นาที)	แผ่นขั้ว (ซม.)
	X1	X2	X3
1	4	90	6
2	8	60	6
3	12	30	6
4	8	90	9
5	8	60	6
6	8	90	3
7	4	60	9
8	4	60	3
9	4	30	6
10	8	60	6
11	12	60	3
12	8	30	3
13	12	60	9
14	12	90	6
15	8	30	9

3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนด ชั้นแรกได้ทำการทดสอบปริมาณฟอสเฟต (Phosphate) แอมโมเนีย (Ammonia) โพแทสเซียม (Potassium) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) แมกนีเซียม (Magnesium) ค่า pH และแคลเซียม (Calcium) สำหรับน้ำเสียเริ่มต้นก่อนเข้าสู่ระบบ เมื่อทำการทดลองแล้วจะทำการวิเคราะห์น้ำเสียหลังการบำบัดประกอบไปด้วย ฟอสเฟต (Phosphate) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ของแข็งแขวนลอย (SS) ของแข็งทั้งหมด (TDS) ที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์ ดังแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการทดลองและวิธีการวิเคราะห์ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	เครื่อง pH Meter รุ่น AD11 ยี่ห้อ ADWA
ของแข็งทั้งหมด (TDS)	อบด้วยถ้วยกระเบื้อง ณ อุณหภูมิ 103-105 องศา
ของแข็งแขวนลอย (SS)	กรองด้วยกระดาษกรองใยแสง อบ ณ อุณหภูมิ 103-105 องศา
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	Closed-Reflux Method
โพแทสเซียม (Potassium)	Direct Air- Acetylene Flame Method(3 1 1 1 B) Potassium Cell Test บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน (30-300 mg/l K)
แอมโมเนีย (Ammonia)	Phenate Method (4 5 0 0 - NH ₃ F) / เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Genesys20,ชุดคิด Method photometric 100683
ฟอสเฟต (Phosphate)	เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Prove300/ชุดคิด Test 114842
แคลเซียม (Calcium)	Atomic Absorption Spectrometry (AAS) / Inductively Coupled Plasma (ICP)
แมกนีเซียม (Magnesium)	Direct Air-Acetylene Flame Method (3111 B)

3.5 สถานที่ในการทดลองการศึกษา

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การวางแผนการทดลองและการกำหนดปัจจัยในการศึกษาในงานวิจัยนี้ ใช้การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) และออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design (BBD) ซึ่งจะมีค่ากำหนดปัจจัยที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการออกแบบการทดลองทั้งสิ้น 3 ปัจจัย และการหาปริมาณแคลเซียมฟอสเฟตจากน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กเพื่อหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง รวมถึงการตกผลึกของแคลเซียมฟอสเฟตจากสภาวะการทดลองที่เหมาะสมดังกล่าว ซึ่งแสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจริงจากปัสสาวะของมนุษย์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์สดจากเพศชาย ช่วงอายุ 20 – 30 ปี สำหรับใช้ในการทดลองซึ่งก่อนการทดสอบการบำบัดน้ำเสีย ได้วิเคราะห์พารามิเตอร์เริ่มต้นของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบเพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียปัสสาวะจริงของมนุษย์ที่ไม่ผ่านการเจือจางด้วยน้ำชำระล้าง ซึ่งแสดงข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 [42]

จากผลการทดลองพบว่าน้ำปัสสาวะเกิดจากการทำงานของไตที่กรองของเสียที่มีอยู่ในเลือด ซึ่งไหลผ่านมาตามทางเดินปัสสาวะก่อนจะถูกขับออก ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวมีสี และขุ่นใส ความเป็นกรด - ด่างอยู่ที่ 4.5 - 8 อย่างไรก็ตามค่า pH ของปัสสาวะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามการบริโภคของมนุษย์มีองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมและฟอสเฟตที่พบมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อยมากในน้ำเสียปัสสาวะ โดยในการทดลองนี้น้ำเสียจากปัสสาวะมีลักษณะทางกายภาพคือมีสีเหลืองใส มีค่า pH ที่เป็นกลาง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Lind et al. [43] ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.60-6.80 โดยจากการรวบรวมข้อมูลของ Karak and Bhattacharyya [44] พบว่า งานวิจัยหลายที่ผ่านมาน้ำปัสสาวะมีความเป็นด่างเป็นส่วนใหญ่และมีงานวิจัยที่พบค่าน้ำเสียของปัสสาวะที่เป็นกลางเช่นกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการบริโภคของกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้พบว่าการทดลองนี้มีค่าคลอไรด์ที่สูงเมื่อเทียบกับงานอื่นๆ ที่ผ่านมา ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากการบริโภคเกลือและน้ำปลาของคนไทยทำให้มีคลอไรด์ในน้ำที่ค่อนข้างสูง ส่วนค่าที่สำคัญในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ฟอสเฟตและแคลเซียมที่ต้องการในการศึกษาความเป็นไปได้หรือศักยภาพของการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตนั้น พบว่า ค่าฟอสเฟตและแคลเซียมในการทดลองนี้มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Randall et al. [45] ซึ่งพบค่าฟอสเฟตจากการทดลองและงานวิจัยอื่นๆ อยู่ในช่วง 260-740 mg/L และ 77-1,900 mg/L สำหรับฟอสเฟตและแคลเซียมตามลำดับ จากการพบปริมาณองค์ประกอบธาตุเหล่านี้ส่วนหนึ่งขึ้นกับตัวบุคคลในด้านสุขอนามัย ส่งผลให้ปริมาณสารองค์ประกอบในน้ำเสียปัสสาวะนั้นมีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์ก่อนบำบัด

พารามิเตอร์น้ำเสียปัสสาวะ	ค่าลักษณะของน้ำเสีย (mg/L)
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	6.01
โพแทสเซียม	500.50
แอมโมเนีย	460
ฟอสเฟต	7.79
แคลเซียม	2.99
แมกนีเซียม	0.66
คลอไรด์	3,802

จากการพบปริมาณองค์ประกอบธาตุเหล่านี้ส่วนหนึ่งขึ้นกับตัวบุคคลในด้านสุขอนามัย ส่งผลให้ปริมาณสารองค์ประกอบในน้ำเสียปัสสาวะนั้นมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้การบริโภคอาหารและยาที่ยังส่งผลต่อสารตกค้างในน้ำปัสสาวะได้อีกด้วย ซึ่งในการศึกษาที่พบธาตุยังมีความพอเหมาะที่นำมาใช้เป็นแหล่งทดแทนในการนำฟอสเฟตมาใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบของผลึกของแข็งได้

4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีนั้นเมื่อเริ่มต้นกระบวนการจะอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเมื่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังแผ่นขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ในระบบ พบว่าน้ำเสียในระบบจะมีสภาพที่เป็นด่างเนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ส่งผลให้ค่าการละลายน้ำของสารประกอบต่างๆ มีค่าที่ลดลง และก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถละลายสารประกอบต่างๆ ในน้ำเสียได้ จึงทำให้เกิดการตะกอน นอกจากนี้ยังมีไอออนประเภทเหล็กและอะลูมิเนียมไอออนที่ทำหน้าที่คล้ายกับสารส้ม ในการรวมตะกอนและตกตะกอนของสารต่างๆ ในน้ำเสีย

ค่าปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ในการศึกษานี้ได้ทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดที่สำคัญ 3 ค่า ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟตและค่าพารามิเตอร์สำคัญอื่นๆ โดยกระแสไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียเป็นตัวกำหนดปริมาณไอออนที่ออกมาจากขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะขึ้นกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสไฟฟ้า ยิ่งส่งกระแสไฟฟ้ามากก็จะก่อให้เกิดปริมาณไอออนที่มากขึ้นตามไปด้วย แต่หากส่งกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปก็อาจจะส่งผลเสียต่อขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากมีความร้อนที่สูงเกินไป นอกจากนี้ยังสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับน้ำอีกด้วย ในการศึกษานี้ได้กำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 4 , 8 และ 12 แอมป์ สำหรับขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งอิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิดจะมีพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากัน 50 ตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะทำให้เกิด

การทำปฏิกิริยาของไอออนในน้ำได้พอเหมาะ และระยะห่างระหว่างขั้วจะมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นและความต้านทานกระแสไฟฟ้าสำหรับแผ่นอิเล็กโทรด โดยผลการศึกษาประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ปัจจัยการออกแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 และแสดงผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและเส้นชั้นความสูงหรือคอนทัวร์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะต่างๆ ของกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่มีการบำบัดค่าฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซีโอดี (COD) รูปที่ 4.3 และ 4.4 ของแข็งแขวนลอย (SS) รูปที่ 4.5 และ 4.6 และของแข็งละลายน้ำ (TDS) รูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

4.2.1. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อมีการเดินระบบกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ 12 แอมป์ เมื่อเวลาผ่านไปในช่วง 60 และ 90 นาที สามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียปัสสาวะได้ดีที่ 99.99 % ที่ระยะห่างที่ 3 ซม. และ 9 ซม. และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตจากการกำหนดปัจจัยในการทดลองด้วย BBD นั้น ได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นขั้วอะลูมิเนียมและเหล็ก ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกระแสไฟฟ้า และระยะห่าง แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยจากรูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของขั้วอะลูมิเนียมพบว่ากระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟตค่อนข้างมาก ตามมาด้วยระยะห่างของขั้วซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะที่มากเพียงพอก็จะมีผลการทดลองที่ดีกว่าระยะห่างที่แคบเกินไป ซึ่งจากศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่ระยะห่างของแผ่นขั้วที่แคบลงจะสามารถเพิ่มความต้านทานไฟฟ้า และความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดีกว่า [46] แต่ในการทดลองนี้เนื่องจากระยะ 3 ซม. เป็นระยะที่แคบเกินไปและส่งผลให้เกิดการลัดวงจรในการบำบัดอยู่บ่อยครั้ง เมื่อเทียบกับระยะห่างที่ 9 ซม. พบว่าจะไม่มีการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในระบบ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนแคลเซียมฟอสเฟตและการกำจัดฟอสเฟตจะขึ้นอยู่กับค่า pH ด้วย ในการทดลองนี้ค่า pH เริ่มต้นซึ่งเป็นค่า pH ของน้ำเสียนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 7-8 จากการศึกษาของ Kappel et al. [47] ที่ช่วงค่า pH ในการบำบัดไฟฟ้าเคมี ค่า pH เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในช่วง 8 – 10 จะสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 70 – 95 % นอกจากนี้ผลประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตของขั้วเหล็กในรูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงสภาวะของกระแสไฟฟ้าที่ 8 แอมป์ นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตอยู่ในช่วง 99.37 % แต่เมื่อมีการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ 12 แอมป์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง นอกจากนี้ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการกำจัดฟอสเฟต

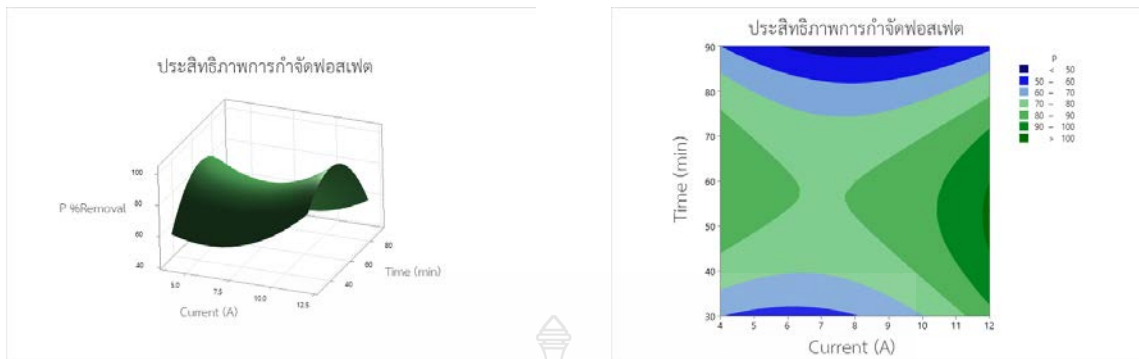
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการออกแบบการทดลองแบบ BBD

ลำดับ	กระแสไฟฟ้าในระบบ (แอมป์)	ระยะเวลาในการทดลอง (นาที)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (ซม.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)							
				PO ₄ ³⁻		COD		SS		TDS	
				Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al
X1	X2	X3									
1	4	90	6	76.57	62.11	20.98	19.82	66.67	83.33	88.00	70.00
2	8	60	6	86.95	77.79	25.63	26.79	66.67	83.33	84.00	60.00
3	12	30	6	14.43	89.21	25.63	18.66	66.67	83.33	92.00	60.00
4	8	90	9	62.11	28.61	25.63	25.63	66.67	83.33	86.00	78.00
5	8	60	6	86.20	84.28	31.44	25.05	50.00	83.33	88.00	64.00
6	8	90	3	85.76	62.11	20.98	12.27	66.67	50.00	88.00	72.00
7	4	60	9	77.42	99.99	19.82	9.36	66.67	50.00	88.00	74.00
8	4	60	3	74.13	80.20	34.93	17.50	50.00	83.33	80.00	60.00
9	4	30	6	82.26	60.44	26.79	16.33	66.67	66.67	86.00	70.00
10	8	60	6	76.35	84.19	26.79	25.05	66.67	66.67	90.00	68.00
11	12	60	3	62.11	99.99	36.09	14.01	33.33	66.67	84.00	80.00
12	8	30	3	63.61	61.17	26.79	12.27	66.67	33.33	86.00	72.00
13	12	60	9	11.79	99.99	32.60	9.94	66.67	100.00	84.00	64.00
14	12	90	6	17.44	62.11	25.63	16.33	66.67	83.33	84.00	66.00
15	8	30	9	99.37	99.62	16.33	6.46	50.00	66.67	92.00	68.00

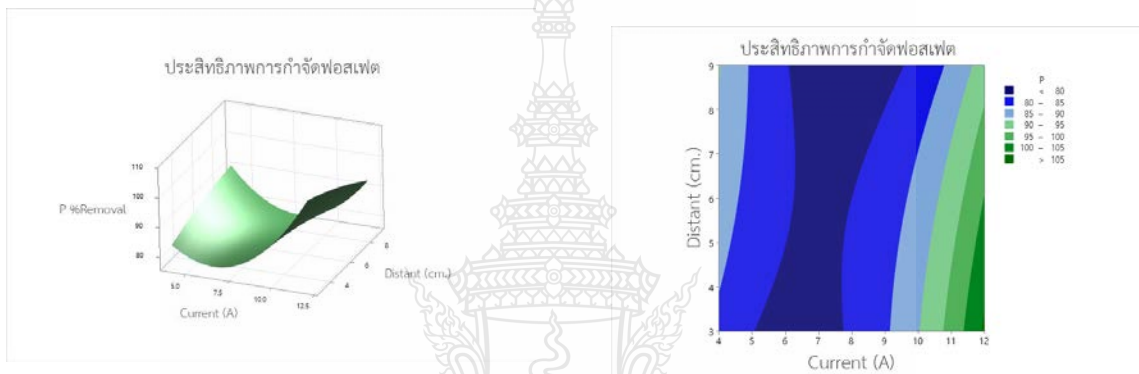
ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างในการใช้ขั้วเหล็กในการบำบัดค่า pH เริ่มต้นในการบำบัดนั้น แผ่นขั้วเหล็กสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าในช่วง pH 4 [48] ซึ่งจากการศึกษาของ Sahset et al. [49] พบว่าประสิทธิภาพของขั้วเหล็กจะมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตที่ต่ำกว่า แตกต่างจากขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงกว่าถึง 100 %

4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ในการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองโดยแผ่นขั้วเหล็กโดยส่วนมากแล้วจากสภาวะที่จำลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีนั้นจะอยู่ในช่วง 17 – 35 % ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งแน่นอนว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อเทียบกับขั้วอะลูมิเนียมจะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ทั้งนี้เนื่องด้วยความเข้มข้นของน้ำเสียปัสสาวะที่ไม่มีการชะล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ในการลดความเข้มข้น จึงส่งผลให้การบำบัดนั้นอาจต้องใช้กระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการบำบัดที่มากกว่า 12 แอมป์ และ 90 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี สำหรับทดลองในการกำจัดซีโอดีของแผ่นขั้วอะลูมิเนียมสามารถลดปริมาณซีโอดีได้เพียง 25 % ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่สภาวะที่ช่วง กระแสไฟฟ้าที่ 8 แอมป์ ระยะเวลา 60 นาที และระยะห่างระหว่างขั้วที่ 6 ซม. ซึ่งเป็นผลมาจากในการทดลองได้ใช้น้ำเสียปัสสาวะสดที่มีความเข้มข้นสูง ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเพื่อลดปริมาณซีโอดีปัจจัยส่วนใหญ่จะเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่สูง และระยะเวลาที่มากกว่า 180 นาที ซึ่งจะสามารถลดปริมาณซีโอดีได้ [50] ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกว่า แต่ก็อาจจะส่งเรื่องความสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า เนื่องจากขั้วอะลูมิเนียมมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง [51] และนอกจากนี้ในช่วง pH ที่ต่ำนั้น จะช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ดีกว่าช่วง pH ที่สูง

4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย จากการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย (ss) และ ของแข็งละลายน้ำได้ (TDS) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.6 ซึ่งในการใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาเก็บกักมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียปัสสาวะในช่วง 83 – 99 % เป็นผลมาจากขั้วอิเล็กโทรดทั้งขั้วบวกและขั้วลบของอะลูมิเนียมมีการปล่อยไฮดรอกไซด์ในการทำของแข็งแขวนลอยเกิดการสูญเสียเสถียรภาพและแตกตัวออกจนรวมตัวกันสูงสุด และตกตะกอนลงมา ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งของแข็งแขวนลอย(ss) และของแข็งแขวนละลายน้ำได้(TDS) นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในขั้วเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.7 – 4.8 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะต่ำกว่าขั้วอะลูมิเนียมอยู่ในช่วง 50 – 67 % เนื่องจากในการทดสอบตะกอนแขวนลอยที่เกิดจากขั้วเหล็กจะมีปริมาณที่น้อยและคุณสมบัติที่ต่างกับขั้วอะลูมิเนียมที่จะมีการรวมตัวของตะกอนที่ดีกว่า นอกจากนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วเหล็กจำเป็นต้องอาศัยการปรับสภาพน้ำเสียให้อยู่สภาวะที่เป็นกรดจึงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี



(ก)

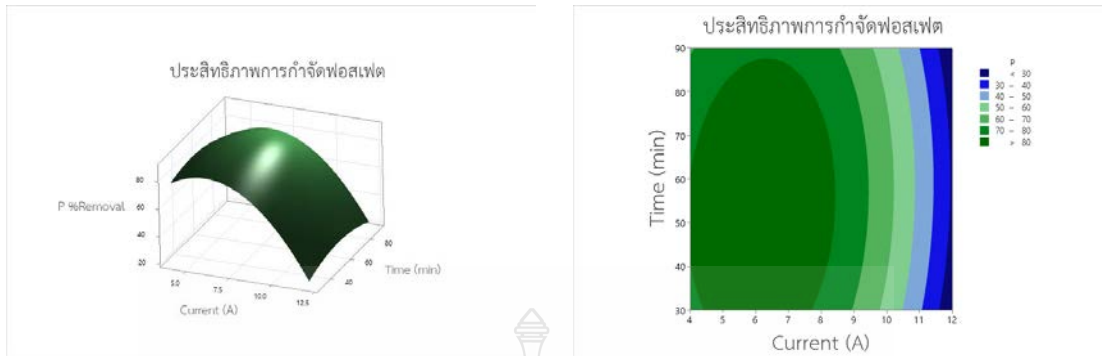


(ข)

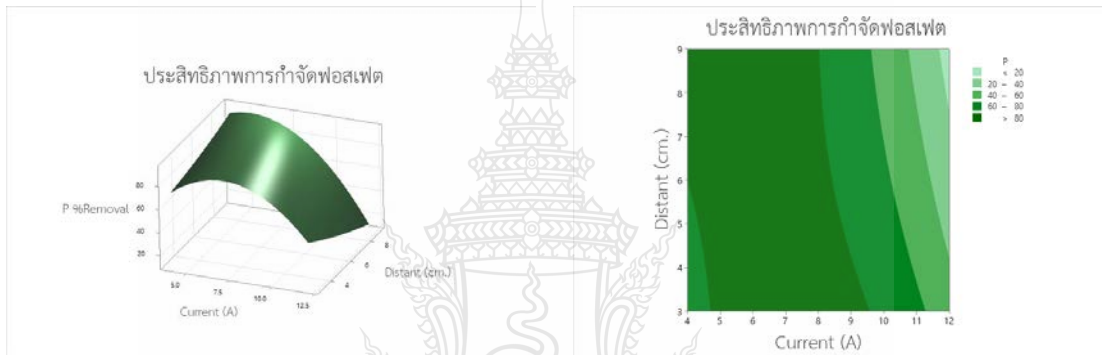


(ค)

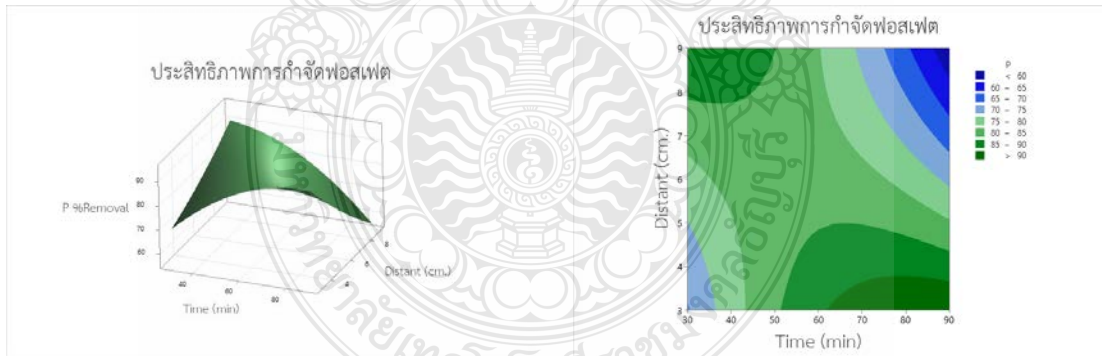
รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม
 (ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 (ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 (ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



(ก)

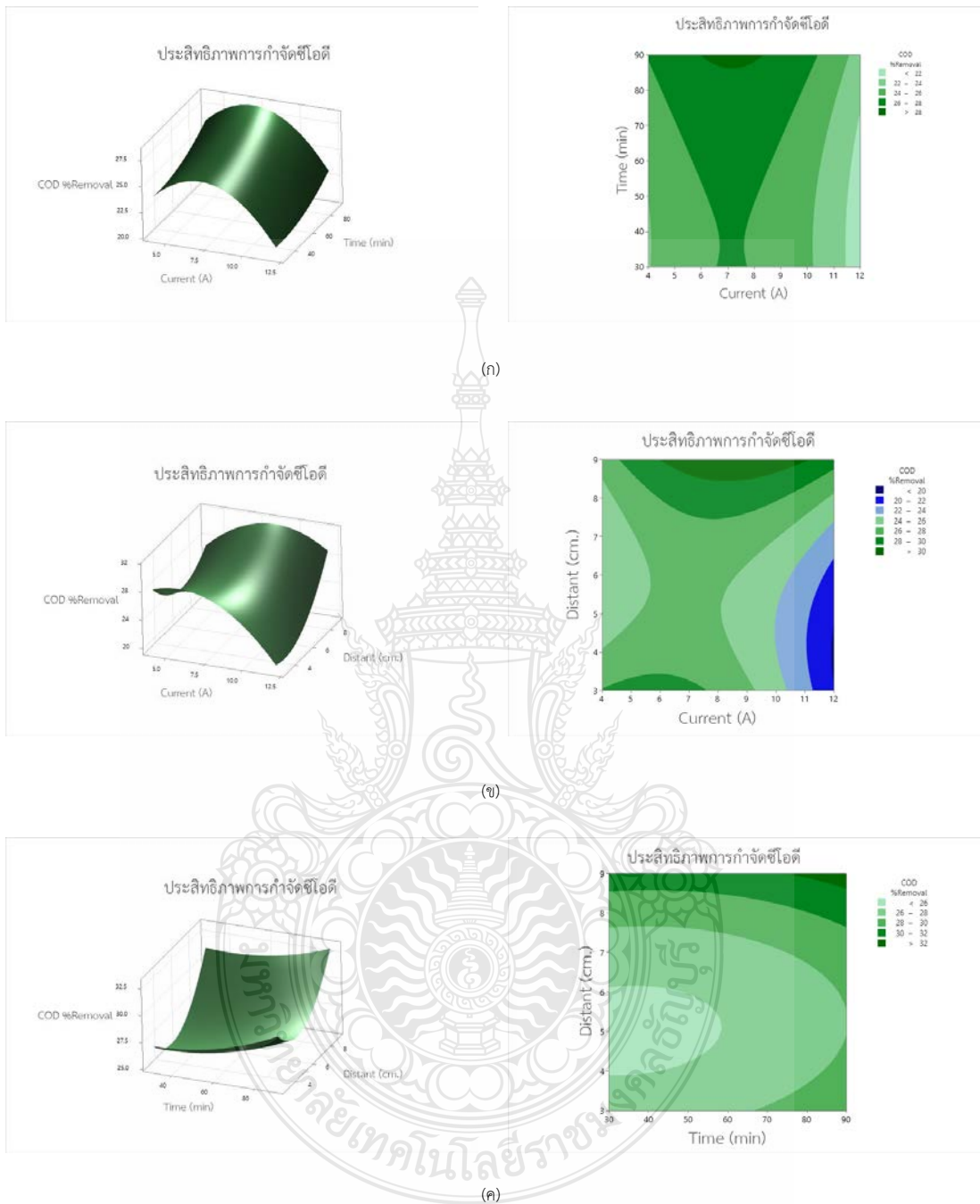


(ข)

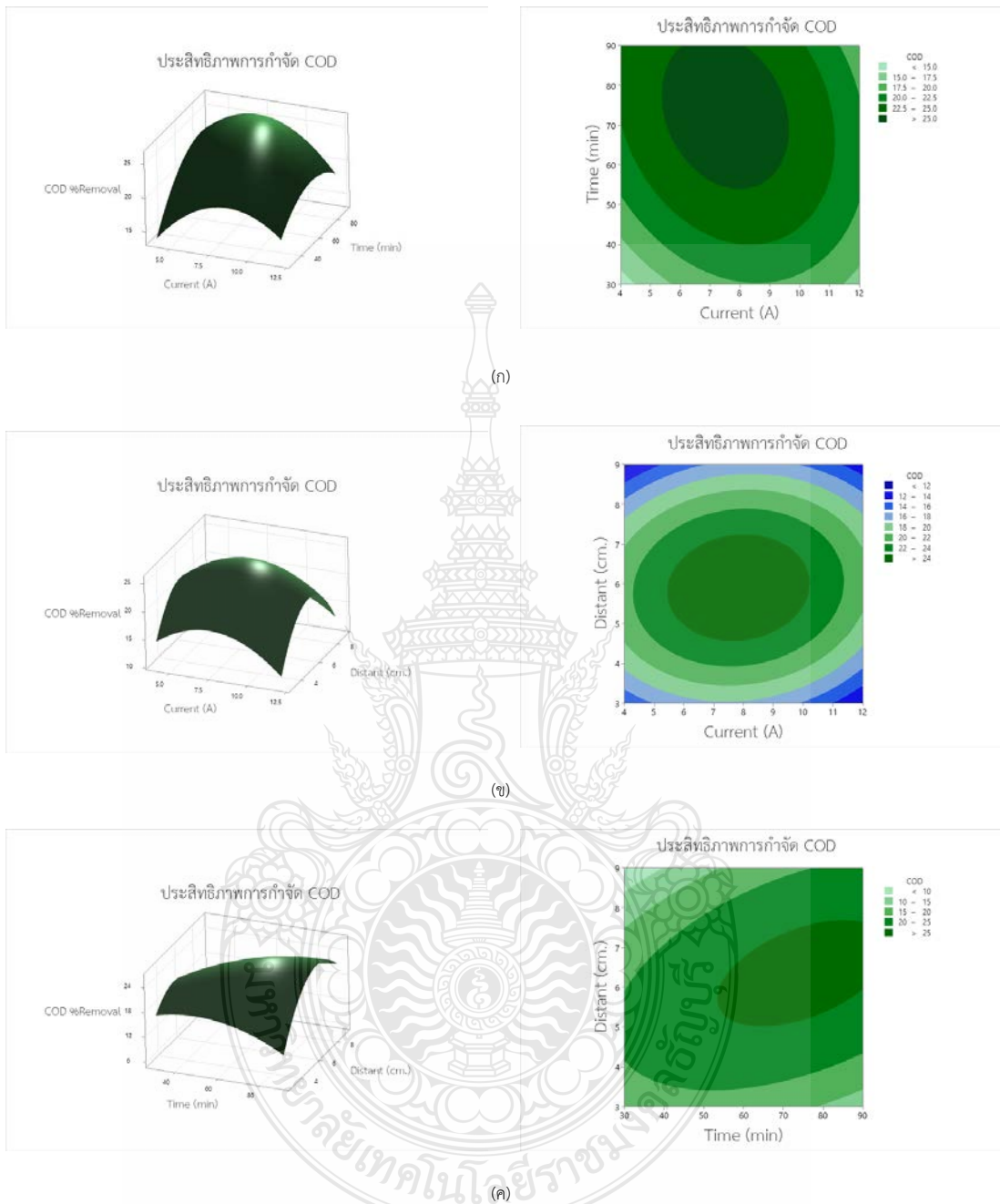


(ค)

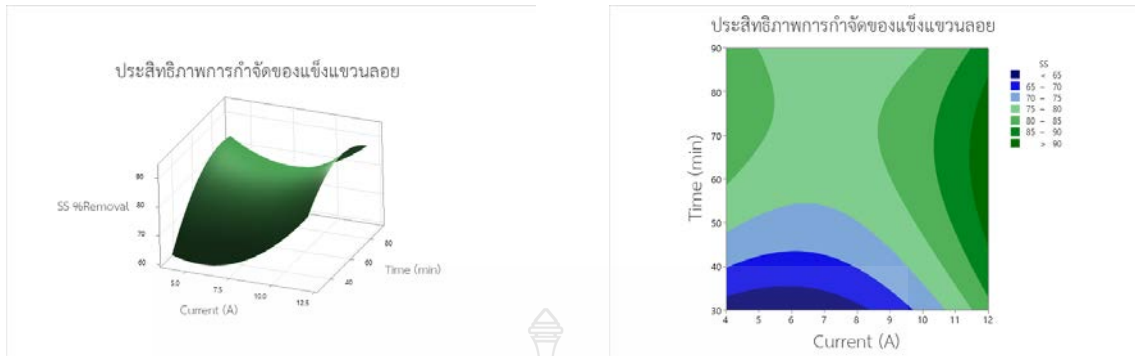
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต จากแผ่นขี้เหล็ก
 (ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 (ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 (ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



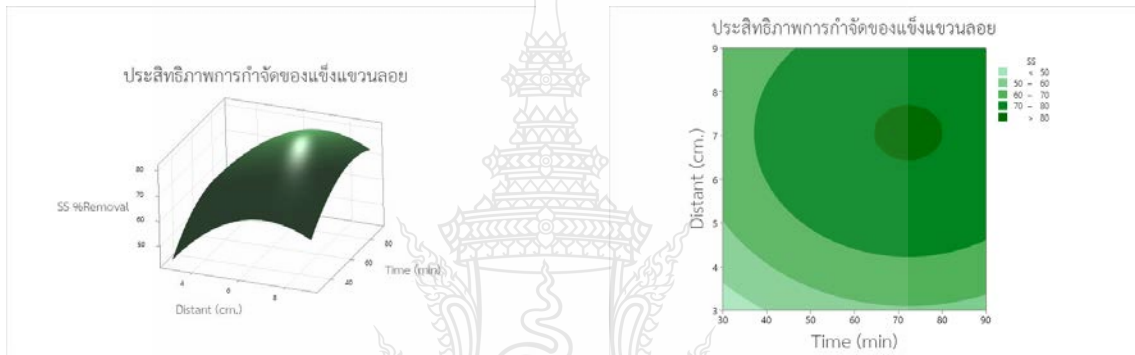
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จากแผ่นขั้วเหล็ก
 (ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 (ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 (ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม
 (ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 (ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 (ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



(ก)



(ข)



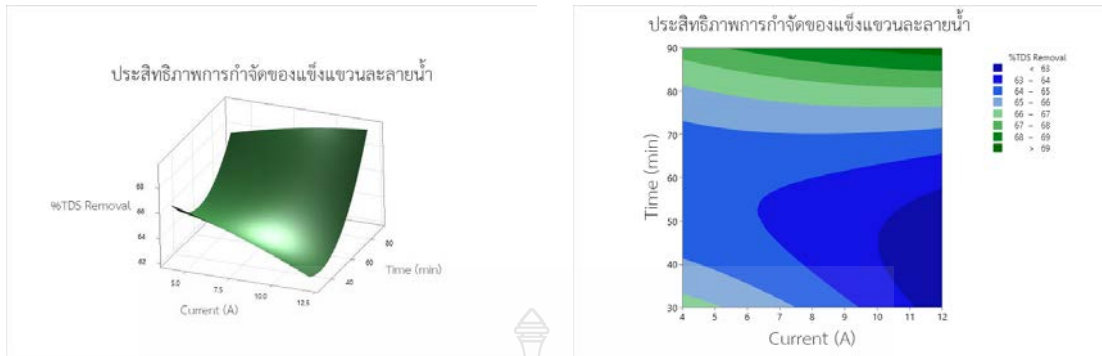
(ค)

รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม

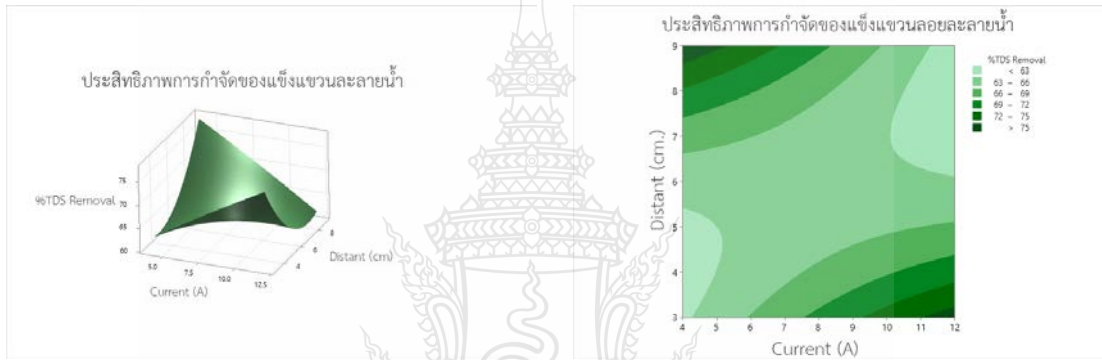
(ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)

(ข) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะห่าง(ซม.) และ เวลา (นาที)

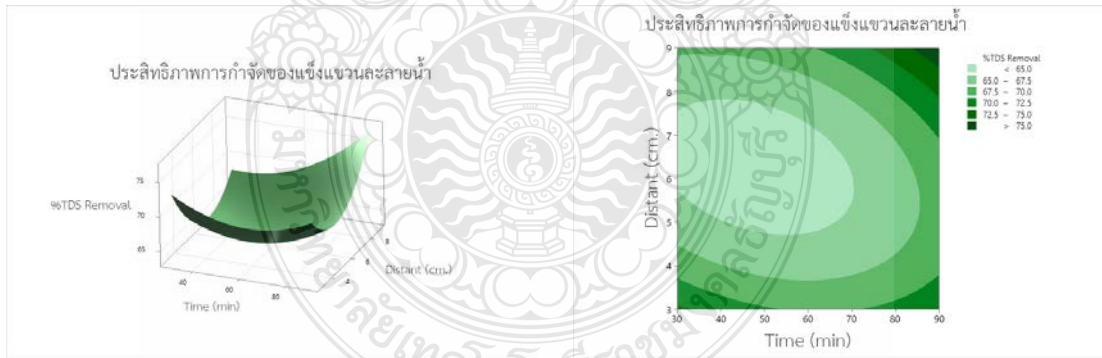
(ค) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)



(ก)

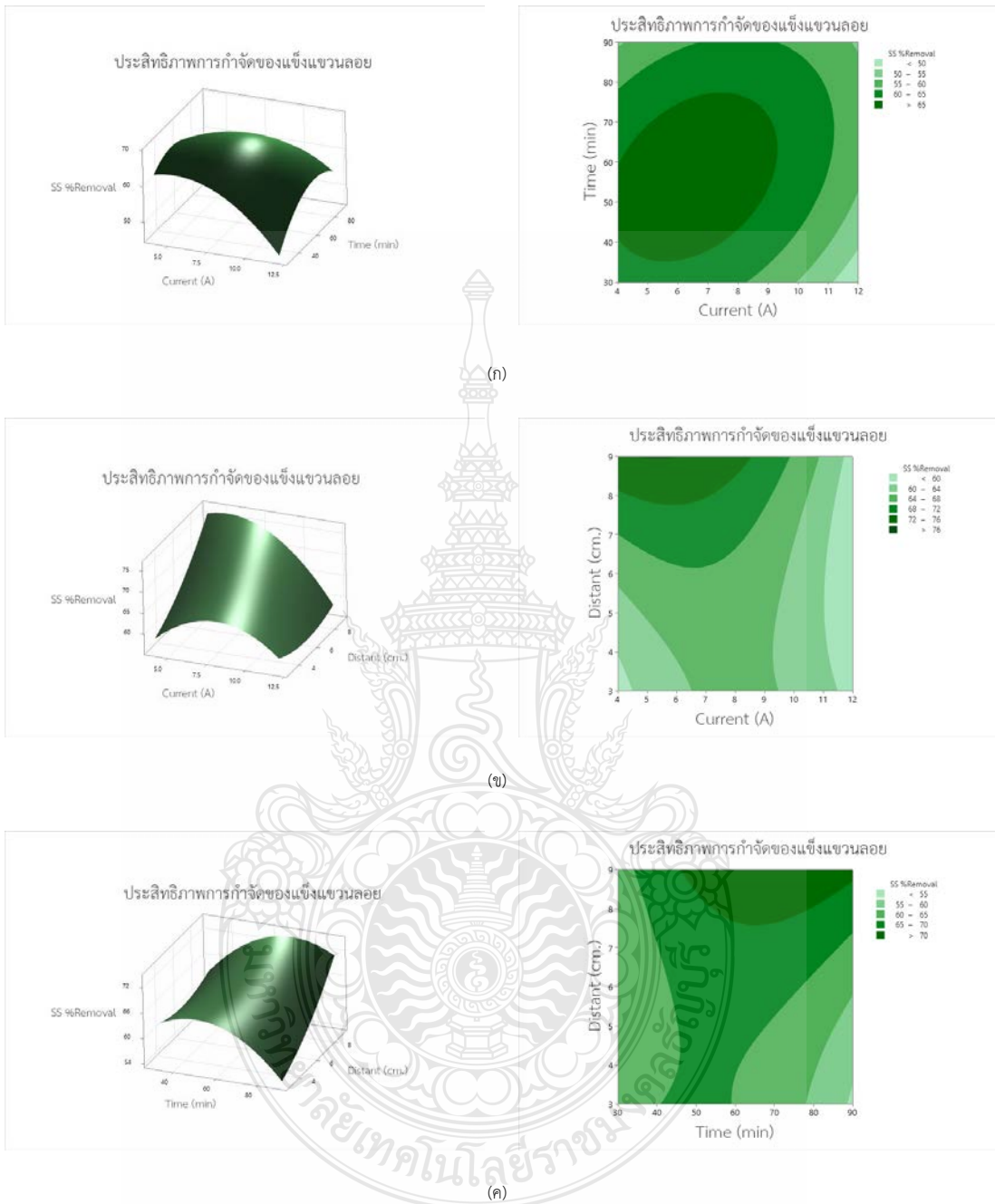


(ข)

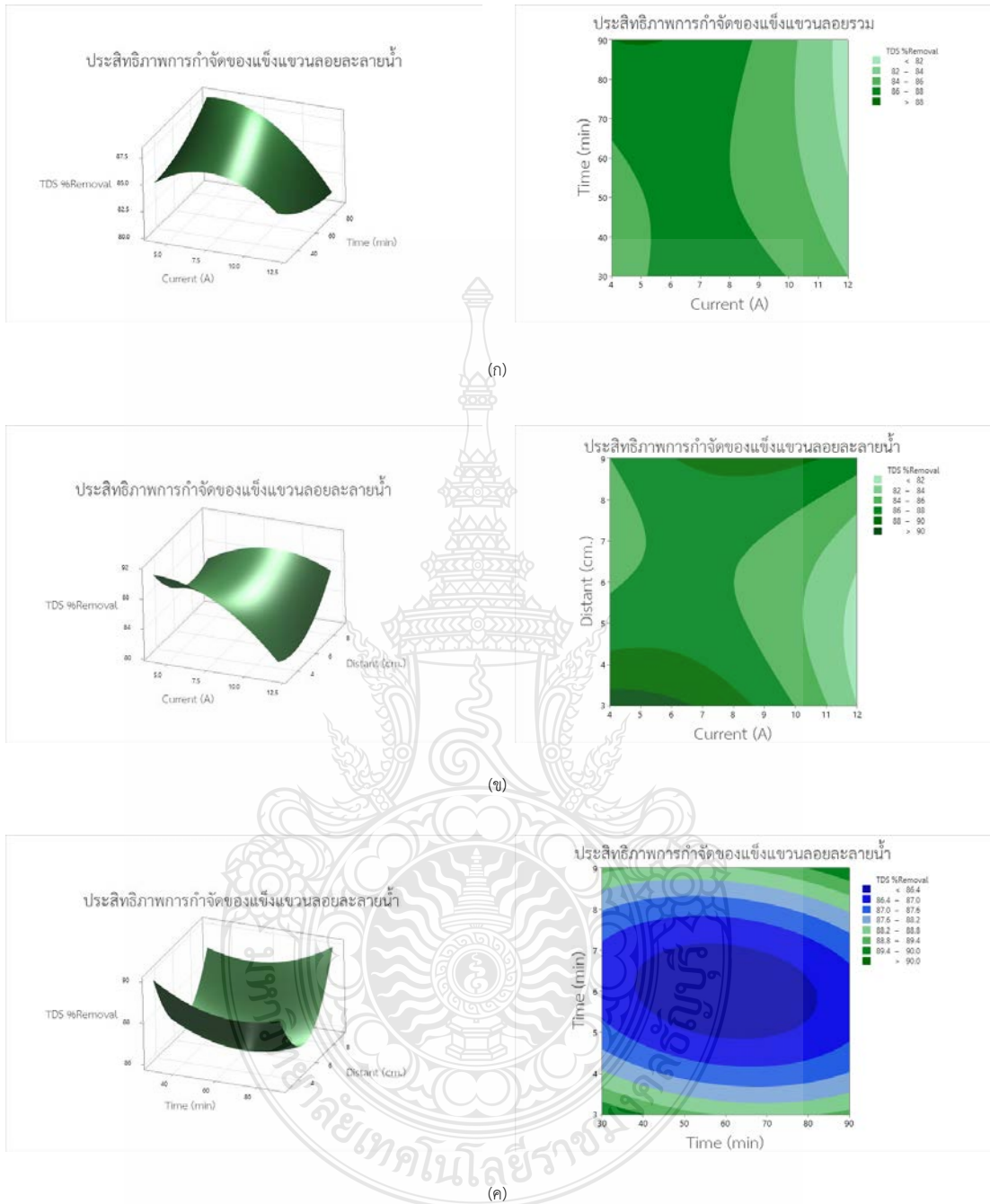


(ค)

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยน้ำได้ จากแผ่นขี้อะลูมิเนียม
 ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย จากแผ่นขี้เหล็ก
 ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยละลายน้ำได้ จากแผ่นขั้วเหล็ก
 ก) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะเวลา (นาที)
 ข) ประสิทธิภาพระหว่าง กระแสไฟฟ้า (แอมป์) และ ระยะห่าง (ซม.)
 ค) ประสิทธิภาพระหว่าง ระยะเวลา (นาที) และ ระยะห่าง (ซม.)

4.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การบำบัดน้ำปัสสาวะจากมนุษย์ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้อิเล็กโทรดทั้ง 2 ชนิด ได้ถูกนำมาตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลอง หากมีข้อมูลที่มีความเหมาะสมจึงนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ ($R - Square, R - Sq$) และการวิเคราะห์หาความแปรปรวน ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลมีเงื่อนไข 3 ข้อ 1.) การตรวจสอบข้อมูลการกระจายแบบแจกแจงปกติ หากค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายแบบปกติ 2.) การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล หากส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ และมีการกระจายสม่ำเสมอ แสดงว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และ 3.) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน หากส่วนตกค้างมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งบวกและลบ แสดงว่าตกค้างมีเสถียรของความแปรปรวน[52]

4.3.1. ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกโดยขั้วอะลูมิเนียม จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.9 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.9 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.9 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.9 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.3.2 ปริมาณซีโอไลท์ที่ถูกกำจัดออกโดยขั้วอะลูมิเนียม จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณซีโอไลท์ที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.10 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.10 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.10 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.10 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.3.3 ปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำกำจัดออกโดยขั้วอะลูมิเนียม จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.11 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.11 A) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.11 B) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.11 C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.3.4 ปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำกำจัดออกโดยขั้วอะลูมิเนียม จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.11 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.11 A) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.11 B)

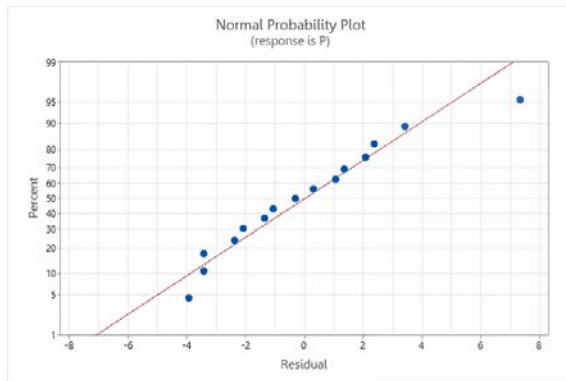
และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.11 C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.3.5 ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกโดยชีวเหล็ก จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.13 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.13 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.13 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.13 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

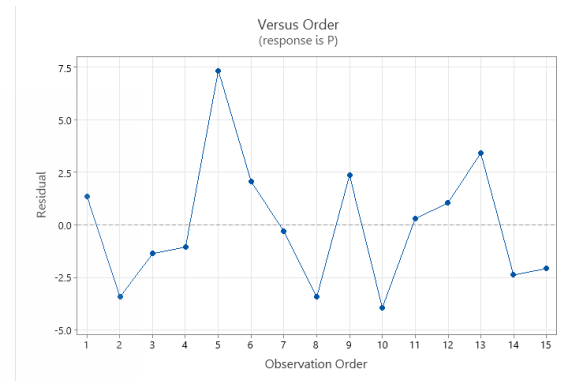
4.3.6 ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดออกโดยชีวเหล็ก จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.14 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.14 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.14 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.14 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

4.3.7 ปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำกำจัดออกโดยชีวเหล็ก จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.15 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.15 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.15 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.15 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

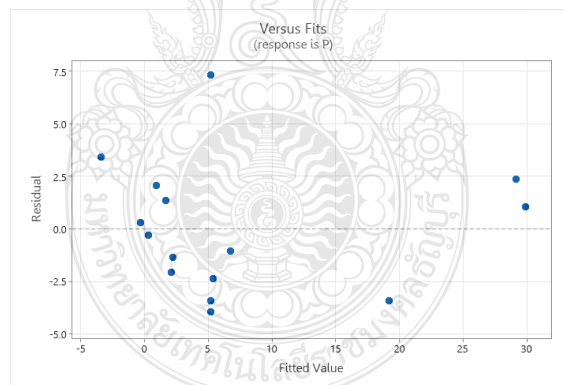
4.3.8 ปริมาณของแข็งในน้ำกำจัดออกโดยชีวเหล็ก จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออกดังแสดงใน รูปที่ 4.16 พบว่า ส่วนที่ตกค้างของมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ คือ 1. การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจง (รูปที่ 4.16 ก) 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (รูปที่ 4.16 ข) และ 3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (รูปที่ 4.16 ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเหมาะสมและถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออก

(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.3 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 91.98 % แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และระยะเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 91.98% นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณของตัวฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของฟอสเฟตได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย สมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.1

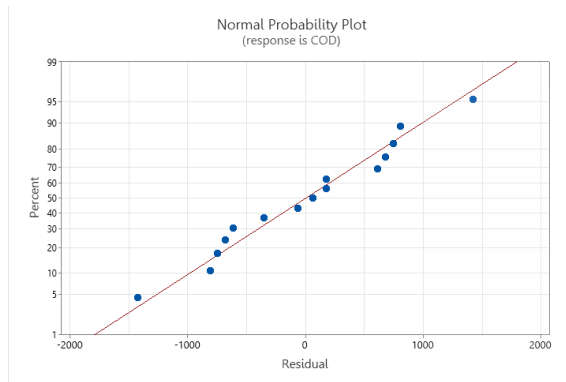
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	5.19	2.95	1.76	0.139
Current	-5.81	1.80	-3.22	0.024
time	-6.08	1.80	-3.37	0.020
distant	-5.50	1.80	-3.05	0.028
Current*Current	-0.78	2.66	-0.29	0.781
time*time	5.20	2.66	1.96	0.108
distant*distant	-0.46	2.66	-0.17	0.868
Current*time	7.67	2.55	3.00	0.030
Current*distant	3.95	2.55	1.55	0.183
time*distant	8.40	2.55	3.29	0.022

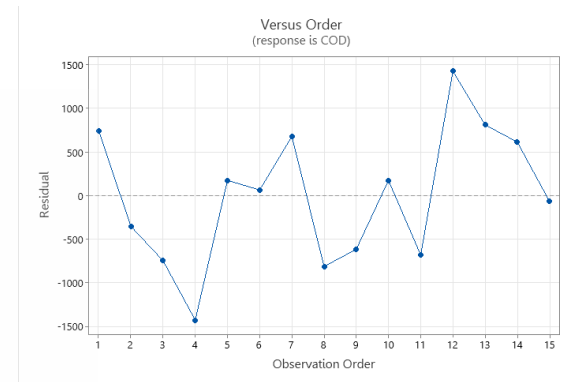
S = 5.10, R – Sq = 91.98%, R-sq(adj) = 77.55 %

$$\begin{aligned}
 P &= 135.8 - 6.48 \text{ Current} - 1.967 \text{ time} - 9.45 \text{ distant} \\
 (\text{มก./ลิตร}) &- 0.049 \text{ Current*Current} + 0.00578 \text{ time*time} - 0.051 \text{ distant*distant} \\
 &+ 0.0639 \text{ Current*time} + 0.329 \text{ Current*distant} + 0.0933 \text{ time*distant}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

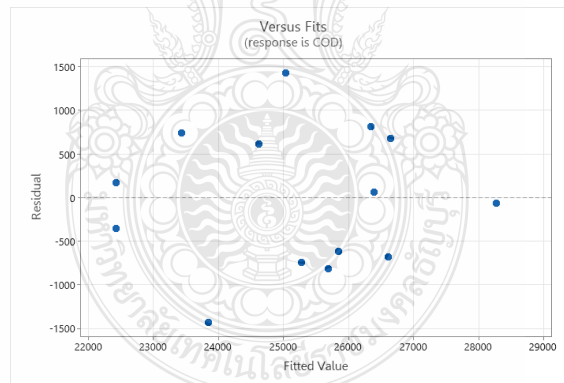
เมื่อ Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)
Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณซีโอทีที่ถูกกำจัดออก

(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.4 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 84.31% แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 84.31% นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณของตัวชี้อิโอดีที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของฟอสเฟตได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย สมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณชี้อิโอดีที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	22426	746	30.07	0.000
Current	153	457	0.34	0.751
time	-767	457	-1.68	0.154
distant	175	457	0.38	0.717
Current*Current	1402	672	2.09	0.091
time*time	964	672	1.43	0.211
distant*distant	2497	672	3.71	0.014
Current*time	438	646	0.68	0.528
Current*distant	-307	646	-0.47	0.655
time*distant	-1445	646	-2.24	0.075

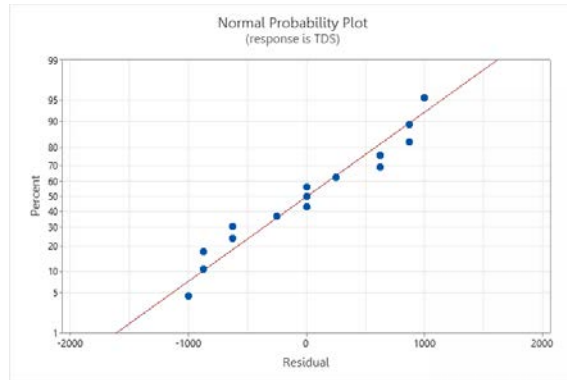
S = 1291.62, R – Sq = 84.31%, R-sq(adj) = 56.08%

$$\begin{aligned} \text{COD (มก./ลิตร)} = & 37493 - 1429 \text{ Current} - 87 \text{ time} - 2102 \text{ distant} + 87.6 \text{ Current*Current} \\ & + 1.071 \text{ time*time} + 277.4 \text{ distant*distant} + 3.65 \text{ Current*time} \\ & - 25.6 \text{ Current*distant} - 16.06 \text{ time*distant} \end{aligned} \quad (4.2)$$

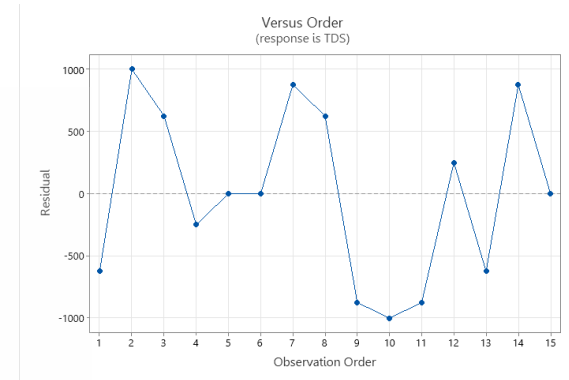
เมื่อ Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)

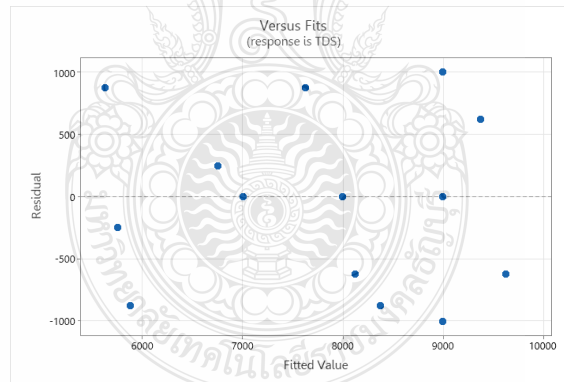
Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออก
 (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.5 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 84.31% แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 84.31% นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณของตัวซีไอทีที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย สมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.3

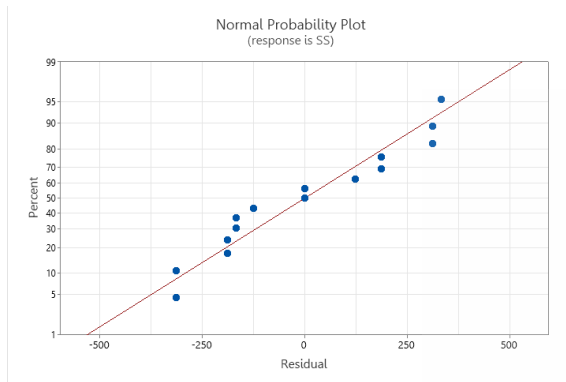
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	9000	671	13.42	0.000
Current	125	411	0.30	0.773
time	-500	411	-1.22	0.278
distant	-0	411	-0.00	1.000
Current*Current	62	605	0.10	0.922
time*time	-688	605	-1.14	0.307
distant*distant	-1437	605	-2.38	0.063
Current*time	-375	581	-0.65	0.547
Current*distant	1875	581	3.23	0.023
time*distant	-625	581	-1.08	0.331

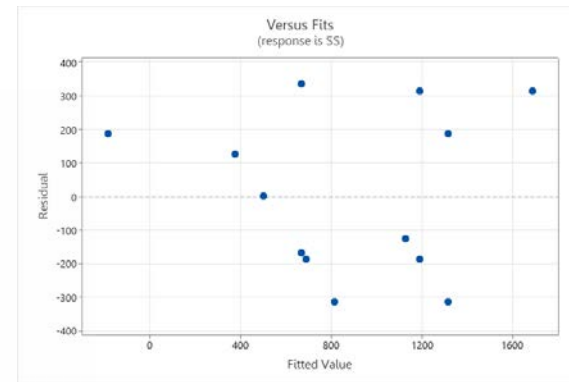
S = 1161.90, R – Sq = 80.21%, R-sq(adj) = 44.57%

$$\text{TDS (มก.ลิตร)} = 5000 - 781 \text{ Current} + 141.7 \text{ time} + 1083 \text{ distant} + 3.9 \text{ Current*Current} - 0.764 \text{ time*time} - 159.7 \text{ distant*distant} - 3.12 \text{ Current*time} + 156.3 \text{ Current*distant} - 6.94 \text{ time*distant} \quad (4.3)$$

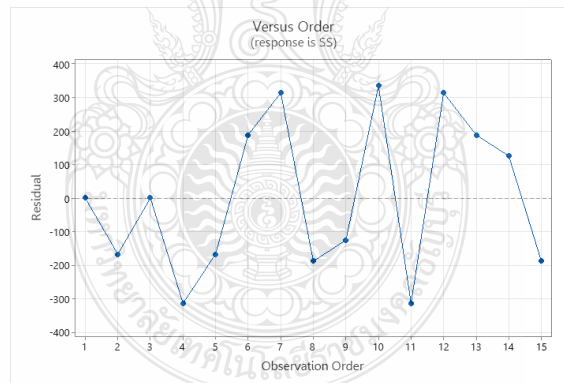
เมื่อ Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)
Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออก

(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 80.98% แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 80.98% นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณลดลงของของแข็งที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของของแข็งในน้ำได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยสมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	667	220	3.02	0.029
Current	-188	135	-1.39	0.224
time	-188	135	-1.39	0.224
distant	-250	135	-1.85	0.123
Current*Current	-271	199	-1.36	0.231
time*time	229	199	1.15	0.301
distant*distant	354	199	1.78	0.135
Current*time	125	191	0.65	0.542
Current*distant	-500	191	-2.62	0.047
time*distant	0	191	0.00	1.000

S = 381.881, R – Sq = 80.98%, R-sq(adj) = 46.74%

$$SS = 1667 + 411 \text{ Current} - 45.1 \text{ time} - 222 \text{ distant} - 16.9 \text{ Current*Current} + 0.255 \text{ time*time} + 39.4 \text{ distant*distant} + 1.04 \text{ Current*time} - 41.7 \text{ Current*dis} + 0.00 \text{ time*distant} \quad (4.4)$$

เมื่อ Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)

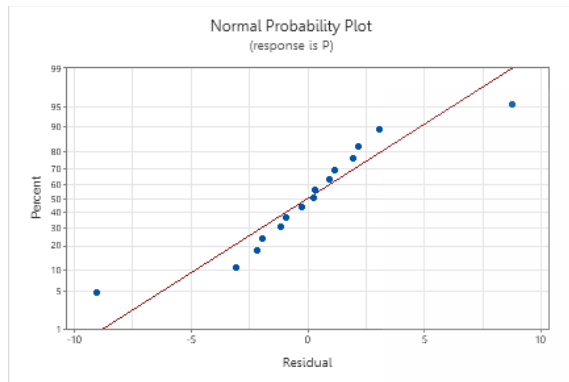
Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)

จากการยืนยันการทดลองพบว่าการทดลองจริง (experimental) กับการทำนายมี (predicted) ที่แสดงในตารางที่ 4.7 ที่สถานะในการทดลองพบว่ามีบางส่วนที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความสมบูรณ์ของแบบจำลองหรือการขาดความเหมาะสมของสมการ (lack of fit) ซึ่งพิจารณาจากค่า p – value ที่มีค่าเท่ากับ 0.05 หากเมื่อเทียบกันแล้วพบว่าแบบจำลองของการใช้ขั้ว

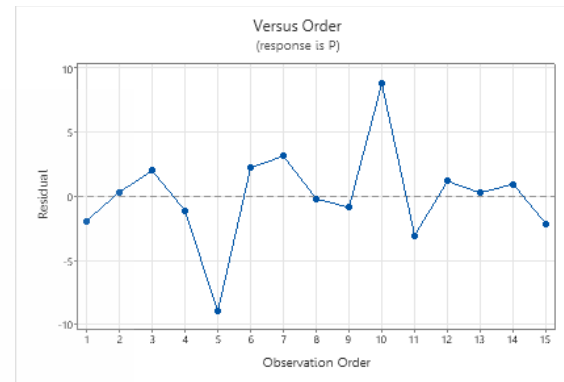
อิเล็กโทรดอะลูมิเนียมยังมีบางส่วนที่ยังขาดความเหมาะสมของสมการ แต่อย่างไรก็ตามในการกำจัดปริมาณฟอสเฟตในการทดลองจริงยังคงมีความใกล้เคียงกับการทำนายในเชิงคณิตศาสตร์ในการกำจัดออก

ตารางที่ 4.7 การยืนยันแบบจำลองของขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม

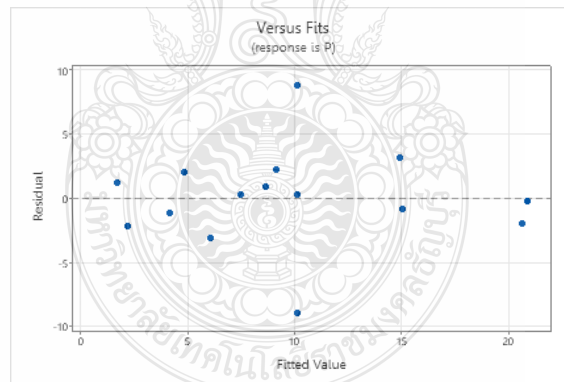
Current	time	distant	P (mg/l)	COD (mg/l)	TDS (mg/l)	SS (mg/l)
4	90	6	18.67	24177.6	7500	500
8	60	6	10.40	22075.2	10000	500
12	30	6	6.82	24528	10000	500
8	90	9	3.02	22425.6	5500	500
8	60	6	1.10	22600.8	9000	500
8	90	3	11.35	26455.2	7000	1500
4	60	9	18.00	27331.2	6500	1500
4	60	3	20.62	24878.4	10000	500
4	30	6	14.14	25228.8	7500	1000
8	60	6	18.85	22600.8	8000	1000
12	60	3	3.02	25929.6	5000	1000
8	30	3	2.90	26455.2	7000	2000
12	60	9	7.73	27156	9000	0
12	90	6	9.58	25228.8	8500	500
8	30	9	0.05	28207.2	8000	1000



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออก

(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.8 พบว่าค่า R - Sq มีค่าเท่ากับ 71.27 % แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 71.27 % ซึ่งในการนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องอาจมีความไม่เสถียร นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณลงของตัวฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของฟอสเฟตได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยสมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.5

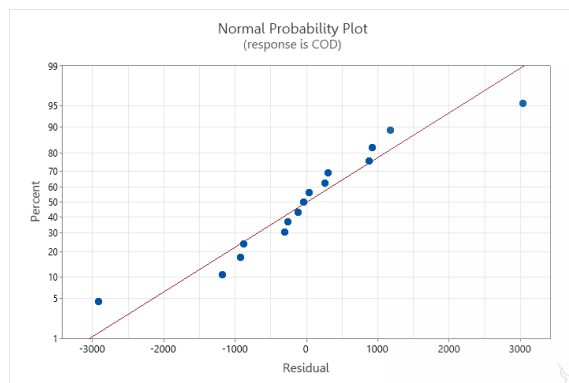
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณฟอสเฟตที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	10.12	3.64	2.78	0.039
Current	-5.54	2.23	-2.49	0.055
time	2.34	2.23	1.05	0.342
distant	-1.14	2.23	-0.51	0.631
Current*Current	5.10	3.28	1.56	0.180
time*time	-2.91	3.28	-0.89	0.415
distant*distant	-2.87	3.28	-0.88	0.421
Current*time	-0.44	3.15	-0.14	0.894
Current*distant	1.83	3.15	0.58	0.586
time*distant	-1.37	3.15	-0.44	0.682

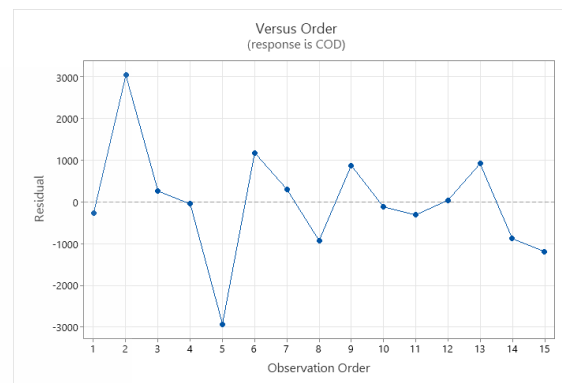
S = 6.29622, R - Sq = 71.27%, R-sq(adj) = 19.56%

$$P = 16.1 - 7.18 \text{ Current} + 0.587 \text{ time} + 3.14 \text{ distant} + 0.319 \text{ Current*Current} - 0.00324 \text{ time*time} - 0.319 \text{ distant*distant} - 0.0037 \text{ Current*time} + 0.153 \text{ Current*distant} - 0.0152 \text{ time*distant} \quad (4.5)$$

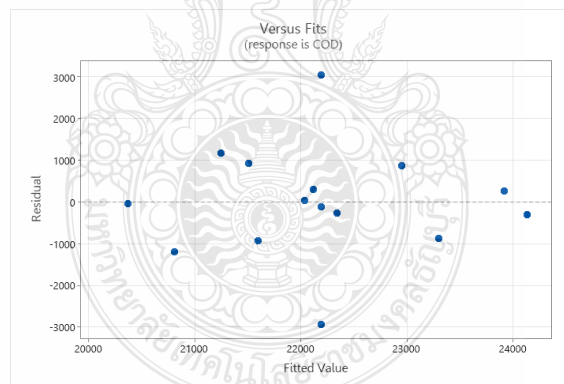
เมื่อ
 Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
 Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)
 Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดออก

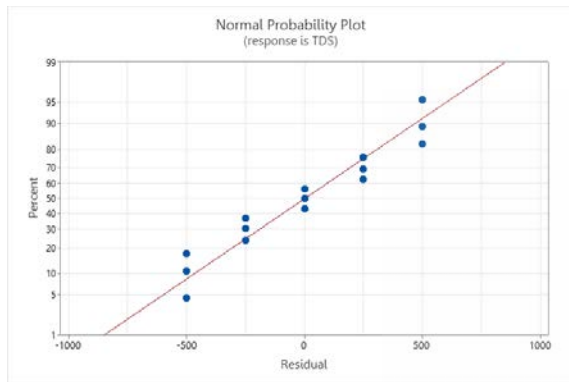
(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

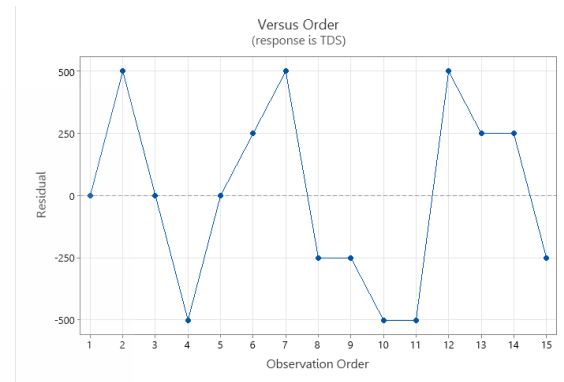
จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.9 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 39.25 % แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 39.25 % ซึ่งในการนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้ไม่อย่าง จึงไม่สามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของการลดลงของปริมาณซีโอดีได้ นอกจากนี้สมการที่ได้ อาจส่งผลกระทบต่อผลของผลลัพธ์

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดออกไป

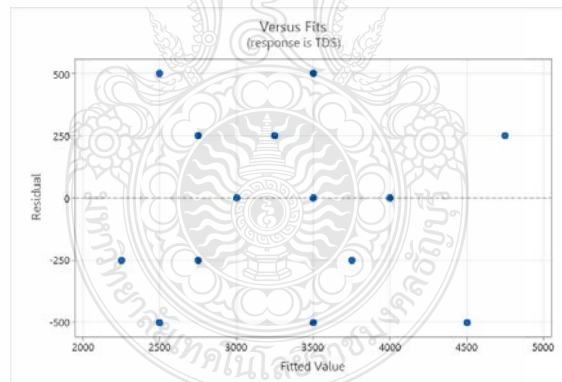
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	22192	1268	17.50	0.000
Current	482	776	0.62	0.562
time	-307	776	-0.39	0.709
distant	-526	776	-0.68	0.529
Current*Current	1080	1143	0.95	0.388
time*time	-146	1143	-0.13	0.903
distant*distant	-934	1143	-0.82	0.451
Current*time	-0	1098	-0.00	1.000
Current*distant	-788	1098	-0.72	0.505
time*distant	88	1098	0.08	0.940
S = 2196.18, R – Sq = 39.25%, R-sq(adj) = 0.00%				



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออก
 (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.10 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 79.91% แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 79.91% นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ตัวแปรดังกล่าวยังมีผลต่อการลดปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถนำแบบจำลองไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าปริมาณการลดลงของของแข็งในน้ำได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย สมการทำนายแสดงดังสมการที่ 4.5

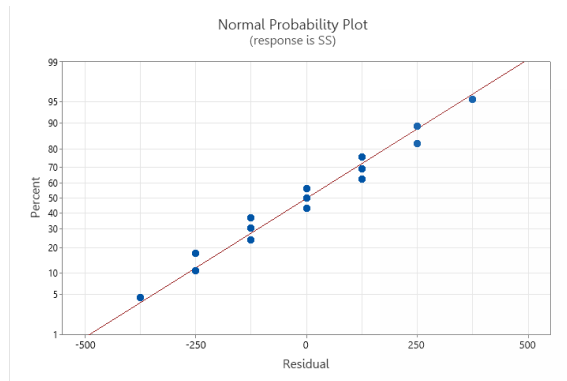
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองของปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ทั้งหมดที่ละลายในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	3500	354	9.90	0.000
Current	500	217	2.31	0.069
time	-0	217	-0.00	1.000
distant	0	217	0.00	1.000
Current*Current	563	319	1.77	0.138
time*time	-187	319	-0.59	0.582
distant*distant	-688	319	-2.16	0.083
Current*time	375	306	1.22	0.275
Current*distant	-625	306	-2.04	0.097
time*distant	-125	306	-0.41	0.700

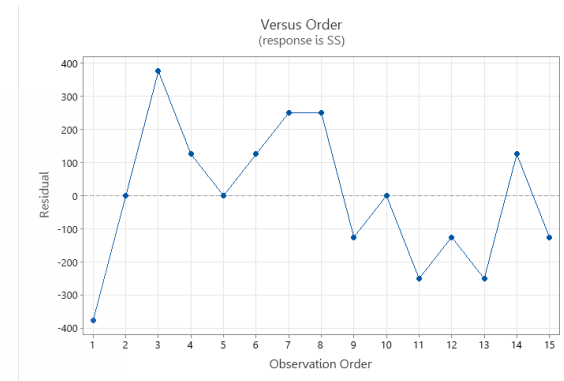
S = 612.372, R – Sq = 79.91%, R-sq(adj) = 43.75%

$$\begin{aligned}
 \text{TDS} &= -250 - 313 \text{ Current} + 8.3 \text{ time} + 1417 \text{ distant} \\
 (\text{มก./ลิตร}) &+ 35.2 \text{ Current*Current} - 0.208 \text{ time*time} - 76.4 \text{ distant*distant} \\
 &+ 3.13 \text{ Current*time} - 52.1 \text{ Current*distant} - 1.39 \text{ time*distant}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

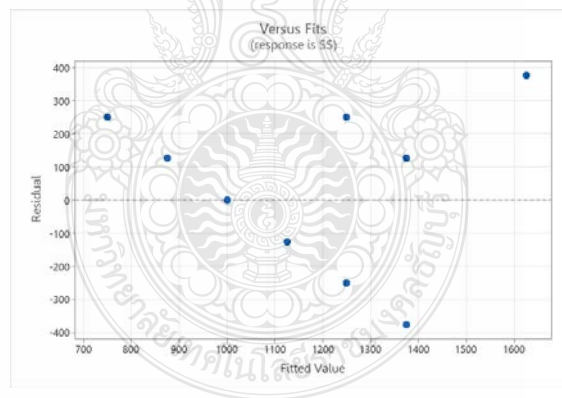
เมื่อ Current คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
Distant คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซ็นติเมตร)
Time คือระยะเวลาในการบำบัด (นาที)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.16 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออก

(ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ, (ข) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล, (ค) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coded Coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในตารางที่ 4.11 พบว่าค่า R – Sq มีค่าเท่ากับ 53.12 % แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต้น (ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว และเวลาในการบำบัด) สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ 53.12 % ซึ่งในการนำแบบจำลองมาสร้างเป็นสมการในการทำนายเพื่อหาผลลัพธ์ได้ไม่อย่าง จึงไม่สามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาปริมาณการลดลงของการลดลงของปริมาณของแข็งในน้ำได้ นอกจากนี้สมการที่ได้อาจส่งผลก็การคาดเคลื่อนของผลลัพธ์

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์การถดถอยของฟัตอบสนองของปริมาณของแข็งในน้ำที่ถูกกำจัดออกไป

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	1000	204	4.90	0.004
Current	125	125	1.00	0.363
time	0	125	0.00	1.000
distant	-125	125	-1.00	0.363
Current*Current	188	184	1.02	0.355
time*time	187	184	1.02	0.355
distant*distant	-63	184	-0.34	0.748
Current*time	-125	177	-0.71	0.511
Current*distant	125	177	0.71	0.511
time*distant	-125	177	-0.71	0.511

S = 353.553, R – Sq = 53.12%, R-sq(adj) = 0.00%

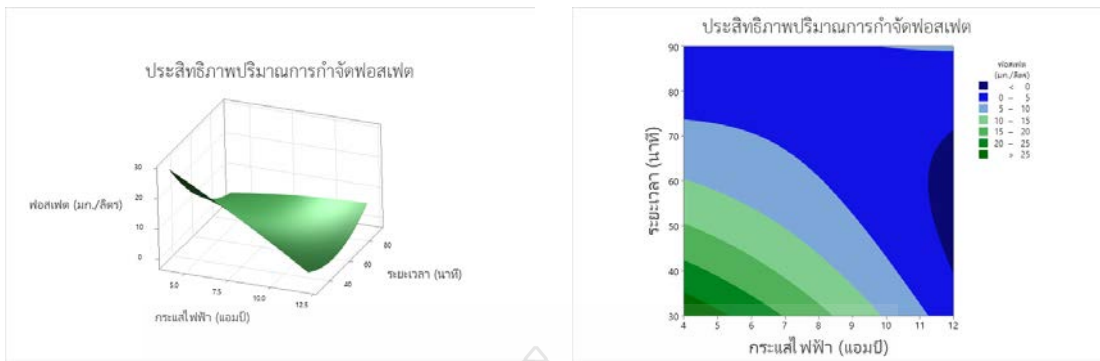
4.4 สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณฟอสเฟตจากน้ำปัสสาวะมนุษย์

จากผลการทดลองต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่แสดงประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตและพารามิเตอร์ที่สำคัญอื่นๆ การหาสภาวะที่เหมาะสมจะมุ่งเน้นไปที่การลดปริมาณฟอสเฟตจากน้ำปัสสาวะมนุษย์โดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก โดยสามารถสรุปผลช่วงค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทดลองของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

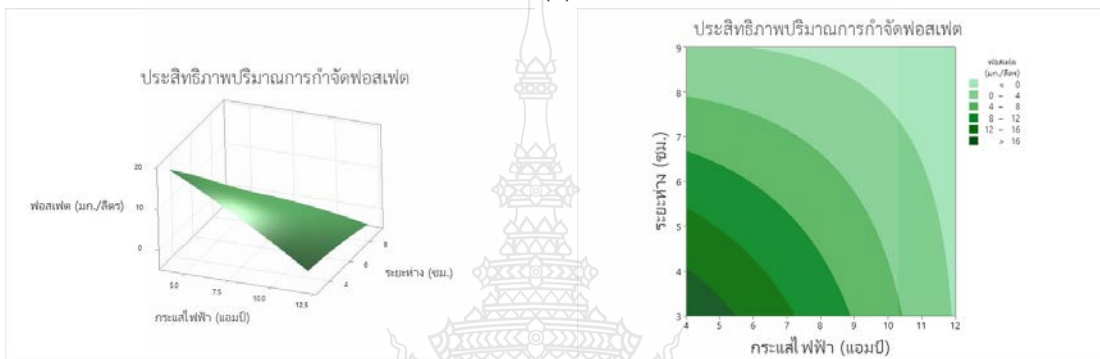
ตารางที่ 4.12 ช่วงค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทดลอง

ชนิดแผ่นขั้ว	ช่วงประสิทธิภาพในการ บำบัด	ช่วงสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบ			
		ซีโอดี	ค่าฟอสเฟต	ค่าของแข็ง แขวนลอย	ค่าของแข็ง ละลายน้ำ
อะลูมิเนียม	กระแสไฟฟ้า(แอมป์)	6-10	8-12	10-12	10-12
	ระยะห่าง (ซม.)	4-7	3-8	5-9	8-9
	ระยะเวลา(นาที)	60-90	40-70	50-80	85-90
เหล็ก	กระแสไฟฟ้า(แอมป์)	6-10	4-8	4-8	5.5-9
	ระยะห่าง (ซม.)	8-9	3-9	8-9	3
	ระยะเวลา(นาที)	80-90	30-80	40-70	90

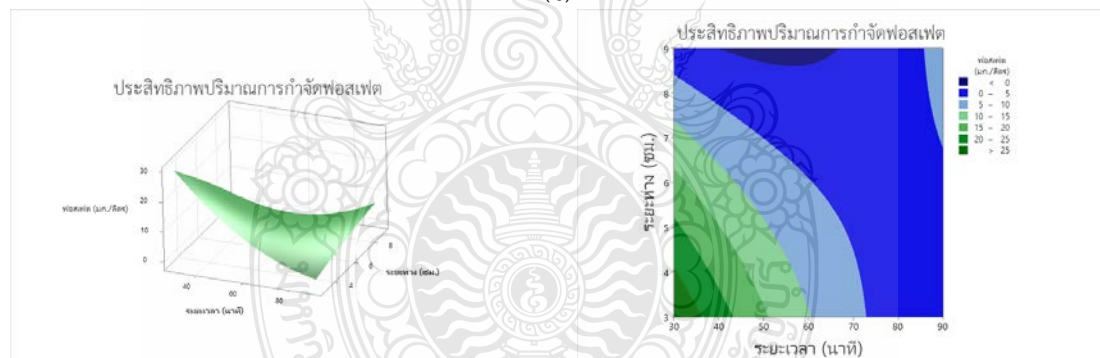
จากการตารางที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ต่างๆจะขึ้นอยู่กับเวลาในการบำบัด ซึ่งที่แผ่นขั้วอะลูมิเนียมประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต ช่วงที่เหมาะสมของกระแสไฟฟ้าพบว่ากำจัดดีในช่วง 8 – 12 แอมป์ และหากมีการเพิ่มขึ้นของเวลาจะสามารถบำบัดได้ทั้งฟอสเฟตในปัสสาวะ และของแข็งแขวนลอยได้อีกด้วย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้พบปริมาณตะกอนที่ค่อนข้างมากในการทดสอบจริง ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบด้วยแผ่นขั้วเหล็กในช่วงกระแสไฟฟ้าที่ 3 -9 แอมป์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ดี แต่การกำจัดของแข็งนั้นจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาที่มากขึ้นกว่า 90 นาที และนอกจากนี้การทดสอบจริงพบว่าปริมาณตะกอนที่พบจะมีค่อนข้างที่น้อย เนื่องจากคุณสมบัติในการใช้แผ่นขั้วเหล็กจำเป็นต้องมีการปรับสภาพน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่เป็นด่างจึงจะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนได้ดีขึ้น และเมื่อนำค่าช่วงสภาวะที่เหมาะสมมาพิจารณาพารามิเตอร์ที่เป็นเป้าหมายการกำจัดของงานวิจัยนี้มาสร้างกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง (response surface plot) และกราฟโครงร่าง (contour plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ ระยะห่างระหว่างขั้วเวลา และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ส่วนตัวแปรตามคือปริมาณการลดลงของฟอสเฟตในน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์จากขั้วอะลูมิเนียม และขั้วเหล็ก รูปร่างของกราฟจะสามารถบ่งบอกถึงลักษณะและขอบเขตของการปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตาม การหาสภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณาจากการลดลงของปริมาณฟอสเฟตซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเกิดเป็นผลึกของแคลเซียมฟอสเฟต และพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดของพารามิเตอร์อื่นๆ ตามมาเป็นปัจจัยรอง รวมถึงการพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาเมื่อมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการพิจารณานำไปใช้ประโยชน์ในงานจริง กราฟแสดงผลการทดลองระหว่างฟอสเฟตกับปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอสเฟตด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีและกราฟโครงร่างที่แสดงปริมาณฟอสเฟตจากสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



(ก)



(ข)



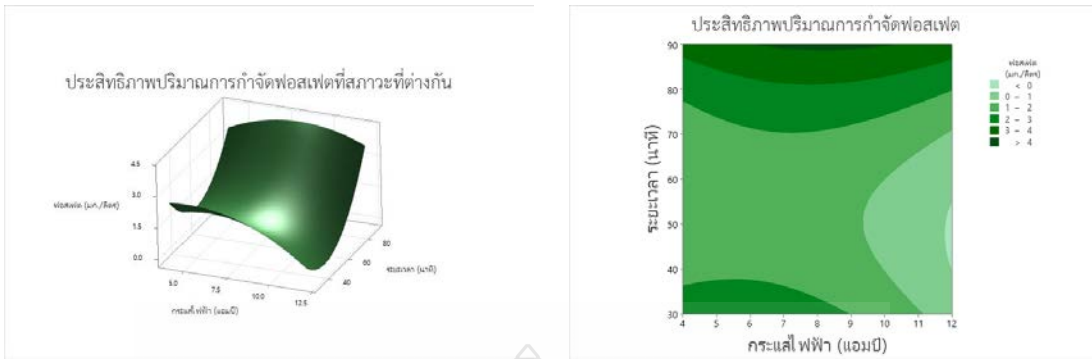
(ค)

รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพปริมาณการกำจัดฟอสเฟตที่สภาวะที่ต่างกัน จากข้าวโอ๊ตโคโรดอะลูมิเนียม

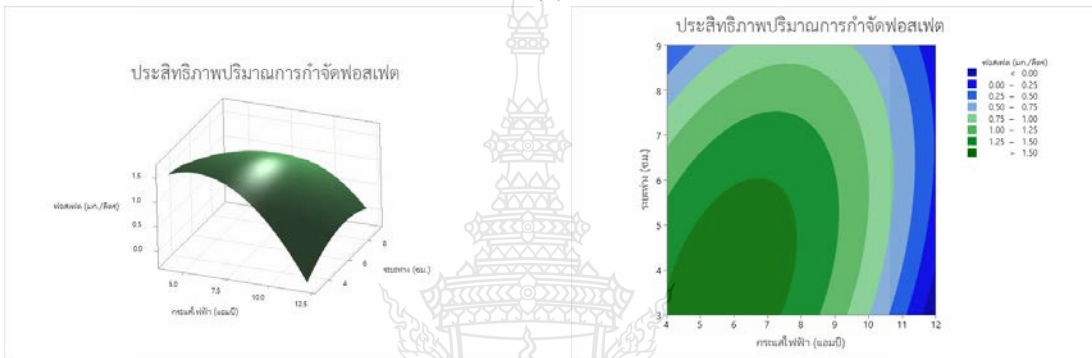
ซึ่ง (ก) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง : เวลาและกระแสไฟฟ้า

(ข) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง : เวลาและระยะห่างของแผ่นข้าวอะลูมิเนียม

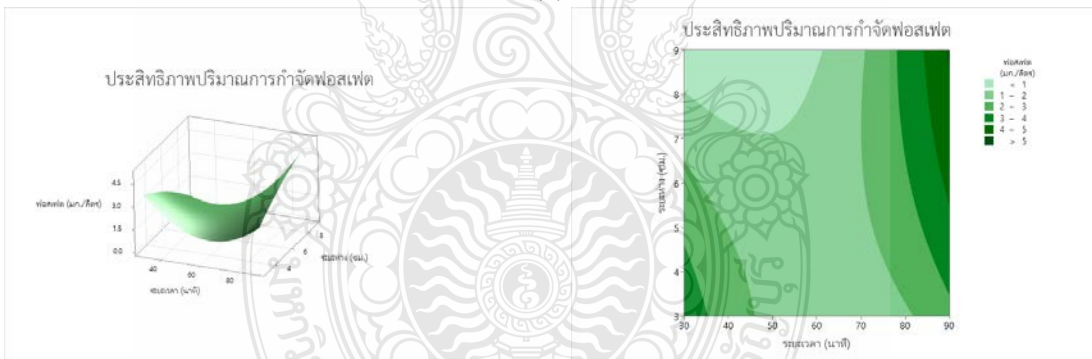
(ค) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าและระยะห่างของแผ่นข้าวอะลูมิเนียม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพปริมาณการกำจัดฟอสเฟตที่สภาวะที่ต่างกัน จากข้อวิเคราะห์หลัก ซึ่ง (ก) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง : เวลาและกระแสไฟฟ้า
 (ข) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง : เวลาและระยะห่างของแผ่นขั้วอะลูมิเนียม
 (ค) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าและระยะห่างของแผ่นขั้วเหล็ก

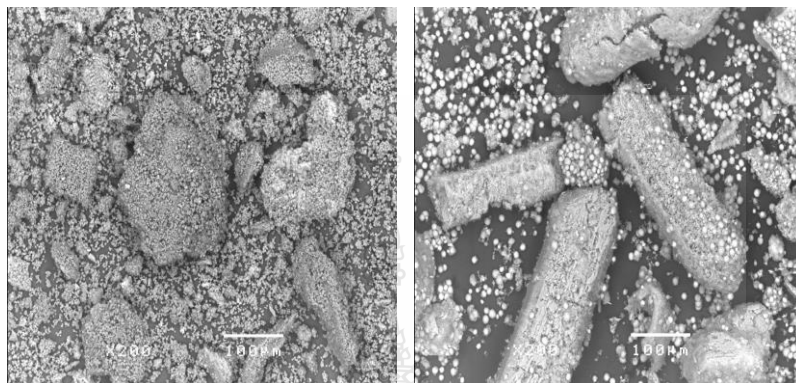
จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 เมื่อพิจารณาจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองของซั้วอะลูมิเนียม พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง เวลาและกระแสไฟฟ้า เวลาและระยะห่างของแผ่นซั้ว และกระแสไฟฟ้าและระยะห่างของแผ่นซั้ว มีปริมาณการลดลงของฟอสเฟตในน้ำสูงสุดอยู่ที่ 25 % (รูปที่ 4.17) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองของซั้วเหล็ก พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง เวลาและกระแสไฟฟ้า เวลาและระยะห่างของแผ่นซั้ว และกระแสไฟฟ้าและระยะห่างของแผ่นซั้ว มีปริมาณการลดลงของฟอสเฟตในน้ำสูงสุดอยู่ที่ 20 % (รูปที่ 4.18) จะเห็นได้ว่าเวลา และระยะห่าง มีอิทธิพลต่อการลดลงของฟอสเฟตในน้ำเสีย เมื่อระยะห่างยิ่งใกล้ขึ้นและ เวลายิ่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียให้เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากสภาวะของซั้วเหล็กที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 8 แอมป์ ระยะเวลากการทดลอง 30 นาที และระยะห่างของซั้วเหล็กที่ 9 เซนติเมตร ผลการกำจัดฟอสเฟตพบว่าฟอสเฟตในน้ำเสียถูกกำจัดไป 99.37 %คงเหลือฟอสเฟตเพียง 0.05 มก./ล. และที่จากสภาวะของซั้วเหล็กที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 8 แอมป์ ระยะเวลากการทดลอง 60 นาที และระยะห่างของซั้วอะลูมิเนียมที่ 6 เซนติเมตร ผลการกำจัดฟอสเฟตพบว่าฟอสเฟตในน้ำเสียถูกกำจัดไป 86.95 %คงเหลือฟอสเฟตเพียง 1.04 มก./ล. ซึ่งทั้ง 2 สภาวะนี้ ปริมาณตะกอนหลังจากการบำบัดมีค่อนข้างมากในการตกผลึกเป็นแคลเซียมฟอสเฟต หลังจากการบำบัดด้วยไฟฟ้าเคมี ผลึกจะถูกทำให้แห้งจากนั้นจึงเก็บของแข็งบนกระดาษกรองโดยการดูดเบาๆ ตะกอนที่เป็นของแข็งบนกระดาษกรองถูกเก็บรวบรวมที่ (1 กรัม./ลิตร) ในกรณีนี้ สามารถรวบรวมของแข็งได้เพียงพอสำหรับการกำหนดคุณลักษณะที่เป็นของแข็ง เราตรวจสอบข้อมูลพันธะของของแข็ง โดย Raman Spectroscopy และ X-ray diffraction (XRD) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และกำหนดองค์ประกอบของธาตุด้วย X-Ray spectroscopy (EDS) แบบกระจายพลังงาน [3], [51]

4.5 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และ กำหนดองค์ประกอบของธาตุด้วย X-Ray spectroscopy (EDS)

เทคนิค Element and Chemical Analysis การยิงลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบกับพื้นผิววัสดุที่จะส่อง เมื่อกระทบต่อวัสดุนั้นอิเล็กตรอนก็จะสะท้อนกลับเข้ามายังตัวรับสัญญาณ เพื่อจำแนกอิเล็กตรอนตัวนั้นว่ามาจากตำแหน่งใด นอกจากนี้ยังสามารถวัดระดับพลังงานของรังสีที่คายออกจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งรังสีที่คายออกมานี้จะสามารถบอกถึงธาตุและองค์ประกอบของธาตุ รวมถึงปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้

จากกาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค Element and Chemical Analysis พบว่าองค์ประกอบของธาตุที่พบในสารตัวอย่าง (รูปที่ 4.19) จากรูป 4.19 (ก) เป็นผลึกที่ได้จากการทดลองด้วยซั้วอะลูมิเนียมจะเห็นว่าการก่อตัวของแคลเซียมฟอสเฟตแสดงให้เห็นลักษณะเฉพาะของการรวมตัวของอนุภาคทรงกลมที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จากตารางที่แสดง 4.13 องค์ประกอบธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ EDS พบว่า มีธาตุประกอบฟอสเฟต และแคลเซียม[51] ในผลึกในรูปของของแข็งได้ในปริมาณที่ 2.98 และ 0.56 % ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในผลึก

ของแผ่นขี้เหล็กดังรูปที่ 4.19 (ข) ที่พบเพียงธาตุฟอสเฟตจากการบำบัดเพียง 8.90 % แต่ไม่พบธาตุแคลเซียมจากผลึก ดังที่แสดงในตาราง 4.13 องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.19 รูปพื้นผิวผลึกแคลเซียมฟอสเฟตที่กำลังขยาย 100 เท่า

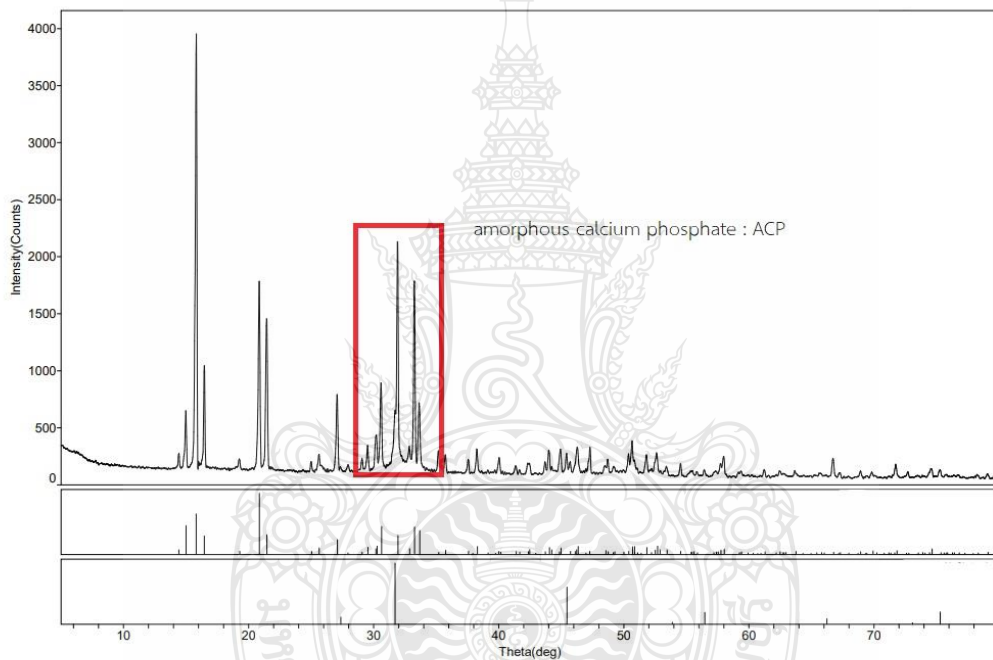
(ก) ผลึกจากแผ่นขี้อะลูมิเนียม

(ข) ผลึกจากขี้เหล็ก

ในรูปแบบการวิเคราะห์ความเป็นผลึกบนการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD) ของของแข็งที่เก็บรวบรวมนั้น ผลึกที่ได้จากการบำบัดจากขี้อะลูมิเนียมมีโอกาสที่จะสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งจะมีลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นในรูปแบบรวมตัวของอนุภาคทรงกลมที่ไม่สม่ำเสมอ [40] ซึ่งจากการวิเคราะห์ภาพ SEM (รูปที่ 4.19) ผลึกจากการบำบัดด้วยขี้อะลูมิเนียมจะมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และเพื่อยืนยันความเป็นผลึกในรูปแบบของ CaP ที่ได้จากการทดสอบลักษณะของผลึกและองค์ประกอบของธาตุที่มีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจาก SEM – EDS นั้น ได้ทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกบนการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หลังการทดสอบที่ช่วงการทำมุมที่ 2θ ตั้งแต่ 10 – 80 องศา พบว่าช่วงพีคของกราฟมีความเป็นผลึกที่ช่วงองศาที่ 15 – 35 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากการพิจารณาเปรียบเทียบช่วงพีคของกราฟ (รูปที่ 4.20) สามารถบ่งบอกถึงเฟสกลางที่เป็นไปได้ รวมทั้งแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (amorphous calcium phosphate : ACP), หินปูน ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, DCPD) และออกตาแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, OCP) สามารถมีส่วนเกิดขึ้นได้ในกระบวนการตกผลึก อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถระบุลักษณะของแคลเซียมฟอสเฟตที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่กล่าวถึงได้ ระยะเริ่มต้นที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะแสดงถึงแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐานโดยไม่มีจุดสูงสุด ที่สอดคล้องกัน

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะ

องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะที่ใช้แผ่นขี้วัวอะลูมิเนียม									
ธาตุ	O	Na	Al	P	S	Cl	K	Ca	Totals
Weight%	61.12	3.54	24.34	2.98	1.93	3.6	1.93	0.56	100
องค์ประกอบของธาตุจากตะกอนน้ำเสียปัสสาวะที่ใช้แผ่นขี้เหล็ก									
ธาตุ	C	O	Na	Mg	P	Cl	K	Fe	Totals
Weight%	10.85	26.37	0.9	0.7	8.9	0.34	0.91	51.03	100



Materials Data, Inc.

DPERTIPAN\spical\3_File\XRD\2-TS\2565\08_65\1280-65> Friday, Aug 19, 2022 04:18p (MDI\JADE)

รูปที่ 4.20 แคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (amorphous calcium phosphate : ACP)

แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ที่ $2\theta = 30 - 40$ องศา ยังเป็นการก่อตัวของแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (ACP) ซึ่งสำหรับแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (ACP) นั้นยังไม่มีสูตรทางเคมีที่กำหนดไว้ แต่ปกติแล้วสามารถใช้สูตร $\text{Ca}_9(\text{PO}_4)_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ดังนั้นจึงแนะนำสูตรของ $\text{Ca}_x\text{H}_y(\text{PO}_4)_z \cdot n\text{H}_2\text{O}$ การก่อตัวของ ACP นอกจากนี้ คาร์บอนซึ่งอาจเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศภายใต้สภาวะที่เป็นต่าง อาจถูกรวมเข้าหรือตกตะกอนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตในการตกผลึกในการบำบัดน้ำเสียปัสสาวะที่ใช้แผ่นขี้ทั้งสองประเภทนั้นมีความแตกต่างกันในด้านของสารประกอบของแข็งแคลเซียมฟอสเฟต และปริมาณตะกอนที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลึกอีกด้วย [40]

4.6 การตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต

เมื่อพิจารณาจากผลที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ผลึกแคลเซียมฟอสเฟตถึงอิทธิพลของสภาวะที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 12 แอมป์ ระยะเวลาการทดลอง 60 นาที และระยะห่างของขั้วอะลูมิเนียมที่ 9 เซนติเมตรนั้น พบว่าอิทธิพลของสภาวะนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในแง่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตกตะกอนของผลึก และจากการศึกษาการใช้ขั้วอะลูมิเนียมสำหรับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยที่บำบัดยากนั้น ยังสามารถลดปริมาณและมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ดีกว่าขั้วเหล็ก และในการกำจัดฟอสเฟตการใช้วิธีการบำบัดไฟฟ้าด้วยขั้วอะลูมิเนียมยังมีผลต่อการกำจัดฟอสเฟต รวมถึงการตกตะกอนที่ดีขึ้นตามไปด้วย[53] ทั้งนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอื่นๆได้หลายประเภท เช่น น้ำเสียจากโรงพยาบาล น้ำเสียจากโรคพอกไต น้ำเสียชุมชน น้ำเสียโรงงาอุตสาหกรรมประเภทเคมี และเกษตรกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ในการนำไปพัฒนาต่อยอดอาจจะต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในเรื่องของไฟฟ้า และแผ่นขั้วที่สึกหลอในการใช้งานอีกด้วย

กลไกการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตในการทดลองนี้มีอิทธิพลมาจากผลของกระแสไฟฟ้า (ความหนาแน่น) ต่อประสิทธิภาพของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี แสดงว่าการกำจัดฟอสเฟตขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นอย่างมาก จากการศึกษาแคลเซียมคาร์บอเนตบรรจุคอลัมน์ไฟฟ้าเคมีตกตะกอนแนวคิดใหม่ในการกำจัดและฟื้นฟูฟอสเฟตของ Lei Y. , 2019[41] พบว่าอิทธิพลของกระแสไฟฟ้ามีผลมากกว่า pH ในการตกตะกอนโดยเฉพาะในกระแสไฟฟ้าที่ (0 mA) มีเพียง 4% ของฟอสเฟตเท่านั้นที่ถูกกำจัด ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตถึง 23% ที่กระแส 5 mA (3.5 A/m^2) และ 40% ที่ 10 mA (7.0 A/m^2) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นอีกของกระแสที่ใช้เป็น 20 mA (14 A/m^2) ไม่ได้ก่อให้เกิดการกำจัดฟอสเฟตอีกต่อไป อาจเป็นเพราะการแบ่งกันระหว่างการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมฟอสเฟต แม้ว่าเราจะพบตะกอนอินทรีย์ธรรมชาติ ผลึกจาก CaP และการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสีย ในระบบบำบัดไฟฟ้าเคมี แต่ก็ยังไม่สามารถชี้แจงถึงกลไกของการตกตะกอนได้ ซึ่งการตกตะกอนร่วมอาจเป็นได้ทั้งการตกตะกอนทางกายภาพโดยตรงหรือการตกตะกอนทางเคมีทางอ้อมหรือการรวมกันของทั้งสอง สำหรับการตกตะกอนร่วมทางเคมี Ca^{2+} จะสร้างสารเชิงซ้อนแบบไบนารีที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter : NOM-Ca^{2+}) ในขั้นต้นจากนั้นจะกระจายไปยังแคโทดและสร้างสารเชิงซ้อน P-Ca-NOM ที่ไม่ละลายน้ำ ขั้นตอนสำคัญของการตกตะกอนร่วมทางเคมีคือการแพร่กระจายของ NOM-Ca^+ ไปยังแคโทด

อย่างไรก็ตามด้วยขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ของ NOM-Ca^+ อัตราการแพร่กระจายของ NOM-Ca^+ จะช้ากว่า Ca^{2+} อิสระมาก ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นไปได้ที่จะซับซ้อน NOM-Ca^+ จะมีส่วนร่วมในการตกตะกอนของ CaP โดยตรง กลไกการตกตะกอนร่วมที่เป็นไปได้มากที่สุดคือการดูดซับ สารอินทรีย์ธรรมชาติบน ACP (รูปที่ 4.21) ในกระบวนการนี้ การก่อตัวของ ACP โดย Ca^{2+} และฟอสเฟตเป็นขั้นตอนแรก เนื่องจากความสามารถในการดูดซับที่ดีของ ACP ที่เกิดขึ้นในตอนแรก และโครงสร้างที่ไม่เสถียร [54] สารอินทรีย์ธรรมชาติจึงสามารถดูดซับไปยังพื้นผิวของ ACP ได้อย่างง่ายดาย Zhou et

a.[55] รายงานการดูดซับทางกายภาพที่คล้ายกันของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนพื้นผิวของผลึกสตรูไวท์ สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ถูกดูดซับ อาจมีปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต ก่อตัวเป็น NOM- Ca^+ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสารอินทรีย์ธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนจากแคโทด หรือกับ H_2 ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวแคโทด [56] นี้จะนำไปสู่การก่อตัวของ NOM- Ca^+ เช่นกัน ต่อจากนั้น NOM- Ca^+ อาจสามารถโต้ตอบกับฟอสเฟตทางเคมีได้ ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติCa-P ที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงแนะนำว่าการดูดซับทางกายภาพของสารอินทรีย์ธรรมชาติโดย ACP เป็นเส้นทางการตกตะกอนร่วมที่เด่นชัดในระยะเริ่มแรกเช่นกันเพราะมี Ca^{2+} จำนวนเล็กน้อยเท่านั้นที่สามารถสร้างความซับซ้อนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ระยะต่อมาการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี อาจนำไปสู่การกำจัดฟอสเฟต ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีสารอินทรีย์ธรรมชาติในระบบการหมุนเวียนกลับคืนของฟอสเฟตในระบบบำบัดด้วยไฟฟ้าไฟฟ้าเคมี



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการบำบัดฟอสเฟตและการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจากปัสสาวะมนุษย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีนั้น ได้ทำการศึกษหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟตในน้ำที่สามารถเกิดการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตได้นั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) และออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design (BBD) พบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียปัสสาวะมนุษย์โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กนั้นมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียมสามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียได้สูงสุดถึงร้อยละ 99.99 และขั้วเหล็กมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.37 และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองบนพื้นฐานของการออกแบบการทดลองด้วย BBD พบว่าแนวโน้มของการใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียโดยกระแสไฟฟ้าและระยะห่างของขั้วมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตที่ทำให้เกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟตพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมนั้นจะอยู่ที่สภาวะกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 12 แอมป์ ระยะเวลาการทดลอง 60 นาที และระยะห่างของขั้วอะลูมิเนียมที่ 9 เซนติเมตร เมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์หาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของผลึกแคลเซียมฟอสเฟต พบว่าผลึกที่ได้เป็นแคลเซียมฟอสเฟตอสัณฐาน (ACP) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของแคลเซียมฟอสเฟต (CaP) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลองกับน้ำเสียโดยมีกลุ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นและมาจากหลากหลายแหล่งเพื่อให้สามารถนำไปขยายผลได้ในอนาคต รวมถึงทำการหาแหล่งน้ำเสียที่มีแคลเซียมที่มากขึ้นหรือเติมแคลเซียมลงไปเพื่อให้เกิดการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตที่สมบูรณ์
2. ควรมีการแปรเปลี่ยนปัจจัยอื่นๆ ในการทำให้ผลึกขนาดใหญ่และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ชัดเจนขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., & Carliell-Marquet, C. (2011). **The future distribution and production of global phosphate rock reserves.** Resources, Conservation and Recycling, 57, 78-86.
- [2] Dodds, W. K., & Smith, V. H. (2016). **Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams.** Inland Waters, 6(2), 155-164.
- [3] Lei, Y., Song, B., van der Weijden, R. D., Saakes, M., & Buisman, C. J. (2017). **Electrochemical induced calcium phosphate precipitation: importance of local pH.** Environmental science & technology, 51(19), 11156-11164.
- [4] Lei, Y., Geraets, E., Saakes, M., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2020). **Electrochemical removal of phosphate in the presence of calcium at low current density: Precipitation or adsorption.** Water research, 169, 115207.
- [5] Tran, A. T., Zhang, Y., De Corte, D., Hannes, J.-B., Ye, W., Mondal, P., Van der Bruggen, B. (2014). **P-recovery as calcium phosphate from wastewater using an integrated selectrodialysis/crystallization process.** Journal of Cleaner Production, 77, 140-151.
- [6] Vanotti, M., & Szogi, A. (2009). **Technology for recovery of phosphorus from animal wastewater through calcium phosphate precipitation.** Paper presented at the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams: May.
- [7] Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). **The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology.** Critical reviews in environmental science and technology, 45(17), 1827-1879.
- [8] Ganrot, Z., Dave, G., & Nilsson, E. (2007). **Recovery of N and P from human urine by freezing, struvite precipitation and adsorption to zeolite and active carbon.** Bioresource technology, 98(16), 3112-3121.
- [9] Karak T., & Bhattacharyya P. (2011). **Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality.** Resources, Conservation and Recycling, 400 – 408.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [10] Udert, K. M., Buckley, C. A., Wächter, M., McArdell, C. S., Kohn, T., Strande, L., Etter, B. (2015). **Technologies for the treatment of source-separated urine in the Thekwini Municipality.** *Water Sa*, 41(2), 212-221.
- [11] กฤตภาส ธรรมเจริญ. (2564). **พลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยผสมของมูลวัวและมูลหมู.** วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [12] Sergey V. Dorozhkin . (2007). **Calcium orthophosphates.** *J Mater Sci.* 42:1061 – 1095.
- [13] ปิติพร มโนคุ่น. (2554). **สมมูลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง.** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [14] Sawyer, N, Clair., Mccarty, L, Ferry. and Parkin, F, Gene. (2003).**Chemistry for Environmental Engineering and Science** (5th edn). Singapore: McGraw-Hill.
- [15] กองวิจัย และค้นคว้าพลังงาน. (2552). **โครงการศึกษาการเพิ่มมูลค่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง.** สืบค้นจาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/14>.
- [16] ศุภมาส ตำนวิทยากุล. (2557). **การตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับการบำบัดน้ำเสีย.** *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, 35-41.
- [17] สุชาติพิทย์ บุญชิต. (2557). **การบำบัดฟอสฟอรัสและโลหะหนักจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยระบบไฟฟ้าเคมี.** (ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- [18] Apirat Kuhavicchanan. (2011). **Modeling and Simulation of an Electrochemical System for Nutrient Recovery.** The Degree of Master of Engineering Faculty of Engineering King Mongkut’s University of Technology Thonburi.
- [19] Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). **The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology.** *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(17), 1827-1879.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [20] Randall, D., & Naidoo, V. (2018). **Urine: The liquid gold of wastewater.** Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), 2627-2635.
- [21] Sarigul, N., Korkmaz, F., & Kurultak, İ. (2019). **A New Artificial Urine Protocol to Better Imitate Human Urine.** Scientific reports, 9(1), 1-11.
- [22] Mihelcic, J. R., Fry, L. M., & Shaw, R. (2011). **Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces.** Chemosphere, 84(6), 832-839.
doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.046
- [23] อุดม ลพสุนทร. (2559). การลดของเสียในกระบวนการประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่นพีซีบีโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [24] ญัฐพร ชัชวาลธাত্রี. (2559). การปรับสภาพฟางข้าวด้วยต่างและไมโครเวฟร่วมกับต่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [25] Box, G. E. P., and Behnken, D. W. (1960). **Some new three level design for the study of quantitative variables.** Technometrics. 2: 455-475.
- [26] Karin Kandananond (2010). **Using the Response Surface Method to Optimize the Turning Process of AISI 12L14 Steel.** Faculty of Industrial Technology, Rajabhat University Valaya-Alongkorn, Prathumthani 13180, Thailand.
- [27] เสาวภา ไวยสุศรี. (2558). การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- [28] Tran, A. T., Zhang, Y., De Corte, D., Hannes, J.-B., Ye, W., Mondal, P., Van der Bruggen, B. (2014). **P-recovery as calcium phosphate from wastewater using an integrated selectrodialysis/crystallization process.** Journal of Cleaner Production, 77, 140-151.
- [29] Hu, R., Lin, C., Shi, H., & Wang, H. (2009). **Electrochemical deposition mechanism of calcium phosphate coating in dilute Ca-P electrolyte system.** Materials Chemistry and Physics, 115(2-3), 718-723.
- [30] Noinumsai, S. (2017). **Textile direct dyeing wastewater treatment by electrochemical-coagulation process.** Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [31] Lei, Y., Geraets, E., Saakes, M., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2020). **Electrochemical removal of phosphate in the presence of calcium at low current density: Precipitation or adsorption.** *Water research*, 169, 115207.
- [32] Lingchen Kong and Xitong Liu. (2020). **Emerging electrochemical processes for materials recovery from wastewater: Mechanisms and prospects.** Department of Civil and Environmental Engineering, The George Washington University, 800 22nd St NW, Washington, DC 20052, USA. *Environ. Sci. Eng.*, 14(5): 90.
- [33] อภิรัตน์ คูหาวิชานันท์. (2554). **การศึกษาการสร้างแบบจำลองและจำลองระบบไฟฟ้าเคมีสำหรับนำธาตุอาหารกลับมาใช้ใหม่.** ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [34] วัฒนา ปิ่นเสม, จรุงเดช คำนูนอก และจิรวัดน์ รุ่งเลิศระกุลชัย. (2010). **Composting With Human Urine : Plant Fertilizer approach.** *Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok 10800, Thailand.
- [35] WANG LiJun, LU JianWei , XU FangSen & ZHANG FuSuo. (2010). **Dynamics of crystallization and dissolution of calcium orthophosphates at the near-molecular level.** *Chinese Science Bulletin* No.8: 713–721.
- [36] ศิริกาญจน์ ดอกไม้เงิน. (2558). **การนำกลับฟอสฟอรัสในรูปแบบผลิตภัณฑ์ชีวจากสัดจัดน้ำ.** ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [37] Brundavanam, S., Poinern, J., Fawcett, D. (2015). **Electrochemical Synthesis of Micrometre Amorphous Calcium Phosphate Tubes and their Transformation to Hydroxypatite Tubes.** *International Journal of Sciences*.
- [38] Lei, Y., Song, B., Saakes, M., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2018). **Interaction of calcium, phosphorus and natural organic matter in electrochemical recovery of phosphate.** *A Journal of the International Water Association.* *Water research*, 142 , 10 – 17.
- [39] Kawashita, M., Itoh, S., Miyamoto, K., & Takaoka, H., G. (2008). **Apatite formation on titanium substrates by electrochemical deposition in metastable calcium phosphate solution.** *J Mater Sci, Mater Med*, 19, 137 – 142.

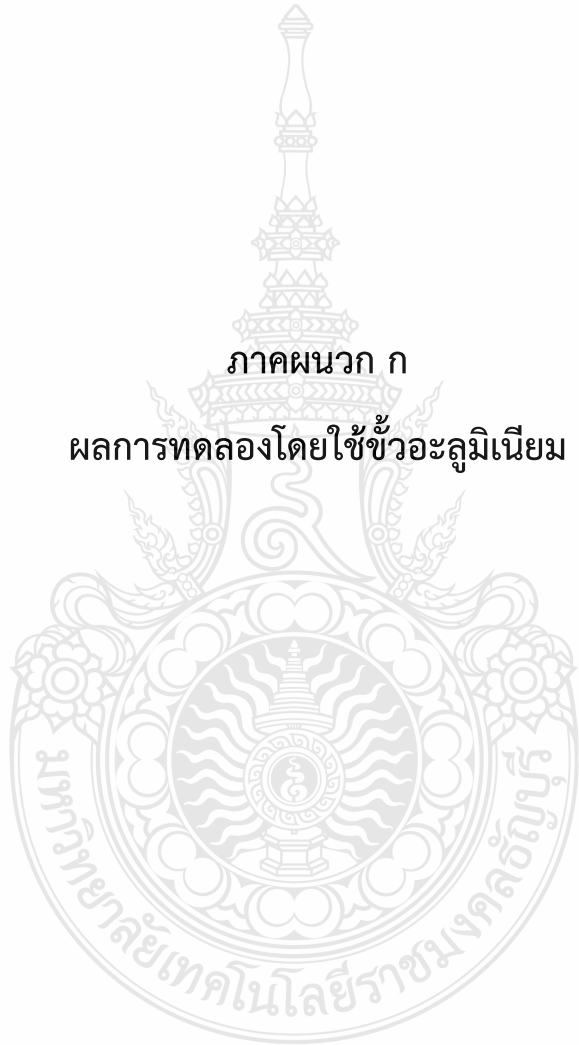
บรรณานุกรม(ต่อ)

- [40] Lie, Y., Saakes, M., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2020). **Electrochemically mediated calcium phosphate precipitation from phosphonates: Implications on phosphorus recovery from non-orthophosphate.** Water research.
- [41] Lie, Y., Narsing ,S., Saakes, M., van der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2019). **Calcium Carbonate Packed Electrochemical Precipitation Column: New Concept of Phosphate Removal and Recovery.** Environmental Science & Technology . 53 (18), 10774-10780.
- [42] Moratalla, A., Cotillas, S., Lacasa, E., Canizares, P. & Rodrigo, M, A. (2021). **Electrochemical Technologies to Decrease the Chemical Risk of Hospital Wastewater and Urine.** Electrochemical Technologies to Decrease the Chemical Risk of Hospital.
- [43] Lind, B., Ban, Z., Byde'n, S. (2000). **Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite.** Bioresource Technology 73, 169-174.
- [44] Karak, T.,& Bhattacharyya, P. (2011). **Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality.** Resources, Conservation and Recycling 55, 400-408.
- [45] Randall, D., Krahenbuhl, M., Kopping, I., Larsen, A, T., & Udert. (2016). **A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition.** Water Research, 361-396.
- [46] Engracia, L., Pablo, C., Cristina, S., Fracisco, J., & Manuel, A. (2011). **Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes.** Chemical Engineering journal (Electronic), Vol. 172., pp. 137 – 143.
- [47] Kappel, C., Yasadi, K., Temmink, H., Metz, S.J., Kemperman, A.J.B., Nijmeijer, K., & Zwijnenburg, A. (2013). **Electrochemical phosphate recovery nanofiltration concentrates. Sepation and Purification Tecnology (Eletronic) ., Vol. 120, pp. 437 – 444.**

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [48] ทรงยศ สารภูษิต. (2547). การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดไซยาไนด์ด้วยวิธีการแยกไฟฟ้า. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- [49] Sahset, I., Nuhi, D., Yalcin, S.Y., and Zuleyha, B., (2002), The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. Separation and Purification Tecnology, Vol. 52., pp. 218 – 223.
- [50] X. Zhang, H. Lin, B. Hu. (2018). The effects of electrocoagulation on phosphorus removal and particle settling capability in swine manure. Separation and Purification Technology.
- [51] Lei, Y., Saakes, M., Van Der Weijden, R. D., & Buisman, C. J. (2018). Effects of current density, bicarbonate and humic acid on electrochemical induced calcium phosphate precipitation. Chemical Engineering Journal, 342, 350-356.
- [52] ดาริกา อวะภาค, นพรัตน์ มะเท, และ ดลฤดี พิษัยรัตน์. (2556). การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายผมนางโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง. วารสาร วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 41 (2): 414-430.
- [53] Engracia, L., Pablo, C., Cristina, S., Fracisco, J., & Manuel, A. (2011). Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes. Chemical Engineering journal (Electronic), Vol. 172., pp. 137 – 143.
- [54] Song, Y. -h., Hahn, H.H., Hoffmann, E., Weidler, P.G., (2006). Effect of humic substances on the precipitation on calcium phosphate. J. Environ. Sci. 18(5), 852 – 857.
- [55] Zhou, Z., Hu, D., Ren, W., Zhao, Y., Jiang, L.M., Wang, L., (2015). Effect of humic sub – stances on phosphorus removal by struvite precipitation. Chemosphere 141, 94-99.
- [56] Rajic, L., Fallahpour, N., Nazari, R., Alshwabkeh, A.N., 2015. Influence of humic substances on electrochemical degradation of trichloroethylene in limestone aquifers. Electrochim. Acta 181, 123 – 129.

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองโดยใช้ข้าวอะลูมิเนียม



ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณซีโอติจากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	COD (mg/l)
1	2	1	4	90	6	24177.6
2	0	1	8	60	6	22075.2
3	2	1	12	30	6	24528.0
4	2	1	8	90	9	22425.6
5	0	1	8	60	6	22600.8
6	2	1	8	90	3	26455.2
7	2	1	4	60	9	27331.2
8	2	1	4	60	3	24878.4
9	2	1	4	30	6	25228.8
10	0	1	8	60	6	22600.8
11	2	1	12	60	3	25929.6
12	2	1	8	30	3	26455.2
13	2	1	12	60	9	27156.0
14	2	1	12	90	6	25228.8
15	2	1	8	30	9	28207.2

ตารางที่ ก.2 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยจากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	SS (mg/l)
1	2	1	4	90	6	500
2	0	1	8	60	6	500
3	2	1	12	30	6	500
4	2	1	8	90	9	500
5	0	1	8	60	6	500
6	2	1	8	90	3	1500
7	2	1	4	60	9	1500
8	2	1	4	60	3	500
9	2	1	4	30	6	1000
10	0	1	8	60	6	1000
11	2	1	12	60	3	1000
12	2	1	8	30	3	2000
13	2	1	12	60	9	0
14	2	1	12	90	6	500
15	2	1	8	30	9	1000

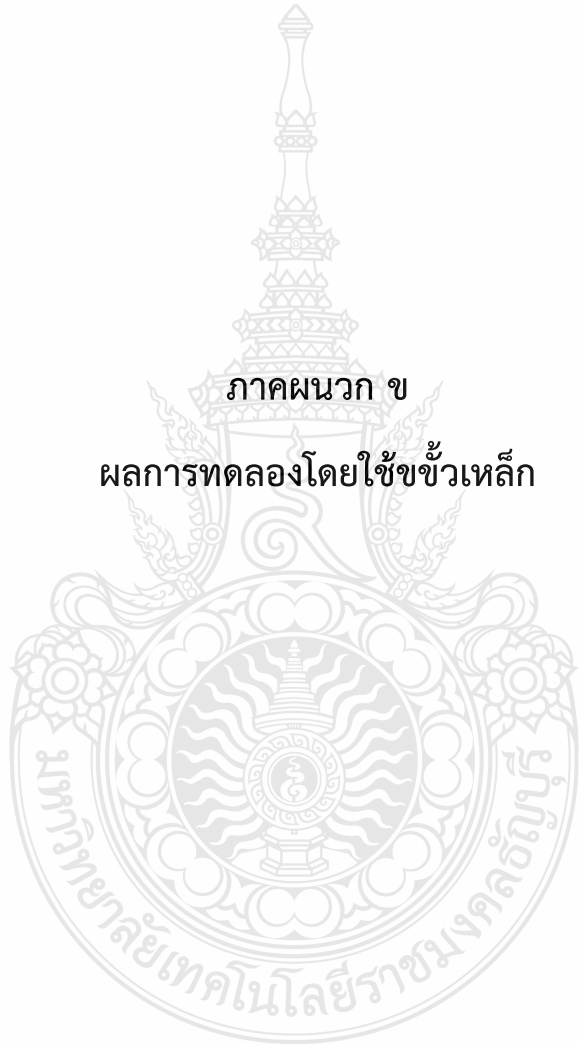
ตารางที่ ก.3 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยละลายน้ำได้จากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	TDS (mg/l)
1	2	1	4	90	6	7500
2	0	1	8	60	6	10000
3	2	1	12	30	6	10000
4	2	1	8	90	9	5500
5	0	1	8	60	6	9000
6	2	1	8	90	3	7000
7	2	1	4	60	9	6500
8	2	1	4	60	3	10000
9	2	1	4	30	6	7500
10	0	1	8	60	6	8000
11	2	1	12	60	3	5000
12	2	1	8	30	3	7000
13	2	1	12	60	9	9000
14	2	1	12	90	6	8500
15	2	1	8	30	9	8000

ตารางที่ ก.4 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณฟอสเฟตจากแผ่นขั้วอะลูมิเนียม

Run Order	PtType	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	P (mg/l)
1	2	1	4	90	6	3.02
2	0	1	8	60	6	1.77
3	2	1	12	30	6	0.86
4	2	1	8	90	9	5.69
5	0	1	8	60	6	12.53
6	2	1	8	90	3	3.02
7	2	1	4	60	9	0.00
8	2	1	4	60	3	15.78
9	2	1	4	30	6	31.53
10	0	1	8	60	6	1.26
11	2	1	12	60	3	0.00
12	2	1	8	30	3	30.95
13	2	1	12	60	9	0.00
14	2	1	12	90	6	3.02
15	2	1	8	30	9	0.03

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองโดยใช้ข้าวเหล็ก



ตารางที่ ข.1 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณซีโอดีจากแผ่นขั้วเหล็ก

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	COD (mg/l)
1	2	1	4	90	6	22075.2
2	0	1	8	60	6	25228.8
3	2	1	12	30	6	24177.6
4	2	1	8	90	9	20323.2
5	0	1	8	60	6	19272.0
6	2	1	8	90	3	22425.6
7	2	1	4	60	9	22425.6
8	2	1	4	60	3	20673.6
9	2	1	4	30	6	23827.2
10	0	1	8	60	6	22075.2
11	2	1	12	60	3	23827.2
12	2	1	8	30	3	22075.2
13	2	1	12	60	9	22425.6
14	2	1	12	90	6	22425.6
15	2	1	8	30	9	19622.4

ตารางที่ ข.2 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยจากแผ่นขั้วเหล็ก

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	SS (mg/l)
1	2	1	4	90	6	1000
2	0	1	8	60	6	1000
3	2	1	12	30	6	2000
4	2	1	8	90	9	1000
5	0	1	8	60	6	1000
6	2	1	8	90	3	1500
7	2	1	4	60	9	1000
8	2	1	4	60	3	1500
9	2	1	4	30	6	1000
10	0	1	8	60	6	1000
11	2	1	12	60	3	1000
12	2	1	8	30	3	1000
13	2	1	12	60	9	1000
14	2	1	12	90	6	1500
15	2	1	8	30	9	1000

ตารางที่ ข.3 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารแขวนลอยละลายน้ำได้จากแผ่นขี้เหล็ก

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	TDS (mg/l)
1	2	1	4	90	6	3000
2	0	1	8	60	6	4000
3	2	1	12	30	6	4000
4	2	1	8	90	9	2000
5	0	1	8	60	6	3500
6	2	1	8	90	3	3000
7	2	1	4	60	9	4000
8	2	1	4	60	3	2000
9	2	1	4	30	6	3500
10	0	1	8	60	6	3000
11	2	1	12	60	3	4000
12	2	1	8	30	3	3000
13	2	1	12	60	9	3500
14	2	1	12	90	6	5000
15	2	1	8	30	9	2500

ตารางที่ ข.4 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณฟอสเฟตจากแผ่นขั้วเหล็ก

Run Order	Pt Type	Blocks	Current (A)	Time (min)	Distant (cm.)	P (mg/l)
1	2	1	4	90	6	18.67
2	0	1	8	60	6	10.40
3	2	1	12	30	6	6.82
4	2	1	8	90	9	3.02
5	0	1	8	60	6	1.10
6	2	1	8	90	3	11.35
7	2	1	4	60	9	18.00
8	2	1	4	60	3	20.62
9	2	1	4	30	6	14.14
10	0	1	8	60	6	18.85
11	2	1	12	60	3	3.02
12	2	1	8	30	3	2.90
13	2	1	12	60	9	7.73
14	2	1	12	90	6	9.58
15	2	1	8	30	9	0.05



ภาคผนวก ค

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

ซีไอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

โดยวิธีกลั่นกลับคืนแบบปิด (closed reflux method)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

- 2.1 เตาให้ความร้อน (heating Block) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 150 ± 2 C
- 2.2 ตู้อบร้อน (hot air oven)
- 2.3 เครื่องชั่ง (balance analytical) ละเอียด 4-5 ตำแหน่ง
- 2.4 บิวเรต (burette) ขนาด 10 ml. พร้อมขาตั้ง
- 2.5 หลอดทดลอง (tube) ฝาเกลียวบุด้วย TFE ขนาด 15x100 mm หรือ 16x150 mm.
- 2.6 ตะแกรงสำหรับตั้งหลอดทดลอง
- 2.7 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50 ml.
- 2.8 ลูกแก้วกันกระเด็น
- 2.9 ปิเปตอัตโนมัติ (micro pipette) ขนาด 1-10 ml. และ ขนาด 100-1000 μ L

2. น้ำยาเคมี (Reagents)

2.1 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ย่อยสลาย (Standard Potassium dichromate digestion solution) ความเข้มข้น 0.01667 โมลาร์ (M)

ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, K₂Cr₂O₇) ชนิดสารมาตรฐานปฐม ภูมิ (primary standard grade) (อบที่อุณหภูมิ 150 C เป็นเวลา 2 ชม.) 4.903 g ละลายในน้ำกลั่น ประมาณ 500 ml. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. Sulfuric acid, conc. H₂SO₄) ปริมาตร 167 ml. เติมเมอคิวรีซัลเฟต (Mercury sulfate, HgSO₄) จำนวน 33.3 g ที่งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และปรับ ปริมาตรเป็น 1000 ml. ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

2.2 น้ำยาเคมีกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid reagent) 4.19 ชั่ง ซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate, Ag₂SO₄) 25.3 g (Ag₂SO₄ 5.5 g / 1.0 kg H₂SO₄) เติมลงในขวด conc. H₂SO₄ ปริมาตร 2.5 L (H₂SO₄ 1 L = 1.84 kg) ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ ละลาย

2.3 สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator solution)

ชั่ง 1-10 ฟีนานทรอลีนโมโนไฮเดรต (1-10 Phenanthroline monohydrate, C₁₂H₅N, HO) 1.485 g และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate, FeSO₄ 7H₂O) 0.695

g ละลายสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 100 ml. ด้วย น้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร

2.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตไทเทรนต์ (Standard ferrous ammonium sulfate (FAS) titrant ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ (M)

ซึ่งเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 39.38 ละลายในน้ำกลั่น เติม conc. H_2SO_4 , 20 ml. ตั้งทิ้งไว้ให้ เย็นและปรับปริมาตรเป็น 1000 ml. ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้จะต้อง standardize ทุกครั้งด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต

2.5 สารมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate Standard, KHP)

ซึ่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, $\text{HOOCCH}_2\text{COOK}$) 0.425 g (อบที่อุณหภูมิ 110 C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) ละลายในน้ำกลั่น และปรับ ปริมาตรเป็น 1000 ml. ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร (สารละลายนี้จะให้ค่า COD = 500 ug O /ml.) 3.6 น้ำกลั่น (Distilled Water : DW)

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 standardization

standardize สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตไทเทรนต์ (FAS) ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้อย่างสลาย โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้อย่างสลาย ปริมาตร 5 ml.. ลงในปิเกอร์ขนาดเล็ก

3.1.2 เติมน้ำกลั่น 10 ml. และตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.1.3 หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด

3.1.4 ไตเตรตด้วยสารละลาย FAS

$$\text{Molarity ของสารละลาย FAS} = \frac{\text{ปริมาตรของสารละลาย } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7(\text{ml.}) \text{ ที่นำมาไตเตรต}}{\text{ปริมาตรของ FAS (ml.) ที่ใช้ไตเตรต}}$$

3.2 การทดสอบตัวอย่าง

3.2.1 ใส่ตัวอย่างน้ำในหลอดทดลองที่ล้างด้วย 20 % H₂SO₄ (ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ ขึ้นกับขนาดของหลอดทดลอง)

3.2.2 เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้อยู่ละลาย (ปริมาตรที่เติม ขึ้นกับ ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ)

3.2.3 เติมน้ำยาเคมีกรดซัลฟิวริก (ปริมาตรที่เติม ขึ้นกับปริมาตรของตัวอย่างน้ำ)

3.2.4 ใส่ลูกแก้วกันกระเด็น ประมาณ 5-7 เม็ด ปิดฝาแล้วเขย่าสารละลายให้เข้ากัน

3.2.5 นำหลอดทดลองใส่ลงในเตาให้ความร้อน ตั้งอุณหภูมิ 150 C ย่อยนาน 2 ชั่วโมง

3.2.6 เมื่อครบเวลานำหลอดทดลองขึ้นจาก Heating Block ตั้งทิ้งให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง

3.2.7 เทสารละลายในหลอดทดลองลงในปิเปตอร์ขนาดเล็ก พร้อมใส่แท่งกวนแม่เหล็ก

3.2.8 หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไตเตรท โดยใช้ 0.10 M

สารละลาย FAS เป็น titrant เมื่อถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินแกมเขียว (blue green) เป็นสีน้ำตาลแดง (reddish brown)

3.2.9 ทุกครั้งต้องทำ Blank โดยทำเหมือนตัวอย่าง แต่ให้ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำ

3.3 การคำนวณ

$$\text{COD as mg O}_2/\text{L} = \frac{(A - B) \times M \times 8,000}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ (ml.)}}$$

โดย A = ml. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์ (blank)

B = ml. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (sample)

M = Molality 10 FAS

8000 = milliequivalent weight ของออกซิเจน x 1000 ml./L

ตะกอนหนัก (Settleable Solids)

1. หลักการ

ทดสอบหาปริมาณสารแขวนลอยที่ไม่มีตะกอน และนำมาลบออกจากปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด ค่าที่ได้คือปริมาณของตะกอนหนัก มีหน่วยน้ำหนักเป็น mg/L

2. เครื่องมือและอุปกรณ์(Apparatus)

- 2.1 ตู้อบร้อน (hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 ° C
- 2.2 เครื่องชั่ง (balance analytical) ละเอียด 4-5 ตำแหน่ง
- 2.3 เครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมแท่งคนแม่เหล็ก (magnetic stirring bar)
- 2.4 ตู้อบความชื้น (desiccator) พร้อม silica gel (เป็นตัวดูดซับความชื้นที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 180 + 2 ° C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง และจะต้องนำไปอบใหม่ทุกครั้งเมื่อความชื้นในตู้อบความชื้น สูงกว่า 50%)
- 2.5 คีมคีบ (forcep)
- 2.6 กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 10 100 ml.
- 2.7 ชุดกรองสุญญากาศ (filter support) ที่ประกอบด้วย ขวดกรอง (membrane filter funnel) ถ้วยกรองกุช (gooch crucible) และเครื่องดูดสุญญากาศ (vacuum pump) พร้อม ขวดดูดสุญญากาศ (suction flask) ขนาด 500- 1000 ml.
- 2.8 กระดาษกรอง (glass-fiber filter) GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 cm
- 2.9 ขวดปริมาตร(volumetric flask) ขนาด 1000 ml. 2.10 aluminum foil 2.11 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 2 L เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm

3. ขั้นตอนการทดสอบ

- 3.1 ทดสอบหาปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด
 - 3.1.1 การเตรียมกระดาษกรองตัวอย่าง
 - 3.1.1.1 เตรียม aluminum foil ให้เป็นรูปก้นปีกเกอร์ ขนาดตามความ เหมาะสมในการวางกระดาษกรองและระบุรหัสไว้
 - 3.1.1.2 ประกอบชุดกรองสุญญากาศ คีบกระดาษกรองวางลงในชุดกรอง ปิด เครื่อง และฉีดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยจนกระดาษกรองเปียก เพื่อให้กระดาษกรองแนบกับถ้วยกรองกุช
 - 3.1.1.3 ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 20 ml. จากนั้นเปิด

ชุดกรองสุญญากาศ และทิ้งน้ำล้าง

3.1.1.4 คีบกระดาษกรองออกจากชุดกรองแล้วนำไปวางลงในถาด aluminum foil ที่ระบุงรหัสไว้

3.1.1.5 นำถาด aluminum foil พร้อมกระดาษกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 103- 105° C อย่างน้อย 1 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อทิ้งไอน้ำ

3.1.1.6 นำถาด aluminum foil พร้อมกระดาษกรองมาชั่งหาน้ำหนัก และ บันทึกน้ำหนักที่ได้

3.1.1.7 ทำตามข้อ 3.1.1.5-3.1.1.6 จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ หรือความ แตกต่างของ การชั่งครั้งล่าสุดกับการชั่งครั้งที่ผ่านมามากกว่าไม่เกิน 0.0005 g หรือ 4% ขึ้นอยู่กับวาคาไต่จะน้อยกว่ากัน จากนั้นจึงเก็บถาด aluminum foil พร้อมกระดาษกรอง ไว้ในตู้ดูดความชื้น จนกระทั่งใช้งาน

3.1.2 การทดสอบตัวอย่าง

3.1.2.1 ประกอบชุดกรองสุญญากาศ คีบกระดาษกรองจากข้อ 4.1.6 วางลงในชุดกรอง เปิดเครื่อง และฉีดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยจนกระดาษกรองเปียก เพื่อให้กระดาษกรองแนบกับ ถาดกรองกุ่ม

3.1.2.2 ผสมตัวอย่างน้ำ(ที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก

3.1.2.3 เขย่าตัวอย่างน้ำแล้วตวงตัวอย่างด้วยกระบอกตวงปริมาตร 10 - 100 ml. (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำ) เปิดเครื่อง และเทตัวอย่างน้ำที่ตวงไว้ลงสู่กระดาษกรองพร้อมกับใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภายในรอบๆ กระบอกตวง 2 ครั้งๆ ละประมาณ 10 ml. แล้วเทลงสู่กระดาษ กรอง กรองจนแห้ง

3.1.2.4 คีบกระดาษกรองออกจากชุดกรองแล้วนำไปวางลงในถาด aluminum foil อันเดิม

3.1.2.5 นำถาด aluminum foil พร้อมกระดาษกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 103- 105° C อย่างน้อย 1 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อทิ้งไอน้ำ

3.1.2.6 นำถาด aluminum foil พร้อมกระดาษกรองมาชั่งหาน้ำหนักและ บันทึกน้ำหนักที่ได้

3.1.2.7 ทำตามข้อ 3.1.2.5-3.1.2.6 จนได้น้ำหนักคงที่หรือความแตกต่างของ การชั่งครั้งล่าสุดกับการชั่งครั้งที่ผ่านมามากกว่าไม่เกิน 0.0005 g หรือ 4% ขึ้นอยู่กับวาคาไต่จะน้อยกว่ากัน

3.2 ทดสอบหาปริมาณสารแขวนลอยที่ไม่ตกตะกอน

3.2.1 การเตรียมกระดาษกรองตัวอย่าง ตามข้อ 3.1.1.1-3.1.1.7 3.2.2 การทดสอบตัวอย่าง

3.2.2.1 นำตัวอย่างน้ำมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเทลงในปิ๊กเกอร์ ขนาด 2 L โดยใช้ปริมาตรไม่น้อยกว่า 1 L หรืออาจมากกว่า แต่ควรให้ระดับน้ำอยู่ที่ความลึกไม่น้อยกว่า 20 cm

3.2.2.2 ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง โดยไม่มีการรบกวน

3.2.2.3 คอยๆ ดูคือน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 250 ml. จากบริเวณศูนย์กลางของ ภาชนะที่จุดกึ่งกลางของชั้นน้ำสวนใสด้านบน และนำไปหาหาสารแขวนลอยที่ไม่ตกตะกอน (ใช้วิธีทดสอบเดียวกับปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด)



ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solid : TDS)

1. หลักการ

ตัวอย่างที่ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วขนาด 40-60 ไมครอน จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการกรองถ่ายลงถ้วยระเหยแห้ง (evaporating dish) แล้วนำไประเหยและอบแห้งที่อุณหภูมิ $180 \pm 2^\circ \text{C}$ หลังจากที่ยอบแห้งแล้วนำไปชั่งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำหนักที่เหลืออยู่ บนถ้วยระเหยแห้งคือปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1 ตู้อบ (hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $180 \pm 2^\circ \text{C}$
- 2.2 เครื่องอังไอน้ำ (steam bath) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 80°C
- 2.3 เครื่องชั่ง (balance analytical) ละเอียด 4-5 ตำแหน่ง
- 2.4 เครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมแท่งคนแม่เหล็ก (magnetic bar)
- 2.5 ตู้ดูดความชื้น (desiccator) พร้อม silica gel เป็นตัวดูดซับความชื้นที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $180 \pm 2^\circ \text{C}$ เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง และจะต้องนำไปอบใหม่ทุกครั้งเมื่อความชื้นในตัวดูดความชื้นสูงกว่า 50%
- 2.6 คีมคีบ (forceps)
- 2.7 กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 10 และ 100 ml.
- 2.8 ถ้วยระเหยแห้ง (evaporating dish)
- 2.9 ชุดกรองสุญญากาศ (filter support) ที่ประกอบด้วย ขวดกรอง (membrane filter funnel) ถ้วยกรองกูช (gooch crucible) และเครื่องดูดสุญญากาศ (vacuum pump) พร้อมขวด ดูดสุญญากาศ (suction flask) ขนาด 500- 1000 ml.
- 2.10 กระดาษกรอง (glass-fiber filter) GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 cm

3. น้ำยาเคมี

3.1 น้ำกลั่น (Distilled Water :DW)

4. ขั้นตอนการทดสอบ

4.1 การเตรียมถวระเหยแห้ง (evaporating dish)

4.1.1 นำถวระเหยแห้งไปอบที่อุณหภูมิ $180 \pm 2^\circ \text{C}$ อย่างน้อย 1 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตูดูดความชื้นเพื่อทิ้งไว้ให้เย็น

4.1.2 นำถวระเหยแห้งไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่ได้

4.1.3 ทำตามข้อ 4.1.1 ถึง ข้อ 4.1.2 จนได้น้ำหนักคงที่หรือความแตกต่างของการชั่งครั้งล่าสุดกับการชั่งครั้งที่ผ่านมาแตกต่างกันไม่เกิน 0.0005 g หรือ 4% ขึ้นอยู่กับวาคาไตจะน้อยกว่า จากนั้นจึงเก็บถวไว้ในตูดูดความชื้น จนกระทั่งใช้งาน

4.2 การทดสอบตัวอย่าง

4.2.1 ประกอบชุดกรองสุญญากาศ คือกระดาษกรองวางลงในชุดกรอง เปิดเครื่องและฉีดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อยจนกระดาษกรองเปียก เพื่อให้กระดาษกรองแนบกับถวกรองกุช

4.2.2 ผสมตัวอย่างน้ำ (ที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง) ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก

4.2.3 เขย่าตัวอย่างน้ำแล้วตวงตัวอย่างปริมาตร 10-100 ml. (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำ) ลงสู่ชุดกรองพร้อมเปิดเครื่องกรอง กรองจนหมดไข่น้ำกลั่นฉีดกลางภายในรอบ ๆ กระบอกตวง 2 ครั้ง ๆ ละประมาณ 5 ml. แล้วเทลงสู่กระดาษกรอง กรองจนแห้ง

4.2.4 ถายตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองลงสู่ถวระเหยแห้งที่ทราบน้ำหนักแล้ว

4.2.5 นำถวระเหยแห้ง (ที่มีตัวอย่างน้ำ) ไประเหยบนเครื่องอังไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิ 80°C จนตัวอย่างแห้ง

4.2.6 นำถวระเหยแห้งไปอบที่อุณหภูมิ $180 \pm 2^\circ \text{C}$ อย่างน้อย 1 ชั่วโมง และ นำไปเก็บไว้ในตูดูดความชื้นเพื่อทิ้งไว้ให้เย็น

4.2.7 นำถวระเหยแห้งไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่ได้

4.2.8 ทำตามข้อ 4.2.6 ถึง ข้อ 4.2.7 จนได้น้ำหนักคงที่ หรือความแตกต่างของการชั่งครั้งล่าสุดกับการชั่งครั้งที่ผ่านมาแตกต่างกันไม่เกิน 0.0005 g หรือ 4% ขึ้นอยู่กับวาคาไตจะน้อยกว่ากัน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายเก่งกาจ จันทร์กวีกุล
วัน เดือน ปีเกิด	26 มีนาคม 2538
ที่อยู่	198 หมู่ 17 ตำบลบ่อสุพรรณ อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี 72190
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	1. บริษัทแซนเทค เซ็นเตอร์ จำกัด ตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2563 ถึง 2564 2. บริษัทรุ่งอุตมทรัพย์ 59 จำกัด ตำแหน่งวิศวกรโครงการ พ.ศ. 2564 ถึง ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	095-736-0951
อีเมล	Chankawikun88@gmail.com