รายงานการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง

Removal of Contaminated Phosphorus in Surface Water by Electrocoagulation Process Using Brass Plate Electrode

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

พัทธกมล สมบุตร
วุฒิกร อนันตสิริชัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2561)

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง

Removal of Contaminated Phosphorus in Surface Water by Electrocoagulation Process Using Brass Plate Electrode

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

พัทธกมล สมบุตร
วุฒิกร อนันตสิริชัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2561)

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง

Removal of Contaminated Phosphorus in Surface Water by Electrocoagulation Process Using Brass Plate Electrode

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

พัทธกมล สมบุตร
วุฒิกร อนันตสิริชัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2561)

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง

Removal of Contaminated Phosphorus in Surface Water by Electrocoagulation Process Using Brass Plate Electrode

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

พัทธกมล สมบุตร
วุฒิกร อนันตสิริชัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2561)

ประวัติผู้วิจัย

<u>หัวหน้าโครงการวิจัย</u>

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวพัทธกมล สมบุตร

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Pattakamol Somboot

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-3499-00144-4-32

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

เวลาที่ใช้ทำวิจัย 25 ชั่วโมง/สัปดาห์

4. สถานที่ทำงาน สาขาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
โทรศัพท์: 043-741654 โทรสาร: 043-741654
E-mail: pattakamol@hotmail.com
โทรศัพท์มือถือ: 064-4809222

5. ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การบำบัดน้ำเสีย, การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการจัดการสิ่งแวดล้อม

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

7.1 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการ

วัชรวิชญ์ ดาวสว่าง และพัทธกมล สมบุตร. 2560. **แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สำหรับบำบัดความขุ่นในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า.** วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร:วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มกราคม-เมษายน 25(1).

ศิวดล กัญญาคำ, วงศ์ผกา พิมพา,พัทธกมล สมบุตร, ปนัดดา แทนสุโพธิ์.(2560). ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเหง้ามันสำปะหลังเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมแป้งมัน.**การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 3**,มหาสารคาม,(20-21กรกฎาคม),75-82.

พัทธกมล สมบุตร และคณะ.2559. **แบบจำลองสภาวะที่เหมะสมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดลิกนินด้วยกระบวนการเฟนตันแบบไม่ใช้แสง**.วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, มกราคม- มิถุนายน 1(1).

วงศ์ผกา พิมพา และคณะ. 2558. **การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง**. การประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.

Khuanmar, K. and Somboot, P.(2011). Removal of Red Acid Dye from Synthetic Wastewater by Adsorption onto Low-cost Material. Advanced Materials Research Vols.156-157, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 375 - 378.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายวุฒิกร อนันตสิริชัย
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Wuttikorn Anuntasirichai
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-3499-00144-4-32
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
เวลาที่ใช้ทำวิจัย 10 ชั่วโมง/สัปดาห์
4. สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
โทรศัพท์: 082-9731022 โทรสาร: 043-741654
E-mail: konggunner@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

ประชุมวิชาการระดับประเทศ

วุฒิกร, วัชรพล. (2560). ระบบตรวจวัดมลพิษทางอากาศบนโทรศัพท์สมาร์ทโฟน. **ในการประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 3.**(น.150-155) 20 กรกฎาคม 2560. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, มหาสารคาม.

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยในโครงการ “การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง” ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นแหล่งข้อมูลในการศึกษาวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อรายงานวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์สถานที่เพื่อจัดเตรียมวัตถุดิบ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ประกอบกับการจัดทำรายงานการวิจัยได้เสร็จสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะนักวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาวิจัยในครั้งต่อไป หากมีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้ทำการศึกษาวิจัยต้องขออภัยและขอน้อมรับในความผิดพลาดและขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย
2561

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย การกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง
ผู้ดำเนินการวิจัย พัทธกมล สมบุตร
หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปี พ.ศ. 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา ปัจจัยที่มีอิทธิพลและแบบจำลองสำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง โดยศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า ซึ่งคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธี Plackettt-Burman ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลมี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย จากนั้นใช้วิธี Box – Behnken ในการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และศึกษาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลทั้ง 3 ปัจจัย ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α =0.05) ทำการทดลองด้วยถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ใช้แผ่นทองเหลือง 6 แผ่น ที่มีพื้นที่ประสิทธิผลแผ่นละ 10 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยที่ใช้ศึกษามีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญโดย $P<0.05$ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฟอสฟอรัสคำนวณได้จากแบบจำลองถดถอยกำลังสอง ทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยการเลือกสภาวะที่เหมาะสมมาทดลองซ้ำ 18 สภาวะ โดยทำการทดลองด้วยสภาวะ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 0.2 แอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียเท่ากับ 5 15 และ 20 พีพีเอ็ม ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 3 7 และ 9 ระยะเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า เท่ากับ 5 15 และ 30 นาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับ 98.08 แตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการเพียงร้อยละ 0.86 อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดเมื่ออยู่ในสภาวะที่จำเพาะ คือ กระแสไฟฟ้า 0.2 – 0.6 แอมแปร์ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียอยู่ระหว่าง 5 – 20 พีพีเอ็ม ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ระหว่าง 6 – 9 ระยะเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5 – 30 นาที

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Research Title Removal of Contaminated Phosphorus in Surface Water by Electrocoagulation Process Using Brass Plate Electrode
Researcher Pattakamol Somboot
Organization Faculty of Engineering
Rajabhat Maha Sarakham University
Year 2018

ABSTRACT

This research purposively investigated the effective factors and the optimal environment mathematical model for Phosphorus treatment in wastewater with an electrochemical process using brass electrode, where 4 effective factors were explored including the initial concentration of Phosphorus in wastewater, the initial PH of wastewater, the testing electric current, and the discharge time; these factors were selected via a Plackett-Burman method. The test result indicated that there were 3 factors (the initial concentration of Phosphorus in wastewater, the initial PH of wastewater, and the discharge time) that notably had an impact on the Phosphorus treatment in wastewater. Meanwhile, the model was designed with a Box – Behnken method to specify the optimal environment by analyzing the response surface, constructing a mathematical model, and studying the consequence of those 3 effective factors by the multiple regression analysis. Additionally, the impact of those factors were analyzed to confirm their variation values as their confidence level was 95% (α =0.05) Practically, the test was performed with a Batch reactor filled with 1,000 ml of synthetic wastewater, 6 pieces of brass sheet and each contains 10 cm of effective area as an electrode; the space amongst each electrode was 2 cm. Accordingly, the research outcome affirmed that all of the effective factors had a significant impact on the Phosphorus treatment when $P<0.05$, the optimal environment for the Phosphorus treatment could be derived from the square model as the mathematical model was also tested repeatedly for its accuracy using the 18 selected optimal environments where the testing electric current was 0.2 ampere, the initial concentration of Phosphorus in wastewater was 5, 15, and 20 ppm, the initial PH of wastewater was 3, 7, and 9, and the discharge time was 5, 15, and 30 minutes. Moreover, the test result also indicated that the Phosphorus treatment performance was 98.08 % which was slightly different for 0.86 % from the equation result. However, the created model was applicable to predict the Phosphorus treatment performance only in a specific context where the electric current should be from 0.2 – 0. Ampere, the initial concentration of Phosphorus in wastewater should be from 5 to 20 ppm, the initial PH of wastewater should be from 6 to 9, and the discharge time should be 5 to 30 minutes.

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ ภาษาไทย	ข
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตของการศึกษา	2
ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
น้ำเสีย	3
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	8
โทรฟิเคชั่น (Eutrophication)	13
การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย	14
กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation)	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	26
วิธีการดำเนินการวิจัย	27
ขั้นตอนการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีใช้วิธีทางสถิติ	32
ขั้นตอนการหาจุดเหมาะสมของสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง	32
ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว	33

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	34
ผลการศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้หลักการทางสถิติด้วยวิธีของ Plackett – Burman	34
ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method) ที่ออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Box-Behnken	37
สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากสมการและจากการทดลอง	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปราย และข้อเสนอแนะ	47
สรุปผลการวิจัย	47
ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง	53
ประวัติผู้วิจัย	54

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	งานวิจัยในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ	15
2.2	งานวิจัยในการกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพ	17
2.3	สรุปปฏิกิริยารีดอกซ์	19
4.1	สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีของ Plackett-Burman	35
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman	35
4.3	สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลและประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีของ Box-Behnken	38
4.4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Box-Behnken	39
4.5	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากสมการและจากการทดลองเมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 0.2 แอมแปร์	46

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของเซลล์อิเล็คโทรไลต์	38
2.2	ลักษณะแผ่นเหล็กที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า	41
2.3	ลักษณะแผ่นทองเหลืองที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า	21
3.1	ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1 การสร้างระบบบำบัดและการเตรียมน้ำสังเคราะห์	27
3.2	การออกแบบประกอบแผ่นขั้วของถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี	29
3.3	ขั้นตอนการออกแบบและประกอบถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี	30
3.4	ขั้นตอนการเตรียมน้ำฟอสฟอรัสสังเคราะห์และทดลองเดินระบบด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี	31
3.5	ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	32
3.6	การหาประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว	33
4.1	ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals)	36
4.2.	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า 15 นาที	40
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 7	40
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียเท่ากับ 15 ppm	41
4.5	ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardizedresiduals)	42
4.6	ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted)	42

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.7	ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับหมายเลขชุดการทดลอง (Run number).....	43
4.8	ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัส (ppm).....	43
4.9	ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย....	44
4.10	ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที).....	44
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5 นาที.....	45
ก.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	53

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมีมากทั้งด้านอากาศ ขยะ และน้ำเสีย โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางน้ำที่มีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเจริญขึ้นในทุกๆ ด้านของประเทศเพราะมีการพัฒนาและการขยายตัวในทุกภาคส่วนที่สูงขึ้น รวมถึงจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นปัญหามลพิษทางน้ำจึงมาจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ เช่น การซักล้างทำความสะอาด น้ำทิ้งจากครัวเรือน น้ำทิ้งทางเกษตรกรรม น้ำทิ้งจากการปศุสัตว์ และน้ำทิ้งจากการประกอบการอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในปัญหามลพิษทางน้ำที่พบมากในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ คือ “ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน” เป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารพวกฟอสฟอรัสสูงและฟอสฟอรัสก็เป็นธาตุอาหารที่พืชน้ำต้องการ เมื่อฟอสเฟตในรูปของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำที่มากเกินความจำเป็น ทำให้พืชและวัชพืชน้ำโดยเฉพาะสาหร่ายสีเขียวและผักตบชวามีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแพร่กระจายทั่วแหล่งน้ำทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงและกีดขวางทางเดินของแสงส่งผลกระทบต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ รวมทั้งเป็นปัญหาต่อการคมนาคมทางน้ำ ซึ่งปัญหาจาก “ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน” ดังกล่าวเกิดขึ้นในแหล่งน้ำผิวดินหลายพื้นที่ในประเทศไทย

ปัจจุบันวิธีการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำมีหลายวิธีด้วยกัน ส่วนวิธีที่มีการใช้บำบัดกันมากวิธีหนึ่ง คือ เทคนิคการบำบัดทางกายภาพเคมีเพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้สูง เช่น โคแอกกูเลชั่น ฟลอคกูเลชั่น การแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการเมมเบรน และกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี ดังนั้นการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำจะต้องคำนึงถึงวิธีการที่เหมาะสมและสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีและใช้เวลาในการกำจัดน้อยและระบบมีขนาดที่เล็กกว่าระบบที่ใช้สารเคมีในการตกตะกอน เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation หรือ EC) นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาบำบัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากสามารถบำบัดสารที่ปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อยเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบชีวภาพ ซึ่งกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีนั้นใช้หลักการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคฟอตเฟตด้วยการใช้ไอออนที่ได้จากปฏิกิริยา (Oxidation) ที่ขั้วบวก (Anode) ซึ่งจะทำให้อนุภาคฟอตเฟตเหล่านั้นมีสภาพเป็นกลางและเกิดการรวมตัวกัน และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิด ที่ขั้วลบ (Cathode) ก็จะทำให้สารที่รวมกันนี้จมลงสู่ก้นถังบำบัด ซึ่งช่วยแยกตะกอนได้อีกทางหนึ่ง (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2551) และในส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนใหญ่แผ่นขั้วที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียของระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีจะเป็นโลหะหรือโลหะผสมที่นำไฟฟ้าได้ เช่น แผ่นอลูมิเนียม แผ่นเหล็ก หรือแผ่นสแตนเลส เป็นต้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาในการกำจัดน้ำเสียขึ้นได้

ดังนั้นผู้วิจัย จึงสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ระบบตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วทองเหลือง และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่างๆ ต่อการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีใช้ขั้วทองเหลือง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำและลดปัญหาการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่นต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

2.2 หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

2.3 หาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 การศึกษานี้กำหนดให้ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วบวก (Anode) และที่ขั้วลบ (Cathode)

3.2 การศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 คือ ขั้นตอนการสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วและการเตรียมน้ำสังเคราะห์

ส่วนที่ 2 คือ การทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ส่วนที่ 3 คือ การทดลองระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 ทราบถึงความสามารถในกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

4.3. ทราบถึงปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
Mahasarakham Rajabhat University

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง โดยมีข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 น้ำเสีย

2.1.1 ความหมายของน้ำเสีย

“น้ำ” เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภค และเมื่อมีการใช้น้ำ แล้วก็มัก จะถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ระบบหมุนเวียนดังกล่าวเกิดปัญหาขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำน้ำมาใช้ในครัวเรือน การเกษตร และภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดน้ำเสียที่มีปริมาณมากเกินขีดความสามารถที่แหล่งน้ำ ธรรมชาติจะปรับตัวได้ทัน จึงเป็นสาเหตุทำให้แหล่งน้ำ เหล่านั้นมีคุณภาพต่ำลงและในที่สุดจึงกลายเป็นน้ำเน่าเสีย เกิดเป็นมลพิษทางน้ำ ที่ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัย อยู่ในแหล่งน้ำ ไม่สามารถดำรงชีวิต ต่อไปได้ โดยมีผู้ให้คำนิยามและความหมายของคำว่า น้ำเสีย ดังนี้

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ แล้ว ตัวอย่างเช่น การใช้น้ำในชีวิตประจำวัน ได้แก่ การใช้น้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย การใช้น้ำ ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การล้างวัตถุดิบวัสดุอุปกรณ์ การหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งทำให้น้ำ ดังกล่าว มีลักษณะสมบัติแตกต่างไปจากเดิมเนื่องจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่ใช้ประโยชน์จากน้ำนั้น นอกจากนี้แล้วสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำ เสียจะเป็นสาเหตุที่ทำ ให้น้ำเสียมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันออกไป

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม MAHASARAKHAM UNIVERSITY

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 ได้กล่าวถึงความหมายของน้ำเสียไว้ว่า “น้ำเสีย หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว รวมทั้ง มลสารที่ปะปนและปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น น้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ จะมีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันออกไป”

ดังนั้น น้ำเสีย จึงมีความหมายโดยรวมว่า สภาพน้ำที่มีการเสื่อมคุณภาพ น้ำจะมีคุณสมบัติ เปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ เนื่องจากมีสารพิษเข้า ไปปะปนอยู่มาก ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ไม่เหมาะต่อการบริโภคและอุปโภคของมนุษย์ เช่น น้ำ ที่มีสีผิดปกติ มีกลิ่นเหม็น น้ำที่มีสารเคมีที่เป็นพิษหรือเชื้อโรคปะปนอยู่

2.1.2 ลักษณะและสมบัติน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสีย จำแนกออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

2.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพ (Physical Characteristics) ได้แก่ สี กลิ่น อุณหภูมิ ของแข็งต่าง ๆ ความขุ่น และความหนาแน่น เป็นต้น

(1) ลักษณะที่เป็นของแข็ง

- ของแข็งทั้งหมด (Total Solid : T.S.) คือ ปริมาณของแข็งหรือสารทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ หาได้จากปริมาณสารที่ระเหย (Evaporate) น้ำออกทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

- ของแข็งจมตัวได้ (Settleable Solids) หมายถึง ของแข็งที่จมตัวสู่ก้นภาชนะ เมื่อตั้งทิ้งในเวลา 1 ชั่วโมง มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อลิตร

- ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Tatal Dissolved Solids : T.D.S.) หมายถึง ของแข็งที่สามารถผ่านกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน แล้วยังคงเหลืออยู่ หลังจากระเหยไอน้ำจนแห้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

- ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids : S.S.) หมายถึง ส่วนของของที่เหลือค้างบนกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน หลังจากกรองน้ำตัวอย่างและอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

- ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids : V.S.) หมายถึง ส่วนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ วิเคราะห์โดยนำถ้วยกระเบื้องระเหยที่วิเคราะห์ของแข็งละลายทั้งหมด ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของของแข็งที่ระเหยง่าย

(2) อุณหภูมิ (Temperature) คือ ความร้อน-เย็นของน้ำ อุณหภูมิของน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิในบรรยากาศ อุณหภูมิของน้ำมีผลกระทบ คือ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิในน้ำ การเจริญเติบโตของสัตว์และพืชน้ำ มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีอุณหภูมิสูง หรืออาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวหนึ่ง มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ โดยจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25 - 35 องศาเซลเซียส และหยุดการเติบโตที่ 50 องศาเซลเซียส มีผลต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำ พบว่า ออกซิเจนละลายในน้ำได้ 7.54 -9.08 มก./ล. ที่อุณหภูมิบรรยากาศ

(3) สี (Color) น้ำเสียชุมชน ที่ปล่อยจากชุมชนจะ มีสีเท่าปนน้ำตาลอ่อน เมื่อไม่มีการบำบัด จะเปลี่ยนเป็นสีเท่าหรือสีดำ น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มีสีเทา เทาเข้ม หรือสีดำ ซึ่งเกิดจากพวกซัลไฟต์ของโลหะ อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเสีย เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานฟอกย้อม สีอาจเกิดจากสาหร่าย หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ

(4) ความขุ่น (Turbidity) หมายถึง สมบัติทางแสงของสารแขวนลอยซึ่งทำให้แสงกระจาย และถูกดูดกลืนมากกว่าที่จะยอมให้แสงผ่านเป็นเส้นตรง ความขุ่นของน้ำเกิดจากมีสารแขวนลอยต่าง ๆ เช่น ดิน ดินตะกอน แพลงตอน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่มีขนาดเล็ก

(5) กลิ่น น้ำเสียชุมชน ในระยะแรกมีกลิ่นเหม็นอับ เนื่องจาก ซัลไฟต์ น้ำเสียอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคมี ยา อาหาร กลิ่นเกิดจาก ฟีนอล แอมโมเนีย ไซยาไนด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายที่ไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เกิดกลิ่น

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม MAHASARAKHAM UNIVERSITY

(6) การนำไฟฟ้า (Conductivity) บอกถึงความสามารถของน้ำ ที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ชนิดของอิออนที่มีอยู่ในน้ำ และอุณหภูมิในขณะทำการวัด ไม่ได้เป็นการบอกถึงอิออนตัวใดตัวหนึ่งโดยเฉพาะ สารประกอบอนินทรีย์ของกรด ด่าง และเกลือ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

2.1.2.2 ลักษณะทางเคมี (Chemical Characteristics) ได้แก่ คามเป็นกรด-ด่าง สารอินทรีย์ ไขมัน สารซักฟอก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โลหะหนัก เป็นต้น

(1) สารอินทรีย์ (Organic Matter) คือ สารที่ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจน หรืออาจมีออกซิเจน ไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ

(2) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : B.O.D.) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน โดยแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าบีโอดี ให้เป็นตัวกำหนดขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียได้ เป็นค่าของออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

(3) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : C.O.D.) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ค่าซีโอดีมีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย เช่นเดียวกับค่าบีโอดี

(4) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีความสำคัญในการควบคุมคุณภาพน้ำและน้ำเสีย ควบคุมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต เพื่อไม่ให้เกิดการกัดกร่อนของท่อ เพื่อให้ในการควบคุมให้สารเคมีที่ใช้บำบัดน้ำเสียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปน้ำมีค่า pH อยู่ในช่วง 5-8 ค่า pH เป็นค่าที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไฮโดรเจในน้ำ [H^+]

(5) คลอไรด์ เกิดจากบ้านพักอาศัย อุตสาหกรรม เช่น การผลิตเกลือ การผลิตแก้ว หรือจากการเกษตรกรรม เช่น การใช้ปุ๋ย สารฆ่าแมลง

(6) ความเป็นด่าง (Alkalinity) เกิดขึ้นจากในน้ำมีสารไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต ของธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม หรือแอมโมเนีย

(7) ความกระด้าง (Hardness) หมายถึง น้ำที่ต้องการสบู่ค่อนข้างมาก จึงจะทำให้เกิดฟอง หรือน้ำที่ทำให้เกิดตะกรัน น้ำกระด้างมี 2 ชนิด คือ (1.) น้ำกระด้างชั่วคราว หรือน้ำกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness) เกิดจากสารไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) รวมตัวกับ Ca^{2+} หรือ Mg^+ สามารถทำให้หายได้โดยการต้ม และ (2.) น้ำกระด้างถาวร หรือ ความกระด้างที่ไม่ได้เกิดจากคาร์บอเนต เช่น เกิดจาก SO_4^{2-} Cl^- ของ Ca^{2+} หรือ Mg^+ เช่น $MgSO_4$ $CaCl_2$

(8) ไนโตรเจน เป็นธาตุที่มีความสำคัญในการสังเคราะห์โปรตีน ธาตุไนโตรเจนในน้ำอยู่ในรูป สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตรท ไนเตรต ก๊าซไนโตรเจน ถ้ามีไนโตรเจนในแหล่งน้ำมาก ทำให้พืชน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

(9) ฟอสฟอรัสในน้ำ ฟอสฟอรัส จะอยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) เช่นสาร PO_4^{3-}, HPO_4^{-2} , H_2PO^{4-} และ H_3PO_4 เป็นต้น

(10) สารโลหะหนักชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของอุตสาหกรรม เช่น สารตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) สารหนู (As) เป็นต้น สารโลหะหนักที่ให้มีได้ในน้ำ

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ในปริมาณน้อยมาก แต่บางชนิดหากมีปริมาณไม่มากนักจะมีผลดีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ทองแดง สังกะสี เป็นต้น

(11) ก๊าซต่างๆที่ละลายในน้ำ

- ก๊าซออกซิเจน (O_2) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: D.O)เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำโดยทั่วไปไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า DO เป็นตัวชี้ถึงปฏิกิริยาทางชีววิทยาในน้ำ การละลายของออกซิเจนขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดัน สิ่งเจือปนในน้ำ เช่น เกลือชนิดต่างๆ

- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟต์ (H_2S) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายไข่เน่า มีความเป็นพิษ ไม่ติดไฟ เกิดขึ้นในการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หากรวมตัวกับเหล็กจะเกิดเป็นสีดำของซัลไฟต์ (FeS)

- ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ง่าย เกิดขึ้นในการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟ เมื่อละลายน้ำทำให้น้ำมีความเป็นกรดเล็กน้อย

2.1.2.3 ลักษณะทางชีวภาพ (Biological Characteristics) น้ำเสียประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย เป็นตัวย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสีย 95% นอกจากนี้ยังมีเชื้อรา สาหร่าย โปรโตซัว นอกจากนี้ ยังประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค และเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ ได้แก่ เชื้ออหิวาห์ เชื้อบิด เชื้อไทฟอยด์ เป็นต้น

(1) แบคทีเรีย (Bacteria) คือ จุลินทรีย์เซลล์เดียว มีขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แบคทีเรียแบ่งตามแหล่งคาร์บอนที่ได้มาเพื่อการเจริญเติบโตได้ 2 ชนิด คือ (1.) ออโทโทรฟิกแบคทีเรีย (Autotrophic Bacteria หรือAutotroph) เป็นแบคที่เรียที่สร้างอาหารได้เอง โดยได้คาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจากแสงอาทิตย์ หรือการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (2.) เฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย (Heterotrophic Bacteria หรือ Heterotroph) เป็นแบคทีเรียที่ไม่สามารถสร้างอาหารได้เอง โดยได้พลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นผู้ย่อยสลายในแหล่งน้ำ นอกจากนี้แบคทีเรียเมื่อแบ่งตามความต้องการออกซิเจน แบ่งได้ 3 ชนิดคือ (1.) แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic Bacteria) คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญเติบโต (2.) แอนแอโรบิกแบคทีเรีย(Anaerobic Bacteria) คือ แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญเติบโต และ (3.) แฟคัลเททีฟแบคทีเรีย (Facultative Bacteria) คือ แบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ทั้งในสภาพที่มี และไม่มีออกซิเจนอิสระ

(2) รา (Fungi) เป็นจุลินทรีย์ที่มีหลายเซลล์ ไม่มีคลอโรฟิลล์ ราอาศัยอยู่ได้โดยไม่สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ รับอาหารจากสิ่งที่ตายแล้ว รามีความสำคัญในการย่อยสลายพวกคาร์บอนที่มีค่า pH ต่ำ (ที่เหมาะสม คือ 5.6) สารมารถย่อนสลายสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดีกว่าแบคทีเรีย รามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลส หรือสารคาร์โบไฮเดรตได้ดี รามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียบางระบบ เช่น ระบบโปรยกรอง

(3) สาหร่าย (Algae) เป็นจุลินทรีย์ ที่มีทั้งเซลเดียวและหลายเซล มีบทบาทสำคัญในการเป็นผู้ผลิต มีคลอโรฟิลล์ สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ (Stabilization Pond) ซึ่งต้องมีออกซิเจนในบ่อน้ำ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

(4) โปรโตซัว (Protozoa) เป็นจุลินทรีย์เซลล์เดียว ไม่มีผนังเซล มีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรีย อาศัยเจริญเติบโตได้ที่ไม่มีออกซิเจน หรือสภาวะทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative Anaerobic) เป็นผู้บริโภค โดยการกินแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์อื่น ๆ

(5) โรติเฟอร์ เป็นสัตว์หลายเซลล์ อาศัยอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน มีประสิทธิภาพสูงในการกินแบคทีเรีย ถ้าพบโรติเฟอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ออกซิเจน แสดงว่าระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีประสิทธิภาพดี

(6) ไวรัส (Virus) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก เป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งมักเป็นโรคที่เกิดในระบบทางเดินอาหาร ไวรัส สามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้

2.1.3 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

สาเหตุการเกิดมลพิษทางน้ำ คือ น้ำเสียมาจากการปล่อยน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากกิจกรรมของมนุษย์ลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดหรือมีการบำบัดแต่เป็นการบำบัดที่ไม่มีประสิทธิภาพ สามารถจำแนกแหล่งที่มาของน้ำทิ้งหรือน้ำเสียได้ดังนี้

2.1.3.1 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) เป็นน้ำเสียหรือน้ำทิ้งที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ จากกิจกรรมของคน บ้านเรือน ชุมชน และระบายน้ำทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่ได้ผ่านการบำบัดมาก่อน น้ำเสียประเภทนี้ ได้แก่ น้ำทิ้งจากบ้านพักอาศัย ภัตตาคาร โรงแรม สถานที่ทำงาน ย่านการค้า ตลาด เป็นต้น

2.1.3.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) ได้แก่ น้ำเสียหรือน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม น้ำเสียจากการล้างเครื่องจักร การล้างสถานประกอบการ เป็นต้น

2.1.3.3 น้ำเสียจากการเกษตร (Agriculture Wastewater) ได้แก่ น้ำที่ผ่านการชะล้างดินบริเวณเพาะปลูก เป็นน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารเคมีทางการเกษตร ปุ๋ยเคมีรูปแบบต่าง ๆ หรือน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำทิ้งจากบ่อกุ้งหรือบ่อปลา เป็นต้น

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.1.4 สีของน้ำเสีย

สีของน้ำเสียที่ปรากฏให้เห็น โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

2.1.4.1 สีแท้หรือสีจริง (True Color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอินทรีย์ต่างๆ

2.1.4.2 สีปรากฏ (Apparent Color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้แก่ พืชเล็กๆ ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช (Phytophankton) และแพลงก์ตอนสัตว์ (Zoophankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น ซากพืช ซากสัตว์ ตะกอนของดิน และทราย

2.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

2.2.1 ประเภทของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติและในน้ำเสียโดยทั่วไปอยู่ในรูปของแข็งหรือสารแขวนลอยและสารละลายดัง ตารางที่ 2-1 โดยฟอสฟอรัสในน้ำเสียมีลักษณะที่แตกต่างกัน (กรรณิการ์, 2525) และ (อุบลวรรณ, 2536) สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

2.2.1.1 ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) สารประกอบเหล่านี้ละลายน้ำได้ดีและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งสารประกอบประเภทนี้ที่พบมากคือ Trisodium Phosphate (Na_3PO_4) , Disodium Phosphate (Na_2HPO_4), Monosodium Phosphate (NaH_2PO_4) และ Diammonium Phosphate ($(NH_4)_2HPO_4$)

2.2.1.2 โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) ซึ่งเป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำเสียที่มาจากบ้านเรือนหรือโรงงานอตุสาหกรรมเนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาดเมื่อแตกตัวจะให้ออร์โธฟอสเฟตออกมา สารประกอบประเภทนี้ที่พบมากคือ Sodium Hexametaphosphate ($Na_3(PO_4)_6$) , Sodium Triphosphate ($Na_5P_3O_{10}$) และ Tetrasodium Pyrophosphate ($Na_4P_2O_7$) สารประกอบเหล่านี้เป็น Dehydrated Phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลซ์ในน้ำกลับไปเป็นพวกออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ตามเดิมอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอณุหภูมิและค่าพีเอชที่ต่ำการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าถ้าอยู่ในน้ำสะอาด 4-50 วัน แต่จะเกิดได้เร็วในน้ำเสียประมาณ 20 ชั่วโมง (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548)

2.2.1.3 อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) ซึ่งได้จากกระบวนการทางชีวภาพสารฟอสฟอรัสเหล่านี้พบได้ในสารละลาย สารแขวนลอยหรืออนิทรียวัตถุที่กำลังเน่าสลายหรือเป็นองค์ประกอบในร่างกายสิ่งมีชีวิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.2.3 ประโยชน์ฟอสฟอรัสต่อร่างกายมนุษย์

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในร่างกายจะพบในรูปของฟอสเฟต โดยประมาณร้อยละ 85 - 90 ของฟอสฟอรัสที่พบในร่างกายทั้งหมด จะเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างร่างกาย เช่น ในกระดูกจะพบฟอสฟอรัสรวมตัวกับแคลเซียมในรูป hydroxyapatite ($(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) และอีกประมาณร้อยละ 11 จะเป็นองค์ประกอบของกล้ามเนื้อ เลือด และของเหลวในร่างกาย ในรูปของฟอสโฟลิปิด กรดนิวคลีอิก และสารอื่นๆที่ละลายอยู่ในเซลล์ สำหรับในเลือดจะพบฟอสฟอรัสประมาณ 35 - 40 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงปริมาณตามสารอาหารที่ได้รับในแต่ละวัน แต่จะมีระดับคงที่ประมาณ 4 - 9 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

การขับฟอสฟอรัสออกจากร่างกาย ประมาณ 2 ใน 3 จะขับผ่านทางปัสสาวะและอีก 1 ใน 3 จะขับผ่านทางอุจจาระ โดยมีฮอร์โมนพาราไทรอยด์เป็นตัวควบคุมระดับปริมาณฟอสฟอรัสในร่างกายและการขับออกนอกร่างกาย

2.2.3.1 หน้าที่สำคัญต่อร่างกาย

1) เป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟัน ซึ่งทำหน้าที่สัมพันธ์กับแคลเซียมที่รวมตัวกันในรูปแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_2(PO_4)_2$) และไฮดรอกซีอาพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)

2) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ฟอสโฟลิปิด ที่เป็นสารสำคัญในการสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ การเคลื่อนย้ายไขมัน และกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกาย

3) เป็นส่วนประกอบสำคัญของ Buffer ในเลือด และของเหลวในร่างกาย สำหรับรักษาสมดุลความเป็นกรด - ด่างของร่างกาย

4) เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเมทาบอลิซึมของสารอาหารต่างๆ

5) เป็นส่วนประกอบสำคัญของสารที่ให้พลังงานสูงในร่างกาย เช่น ATP

6) เป็นแร่ธาตุที่ช่วยในการทำงานของวิตามิน และเอนไซม์ในร่างกาย

7) เป็นส่วนประกอบสำคัญของกรดนิวคลีอิก และสารทางพันธุกรรม เช่น RNA และ DNA

8) ช่วยในการควบคุมการทำงานของระบบประสาท และกล้ามเนื้อ

2.2.3.2 ประโยชน์ฟอสฟอรัสต่ออุตสาหกรรม

ฟอสฟอรัสที่มีบทบาทต่อด้านอุตสาหกรรมจะพบมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่

1) อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมี ผลิตฮอร์โมนเร่งการเติบโตของพืช

2) อุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอก

3) อุตสาหกรรมผลิตน้ำยาล้างจาน น้ำยาทำความสะอาดต่างๆ

4) อุตสาหกรรมผลิตไม้ขีดไฟ ประทัดหรือพุ

2.2.3.3 ประโยชน์ฟอสฟอรัสต่อพืช

เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ถูกตรึงหรือเปลี่ยนเป็นสารประกอบได้ง่ายทำให้ละลายน้ำได้ยากพืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ลดลง จึงไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช ฟอสฟอรัสที่พบในพืชจะในรูปของฟอสเฟตไอออน พบมากบริเวณในท่อลำเลียงน้ำ เมล็ด ผล และในเซลล์พืช มีบทบาทสำคัญในการถ่ายทอดพลังงาน เป็นวัตถุดิบในกระบวนการสร้างสารต่างๆ ควบคุมระดับความเป็นกรด-ด่าง ในเซลล์

พืชจะการนำฟอสฟอรัสจากดินมาใช้ด้วยการดูดฟอสฟอรัสในรูปอนุมูลไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^-$) และไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) ดินที่มีความเป็นกรดจะมีฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน($H_2PO_4^-$) ดินมีสภาพเป็นด่าง ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) แต่ฟอสฟอรัสมักถูกยึดด้วยอนุภาคดินเหนียว รวมถึงรวมตัวกับธาตุอื่นๆในดิน ทำให้พืชไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น ในสภาพดินที่เป็นกลาง พืชจะนำฟอสเฟตไอออนมาใช้ได้ดีกว่า

2.2.3.4 หน้าที่และความสำคัญต่อพืช

พืชมีความต้องการฟอสฟอรัส ประมาณ 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง แต่หากได้รับฟอสฟอรัสสูงกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช โดยฟอสฟอรัสมีหน้าที่สำคัญ ดังนี้

1) ส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก กิ่ง ลำต้น ช่วยในการสังเคราะห์แสง การหายใจ และการแบ่งเซลล์

2) ช่วยเร่งให้พืชแก่เร็ว ช่วยเร่งการออกดอก การติดผล และการสร้างเมล็ด

3) ช่วยให้รากดูดแร่ธาตุจากดินมาใช้เป็นประโยชน์ได้มากขึ้น

4) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อโรค ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพดี

5) ช่วยให้ลำต้นแข็งแรง ไม่ล้มง่าย และลดผลกระทบที่เกิดจากการได้รับไนโตรเจนมากเกินไป

6) ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรต และลดความเป็นกรดของน้ำในเซลล์ (cell sap)

7) เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิกที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีนทางพันธุกรรม

8) เป็นองค์ประกอบโครงสร้างฟอสโฟลิพิดในเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

9) เป็นองค์ประกอบ ATP ซึ่งเป็นสารประกอบพลังงานสูงของเซลล์

10) เป็นองค์ประกอบของโคเอนไซม์ (coenzyme) ได้แก่ NAD^+ (nicotinamide adenine dinucleotide) และโคเอนไซม์เอ

11) เป็นองค์ประกอบของสารประกอบฟอสเฟตอื่นๆ เช่น phosphoglyceraldehyde และ ribulose bis phosphate ในวัฏจักรคาลวิน (Calvin cycle) ของกระบวนการสังเคราะห์แสง

2.2.2 ผลกระทบฟอสฟอรัสต่อแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสจัดเป็น Growth Limiting Nutrient ของพืชน้ำดังนั้นการระบายน้ำทิ้งที่ยังมีสารประกอบของฟอสฟอรัสสูงลงไปในน้ำเป็นจำนวนมากอาจกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำและวัชพืชน้ำอย่างรวดเร็วทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวขุ่น ออกซิเจนลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) นอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดมากขึ้นแล้วยังอาจมีอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตของมนุษย์และสัตว์ที่บริโภคสารพิษที่มีอยู่ในสาหร่ายบางชนิด ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับห่วงโซ่อาหารคือสาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์, อนินทรีย์ไนโตรเจน, ออร์โธฟอสเฟตและแร่ธาตุต่างๆ (Trace Element) ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่โดยการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหารและสมดุลของห่วงโซ่อาหารจะถูกควบคุมโดยปริมาณธาตุอาหารที่มีในแหล่งน้ำแต่เมื่อปริมาณอาหารในแหล่งน้ำสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารและห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้สาหร่ายบางส่วนที่เกิดการย่อยสลายในน้ำจะจมตัวลงใต้แหล่งน้ำทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดน้อยลงส่งผลต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ (Hammer, 1996 ; จารวุรรณ, 2538)

2.2.3 แหล่งปล่อยฟอสฟอรัสสู่สิ่งแวดล้อม

1) ชุมชน แหล่งชุมชนมีการปล่อยสารประกอบฟอสฟอรัสลงแหล่งน้ำจากน้ำทิ้งในครัวเรือนที่เกิดจากการใช้สารซักล้างหรือสารทำความสะอาดต่างๆ โดยเฉพาะผงซักฟอก และน้ำยาล้างจาน

2) อุตสาหกรรม อุตสาหกรรมมีการปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำทั้งในรูปสารประกอบจากการใช้สารซักล้างหรือสารทำความสะอาดต่างๆ ในกิจกรรมต่างๆของโรงงาน รวมถึงบางโรงงานที่มี

กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องฟอสฟอรัส เช่น โรงงานปุ๋ยเคมี อาจมีการปนเปื้อนกับน้ำเสียหลังการบำบัดของโรงงานออกสู่แหล่งน้ำ

3) การเกษตร ภาคการเกษตรมีการใช้สารฟอสฟอรัสมากในรูปของปุ๋ย ทำให้เกิดมีการตกค้างและการชะล้างปนเปื้อนลงแหล่งน้ำ หากมีปริมาณมากจะทำให้แหล่งน้ำต่างๆเกิดแพลงก์ตอนพืชได้ง่าย

2.2.4 ความเป็นพิษของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอโลหะชนิดหนึ่ง ที่มีส่วนสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระดูกและสารประกอบต่างๆ ในร่างกาย ธาตุฟอสฟอรัสบริสุทธิ์นั้นพบได้ในหลายอัลโลโทรป (Allotrope) ที่พบบ่อยที่สุด นั้นจะมีอยู่ 2 อัลโลโทรป คือ อยู่ในรูปฟอสฟอรัสเหลือง (Yellow phosphorus) หรืออาจเรียกว่า ฟอสฟอรัสขาว (White phosphorous) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมฟอสฟอรัส 4 อะตอมเรียงตัวกันเป็นโมเลกุล (สูตรโมเลกุล P4) กับอีกอัลโลโทรปหนึ่ง คือฟอสฟอรัสแดง (Red phosphorus) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมฟอสฟอรัสเรียงตัวเป็นสายยาวต่อกัน ฟอสฟอรัสถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง ทั้งการทำปุ๋ย ทำหัวไม้ขีด ดอกไม้ไฟ ระเบิด และยาปราบศัตรูพืช ฟอสฟอรัสเหลืองเป็นสารระคายเคือง มีฤทธิ์กัดกร่อนไหม้เนื้อเยื่อทางเดินอาหารได้อย่างรุนแรง อีกทั้งยังเป็นพิษต่อระบบร่างกายอย่างรุนแรงด้วย ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบอวัยวะได้หลายระบบ ส่วนฟอสฟอรัสแดงนั้นดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้น้อย และแทบไม่มีความเป็นพิษ

2.2.4.1 อาการทางคลินิก

1) อาการเฉียบพลัน ฟอสฟอรัสเหลืองเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการหายใจ การสัมผัสทางผิวหนัง และการกิน การสูดหายใจเอาไอหรือฟูมเข้าไปในปริมาณมาก จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเยื่อบุและทางเดินหายใจ แสบจมูก แสบคอ ไอ แน่นหน้าอก หายใจมีเสียงหวีด ถ้ารุนแรงจะเกิดปอดบวมน้ำและปอดอักเสบ (Chemical pneumonitits) ทำให้ตายได้ การสัมผัสทางผิวหนังและดวงตาทำให้ระคายเคือง เยื่อบุตาอักเสบ ผิวหนังเกิดผื่นระคายเคือง ถ้ารุนแรงจะเกิดกัดกร่อนจนผิวไหม้ กัดกระจกตา การกินเข้าไปจะเกิดอาการรุนแรงเช่นกัน คือ ทางเดินอาหารเป็นแผลไหม้ แสบร้อนในทางเดินอาหาร อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย อาจพบว่า ลมหายใจ อาเจียน และอุจจาระมีกลิ่นกระเทียม อาเจียนและอุจจาระที่ออกมาหากมีฟอสฟอรัสปะปนมากอาจเรืองแสงได้ (Smoking stool) อาการทางระบบร่างกาย จะปวดศีรษะ สับสน ชัก ช็อก โคม่า หัวใจเต้นผิดจังหวะ (Atrial fibrillation, QRS and QT prolongation, Ventricular tachycardia, Ventricular fibrillation) เกลือแร่ผิดปกติ เช่น แคลเซียมต่ำ น้ำตาลในเลือดต่ำ ส่วนระดับฟอสเฟตอาจปกติ สูง หรือต่ำก็ได้ การเสียชีวิต อาจเกิดจากหัวใจล้มเหลว ตับวาย หรือไตวาย ทำให้เสียชีวิตได้ภายใน 24 – 48 ชั่วโมง การตั้งใจกินประทัดที่ทำมาจากฟอสฟอรัสเหลืองเพื่อฆ่าตัวตายนี้พบมีรายงานในกลุ่มประเทศละตินอเมริกา และพบว่าผู้ป่วยหลายรายเสียชีวิตจากภาวะตับวายและไตวาย

2) อาการระยะยาว การสัมผัสกับไอหรือฟูมของฟอสฟอรัสเหลืองเป็นเวลานาน ทำให้เกิดหลอดลมอักเสบ ซีด อ่อนเพลีย น้ำหนักลด ถ้าสัมผัสนานกว่า 10 เดือนขึ้นไปอาจเกิดการสูญสลายของกระดูกขากรรไกรล่าง (Osteonecrosis of mandibular bone) เรียกว่าภาวะ Phossy jaw

2.2.4.2 การตรวจทางห้องปฏิบัติการ

การวินิจฉัยที่สำคัญคือการซักประวัติการสัมผัสฟอสฟอรัสเหลือง ไม่ว่าจากการสูดหายใจเข้าไปจากการทำงาน หรือจากการกินฆ่าตัวตาย การตรวจร่างกายถ้ามีกลิ่นกระเทียมจากลมหายใจ อาเจียน หรืออุจจาระ จะช่วยสนับสนุน อุจจาระอาจเรืองแสงถ้ามีฟอสฟอรัสออกมามาก ตรวจผิวหนังด้วย

รังสีอุลตร้าไวโอเลต (Wood's lamp) อาจพบฝุ่นฟอสฟอรัสเหลืองเรืองแสงปนเปื้อนอยู่ สำหรับการตรวจทางห้องปฏิบัติการ การตรวจระดับฟอสเฟตในเลือดไม่มีประโยชน์ เนื่องจากอาจพบปกติ หรือสูง หรือต่ำ ก็ได้ การตรวจที่ช่วยในการดูแลผู้ป่วยคือ การตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ตรวจระดับเกลือแร่ในเลือด ระดับแคลเซียมในเลือด ระดับน้ำตาลในเลือด การทำงานของไต การทำงานของตับ การแข็งตัวของเลือด ตรวจวิเคราะห์ปัสสาวะ ระดับแก๊สในหลอดเลือดแดง ตรวจภาพรังสีทรวงอกเพื่อหาภาวะปอดอักเสบในผู้ที่เป็นพิษจากการสูดหายใจ

2.2.4.3 การดูแลรักษา

การปฐมพยาบาล กรณีได้รับพิษจากการสูดหายใจหรือทางผิวหนัง ให้นำผู้ป่วยออกมาในที่อากาศถ่ายเทให้เร็วที่สุด ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนออก รีบใช้น้ำล้าง อย่าปล่อยให้มีเศษฟอสฟอรัสเหลืองโดนอากาศติดคาไว้ เพราะอาจระเบิดลุกไหม้เป็นอันตรายต่อผู้ป่วยและผู้เข้าไปช่วยเหลือได้ ล้างน้ำให้นาน และถ้ามีบริเวณผิวหนังที่เป็นแผลไหม้ให้ใช้ผ้าก๊อซหรือผ้าพันแผลชุบน้ำปิด ให้ออกซิเจนเสริมถ้ามีหอบเหนื่อย แล้วรีบส่งพบแพทย์ กรณีกินฟอสฟอรัสเหลืองเข้าไป ให้รีบส่งพบแพทย์ทันที

การรักษา เมื่อมาถึงโรงพยาบาล กรณีสูดหายใจ ให้ประเมินการหายใจ ใส่ท่อช่วยหายใจถ้าไม่หายใจ ให้ออกซิเจนเสริม ประเมินระบบไหลเวียน ประเมินสัญญาณชีพ ตรวจร่างกายและถ่ายภาพรังสีทรวงอกเพื่อค้นหาภาวะปอดบวมน้ำหรือปอดอักเสบ สังเกตการหายใจอย่างใกล้ชิดเพราะอาจมีทางเดินหายใจบวมหรือการหายใจล้มเหลวได้ ต่อจากนั้นให้การรักษาประคับประคอง กรณีสัมผัสทางผิวหนัง ให้ล้างตัวถ้ายังไม่ได้ล้างตัวมา ถ้ามีเศษผงฟอสฟอรัสปนเปื้อนมาให้ล้างออก เสื้อผ้าที่ปนเปื้อนให้เอาจุ่มน้ำ ล้างแผลและทำแผลเปียกไว้ กรณีกินมา ให้ประเมินสัญญาณชีพ ถ้าถ่ายหรืออาเจียนมากจะช็อกเพราะขาดน้ำ ต้องให้สารน้ำให้เพียงพอ ไม่มียาต้านพิษ (Antidote) สำหรับฟอสฟอรัสเหลือง การให้ผงถ่านมันต์ ไม่มีข้อมูลถึงประโยชน์ การใส่สายทางจมูกเพื่อล้างท้องจะมีประโยชน์เฉพาะเมื่อทำภายใน 60 นาทีหลังกินมา ตรวจคลื่นไฟฟ้า หัวใจ รักษาอาการหัวใจเต้นผิดจังหวะ ชัก ช็อก และเกลือแร่ที่ผิดปกติ เช่น แคลเซียมต่ำ น้ำตาลต่ำ ถ้าเกิดขึ้น รักษา ประคับประคองตามอาการ

2.2.4.3 การป้องกันและเฝ้าระวัง

การป้องกันที่ดีคือควบคุมการสัมผัสตามหลักอาชีวอนามัย ถ้าต้องทำงานกับฟอสฟอรัสเหลือง ต้องใส่อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังและทางเดินหายใจให้เหมาะสม ควบคุมระดับในบรรยากาศไม่ให้เกินค่ามาตรฐาน การตรวจเฝ้าระวัง ให้สอบถามอาหารหอบเหนื่อย แน่นหน้าอก อ่อนเพลีย น้ำหนักลด ปวดฟันและขากรรไกร ในคนที่ทำงานสัมผัสฟอสฟอรัสเหลืองในปริมาณสูง (อย่างไรก็ตาม โอกาสพบโรคจากการทำงานกับฟอสฟอรัสเหลืองในปัจจุบันอาจลดน้อยลง เนื่องจากในอดีตผู้ป่วยพิษจากฟอสฟอรัสเหลืองส่วนใหญ่จะพบในคนทำงานโรงงานไม้ขีด แต่ปัจจุบันไม้ขีดมักเปลี่ยนไปใช้ฟอสฟอรัสแดงในการทำแล้ว โอกาสพบผู้ป่วยจึงน้อย) ส่วนการป้องกันพิษจากการกินเพื่อฆ่าตัวตายนั้น อาจต้องให้ความรู้ในชุมชนที่เสี่ยง และแก้ไขปัญหาในเชิงสาธารณสุขของประเทศ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.2.5 การวัดความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

วิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลาย การวิเคราะห์ความเข้มข้นในปัจจุบันนิยมใช้วิธีวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotomety) โดยจะต้องนำฟอสฟอรัสในสารละลายมาทำปฏิกิริยาให้เกิดเป็นสารดูดกลืนแสงก่อน แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer วิธีทำปฏิกริยามี 2 วิธี คือ

2.2.5.1 Molybdenum blue method วิธีนี้วิเคราะห์โดยนำสารละลายที่สกัดได้ไปทำปฏิกิริยากับ ammonium molybdate เพื่อให้ฟอสฟอรัสกลายเป็นสารประกอบ ammonium phosphomolybdate จากนั้นรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนนี้ด้วย $SnCl_2$, hydrazine หรือ ascobic acid เพื่อให้ได้สารประกอบ molybdenum blue จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 625-730 นาโนเมตร หรือ 840-880 นาโนเมตร ค่า molar absorptivity ในช่วงความยาวคลื่น 840 - 880 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่าทำให้มีความไวในการวัดดีกว่า อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดบางเครื่องอาจไม่สามารถวัดได้ในช่วงนี้ หรือมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้อย่างระมัดระวัง

2.2.5.1 Vanadomolybdate method วิธีนี้วิเคราะห์โดยนำสารละลายที่สกัดได้ไปทำปฏิกิริยากับสารละลาย ammonium molybdate และ ammonium metavanadate หากมีฟอสฟอรัสอยู่จะได้สารประกอบเชิงซ้อนสีเหลือง ซึ่งสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 400-490 นาโนเมตร วิธีนี้มีความไวน้อยกว่า molybdenum blue ประมาณ 1 ใน 10 แต่มีเสถียรภาพของสีที่เกิดขึ้นดีกว่า และมีการรบกวนจากไอออนอื่นน้อยกว่า วิธีนี้จึงเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ตัวอย่างซึ่งมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง เช่น พืช ปุ๋ย และอาหารสัตว์ เป็นต้น

2.3 ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)

ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication) เป็นสภาวะที่แหล่งน้ำมีปริมาณธาตุอาหารโดยเฉพาะฟอสฟอรัสสูงมากกว่าปกติ ซึ่งเกิดจากน้ำทิ้งชุมชน การชะล้างปุ๋ยและธาตุอาหารต่างๆ จากพื้นที่เกษตรกรรมลงสู่แหล่งน้ำและน้ำทะเล เป็นสาเหตุให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่าย แพลงก์ตอนพืช และวัชพืชน้ำ

ปัจจัยสำคัญในการควบคุมปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหารในรูปคาร์บอน สารอนิ ทรีย์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แสง ความเร็ว อัตราการไหลของน้ำ และระยะเวลากักเก็บน้ำ โดยแหล่งคาร์บอนในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของคาร์บอเนตส่วนแหล่งของไนโตรเจนนั้นได้มาจากการชะล้างปุ๋ยจากพื้นดิน และการตรึงไนโตรเจนของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน นอกจากนี้ปริมาณฟอสฟอรัสมาจากหิน ฟอสเฟตจากการทำเหมืองแร่ อุจจาระสัตว์ ซากพืชที่ย่อยสลาย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเกิดยูโทรฟิเคชั่น คือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณมวลชีวภาพในแหล่งน้ำขณะที่ความหลากหลายของสายพันธุ์ของสัตว์และพืชจะลดลง (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ , 2545)

2.4 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

2.4.1 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ

ในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้น จุลินทรีย์จำเป็นต้องมีอาหารเพียงพอในการสร้างเซลล์ ซึ่งสามารถแบ่งอาหารของจุลินทรีย์ได้เป็น 4 จำพวก คือ 1. สารประกอบซึ่งให้คาร์บอนไนโตรเจน ฟอสฟอรัส 2. สารประกอบซึ่งให้พลังงานในการดำรงชีวิต 3. สารอนินทรีย์ และ 4. สารที่ต้องการเพียงพอเล็กน้อย โดยทั่วไปจุลินทรีย์ต้องการแร่ธาตุหลักได้แก่ โปตัสเซียม แคลเซียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก โคบอลท์ แมกนีเซียมและทองแดง ซึ่งในน้ำเสียชุมชนจะมีสารอาหารเหล่านี้อยู่เพียงพอในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ถ้าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจขาดแร่ธาตุบางอย่างไป จึงจำเป็นต้องเติมลงไป เพื่อทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุลินทรีย์ในระบบที่ใช้ออกซิเจนมีสูตรโมเลกุล $C_2H_7O_2NP_{0.2}$ ประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยน้ำหนักในสัดส่วนร้อยละ 11.2 และ 5.2 ตามลำดับ ซึ่งแบคทีเรียสามารถนำเอาไนโตรเจนมาใช้ได้จากแอมโมเนียไนเตรทและไนไตรท์ ส่วนฟอสฟอรัสนั้นแบคทีเรียจะใช้ในรูปของออโธฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ (PO^{3-}_4) โดยอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อความต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 100 : 5 : 1

ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดทางชีวภาพ โดยการดูดซับออโธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปของเนื้อเยื่อเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดในระหว่างการบำบัดขั้นที่สองอยู่ในรูปตะกอน มีตั้งแต่ร้อยละ 10 – 30 ของปริมาณของฟอสฟอรัสในน้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบบำบัด โดยจุลินทรีย์ไม่เพียงแต่ใช้ฟอสฟอรัสในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์ สังเคราะห์สารและถ่ายทอดพลังงานในเซลล์เท่านั้น แต่ยังสามารถเก็บฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์เป็นพลังงานสะสมที่ใช้อากาศและสภาวะไร้อากาศสามารถทำได้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา เรียกว่า “mainstream” ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสในตะกอนจุลินทรีย์ที่สูบกลับ (return sludge) เรียกว่า “sidestream”

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่นิยมใช้กันมาก มีหลักการว่าในสภาวะไร้อากาศซึ่งมีค่ากรดสูง จุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่สะสมในรูปสารประกอบโพลีฟอสเฟตและจะถูกปล่อยฟอสเฟตออกมาจากเซลล์ เพื่อที่จะใช้สารอินทรีย์ที่ใช้ได้ง่ายคือกรดไขมัน แต่เมื่อจุลินทรีย์ถูกป้อนเข้าสู่บริเวณที่มีออกซิเจน (aerobic reactor) จุลินทรีย์พยายามสะสมฟอสฟอรัสในรูปของโพลีฟอสเฟตไว้ในเซลล์ในปริมาณมากกว่าปกติ (luxary uptake) นั่นคือฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกจากน้ำในรูปตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้หลักการสร้างตะกอนสภาวะที่เปลี่ยนแปลงระหว่างไร้อากาศและใช้อากาศ

เพื่อที่ได้ระบบที่ต่อเนื่อง จะต้องมีการเคลื่อนที่ของเซลล์จุลินทรีย์ไปพร้อมกับน้ำเสียที่จะบำบัดในถังที่สร้างสภาวะต่างกัน ดังนั้นการกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีทางชีวภาพจึงใช้ประกอบได้กับระบบที่เป็นระบบเอเอส (activated sludge) แต่ไม่สามารถใช้กับระบบโปรยกรอง หรือไม่เหมาะสมเมื่อระบบเดิมเป็นแบบคลองวนเวียน ระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพนี้ สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสให้เหลือระดับความเข้มข้น 1-2 มิลลิกรัม/ลิตร ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆด้วย เช่น ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย ในน้ำทิ้งจากระบบบำบัด (effluent) เนื่องจากในตะกอนมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ประมาณร้อยละ 5 นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (BOD) ต่อฟอสฟอรัสในน้ำเสียซึ่งควรมีมากกว่า 10 :1

จากหลักการในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ในการกำจัดฟอสฟอรัสได้หลากหลายดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

ผู้วิจัย	ชนิดของงาน	ผลการศึกษา
Pedro, et.al. (1999)	การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพด้วย Biofilm membrane	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงสุดที่ 89 %
Tilche, et.al. (1999)	การกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนทางชีวภาพด้วยระบบ SBR ในการบำบัดน้ำเสียของฟาร์มหมู	มีประสิทธิภาพสูงกว่า 98 %
Obaja, et.al. (2003)	ไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟอเคชัน และการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในน้ำเสียฟาร์มหมูโดยใช้ระบบ SBR	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 99.7 เปอร์เซนต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส SRT 1 วัน และ HRT 11 วัน
Li, et.al. (2003)	ลักษณะการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้ไบโอฟิล์มในระบบ SBR	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 90 %

จากงานวิจัยการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในตารางที่ 2.1 พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพสูงแต่เป็นวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นการใช้วิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงนั้นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ และมีความชำนาญสูงในการควบคุมระบบ อีกทั้งเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ต้นทุนสูง ดังนั้นในการเลือกใช้วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร RAJABHAT MAHA SARAKHAM UNIVERSITY

2.4.2 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ – เคมีที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในรูปของตะกอน ซึ่งจะแยกออกจากสารละลายนั้นได้ การตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายในน้ำของสารนั้นๆ ซึ่งการตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกัน ดังต่อไปนี้

1) ใส่สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อย

2) ใส่สารซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะสมดุลของการละลายน้ำ (solubility equilium) ให้เลื่อนมาถึงจุดที่สารละลายในน้ำไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป จึงเกิดการรวมตัวและตกตะกอน

3) เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัว หรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ทำให้ค่าการละลายลดลงจนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง เนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กระบวนการการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เป็นกระบวนการที่แตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชั่น เพราะการตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารลงไปในน้ำเพื่อให้ทำ

ปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นการตกตะกอนที่ใหญ่และหนัก จมตัวได้ ส่วนใหญ่โคแอกกูเลชั่นเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สิ่งสกปรกที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ในทางปฏิบัติการตกตะกอนทางเคมีมักถูกเรียกรวมๆกันไปเป็นโคแอกกูเลชัน

ในปัจจุบันสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสมีหลายชนิด ได้แก่

1) เบนโทไนท์ (Bentonitc) เป็นดินเหนียวที่เกิดจากการสะสมของเถ้าภูเขาไฟ ประกอบด้วยเบนโทไนท์ร้อยละ 55 และ สารอนินทรีย์ร้อยละ 45 ซึ่งอยู่ในรูปของอลูมิเนียมออกไซด์ เฟอรัสออกไซด์ ซิลิคอนออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ มีข้อดีคือ

- ใช้กับน้ำที่มีความขุ่นเพื่อเพิ่มเป้าสัมผัสในน้ำได้
- สามารถดูดซับประจุบวกได้ดี
- ราคาถูก หาได้ง่าย
- ตะกอนมีน้ำหนักจึงตกเร็ว
- pH มักไม่มีผลต่อการตกตะกอน

แต่มีข้อเสียคือ มักจับตัวกันเป็นก้อนเหนียว เมื่อใส่ลงไปในน้ำทีเดียว ดังนั้นเพื่อแก่ปัญหาดังกล่าจึงนิยมตีหรือกวนให้ก้อนดินแตกก่อนแล้วค่อยผสมลงไปในน้ำ

2) ปูนขาว (Lime) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ มีข้อดีคือ

มีราคาถูก สร้างตะกอนได้ดี ทำให้พีเอชหลังตกตะกอนมีค่าสูงขึ้น แต่มีข้อเสียคือจะเกิดตะกอนมาก ทำให้เป็นปัญหาในการกำจัดได้โดยปูนขาวทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างและฟอสฟอรัสในน้ำเสียเกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกซีอาอาพาไทด์ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3) อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) หรือสารส้ม มีข้อดีดังนี้

- ราคาถูก หาซื้อง่าย
- จับตัวกันเป็นก้อนกับคอลลอยด์ได้ดี
- ใช้งานง่าย สะดวกสบาย
- ละลายในน้ำได้ 86.9 % ส่วนต่อน้ำ 100 ส่วนที่ 0 องศาเซลเซียส

ข้อเสีย

- เป็นเกลือของกรดที่ละลายน้ำได้ดี เกิดสภาพกรดทำให้เกิดการกัดกร่อนภาชนะที่ใช้งาน
- ทำให้เกิดความกระด้างถาวรเพิ่มขึ้น
- ต้องเพิ่มความเป็นกรดด่างให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน แต่ถ้าเพิ่มความเป็นด่างมากเกินไปจะเกิดความคงทนของสีในน้ำได้
- เพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้ ทำให้เพิ่มการกัดกร่อน
- ปฏิกิริยามักเกิดไม่ค่อยสมบูรณ์ ถ้าในน้ำมีปริมาณคอลลอยด์มาก บางครั้งอาจไปขัดขวางปฏิกิริยาได้ ทำให้มีค่าปริมาณสารส้มเหลือในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบกำจัดมากทำให้เกิดการอุดตันต่อสารกรองได้โดยมักจะอยู่ในรูป Al_2O_3 ไม่ได้อยู่ในรูป $Al_2(SO_4)_3$ และสารส้มที่ตกค้างมักไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

4) เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือ copperas มีข้อดีดังต่อไปนี้

- ตกตะกอนได้ที่พีเอชกว้างประมาณ 4-11
- เวลาในการตกตะกอนและการรวมตัวให้เกิดตะกอนจะสั้นกว่าสารส้ม
- ตะกอนที่ได้มีขนาดใหญ่
- มีเหล็กออกสู่น้ำทิ้งน้อย
- กว่าสารส้ม ราคาถูกกว่า

ข้อเสีย

- มักให้ตะกอนสีน้ำตาล
- เกิดการกร่อนถ้าอยู่ในรูป Fe^{2+}
- ไม่เหมาะสมกับน้ำที่มีความเป็นด่างต่ำและมีสี

2.4.3 การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพ

จะใช้กระบวนการดูดซับ (adsorption process) โดยใช้สารดูดซับ (adsorbent) เป็นตัวดูดซับฟอสเฟต เช่น activated alumina นอกจากนี้ยังมีการใช้ adsorbent อื่นๆ มากำจัดฟอสฟอรัสซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 99 % ในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย อีกทั้งวิธีการในการกำจัดฟอสฟอรัสยังไม่ยุ่งยาก จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญที่จะประยุกต์ใช้การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพในการบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยในการกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพ

ผู้วิจัย	ชนิดของงาน	ผลการศึกษา
Qzacar (2003)	การดูดซับฟอสเฟตออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ alunite	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต 99 %
Ensar, et.al. (2003)	การกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียโดยใช้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากของเสียของการผลิตคอนกรีต	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต 99 %
Qguz (2004)	การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เศษถ่านหินจากเตาหลอม	มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟต 99 %

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ความสามารถในการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ไปกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุลโดยมีจุดมุ่งหมาย เพื่อหาความสามารถในการดูดซับของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะในการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำ โดยอาศัยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดซับ

2.5 กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation)

2.5.1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

หลักการทำงานของกระบวนการการรวมตะกอนทางไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าในถังปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวกทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ขณะเดียวกันที่ขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ โดยน้ำจะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์อิออน เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดกลุ่มตะกอนของเฟอรัส อิออน และ เฟอริกอิออน ในรูปของเฟอรัสไฮดรอกไซด์และเฟอริกไดออกไซด์ ซึ่งสามารถตกตะกอนในน้ำเสียและสิ่งสกปรกได้ (สมพงษ์ ,2551)

2.5.2 หลักการทำงานของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

กระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น – รีดักชั่น หรือปฏิกิริยารีดอกซ์) หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถังบำบัดผ่านขั้วไฟฟ้าจะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนลงในถังบำบัด ที่มีอิออนที่เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและให้อิเล็กตรอนออกมาละลายอยู่ในน้ำที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น จะทำให้น้ำเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์อิออน(OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น

2.5.3 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

2.5.3.1 ปฏิกิริยาที่ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยานอนรีดอกซ์ (Non Redox Reaction)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.5.3.2 ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีทั้งการให้และรับอิเล็กตรอนเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งมีผลทำให้เลขออกซิเดชันของธาตุต่างๆเปลี่ยนไป ปฏิกิริยารีดอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ปฏิกิริยาย่อย คือ

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) คือ ปฏิกิริยาที่สารมีการให้อิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มของเลขออกซิเดชันของธาตุในอนุภาคต่างๆ
- ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) คือปฏิกิริยาที่สารมีการรับอิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยาที่มีการลดค่าเลขออกซิเดชันชองธาตุในอนุภาคต่างๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น การชุบโลหะ การทำแบตเตอร์รี่การแยกสารด้วยไฟฟ้า การทำสารให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

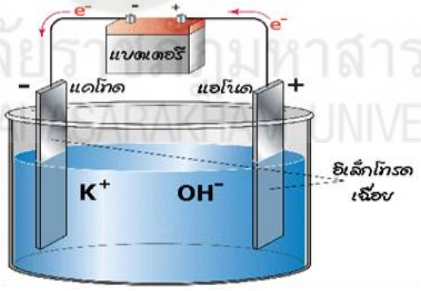
ตารางที่ 2.3 สรุปปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวรีดิวซ์	ตัวออกซิไดซ์
ให้อิเล็กตรอน	รับอิเล็กตรอน
มีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น	เลขออกซิเดชันลดลง
ทำหน้าที่รีดิวซ์	ทำหน้าที่ออกซิไดซ์
ถูกออกซิไดซ์	ถูกรีดิวซ์
อยู่ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน	อยู่ในปฏิกิริยารีดักชัน

2.5.4 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell)

อิเล็กโทรลิซีส (Electrolysis) หมายถึง กระบวนการแยกสลายสารเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยผ่ากระแสไฟฟ้าลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือสารอิเล็กโทรไลต์ที่หลอมเหลว แล้วสารอิเล็กโทรไลต์เกิดการแยกสลายได้สารใหม่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า เป็นปฏิกิริยาเคมี หรือเป็นระบบที่เกิดกระบวนการอิเล็กโทรลิซีส ส่วนประกอบของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรืออิเล็กโทรไลต์ที่หลอมเหลว ขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่อกับขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่าแอโนดและเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วลบของ แบตเตอรี่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่าแคโทด และเป็นขั้วลบ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์อิเล็กโทรไลต์
ที่มา: https://sites.google.com/site/itg65620114132/sell-xi-lek-thor-lit (2561)

2.5.5 โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า นิยมใช้เหล็ก ทำเป็นขั้วไฟฟ้า หรือเหล็กจากเศษโลหะที่ทิ้งแล้ว เมื่อนำโลหะเหล่านี้กลับมาใช้ทำขั้วไฟฟ้า ต้องดูแลเพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดการตกตะกอนของสลัดจ์ ในช่องว่างระหว่างเศษโลหะ ซึ่งจำเป็นต้องล้างอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ไอออนของโลหะที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษส่วนใหญ่จะใช้ในการกำจัดน้ำเสียและในการบำบัดน้ำ โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการตกตะกอนของ เมื่อมีไอออนอยู่ในน้ำกลไกของกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตัวกลางที่เป็นน้ำคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

2.5.6 อิเล็กโทรด

จากที่ได้กล่าวมาแล้ววัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด ได้แก่ ทองเหลือง และ เหล็ก หรืองานโลหะอื่นๆ ควรใช้วัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวยึดจับอิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะเหล่านี้ ในการใช้งานจะต้องระมัดระวังการเกิดสลัดจสะสมระหว่างอิเล็กโทรด และควรทำความสะอาดผิวหน้าของอิเล็กโทรดเป็นประจำ และเนื่องจากการกำจัดมลสาร จะต้องใช้อิออนโลหะที่มากเพียงพอกับปริมาณมลสารที่ต้องการกำจัด ดังนั้นจึงนิยมใช้เหล็กสำหรับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากราคาถูกกว่า อัตราการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดจะขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสียโดยเฉพาะในกรณีที่น้ำเสียมีมลสารมาก จะต้องใช้อิออนโลหะจำนวนมากในการตกตะกอนด้วยเช่นกัน

เหล็ก (Fe) คือ โลหะหนักที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชั่น +2 และ +3เหล็กที่มีเลขออกซิเดชั่นสูงๆจะไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรงถ้าเอาเหล็กไปวางไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสีน้ำตาลที่ผิวเรียกว่า “สนิมเหล็ก” ดังนั้นเครื่องมือที่เป็นเหล็กจึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิม เคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม) หรือผสมโลหะบางชนิดลงไปซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับอโลหะได้หลายชนิดเมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe_3^+และ Fe_2^+ปนกันเนื่องจากเหล็กถูกออกซิไดซ์กับอากาศได้ง่ายโดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบส

ภาพที่ 2.2 ลักษณะแผ่นเหล็กที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

ทองเหลือง คือ โลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ปริมาณของสังกะสีในทองเหลืองมีตั้งแต่จำนวนเล็กน้อยไปจนถึงมากกว่า 40 % โดยน้ำหนัก สีของทองเหลืองจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสมอยู่ ถ้าปริมาณสังกะสีมีน้อยโลหะจะออกเป็นสีชมพู ถ้าสังกะสีมากโลหะจะออกเป็นสีเหลืองและเหลืองซีดตามลำดับ สังกะสีในทองเหลืองทำให้ทองเหลืองมีสมบัติการต้านแรงดึงและความเหนียวสูงขึ้น ความแข็งจะสูงกว่าทองแดงมาก สมบัตินี้จะดีขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของสังกะสีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณสังกะสีมีมากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อมากกว่า 40 % ความเหนียวของโลหะจะลดลงมาอย่างมากจนไม่เหมาะสำหรับการใช้งาน ดังนั้น ทองเหลืองในงานวิศวกรรมจึงมีพิกัดขั้นสูงของปริมาณสังกะสีไม่เกิน 40 % ทองเหลืองที่มีสังกะสีประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก เป็นทองเหลืองที่มีความ

แข็งแรงและความเหนียวสูงมากที่สุด จึงเป็นส่วนผสมของทองเหลืองที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุด จุดอ่อนที่สำคัญของทองเหลือง คือ ทองเหลืองไม่ค่อยมีความทนทานต่อการผุกร่อน เมื่อปริมาณสังกะสี ที่มากขึ้นโอกาสที่เกิดการผุกร่อนกับโลหะมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการผุกร่อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้กับทองเหลือง โดยการนำธาตุต่างๆ ผสมเข้าในทองเหลือง ได้แก่ ตะกั่ว ดีบุก นิกเกิล อะลูมิเนียม แมงกานีส ซิลิคอน และเหล็ก เป็นต้น

คุณสมบัติทางกลของทองเหลือง สังกะสีมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของทองทองเหลือง โดยเพิ่มทั้งความแข็งและความเหนียว ให้กับโลหะทองแดง ในหล่อทองเหลือง ปริมาณของสังกะสีจะสามารถทำละลาย โดยให้สารละลายของแข็งในทองแดง แต่เมื่อปริมาณของสังกะสีเพิ่มสูงขึ้น สังกะสีจะให้สารประกอบเชิงโละกับทองแดง ซึ่งจะมีแต่ความแข็ง เปราะแตกง่าย และความเหนียวจะค่อยๆลดลง ดังนั้น การที่นำทองเหลืองไปใช้งานจำเป็นต้องทราบสมบัติเชิงกลของทองเหลือง ซึ่งจะมีปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีกับทองแดงเป็นบทบาทพื้นฐานความเข้าใจถึงจุดหลอมเหลว และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของทองเหลือง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 2.3 ลักษณะแผ่นทองเหลืองที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

วัชรวิชญ์ ดาวสว่าง และ พัทธกมล สมบุตร (2559) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สำหรับบำบัดความขุ่นในน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีการบำบัดความขุ่นน้ำโดยใช้ไฟฟ้าเพื่อลดการใช้สารเคมีและการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ายอดคลื่นแบบพัลส์ที่ 150V กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 25mA ที่ความถี่สัญญาณพัลส์ 32 kHz ซึ่งการทดลองคายประจุไฟฟ้าลงในน้ำปริมาตร 500ml ที่ความขุ่น 3 ระดับคือ 51.6 NTU 19.94 NTU และ 7.95 NTU ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น เวลาที่ใช้ในการคายประจุไฟฟ้าที่ 5 ถึง 15 นาที แล้วทำการพักตะกอนเป็นเวลา 1 ถึง 3 ชั่วโมง การทดลองได้แบ่งเวลาในการคายประจุออกเป็น 4 เวลา คือ 5 8 12 และ 15 นาที แล้วทำการวัดค่าความขุ่นเพื่อหาประสิทธิภาพผลที่ได้ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ กรคายประจุไฟฟ้าที่เวลา 15 นาที แล้วพักให้ตกตะกอนที่เวลา 3 ชั่งโมง ความขุ่นของน้ำลดลงจาก 51.6 NTU เป็น 0.28 NTU ประสิภาพในการจำกัดความขุ่นทำได้ถึง 99.46%

วาทิต ภักดี และ กิตติพล รัตนพงษ์ (2559) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่อง การบำบัดน้ำเสียเป็นสิ่งจำเป็นทั้งในภาคอุตสาหกรรมและในครัวเรือน การศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง กระบวนการรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าหรือ Electro Coagulation (EC) เป็นกระบวนการในขั้นตอนหนึ่งของการบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอนุภาคด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคที่ปนเปื้อนรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นจนทำให้สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ชุดทดลองนี้ประดิษฐ์ขึ้นมีส่วนรวมอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมจำนวนหลายแผ่น โดยศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 4 ระยะ คือ 4 6 8 และ 10 น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิดคือ น้ำสีอะคริลิกและน้ำแป้งมันสำปะหลัง โดยทำการทดลองกระบวนการกับระบบน้ำเสียที่ไหลอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียประเมินจากค่าความขุ่นที่ลดลง ค่า pH และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการราวมอนุภาคด้วยไฟฟ้าช่วยลดความเป็นกรดของน้ำเสียได้ เมื่อระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดลดลงความขุ่นจะถูกกำจัดมากขึ้นแต่จะต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพของกระบวนการอนุภาคด้วยไฟฟ้าในน้ำแป้งสูงกว่าในน้ำสีอะคริลิค

ณัฐ จันท์ครบ และคณะ (2558) ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตผ้าเบรกด้วยวิธีอิเล็กโตรโคแอคกูเลชัน เป็นการสร้างชุดสาธิตระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตผ้าเบรกโดยใช้วิธีการบำบัดด้วยวิธีแบบอิเล็กโตรโคเอกูเลชั่น จะใช้คู่อิเล็กโทรดที่เป็นอลูมิเนียม (ขั้วบวก) กับแผ่นทองแดง (ขั้วลบ) ในการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำการทดลองโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 1.2 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และเวลากักเก็บ 10 20 30 40 60 90 และ 120 นาที เพื่อทดสอบคุณสมบัติของบำบัด ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตผ้าเบรกโดยใช้กำลังไฟฟ้า 28.8 วัตต์ ระยะเวลาการกักเก็บ 60 นาที ให้ค่า COD ลดลงสูงสุดโดยค่า COD ของน้ำเสียลดลงจาก 2200 มก./ล. เหลือเป็น 75 มก./ล.โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็น 96.6%

ปรัชวนี พิบำรุง (2558) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ ฟอสฟอรัสและการชะละลายฟอสฟอรัสในดินนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินโดยวิธี Bray-2 และวิธี Olsen กับปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายดิน ($CaCl_2P$) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดินนาที่สกัดโดย Bray-2 อยู่ในช่วง 7.06 – 734.08 มก./กก. เฉลี่ยเท่ากับ 215.86 มก./กก. ขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธี Olsen อยู่ในช่วง 19.66 – 752.13 มก./กก. เฉลี่ยเท่ากับ 244.93 มก./กก. ในด้านสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดโดย Bray-2 มีสหสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดโดย Olsen อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (r=0.9904**) สำหรับการประเมินความเสี่ยงการชะล้างฟอสฟอรัสในพื้นที่ศึกษา โดยวิธี Bray-2 มีค่าวิกฤติการชะละลายฟอสฟอรัส (Bray-2 P critical value) เท่ากับ 43.85 มก./กก. โดยวิธี Olsen มีค่าวิกฤติการชะละลายฟอสฟอรัส (Olsen P critical value) เท่ากับ 90.99 มก./กก

ไพฑูรย์ หมื่นจำเริญ และ แคทลียา ปัทมพรหม (2557) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของแรงดันไฟฟ้าและช่องว่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียโดยการจับตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดต่อวงจรแบบขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 20 25 และ 30 VDC และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด 3 ระยะคือ 0.5 1.0 และ 1.5 ซม. ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยได้ศึกษาประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของน้ำเสีย รวมถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่กำจัดค่าความขุ่นมีประสิทธิภาพที่สุดคือ 30 VDC และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดที่กำจัดค่าความขุ่นมีประสิทธิภาพที่สุดคือ 0.5 ซม. อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการบำบัดแล้ว พบว่าค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่อยู่ที่ความสูญเสียของแผ่นอิเล็กโทรดมากกว่าค่าพลังงานที่ใช้ โดยสภาวะการบำบัดที่ถูกที่สุดที่ให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นลงเหลือต่ำกว่า 12 NTU คือ ที่แรงดันไฟฟ้า 20 VDC และระยะห่างแผ่นเพลทเป็น 0.5 ซม. โดยที่อัตราการไหลที่ไหลช้าลงเป็น 150 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าอัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที เล็กน้อย

ศิริพร กาทอง และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย (2557) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ การหาปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทศเซียม ในปุ๋ยอินทรีย์น้ำ จำนวน 8 ตัวอย่าง และปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่ผลิตใช้เองโดยใช้พืชในท้องถิ่นของเกษตรกร จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยย่อยตังอย่างปุ๋ยอินทรีย์น้ำด้วยกรดแล้วนำไปหาปริมาณไนโตรเจนด้วยเทคนิคเจลดาห์ หาปริมาใช้ฟอสฟอรัส ตรวจวัดด้วยวิธีวานาโดโมลิบเดต โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และหาปริมาณโพแทสเซียมโดยใช้เครื่องอะตอมมิกอิมิสชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 766.5 นาโนเมตร จากผลการศึกษาปุ๋ยอินทรีย์น้ำทั้ง 8 ตัวอย่าง พบว่า ปริมาณไนโตรเจนที่ได้ในปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม มีปริมาณสูงกว่าปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่เกษตรกรผลิตเอง พบว่าอยู่ในช่วง 692.30 - 6,320.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณไนโตรเจนพบมากที่สุดอยู่ในปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่างที่ 3 และพบน้อยที่สุดในปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่าง 8 ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 26.11 – 596.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสพบมากที่สุดอยู่ในปุ๋ยอินทรีย์ตัวอย่างที่ 2 พบน้อยที่สุดในปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่างที่ 8 เช่นเดียวกันการหาปริมาณโพแทสเซียมที่ได้อยู่ในช่วง 89.13 – 629.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณโพแทสเซียมพบมากที่สุดในปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่างที่ 2 และน้อยที่สุดได้แก่ ปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่างที่ 5 ดังนั้นจากปุ๋ยอินทรีย์น้ำทั้ง 8 ตัวอย่าง ปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่เหมาะสมใช้บำรุงพืชที่ต้องการธาตุอาหารหลักควรเป็นปุ๋ยอินทรีย์น้ำตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3

วนิดา ชูอักษร (2555) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม มีหลายวิธีได้แก่วิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัดคือการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ก็ต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิ การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม ปูนขาว และสารประกอบเหล็ก ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัดกระบวนการเฟนตัน ก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา การใช้โอโซน ก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดด่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ในการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมีมีข้อจำกัด เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในการกำจัดนอกจากจะสิ้นเปลืองและตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิด มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

ณัฐ จันท์ครบ และคณะ (2554) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ การพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบอิเล็กโตรโคแอกกูเลชันโดยใช้การสลับขั้วไฟฟ้าแบบไม่สมมาตรและคู่อิเล็กโทรดที่เหมาะสม โดยใช้หลักการการสลับขั้วไฟฟ้าเป็นจังหวะเพื่อลดการก่อตัวของไฮดรอกไซด์ที่เป็นอุปสรรคต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการใช้อิเล็กโทรดที่เป็นโลหะต่างชนิดกันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นหลักร่วมกับโลหะประเภทอื่นได้แก่ เหล็ก สแตนเลส ทองแดง ผลการทดสอบพบว่า การสลับขั้วไฟฟ้าและโลหะที่ต่างชนิดกันทำให้การก่อตัวของไฮดรอกไซด์น้อยลงเป็นผลให้อุปสรรคการไหลกระแสไฟฟ้าลดลง ทำให้สามารถเพิ่มช่วงระยะเวลาต้องบำรุงได้ยาวนานขึ้น โดยช่วงเวลาสลับขั้วไฟฟ้าที่เท่ากันโลหะทองแดงจะให้ความเร็วในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุด รองลงมาคือ เหล็ก และสแตนเลส ตามลำดับ ส่วนต้นทุนการดำเนินงานทองแดงจะมีต้นทุนสูง เหล็กจะมีปัญหา น้ำมีสีสนิมแดง ที่เหมาะสมแนะนำให้ใช้อลูมิเนียมคู่กับสแตนเลสซึ่งไม่มีปัญหาสีของน้ำ ทนต่อการกร่อนสลายและดูแลทำความสะอาดง่าย โดยต้นทุนไม่สูงมากนัก

สุเทพ สิริวิทยากรณ์ และ วีระนุช บุญรุ่ง (2553) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม สภาวะที่เหมาะสมเฉลี่ยของเฟนตัน ใช้ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.92 กรัม/ลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6.38 กรัม/ลิตร ที่ค่า pH 3.40 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 97.85 52.83 และ 79.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอลูมิเนียมซัลเฟต ใช้ปริมาณสารสร้างตะกอน 2.56 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 7.20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และCOD เฉลี่ย

เท่ากับ 94.02 76.28 และ 42.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ใช้ปริมาณสารสร้างตะกอน 4.00 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH 7.40 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และCOD เฉลี่ยเท่ากับ 96.12 86.75 และ 54.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของสารเคมีทั้ง 3 ชนิด พบว่าเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด รองลงมาคือ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และอลูมิเนียมซัลเฟต ตามลำดับ ส่วนค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเฟนตัน อลูมิเนียมซัลเฟต และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เท่ากับ 125.32 25.79 และ 83.15 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำเสีย ตามลำดับ

สหรัฐ เชาว์รูปดี (2552) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับ การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การประยุกต์ใช้การตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย เพื่อกำจัดสังกะสี งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 9x10 ตารางเซนติเมตร ชุดที่ 2 เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน จำนวน 3 คู่ โดยมีขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 3x10 ตารางเซนติเมตร โดยแต่ละชุดการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิแอมแปร์ ส่วนที่สอง ใช้ค่าสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนแรกมาใช้กับน้ำเสียจริง ผลการทดลองส่วนที่ 1 การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 2.4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.68% การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 9 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.71% ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่า การจัดเรียงขั้วแบบเซลล์ต่อขนาน ที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ จัดเป็นสภาวะที่เหมาะสม โดยกำจัดสังกะสี ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 100% ผลการทดลองส่วนที่ 2 การทดลองในน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 3.0 มิลลิโมลต่อลิตร โดยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.40% การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ที่ pH 9 สามารถกำจัดสังกะสีได้ 99.40 % ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่า การจัดเรียงขั้วแบบเซลล์ต่อขนานที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ กำจัดสังกะสี ณ ชั่วโมงที่ 6 ได้ 24%

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง ซึ่งการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ขั้นตอนการสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วและการเตรียมน้ำสังเคราะห์ ส่วนที่ 2 การทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น และส่วนที่ 3 การทดลองระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

3.1 วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1) น้ำกลั่นสำหรับเตรียมสารละลายที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4) สารละลายมาตราฐานฟอสฟอรัส
5) แอมเนียมโมลิบเดต (Ammonium moybdate)
6) ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟสไดไฮเดรต
7) ฟีนอล์ฟทาลีน
8) เอธิลแอลกอฮอลความเข้มข้น 95 %
9) แอสคอร์บิคแอซิด
10) โปตัสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter)
2) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
3) เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter)
4) เครื่องชั่ง (Balance) ทศนิยมชนิด 4 ตำแหน่ง
5) นาฬิกาจับเวลา
6) โวลต์มิเตอร์ยี่ห้อ Yamada รุ่น M-92A
7) บิวเรต (Buret) ขนาด 50 มิลลิลิตร
8) กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 50 และ 1,000 มิลลิลิตร
9) บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 100 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
10) ปิเปตวัดปริมาตร (volumetric pipet) ขนาด 1 2 5 10 20 และ 50 มิลลิลิตร
11) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
12) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flash) ขนาด 50 และ 1,000 มิลลิลิตร
13) แผ่นอะคิลิกใส
14) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flash) ขนาด 50 และ 1,000 มิลลิลิตร
15) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการวิเคราะห์ ขนาด 60 มิลลิลิตร
16) แผ่นทองเหลือง
17) ถังเก็บน้ำ

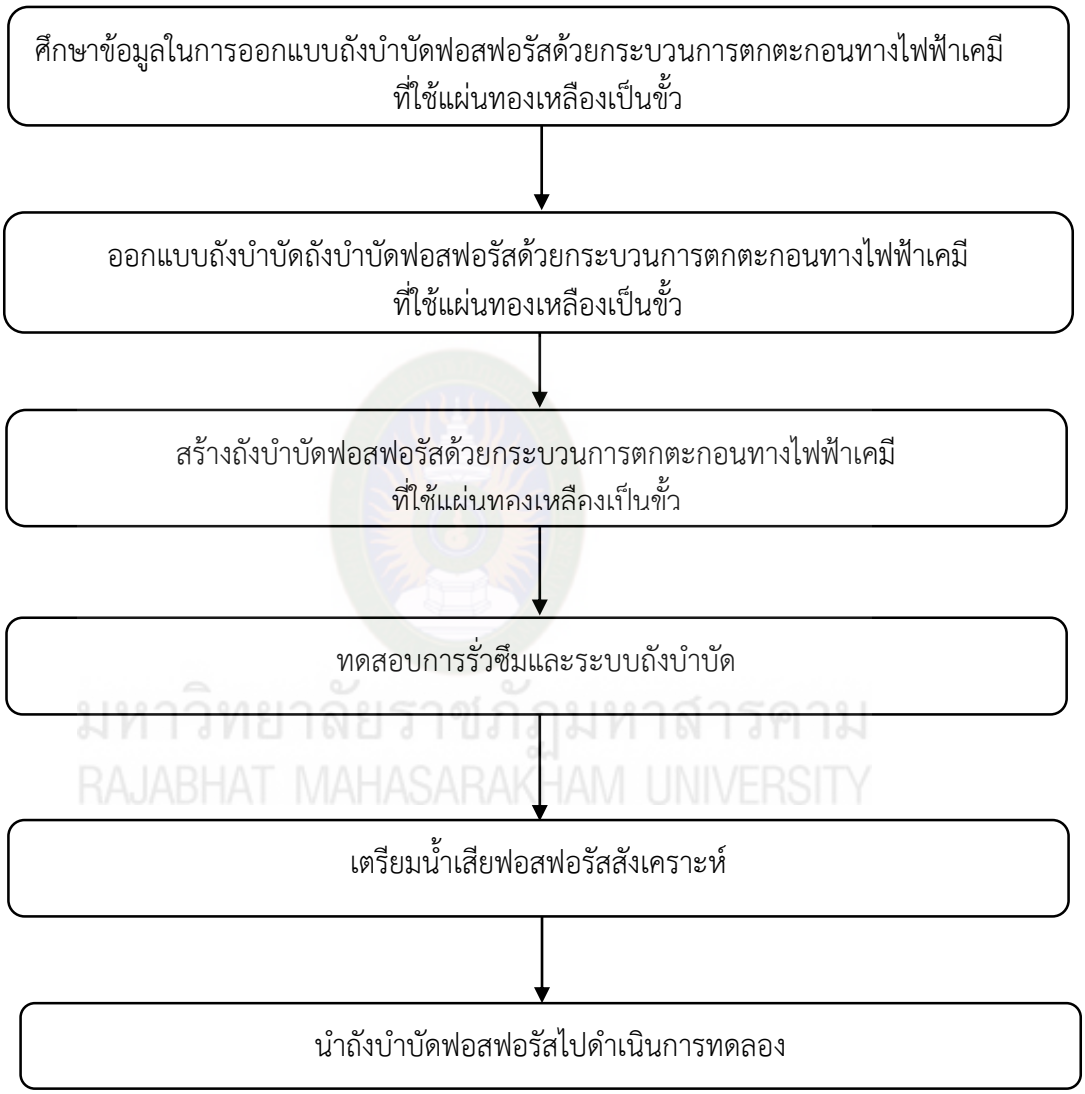
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัย แบ่งเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 ขั้นตอนการสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วและการเตรียมน้ำสังเคราะห์ ดังภาพที่ 3.1

3.2.1 การสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วและการเตรียมน้ำสังเคราะห์



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1 การสร้างระบบบำบัดและการเตรียมน้ำสังเคราะห์

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

รายละเอียดการสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้วและการเตรียมน้ำสังเคราะห์ มีดังนี้คือ

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลในการออกแบบถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

3.2.1.2 ออกแบบถังบำบัดถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

3.2.1.3 เตรียมวัสดุในการสร้างระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี ได้แก่ แผ่นอะคริลิค แผ่นทองเหลือง สายไฟ ซิลิโคน น้ำยาเชื่อมพลาสติก หินเจียร เลื่อยวงเดือน ตลับเมตร ดินสอ คีมย้ำรีเวท ก๊อกน้ำและสายยาง

3.2.1.4 นำแผ่นอะคริลิคมาตัดให้ได้จำนวน 5 แผ่น

3.2.1.5 นำแผ่นอะคริลิคที่ตัดไว้มาประกอบเป็นถังบำบัดสีแอซิด ขนาด 13 x 10 x 15 เซนติเมตร

3.2.1.6 จากนั้นนำแผ่นทองเหลืองมาตัดเพื่อทำเป็นขั้วอิเล็กโทรด ขนาด 7 x 10 เซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น และประกอบทองเหลืองเข้ากับสายไฟ

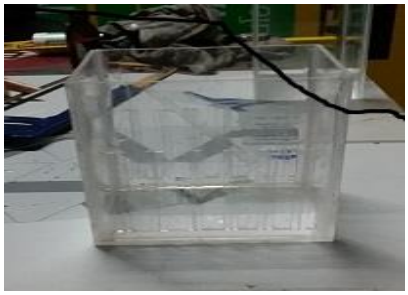
3.2.1.7 นำขั้วอิเล็กโทรด คือ ทองเหลือง มาประกอบเข้าไปในถังบำบัดโดยมีระยะห่างของแผ่น 2 เซนติเมตรเพื่อให้ระบบเป็นแบบสองขั้ว ต่อเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC Converter) นำแอมป์มิเตอร์มาต่อกับวงจรเพื่อดูค่ากระแสไฟฟ้า และนำโวลต์มิเตอร์มาต่อขนานกับวงจรหลักเพื่อดูค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น

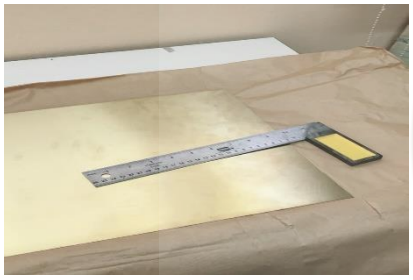
3.2.1.8 ทดสอบการรั่วไหลของถังบำบัดระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี หากไม่มีการรั่วซึม สามารถนำถังบำบัดไปใช้ในการทดลองได้

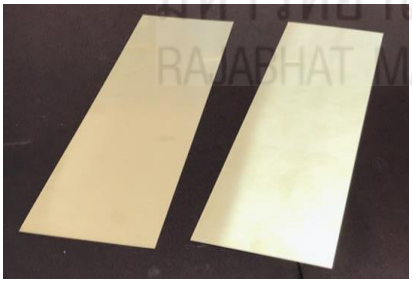
3.2.1.9 เตรียมน้ำเสียฟอสฟอรัสสังเคราะห์

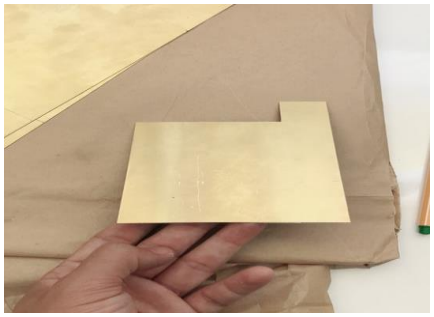
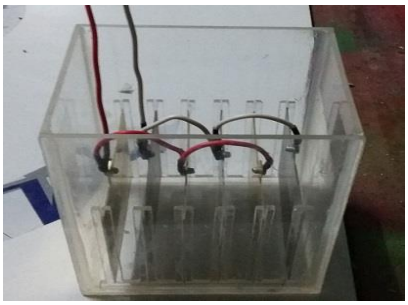
3.2.1.10 นำถังบำบัดระบบการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี ไปใช้ในการทดลองกำจัดน้ำเสียฟอสฟอรัส

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



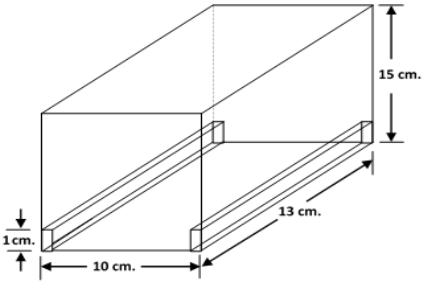




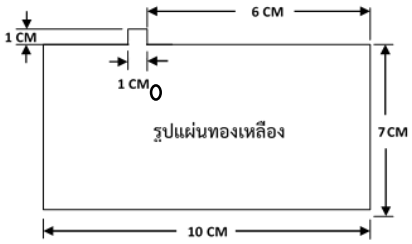
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 3.2 การออกแบบประกอบแผ่นขั้วของถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี

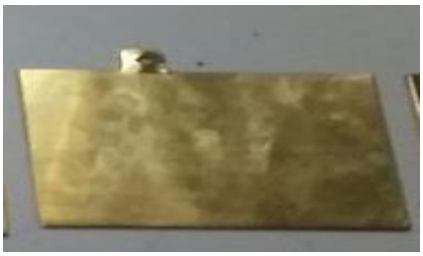


(ก)

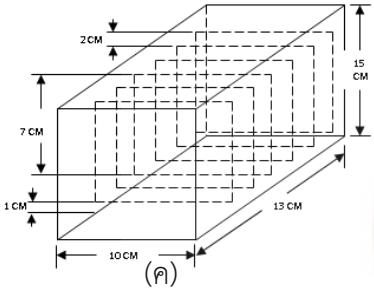
(ก)



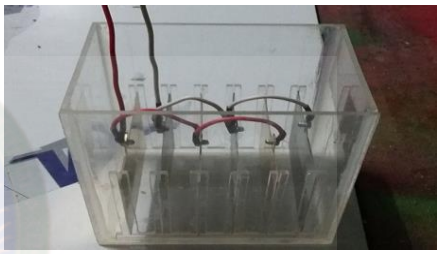
(ข)



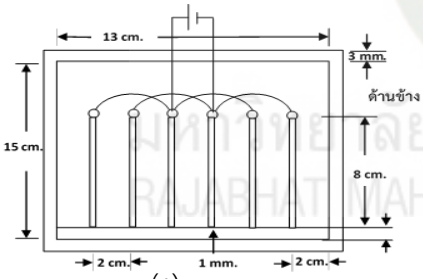
(ข)



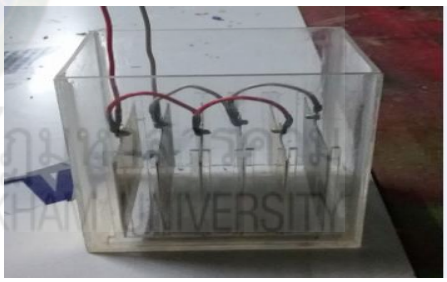
(ค)



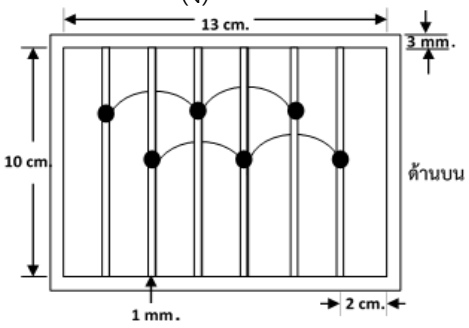
(ค)



(ง)



(ง)



(จ)

(จ)

ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการออกแบบและประกอบถังบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี

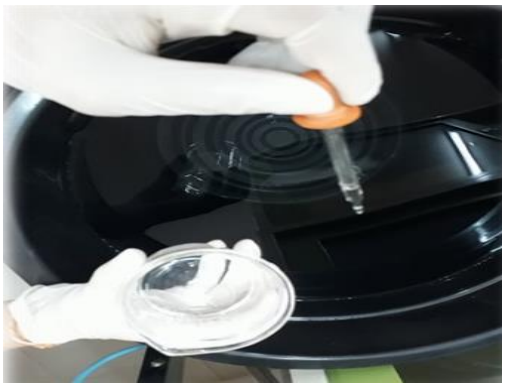
(ก) รูปแบบขนาดถังบำบัด (ข) แผ่นทองเหลืองที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า
(ค) การต่อแผ่นขั้วเข้ากับเครื่องบำบัด (ง) รูปแบบการต่อวงจร (ด้านข้าง)
(จ) รูปแบบการต่อวงจร (ด้านบน)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

2.3.3 ดำเนินการเตรียมน้ำเสียฟอสฟอรัสสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

1) ดำเนินการเตรียมสารเคมีและน้ำเสียฟอสฟอรัสสังเคราะห์เพื่อใช้ทดลองเดินระบบถังบำบัด

(ก)



(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมน้ำฟอสฟอรัสสังเคราะห์และทดลองเดินระบบด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี

<u>ส่วนที่ 2</u> ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น ดังภาพที่ 3.5

3.2.2 การคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีใช้วิธีทางสถิติ

- ทดลองเก็บข้อมูลพารามิเตอร์เบื้องต้นไปตรวจวัดค่า
- นำค่าที่ได้ไปผ่านการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีของ Plackett - Burman

3.2.3 การหาจุดเหมาะสมของสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง

- นำค่าปัจจัยที่มีผลต่อต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ผ่านการคัดกรองมาหาจุดเหมาะสมของสภาวะปัจจัยที่ทำให้การกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีที่สุดโดยวิธี RSM โดยเลือกใช้ Box– Behnken

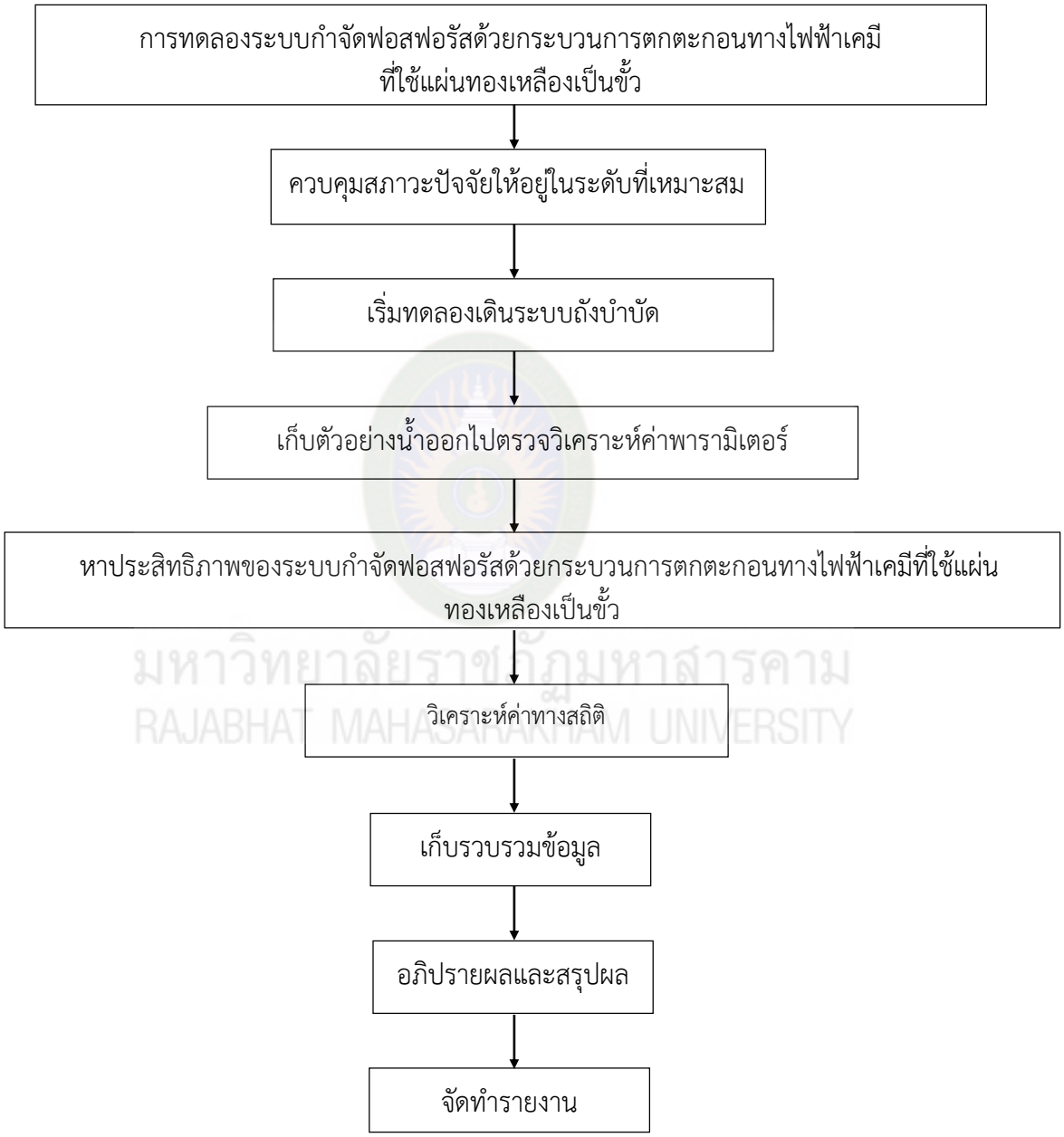
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

<u>ส่วนที่ 3</u> ขั้นตอนการทดลองกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว ดังภาพที่ 3.6

3.3.5 การหาประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

- นำข้อมูลการทดลองคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 3.6 การหาประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้แผ่นทองเหลืองเป็นขั้ว

บทที่ 4
ผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ในการวิจัย ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้หลักการทางสถิติ

4.1.1 ผลการศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman

เมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Plackett-Burman พบว่า มีจำนวนชุดการทดลองรวมทั้งสิ้น 12 ชุดการทดลอง แต่เนื่องจากเมื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติเบื้องต้น พบว่า มีชุดการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนสูงผิดปกติจำนวน 2 ชุดการทดลอง ทำให้ต้องตัดค่าจากชุดการทดลองทั้ง 2 ชุดออก ทำให้มีชุดการทดลองที่สามารถนำเข้าวิเคราะห์ได้ 10 ชุดการทดลอง โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองแสดงตารางที่ 4.1 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำ ($P=0.0045$) พีเอชเริ่มต้นของน้ำ ($P=0.0329$) และ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ($P=0.0174$) ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ไม่มีนัยสำคัญ ($P=0.9512$) ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลแสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นทำการทดสอบข้อกำหนดทางสถิติ โดยพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) พบว่าจุดของข้อมูลบนกราฟ มีการเรียงตัวในลักษณะเป็นเส้นตรง (ภาพที่ 4.1 ก) ดังนั้นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ภาพที่ 4.1 ข) ดังนั้นข้อมูลไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่า ไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติและข้อมูลกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (ภาพที่ 4.1 ค) ดังนั้นข้อมูลที่วิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่ม มีความเป็นอิสระต่อกัน และเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลได้

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
RAJABHAT RAJANAGARINDRA UNIVERSITY

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีของ Plackett-Burman

ชุดการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา				ประสิทธิภาพ (%)	หมายเหตุ
	ความเข้มข้น (ppm)	พีเอช	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะเวลา (นาที)		
1	5	3	0.6	5	97.6	
2	20	9	0.2	5	97.5	
3	5	9	0.6	30	89.9	
4	20	3	0.2	5	96.3	ไม่นำเข้าวิเคราะห์
5	5	9	0.6	5	90.9	ไม่นำเข้าวิเคราะห์
6	20	9	0.6	5	97.0	
7	20	3	0.6	30	97.5	
8	5	3	0.2	5	96.6	
9	20	9	0.2	30	96.9	
10	20	3	0.6	30	97.5	
11	5	9	0.2	30	89.0	
12	5	3	0.2	30	91.1	

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	101.56	4	25.39	10.53	0.0119
X_1	57.61	1	57.61	23.88	0.0045
X_2	20.61	1	20.61	8.55	0.0329
X_3	$1x10^{-2}$	1	$1x10^{-2}$	$4.146x10^{-3}$	0.9512
X_4	29.41	1	29.41	12.20	0.0174
Residual	12.06	5	2.41		
Lack of Fit	12.06	4	3.01		
Cor. Total	113.62	9			

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

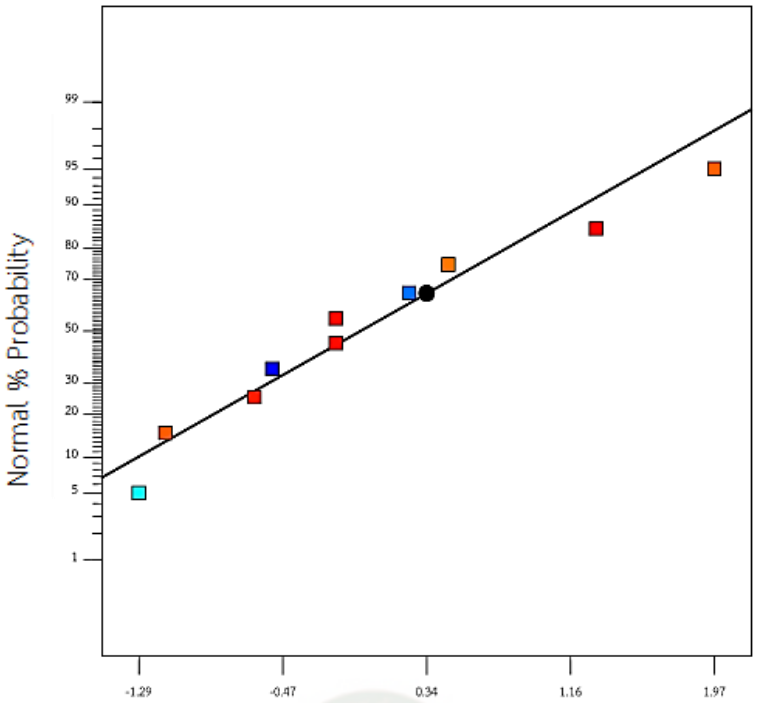
หมายเหตุ :

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำ (ppm)

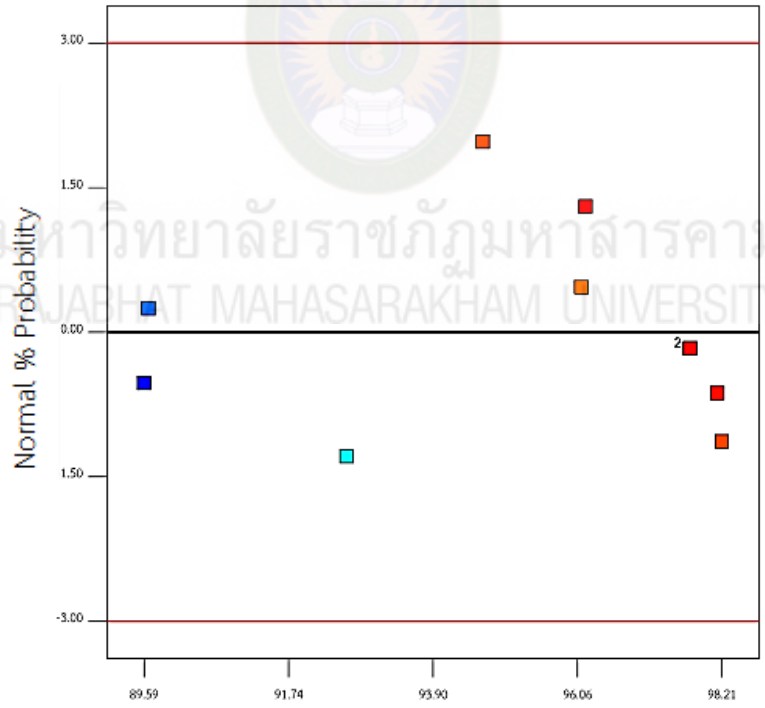
X_2 คือ พีเอช

X_3 คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

X_4 คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที)



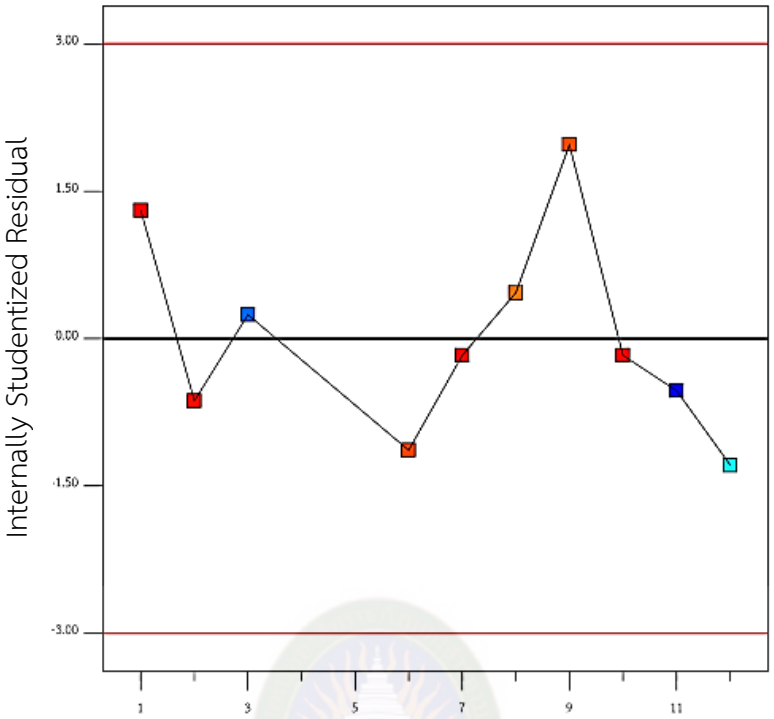
(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.1 ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับ (ก) ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) (ข) ผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) (ค) หมายเลขชุดการทดลอง (Run number)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



(ค)

ภาพที่ 4.1 ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับ (ก) ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) (ข) ผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) (ค) หมายเลขชุดการทดลอง (Run number) (ต่อ)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method) ที่ออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Box-Behnken

4.2.1 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method)

หลังจากคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธี placklett-Burman แล้ว จะนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด มาทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่คัดกรองแล้วมีจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำ พีเอชเริ่มต้นของน้ำ และ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยนี้มาออกแบบการทดลองอีกครั้งด้วยวิธีของ Box-Behnken พบว่ามีจำนวนชุดการทดลองทั้งสิ้น 17 ชุดการทดลอง จากนั้นจึงทำการทดลอง โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าคงที่ เท่ากับ 0.2 แอมแปร์ ตลอดการทดลอง สภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองแสดงตารางที่ 4.3 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความเป็นสหสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างปัจจัยแต่ละปัจจัย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่มีสหสัมพันธ์และส่งผลต่อประสิทธิภาพ

การบำบัดอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า ($P<0.0001$) เท่านั้น และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า ($P<0.0176$) โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย แสดงดังภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า แสดงภาพที่ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลและประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีของ Box-Behnken เมื่อกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดลองเท่ากับ 0.2 แอมแปร์

ชุดการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา			ประสิทธิภาพ (%)	หมายเหตุ
	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	พีเอช	ระยะเวลา (นาที)		
1	15.00	3.00	25.00	95.09	
2	15.00	7.00	15.00	95.23	
3	5.00	9.00	15.00	91.18	
4	20.00	3.00	15.00	96.87	
5	15.00	7.00	15.00	94.97	
6	5.00	7.00	5.00	96.45	
7	15.00	9.00	5.00	96.66	
8	20.00	7.00	5.00	98.00	
9	15.00	7.00	15.00	95.12	
10	5.00	3.00	15.00	92.24	
11	5.00	7.00	25.00	90.05	
12	20.00	7.00	25.00	97.02	
13	15.00	7.00	15.00	95.30	
14	20.00	9.00	15.00	96.35	
15	15.00	3.00	5.00	96.51	
16	15.00	9.00	25.00	96.24	ไม่นำเข้าวิเคราะห์
17	15.00	7.00	15.00	94.88	

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Box-Behnken

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	71.82	9	7.98	125.81	< 0.0001
X_1	39.51	1	39.51	622.83	< 0.0001
X_2	0.98	1	0.98	15.50	0.0077
X_3	17.27	1	17.27	272.23	< 0.0001
$X_1 X_2$	0.022	1	0.022	0.35	0.5779
$X_1 X_3$	7.54	1	7.54	118.87	< 0.0001
$X_2 X_3$	0.67	1	0.67	10.52	0.0176
X_1^2	0.28	1	0.28	4.39	0.0809
X_2^2	1.07	1	1.07	16.79	0.0064
X_3^2	1.99	1	1.99	31.35	0.0014
Residual	0.38	6	0.063		
Lack of Fit	0.26	2	0.13	4.21	0.1038
Pure Error	0.12	4	0.031		
Cor Total	72.20	15			

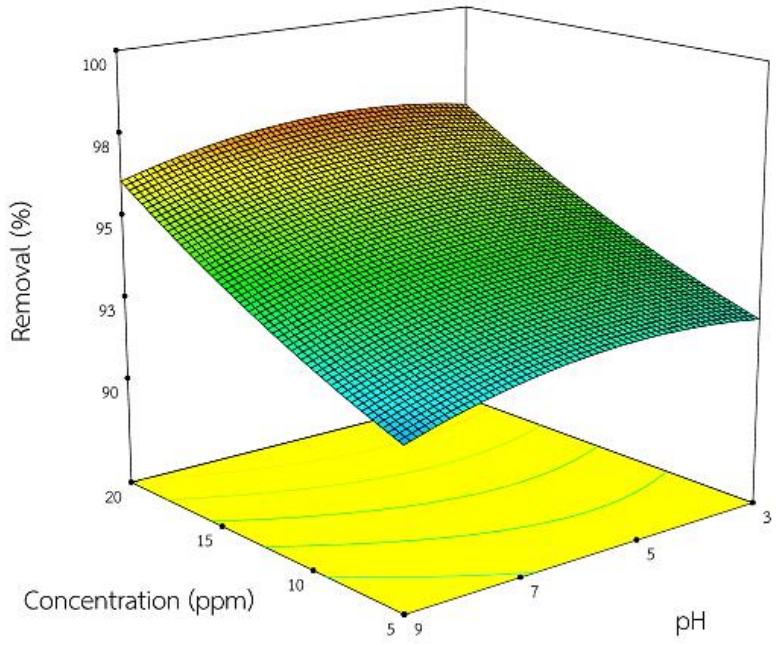
หมายเหตุ :

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำ (ppm)

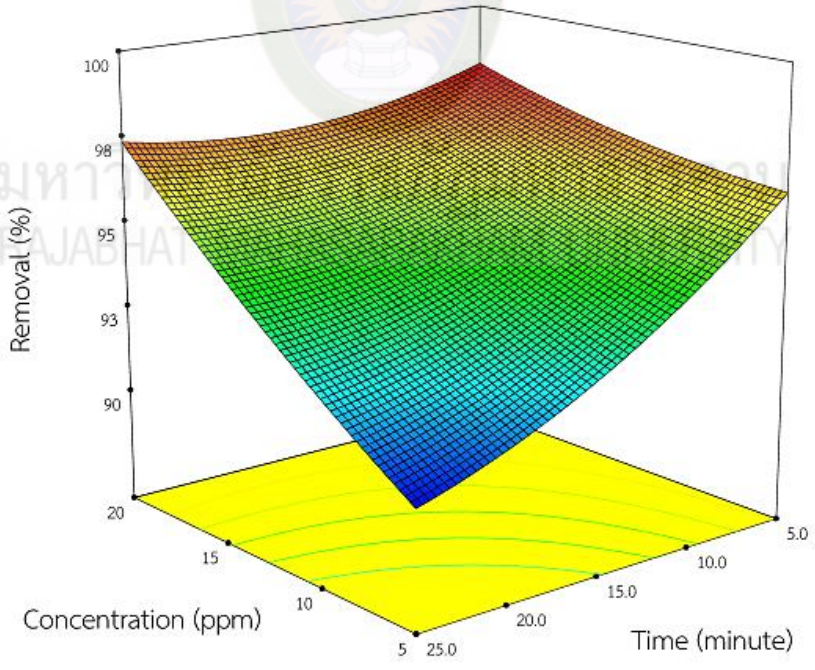
X_2 คือ พีเอช

X_3 คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที)

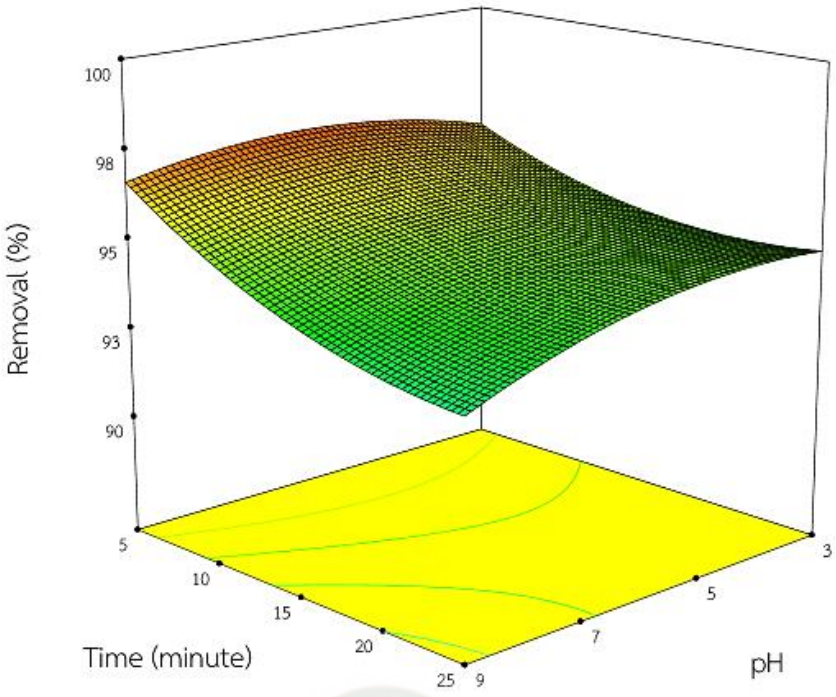
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า 15 นาที



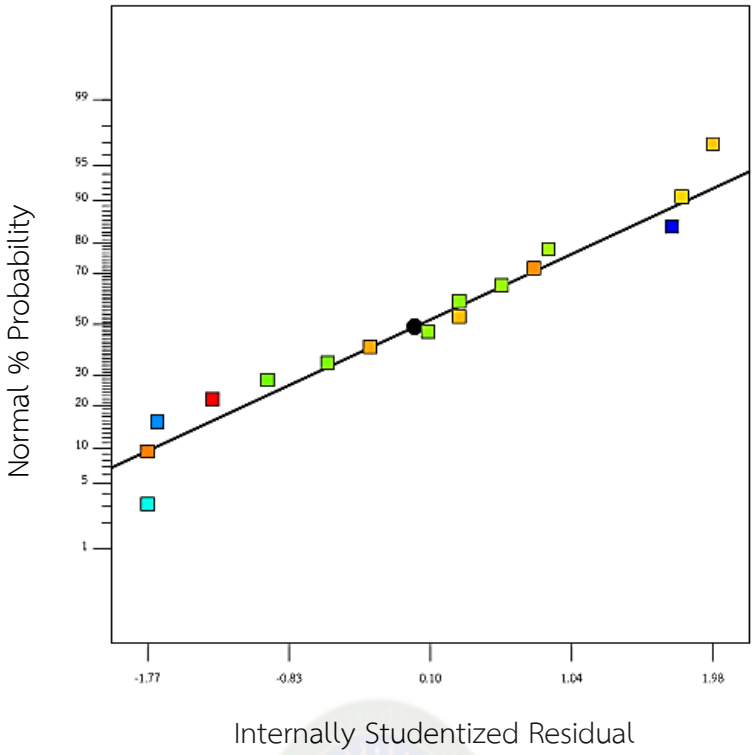
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 7



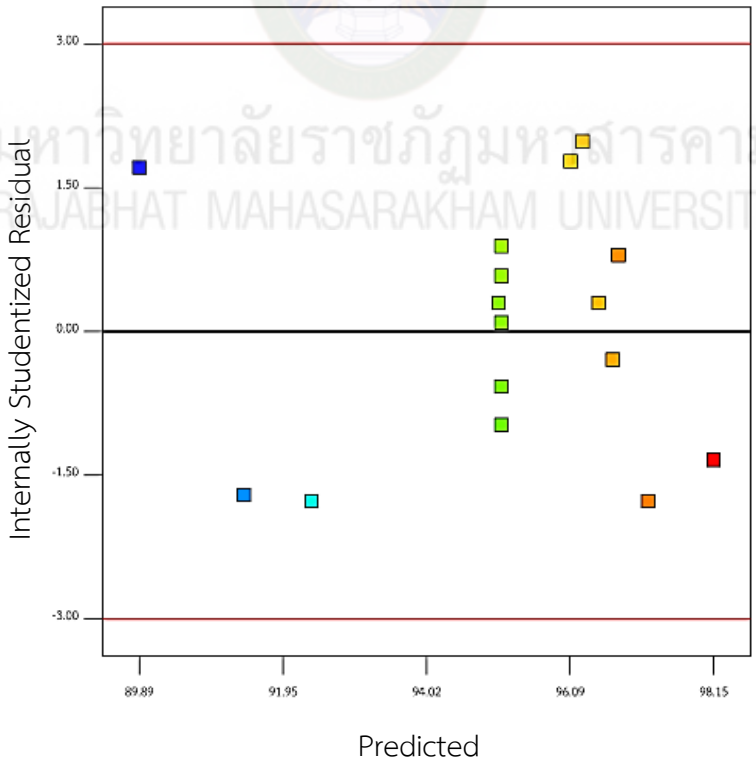
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำกับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียเท่ากับ 15 ppm

เมื่อทำการทดสอบข้อกำหนดทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) พบว่าจุดของข้อมูลบนกราฟ มีการเรียงตัวในลักษณะเป็นเส้นตรง (ภาพที่ 4.5) ดังนั้นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ภาพที่ 4.6) ดังนั้นข้อมูลไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่า ไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติ (ภาพที่ 4.7) ประกอบกับเมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับปัจจัยแต่ละปัจจัย พบว่า ข้อมูลกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (ภาพที่ 4.8 – ภาพที่ 4.10) ดังนั้นข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่มและมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถที่จะนำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างสมการความสัมพันธ์และใช้ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองต่อไปได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

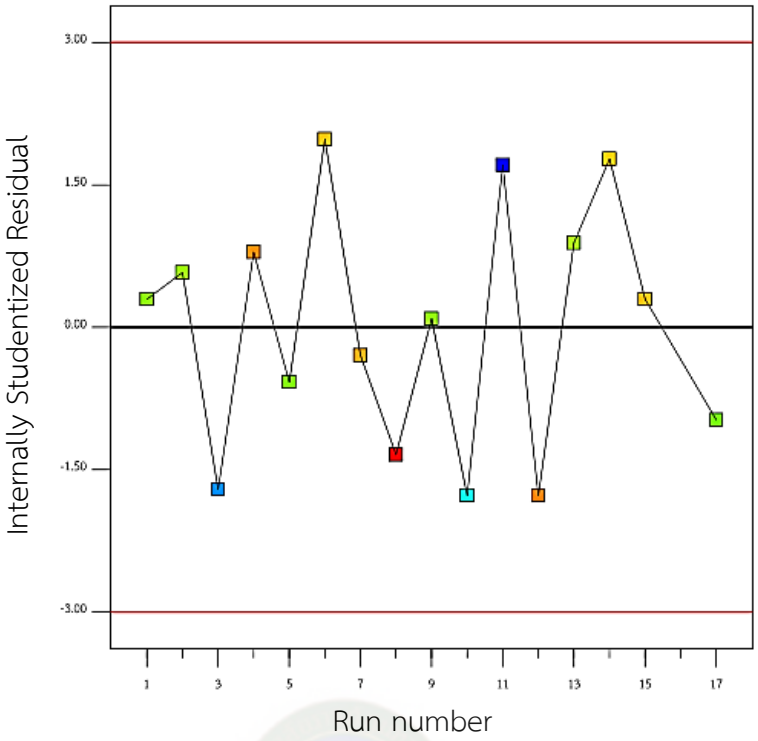


ภาพที่ 4.5 ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals)

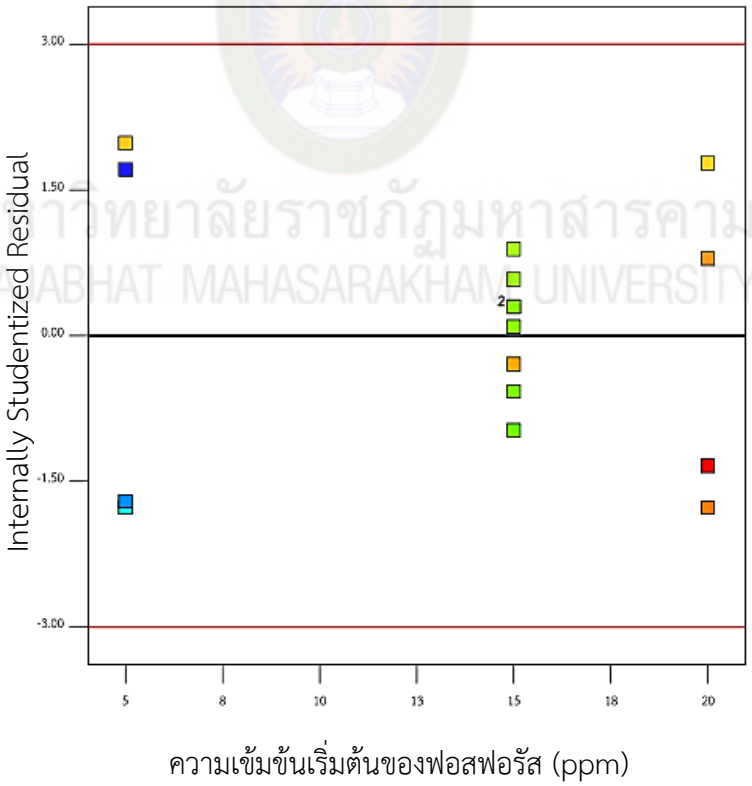


มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 4.6 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted)

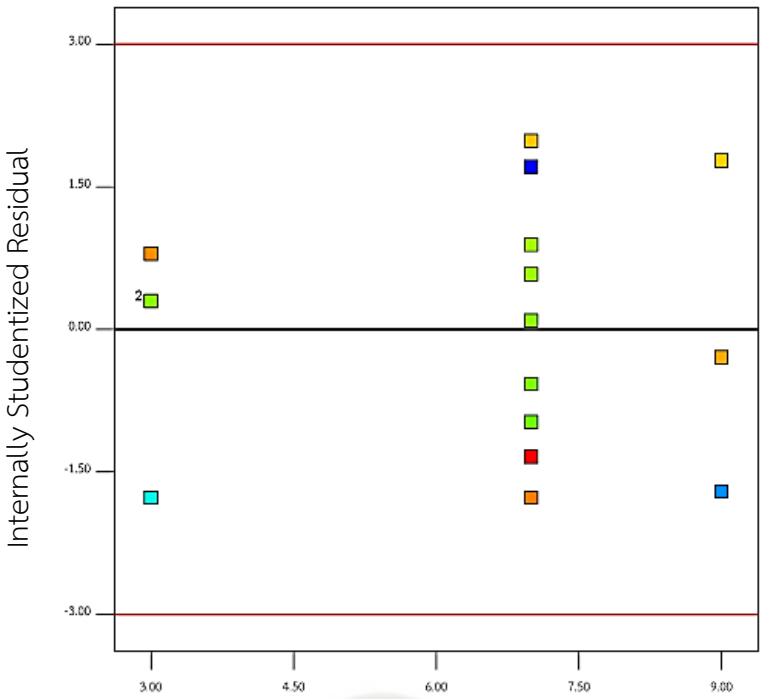


ภาพที่ 4.7 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับหมายเลขชุดการทดลอง (Run number)

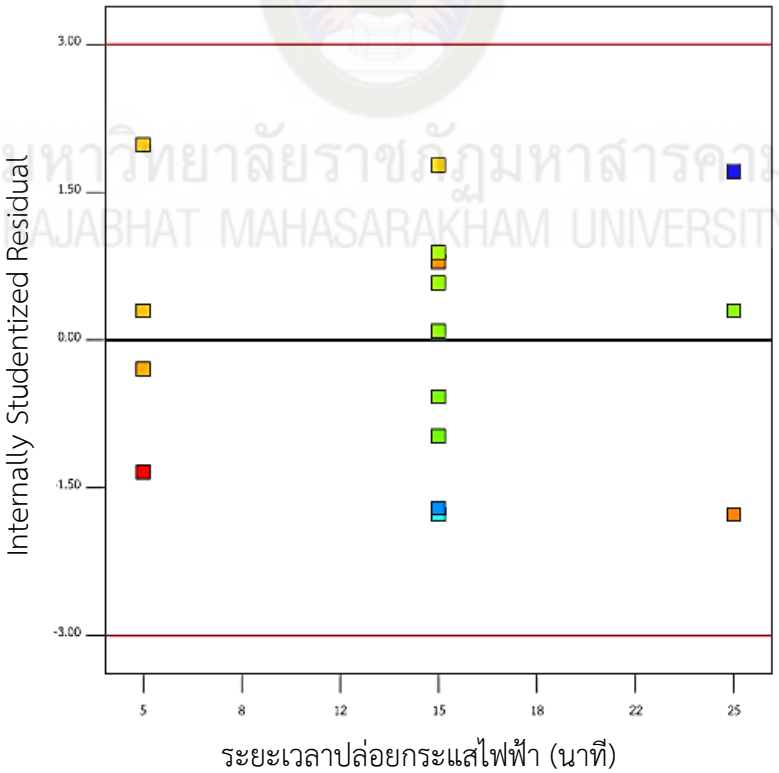


มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 4.8 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัส (ppm)



ภาพที่ 4.9 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 4.10 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที)

เมื่อนำปัจจัยที่ทำการทดลองมาสร้างสมการความสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอย พบว่า มีความสัมพันธ์ดังสมการ (4.1) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกับค่าปัจจัยที่เหมาะสม แสดงดังภาพที่ 4.11

$$Y = 96.110 - 0.132X_1 + 0.969X_2 - 0.522X_3 + 3.153\times10^{-3} X_1X_2 + 0.018X_1 X_3 \quad (4.1)$$

$$- 0.016X_2 X_3 + 5.787\times10^{-3}X_1^2 - 0.075 X_2^2 + 7.579\times10^{-3}X_3^2$$

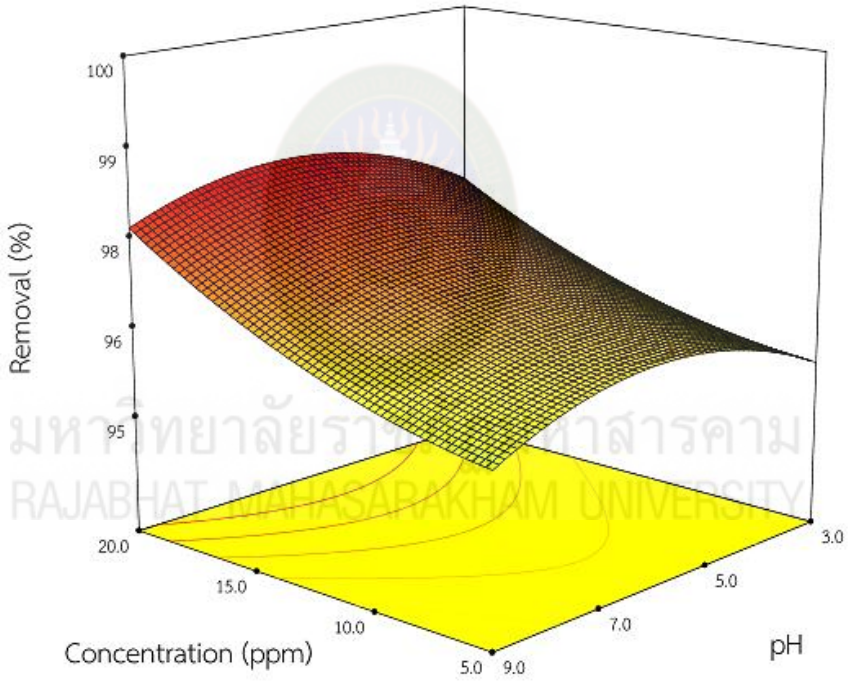
เมื่อ

Y = ประสิทธิภาพการบำบัด (%)

X_1 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย (ppm)

X_2 = ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

X_3 = ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที)



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 0.2 แอมแปร์ และระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5 นาที

จากนั้นทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยการกำหนดค่าของปัจจัยแต่ละปัจจัย แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.1) และทำการทดลองซ้ำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายด้วยสมการและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันสูงสุดเท่ากับ 2.81 ดังนั้นสมการที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากสมการและจากการทดลองเมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 0.2 แอมแปร์

ลำดับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที)	ประสิทธิภาพ (%)		ผลต่าง
				จากสมการ	จากการทดลอง	
1	20.00	9.00	5.00	97.66	97.49	0.17
2	20.00	7.00	5.00	98.15	97.97	0.18
3	20.00	3.00	5.00	97.35	96.09	1.26
4	20.00	9.00	30.00	96.64	96.62	0.02
5	20.00	7.00	30.00	97.94	96.89	1.05
6	20.00	3.00	30.00	98.73	96.91	1.82
7	15.00	9.00	5.00	96.71	96.92	0.21
8	15.00	7.00	5.00	97.24	98.08	0.84
9	15.00	3.00	5.00	96.50	96.77	0.27
10	15.00	9.00	30.00	93.44	96.25	2.81
11	15.00	7.00	30.00	94.77	95.26	0.49
12	15.00	3.00	30.00	95.63	95.32	0.31
13	5.00	9.00	5.00	95.69	92.95	2.74
14	5.00	7.00	5.00	96.28	96.33	0.05
15	5.00	3.00	5.00	95.66	96.67	1.01
16	5.00	9.00	30.00	87.92	89.09	1.17
17	5.00	7.00	30.00	89.31	89.73	0.42
18	5.00	3.00	30.00	90.30	91.07	0.77

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ มีการกำหนดค่าปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลองในช่วงจำกัด ดังนั้นการนำสมการไปใช้งานควรพิจารณาช่วงของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองด้วย การใช้สมการกับปัจจัยที่มีค่านอกเหนือจากช่วงที่ใช้ทดลอง ควรใช้อย่างระมัดระวังและควรตรวจสอบความแม่นยำของสมการเสมอ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาโดยมุ่งเน้นที่การศึกษาคัดกรอง ปัจจัยที่มีอิทธิพล สภาวะที่เหมาะสม และการกำจัดฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแผ่นทองเหลือง สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและอภิปรายผล ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

เมื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.1.2 สมการความสัมพันธ์และการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่คัดกรองแล้ว

เมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียมาสร้างสมการความสัมพันธ์ พบว่า ปัจจัยที่ใช้ทดลองแต่ละปัจจัยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $Y = 96.110 - 0.132X_1 + 0.969X_2 - 0.522X_3 + 3.153x10^{-3} X_1X_2 + 0.018X_1 X_3 - 0.016X_2 X_3 + 5.787x10^{-3}X_1^2 - 0.075 X_2^2 + 7.579x10^{-3}X_3^2$ เมื่อ Y, X_1, X_2 และ X_3 คือ ประสิทธิภาพการบำบัด (%) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย (ppm) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (นาที) ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

5.1.3 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยการกำหนดค่าของปัจจัยแต่ละปัจจัย แล้วแทนค่าลงในสมการตามข้อ 5.1.2 และทำการทดลองซ้ำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายด้วยสมการและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายและประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันสูงสุดเท่ากับ 2.81 ดังนั้นสมการที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม และใช้ทำนายประสิทธิภาพสำหรับการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้ และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.08 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เท่ากับ 15 ppm ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ7 และ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ มีการกำหนดค่าปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลองในช่วงจำกัด ดังนั้นการนำสมการไปใช้งานควรพิจารณาช่วงของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองด้วย การใช้สมการกับปัจจัยที่มีค่านอกเหนือจากช่วงที่ใช้ทดลอง ควรใช้อย่างระมัดระวังและควรตรวจสอบความแม่นยำของสมการเสมอ

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

(ก)

(ข)

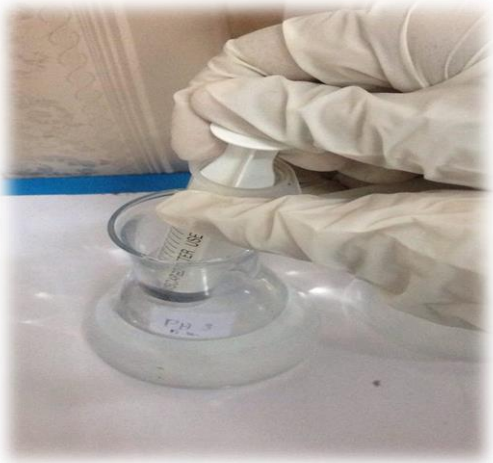
(ค)

(ง)

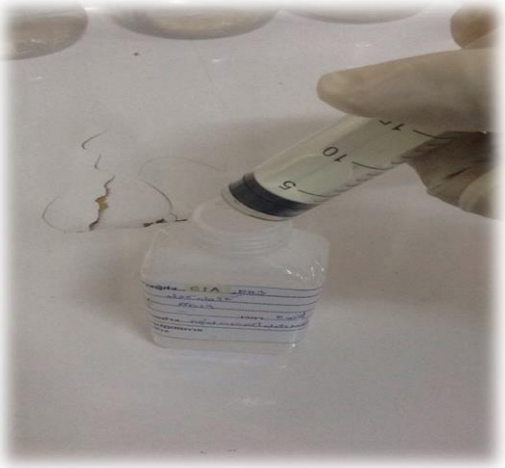
(จ)

ภาพที่ ก.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำฟอสฟอรัสสังเคราะห์และทดลองเดินระบบด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



(ก)



(ข)

(ค)

(ง)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

(จ)

(ฉ)

ภาพที่ ก.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการทดลองเดินระบบ
ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีเพื่อตรวจวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัสด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์