สมรรถนะการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียโดยใช้อิเล็กโทรดอะลูมิเนียมและอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

PERFORMANCE OF NITRATE TREATMENT IN WASTEWATER USING ALUMINUM ELECTRODE AND PULSED ELECTROLYSIS

ประภวิษณุ์ สุวรรณนิมิตร
PRAPAVIT SUWANNIMIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2568

KMITL-2025-SC-M-030-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE OF NITRATE TREATMENT IN WASTEWATER USING ALUMINUM ELECTRODE AND PULSED ELECTROLYSIS

PRAPAVIT SUWANNIMIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-SC-M-030-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียโดยใช้อิเล็กโทรดอะลูมิเนียมและอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์
ชื่อนักศึกษา	นายประภวิษณุ์ สุวรรณนิมิตร
รหัสประจำตัว	64605066
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศาล ศรีราช

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการกำจัดไนเตรตจากน้ำเสียชุมชนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ประสิทธิภาพของการรีดักชันไนเตรตถูกศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ได้เติมอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมในการทำปฏิกิริยากำจัดไนเตรตภายในเซลล์อิเล็กโทรลิซิสที่ถูกออกแบบจากวัสดุอะคริลิก การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรตทำได้โดยการดูดซับแสงของสารโดยใช้สเปกโตรสโกปี (Ultraviolet-visible spectroscopy) ส่วนสารตกตะกอนที่เกิดขึ้นถูกตรวจสอบโดยเทคนิคการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ผลการทดลองที่ทำการบำบัดเป็นเวลา 180 นาที แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไนเตรตคือ การใช้ความถี่พัลส์ที่ 10 กิโลเฮิรตซ์, ความกว้างพัลส์ 80% และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 16 mA/cm^2 ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถกำจัดไนเตรตได้ถึง 90.73% (4.3 mg/L) จากความเข้มข้นไนเตรตเริ่มต้นที่ 46 mg/L และยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนที่ 80.08% นอกจากนี้ การสูญเสียมวลของแอโนดอะลูมิเนียมยังต่ำเพียงแค่ 0.8% และการใช้พลังงานน้อยกว่า 9.3 Wh/mg เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง โดยสารตกตะกอนหลักที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลต์คือ ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียม.

คำสำคัญ : ไนเตรตในแหล่งน้ำ, วิธีการกำจัดไนเตรต, สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม, อิเล็กโทรดอะลูมิเนียม, อิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Performance of Nitrate Treatment in Wastewater using Aluminum Electrode and Pulsed Electrolysis
Studeny Name	Mr. Prapavit Suwannimit
Student ID	64605066
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2025
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr.Pisan Srirach

Abstract

This research focuses on nitrate removal from municipal wastewater using an electrochemical method (Electrochemistry) with pulsed electrolysis. The efficiency of nitrate reduction was studied under conditions without the addition of electrolytes, using aluminum electrodes to perform the nitrate removal reaction within an acrylic-based electrolysis cell. Nitrate concentration was analyzed by measuring light absorption of the substance using Ultraviolet-visible spectroscopy, while the precipitated compounds were examined using X-ray diffraction (XRD) technique. Experimental results after a 180-minute treatment showed that the optimal conditions for nitrate removal were a pulse frequency of 10 kHz, pulse width of 80%, and current density of 16 mA/cm². Under these conditions, nitrate was reduced by 90.73% (4.3 mg/L) from an initial concentration of 46 mg/L, and nitrogen selectivity was 80.08%. Furthermore, the mass loss of the aluminum anode was as low as 0.8%, and energy consumption was less than 9.3 Wh/mg when compared to direct current electrolysis. The main precipitate formed in the electrolyte cell was aluminum hydroxide.

Keywords : Nitrate in water sources, Nitrate removal methods, Square-wave pulse signal, Aluminum electrode, Pulsed electrolysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายท่าน ซึ่งผู้จัดทำสำนึกในพระคุณเป็นอย่างยิ่งและขอถือโอกาสนี้แสดงความขอบคุณจากใจ

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิศาล ศรีราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก จากภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำอันทรงคุณค่า อุทิศเวลาอันมีค่าในการตรวจสอบ แก้ไข และชี้แนะแนวทางให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ รวมถึงบทความทางวิชาการและเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัชชัย พุทซ้อน จากภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและให้ข้อคิดเห็นที่ช่วยพัฒนางานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก จากภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในฐานะกรรมการสอบ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะ ตลอดจนช่วยเหลือดูแลและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำในการปรับแก้บทความทางวิชาการ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้ผู้จัดทำสามารถพัฒนางานวิจัยได้อย่างมีคุณภาพ

นอกจากนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษา ซึ่งทำให้ผู้จัดทำสามารถดำเนินโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำได้พบกับความท้าทายมากมาย ทั้งอุปสรรคทางด้านวิชาการและอารมณ์ความรู้สึก แต่ด้วยความมุ่งมั่นและความพยายามอย่างเต็มที่ ทำให้สามารถก้าวข้ามช่วงเวลาที่ยากลำบากเหล่านั้นมาได้ ผู้จัดทำจึงขอขอบคุณตนเอง ที่ไม่ยอมแพ้ต่อความยากลำบากและอดทนต่อแรงกดดันจนสามารถทำให้ผลงานชิ้นนี้สำเร็จได้ สุดท้ายนี้หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ด้วยความเคารพและขออภัยมา ณ ที่นี้

ประภวิษณุ์ สุวรรณนิมิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัฏจักรไนโตรเจน	5
2.1.1 ไนโตรเจน	5
2.1.2 สารประกอบไนโตรเจน	6
2.1.3 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน	7
2.1.4 กระบวนการไนตริฟิเคชัน	8
2.1.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	9
2.2 น้ำเสีย	10
2.2.1 ประเภทของของเสีย	10
2.2.2 ประเภทของน้ำเสีย	11
2.2.3 มาตรฐานคุณภาพของน้ำเสีย	12
2.2.4 มาตรฐานคุณภาพของน้ำเสียผิวดิน	16
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	18
2.4 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส	18
2.5 อิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์ (Electrical double layer)	20
2.6 รูปแบบสัญญาณพัลส์	23
2.7 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน	26
2.8 การวิเคราะห์พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างตะกอน........ 29
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย........ 34
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด........ 34
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับอิเล็กโทรลิซิส........ 35
3.1.2 สารเคมีสำหรับการทดลอง........ 37
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์........ 37
3.2 การเตรียมกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสสำหรับการทดลอง........ 39
3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์........ 41
3.4 วิธีการการทดสอบ........ 43
3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษา........ 44
3.5.1 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์........ 44
3.5.2 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้ากับตะกอนที่เกิดขึ้น........ 44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล........ 45
4.1 ความเป็นไปได้ของการกำจัดไนเตรตโดยใช้อิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์........ 45
4.1.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตโดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์........ 45
4.1.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ไนไตรท์, แอมโมเนียและก๊าซไนโตรเจนที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์........ 51
4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์.... 53
4.2 การประเมินการสูญเสียแอโนดอะลูมิเนียมและการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส........ 54
4.2.1 การวิเคราะห์การสูญเสียแอโนดอะลูมิเนียม........ 55
4.2.2 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดอะลูมิเนียม........ 56
4.2.3 การวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้น........ 57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ........ 59
5.1 สรุปผลการวิจัย........ 59
5.2 ข้อเสนอแนะ........ 60
เอกสารอ้างอิง........ 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.. 65
ภาคผนวก ก... 66
ภาคผนวก ข... 73
ประวัติผู้เขียน.. 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียชุมชน.. 12
2.2 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม... 13
2.3 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียเกษตรกรรม.. 15
2.4 การกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดิน.. 16
2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน.. 17
4.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพและอัตราการลดลงของไนเตรต.. 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วัฏจักรไนโตรเจน	6
2.2 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนแอมโมเนีย	7
2.3 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไนไตรต์	7
2.4 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไนเตรต	7
2.5 กระบวนการเกิดออกซิเดชันแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์	8
2.6 ภาพจำลองกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส	19
2.7 ภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy และ Chapman	20
2.8 การกระจายของประจุในภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy และ Chapman	21
2.9 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของไอออนบวกเมื่อมีระยะห่างจากพื้นผิว	22
2.10 ภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Stern	23
2.11 ลักษณะขอบขาของสัญญาณพัลส์	24
2.12 ลักษณะความกว้างของสัญญาณพัลส์	24
2.13 สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แตกต่างกันในขณะที่ความถี่ของสัญญาณไม่เปลี่ยนแปลง	25
2.14 รูปแบบสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม	26
2.15 หลักการทำงานของ Ultraviolet-visible light spectrophotometer	27
2.16 ภาพแสดงส่วนประกอบของ Scanning electron microscopy	29
2.17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์	30
2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern)	31
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	34
3.2 อิเล็กโทรลิซิสเซลล์	35
3.3 แหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง	35
3.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณ	36
3.5 โมดูล Mosfet D4184	36
3.6 แผ่นอะลูมิเนียม	37
3.7 สารโพแทสเซียมไนเตรต	37
3.8 ออสซิลโลสโคป	38
3.9 เครื่องวัดความเข้มแสงหรือโฟโตมิเตอร์	38
3.10 เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ไดอะแกรมระบบอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์...	40
3.12 วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์...	41
3.13 ระบบอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์..	43
4.1 แผนภูมิความเข้มข้นของไนเตรตเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์...............	46
4.2 แผนภูมิความเข้มข้นของไนเตรตเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์...............	48
4.3 แผนภูมิปริมาณของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์..............	50
4.4 แผนภูมิปริมาณของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์..............	50
4.5 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสและความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนกับเงื่อนไขการทดลอง..	52
4.6 ผลการสึกกรอนของอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมของระบบบำบัดไนเตรตแบบพัลส์กับกระแสตรง..	56
4.7 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) ของแผ่นอิเล็กโทรด กำลังขยาย 200 เท่า (ก) ก่อนกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (ข) หลังกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง (ค) หลังกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์..............................	57
4.8 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer) ของตะกอนจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว..	58
5.1 ตะกอนที่เกิดขึ้นในอิเล็กโทรลิซิสเซลล์..	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแหล่งน้ำเสียทั่วไปมักจะพบว่ามีการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนจำนวนมาก ซึ่งการเกิดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำมีที่มาจากหลากหลายแหล่งต้นทางเช่น น้ำเสียจากชุมชนที่เกิดจากการใช้น้ำประปาหรือน้ำบาดาลในการทำกิจกรรมในครัวเรือนเช่น การทำอาหาร การล้างจาน หรือการทำความสะอาด สารประกอบไนโตรเจนจากน้ำเสียประเภทนี้มักเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจเกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีซึ่งอาจถูกปล่อยออกมาโดยไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม น้ำเสียจากการเกษตรที่อาจเกิดจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและการใช้สารเคมีควบคุมแมลงเช่น สารกำจัดแมลงกลุ่มนีโอนิโคตินอยด์ (Neonicotinoids) ซึ่งสารเคมีที่ตกค้างอยู่บนผิวดินอาจไหลลงสู่แหล่งน้ำจากการชะล้างหรือการไหลบ่าของน้ำฝน ทำให้เกิดการสะสมของสารไนโตรเจนในแหล่งน้ำ [5,14,29] ผลกระทบที่ตามมาจากการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำจะเกิดกระบวนการที่เปลี่ยนสารประกอบเหล่านั้นให้เป็นไนเตรต (NO_3^-) เรียกว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia oxidation) ในขั้นตอนนี้ แบคทีเรียในกลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia-oxidizing bacteria) เช่น ไนโตรโซโมนัส (Nitrosomonas) จะทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนีย (NH_3) หรือแอมโมเนียม (NH_4^+) ที่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นไนไตรต์ (NO_2^-) ขั้นตอนที่สองคือการออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite oxidation) การออกซิไดซ์ไนไตรต์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกให้กลายเป็นไนเตรตซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรและสามารถละลายอยู่ในน้ำได้ [8] ไนเตรตที่เกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถถูกดูดซับโดยพืชน้ำ หากมีไนเตรตในปริมาณมากเกินไปในแหล่งน้ำอาจนำไปสู่การเกิดสภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็วเกินไป การเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำเหล่านี้ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงอย่างมากและทำให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำสูญเสียไป ซึ่งอาจนำไปสู่การตายของปลาหรือสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและเกิดเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม [1]

โดยการแก้ปัญหาของน้ำเสียที่เกิดการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนจำนวนมากซึ่งส่งผลให้มีปริมาณของไนเตรตในแหล่งน้ำสูงมีดังนี้ หนึ่งการใช้กระบวนการทางชีวภาพเช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ (Biological treatment) โดยใช้กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การใช้แบคทีเรียทำหน้าที่ลดไนเตรตให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งสามารถระเหยออกไปในอากาศได้, ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำ (Constructed wetlands) ซึ่งใช้พืชน้ำและจุลินทรีย์ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับและบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำ สองการใช้กระบวนการทางเคมีเช่น การใช้สารเคมีสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันทางเคมี (Chemical denitrification) ในกระบวนการนี้มีการใช้สารเคมีเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ในการลดไนเตรตให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งสามารถระเหยออกจากน้ำได้, การใช้สารเคมีสำหรับการตกตะกอน (Chemical precipitation) โดยใช้สารเคมีเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $(Ca(OH)_2)$ หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ $(FeCl_3)$ ในการทำปฏิกิริยาทางเคมีจะทำให้สารไนเตรตและไนไตรต์เหล่านี้กลายเป็นตะกอนและสามารถแยกออกจากน้ำได้, การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) โดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกหรือลบเพื่อดึงไนเตรตออกจากน้ำ โดยเรซินจะจับกับไอออนไนเตรตและทำให้ไนเตรตหลุดออกจากน้ำ จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองกระบวนการมีข้อจำกัดคือกระบวนการทางชีวภาพมีการใช้ระยะเวลาในการบำบัดเป็นเวลานานเพราะการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนในกระบวนการนั้น ๆ เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ส่วนกระบวนการทางเคมีเนื่องจากมีการใช้สารเคมีทำให้เกิดปฏิกิริยากระบวนการนี้ต้องการสภาวะที่มีการควบคุมเช่น ค่า pH และอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดเหล่านี้ในปัจจุบันจึงมีการหันมาให้ความสนอย่างมากกับใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reduction) [2] เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าส่งผ่านขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้มีเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนและอนุพันธ์ไนเตรตต่าง ๆ ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน ในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) วิธีนี้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดและสามารถกำจัดไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติม นอกจากนี้กระบวนการนี้สามารถควบคุมได้ง่ายและปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการมีความยืดหยุ่นในการออกแบบและสามารถใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียที่หลากหลาย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นวิธีการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงหากต้องการบำบัดน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น พลังงานที่ใช้, รูปแบบของแหล่งจ่ายและปริมาณของขั้วไฟฟ้า

ดังนั้นแล้วในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ที่มีการเน้นไปในทางการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่เลือกใช้เป็นแบบพัลส์ เนื่องจากทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสจะเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงและพลังงานไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอนี้ยังส่งผลต่อขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดจากการเกิดโพลาไรเซชันที่ผิวอิเล็กโทรดหรือที่เรียกว่าการเกิดอิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์ จากงานวิจัยนี้ที่ทำการศึกษารูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแบบพัลส์นั้นเพื่อลดปัญหาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและการเกิดโพลาไรเซชันที่ผิวอิเล็กโทรด แต่ยังคงประสิทธิภาพในการกำจัดอนุพันธ์ไนเตรตต่าง ๆ ในน้ำ และทำการออกแบบระบบจำลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษารูปแบบสัญญาณไฟฟ้าแบบพัลส์ในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส
2) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์และขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ออกแบบระบบที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ โดยใช้โมดูล Mosfet D4184 ในการสร้างพัลส์ที่ส่งยังอิเล็กโทรลิซิสเซลล์ จากนั้นทำการทดสอบรูปแบบสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสารไนเตรตโดยใช้สารโพแทสเซียมไนเตรตผสมให้ละลายเข้ากับน้ำดีไอ (Deionized water) ให้ได้ความเข้มข้นที่ประมาณ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร และเตรียมขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส โดยมีขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร
3) ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์กับขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม ใช้เวลาในการทดลองที่ 3 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ทุก ๆ 30 นาที เพื่อนำมาวัดค่าสารประกอบไนโตรเจนให้น้ำ โดยมีการเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดเช่น ความถี่ ความกว้างของพัลส์ ตามเงื่อนไขที่ผู้วิจัยได้ตั้งไว้
4) วัดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำหลังการทดสอบ จากนั้นนำค่ามาวิเคราะห์ปริมาณที่เหลืออยู่ในน้ำหลังจากการอิเล็กโทรลิซิส โดยใช้เครื่องมือวัดอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-visible spectrophotometer)
5) นำขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดจากการอิเล็กโทรลิซิสมาวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนักของแผ่นและการคำนวณสมการทางทฤษฎีเพื่อศึกษาการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมหลังจากการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ นอกจากนี้มีการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำตะกอนที่เกิดขึ้นจากการอิเล็กโทรลิซิสมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในการอิเล็กโทรลิซิส และยังคงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสีย
2) ทราบถึงประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการการกำจัดไนเตรตในน้ำเสีย
3) ระบบจำลองการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแบบพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันการปนเปื้อนของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำค่อนข้างสูง ส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตและอาจส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงตามมาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ที่ได้ทำการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ใช้สำหรับการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เพื่อให้สามารถออกแบบระบบจำลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถประหยัดพลังงาน

2.1 วัฏจักรไนโตรเจน

วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพของธาตุไนโตรเจนและสารประกอบไนโตรเจนตามสภาพแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนด้วยกระบวนการทางเคมีและการย่อยสลายของจุลินทรีย์จากระบบหนึ่งไปสู่ระบบหนึ่งหมุนเวียนเป็นวัฏจักร

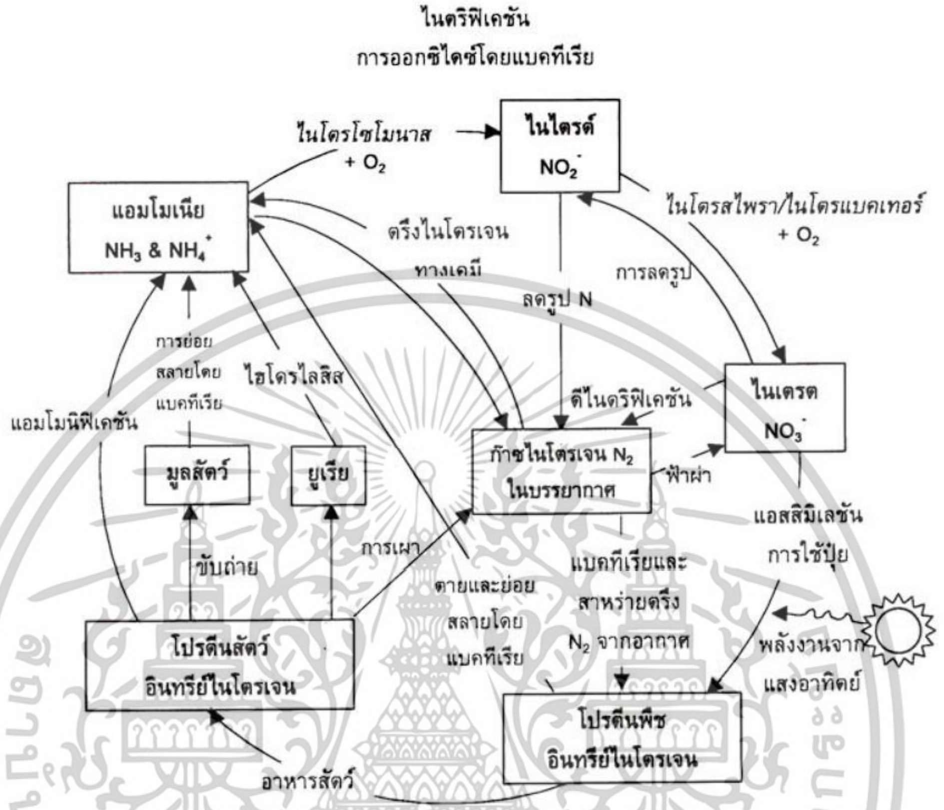
2.1.1 ไนโตรเจน ถือเป็นแร่ธาตุสำคัญและจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตสัตว์และพืช เนื่องจากเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอินทรีย์สารหลายชนิด เช่น เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันบางชนิด ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาทางแหล่งน้ำมาก ไนโตรเจนมีหลายวาเลนซ์จึงสามารถเกิดสารประกอบได้หลายอย่างในทางธรรมชาติ การเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนนี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน โดยทั่วไปแล้วส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นโดยสิ่งมีชีวิตซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen compound) คือสารประกอบของไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบหรือโครงสร้างของสัตว์และพืช ซากเน่าเปื่อย สิ่งขับถ่ายที่มาจากสัตว์และสารจากย่อยสลายซากของสิ่งมีชีวิตนั้น ได้แก่ ยูเรีย โปรตีน คลอโรฟิลด์ กรคอะมิโน และกรดยูริก เป็นต้น

2. สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic nitrogen compound) ได้แก่ แอมโมเนียม, ไนไตรต์และไนเตรตเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เป็นการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์สาร โดยกลุ่มแบคทีเรียในน้ำและในดินที่มีชื่อเรียกว่า ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและน้ำ เนื่องจากไนเตรตเป็นสารที่พืชน้ำต้องการ แต่ในทางตรงกันข้ามหากเกิดในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) จะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) โดยแบคทีเรียที่มีชื่อเรียกว่า ดีไนตริไฟดิ้งแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ ซึ่งอาจมีโอกาสเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้คือ ไนตรัสออกไซด์และไนตริกออกไซด์ ซึ่งในบางกรณีอาจจะส่งผลกระทบทำให้สูญเสียไนโตรเจนในดินและในน้ำ

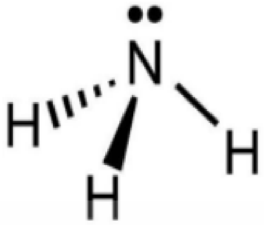


รูปที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน (ธงชัย, 2544)

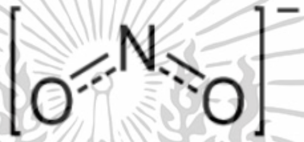
2.1.2 สารประกอบไนโตรเจน คือสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งไนโตรเจนมักพบว่าเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพืชมาก เนื่องจากว่าไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก (Nucleic Acid) และเนื่องจากไนโตรเจนมักจะเป็นธาตุที่มีจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากไนโตรเจนอยู่ในรูปของแก๊ส แต่จะมีไนโตรเจนบางส่วนที่อยู่ในดินซึ่งจะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 90 จะอยู่ในส่วนประกอบของอินทรีย์วัตถุหรือก็คืออยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจะมีประโยชน์ต่อพืชเมื่อถูกเปลี่ยนให้มาอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนคือ จำพวกแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรต สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปหลัก 3 รูปคือ แอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรต โดยที่พืชจะนำไปใช้คือแอมโมเนียและไนเตรต สารประกอบทั้งสองจำเป็นสำหรับพืช แต่มีจำกัดในดินและมักจะสูญเสียไปได้ง่ายโดยกระบวนการต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

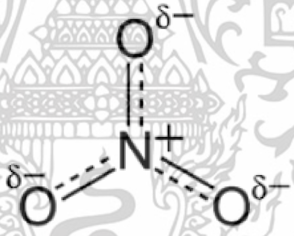
ๆเช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันไนเตรตหรือดีไนตริฟิเตชัน รายละเอียดแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 2.2 - 2.4 (ปัทมา วิตยากร, 2557)



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนแอมโมเนีย



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไนไตรต์



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไนเตรต

2.1.3 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนไนโตรเจนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งกระบวนการที่จะเกิดขึ้นนี้มีในอัตราที่เร็วในบริเวณที่มีออกซิเจน และลดลงเมื่อเปลี่ยนจากสภาพที่มีออกซิเจนไปเป็นสภาพ Facultative anaerobic และ Obligate anaerobic โดยอัตราเร็วของกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon/Nitrogen ratio) ของตะกอน สารอาหารที่มีในระบบและสภาพของดิน เช่น เนื้อดิน และโครงสร้าง (Reddy and Patrick, 1984) ซึ่งช่วงของพีเอชที่ดีที่สุดสำหรับการเกิดแอมโมนิฟิเคชันจะอยู่ระหว่าง 6.5 และ 8.5 ทั้งนี้ในดินที่อิ่มตัว พีเอชจะเป็นกลางเนื่องจากเกิดสภาวะบัฟเฟอร์ ส่วนในดินที่มีการระบายน้ำดี พีเอชของดินจะลดลงเนื่องจากการสะสมของไนเตรต (Nitrate accumulation) และการเกิดไฮโดรเจนไอออน *(H^+)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการระเหยง่ายของแอมโมเนีย (Ammonia volatilization) เป็นกระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physicochemical) ซึ่งแอมโมเนียไฮโดรเจนจะอยู่ในสมดุลระหว่างสถานะก๊าซและไฮดรอกซิลดังสมการที่ (2.1)

$$NH_3(aq) + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^- \tag{2.1}$$

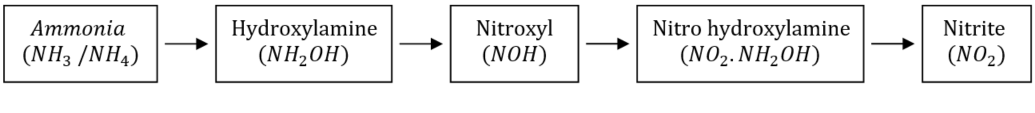
2.1.4 กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาออกซิไดซ์ทางชีวภาพ โดยเปลี่ยนจากแอมโมเนียมเป็นไนเตรตและไนไตรต์เป็นสารระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) ของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการแบบ Chemoautotrophic ซึ่งไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะได้รับพลังงานจากการออกซิเดชันแอมโมเนียและไนเตรต โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้ต้องการออกซิเจน เพื่อใช้ในกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนไตรต์ไนโตรเจน และไนไตรต์ไนโตรเจนเป็นไนเตรตไนโตรเจน ดังสมการที่ (2.2) – (2.4) ทั้งนี้ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียมให้เป็นไนเตรตจะเป็นกระบวนการที่มี 2 ขั้นตอน (Wallace and Nicholas,1969 และ Hauck,1984)

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O \tag{2.2}$$

$$NO_2^- + 0.05O_2 \rightarrow NO_3^- \tag{2.3}$$

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O \tag{2.4}$$

ในขั้นตอนแรก จะเกิดการออกซิเดชันแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรียกลุ่ม Chemolithotrophic bacteria (ในสภาวะที่มีออกซิเจนเท่านั้น) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนีย เนื่องจากได้รับพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งในดินจะมีแบคทีเรียกลุ่มนี้หลายชนิดด้วยกัน โดยลำดับของปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรตของแบคทีเรียในกลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group Bacteria) มีดังนี้ (Hauck, 1984)



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดออกซิเดชันแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสารประกอบระหว่างปฏิกิริยาได้แก่ NOH และ $NO_2.NH_2OH$ นั้น จะไม่แยกออกมาคิด แต่สองตัวนี้มีความสัมพันธ์ที่ได้แสดงให้เห็นลำดับของปฏิกิริยาคือ จะมีการส่งผ่านอิเล็กตรอน 2 ตัวในกระบวนการแต่ละขั้นระหว่างแอมโมเนียมไอออนกับไนไตรท์ (Hauck, 1984) ส่วนในขั้นตอนที่สองของกระบวนการไนตริฟิเคชันจะเกิดการออกซิเดชันจากไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต โดยแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative chemolithotrophic bacteria ซึ่งจะสามารถใช้สารประกอบอินทรีย์จำพวกไนไตรต์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตได้ โดยแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia-Oxidizing Bacteria) ได้จะมีหลายชนิดตรงข้ามกับแบคทีเรียจำพวกที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite-Oxidizing Bacteria) จะเป็นเพียงแค่สปีชีส์เดียวเท่านั้นในดินและแหล่งน้ำจืด ได้แก่ ***Nitrobacter winogradskyi*** (Grant and Long, 1985) นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่าแบคทีเรียกลุ่มไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacter) ในจีนัส Nitrospira สามารถพบได้ทั่วไปในดิน แหล่งน้ำจืดและสภาพแวดล้อมทางทะเล รวมทั้งพบว่าแบคทีเรียจำพวกที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ ในบางสปีชีส์สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อมีไนไตรต์และคาร์บอนเป็นแหล่งอาหารหรือสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตรงกันข้ามกับแบคทีเรียพวกแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Bock et al., 1986)

2.1.5 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการออกซิเดชันในสภาพแอนอกซิก (Anoxic) ครั้งแรกที่เกิดขึ้นหลังจากการขาดออกซิเจน (Oxygen depletion) คือการลดลงของไนเตรต โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปโมเลกุลของไนโตรเจน หรือในรูปก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน หากมองในทางเคมีชีวภาพกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากแบคทีเรียโดยมีออกไซด์ของไนโตรเจนอยู่ในรูปไอออนหรือก๊าซ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน (Electron transport chain) โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อมาจากสารจำพวกที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ ซึ่งมักเป็นสารประกอบอินทรีย์และส่งต่อไปยังระบบต่าง ๆเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปออกซิไดซ์ไนโตรเจน โดยพลังงานอิสระจะถูกเก็บไว้ในรูปของเอทีพี (ATP) ซึ่งหลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (Phosphorylation) และมีการนำไปใช้ใน Nitrifying organism ซึ่งสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีชีวภาพจากไนเตรตไปเป็นก๊าซไนโตรเจนแสดงได้ดังสมการที่ (2.5) (Vymazal, 1995)

$$2NO_3 \rightarrow 2NO_2^- \rightarrow 2NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 น้ำเสีย

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึงน้ำที่ใช้แล้วจากกิจกรรมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นจากชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการต่าง ๆรวมไปถึงฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและสัตว์บก ซึ่งในน้ำเสียเหล่านี้จะมีการปนเปื้อนอยู่ และสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนี้ควรจะกำจัดออกให้ได้มากที่สุดก่อนจะปล่อยสู่แหล่งน้ำน้ำอื่น ๆหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อลดมลพิษทางน้ำและปัญหาอื่น ๆในสิ่งแวดล้อม พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดลอมแหงชาติ พ.ศ. 2535 ให้คำนิยามวา น้ำเสียหมายถึงของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลวรวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปอนอยูในของเหลวนั้น (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล่อม. 2535) คำนิยามนี้ชี้ใหเห็นวา น้ำเสียเกิดเพราะมีการปนเปอนของมวลสารที่อาจเป็นวัตถุทางกายภาพ สารเคมีหรือสิ่งมีชีวิตที่ปะปนอยู่จนไม่สามารถนำน้ำนั้นมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ หรือนำมาใช้ตามความต้องการได้รวมถึงการอยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตในน้ำ แต่ถาพิจารณาในมุมลึกแลว อาจใหความหมายน้ำเสียในอีกแนวคิดหนึ่งว่า น้ำที่มีสิ่งเจือปนในน้ำเกินค่ามาตรฐานทั้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตรายต่อการบริโภคนั่นคือ เป็นน้ำที่สูญเสียคุณภาพทางน้ำตามมาตรฐานหรือเปลี่ยนแปลงจากคุณสมบัติเดิมตามสภาพธรรมชาติเชน มีสิ่งปฏิกูลที่ละลายและไม่ละลายน้ำเจือปนอยู่ เป็นเหตุให้น้ำนั้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามต้องการ (เกษม จันทรแกว. 2541 : 502-503) จึงกล่าวสรุปได้ว่า น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีองค์ประกอบของมวลสารหรือสารเคมีทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษในสัดส่วนที่ผิดไปจากธรรมชาติทั่วไปจนส่งผลต่อสุขภาพและอนามัยของมนุษย์ สัตวและพืช

2.2.1. ประเภทของของเสีย ชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนหรือสิ่งปฏิกูลในแหล่งน้ำเสียนั้นมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสีย โดยยกตัวอย่างสิ่งที่ปนเปื้อนหรือสิ่งปฏิกูลส่วนใหญ่ที่มักพบมีประเภทดังต่อไปนี้

1. สารอินทรีย์ ได้แก่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่นเศษข้าว พืชผัก ชิ้นเนื้อเป็นต้น

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือเป็นอุปสรรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์เป็นต้น

3. โลหะหนักและสารพิษอื่น ๆอาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหารเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเช่น ปรอท โครเมียม ทองแดง ปกติมักจะพบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร ส่วนชุนชนก็อาจมีปนเปื้อนบ้างจากอุตสาหกรรมบางประเภทเช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาลเป็นต้น

4. สารละลายและสารลอยน้ำต่าง ๆเป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงหรือกีดขวางแสงที่ส่องลงสู่แหล่งน้ำเช่น น้ำมันเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ของแข็ง ประกอบด้วยของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) ตะกอนหนัก (Settleable) และของแข็งละลาย (Dissolved solid) เมื่อสิ่งเหล่านี้จมอยู่ในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำและการนำน้ำนั้นไปใช้ประโยชน์อื่น ๆต่อไป

6. สารก่อให้เกิดฟองและสารซักฟอก ได้แก่ผงซักฟอก สบู่ ฟองจะเกิดขึ้นนั้นกีดกันการกระจายของออกซิเจนในอากาศสู่แหล่งน้ำและอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

7. ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเมื่อแหล่งน้ำมีธาตุอาหารเหล่านี้ในปริมาณมากจะทำให้เกิดการเร่งการเจริญเติบโตของพืชน้ำจำพวกสาหร่าย (Algae boom) ส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงจากการใช้ออกซิเจนของพืชน้ำเหล่านี้และยังทำให้เกิดเป็นวัชพืชน้ำกีดขวางแสงที่ส่องลงสู่แหล่งน้ำ

2.2.2 ประเภทของน้ำเสีย จากชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนหรือสิ่งปฏิกูลในแหล่งน้ำเสียสามารถแบ่งประเภทของน้ำเสียได้เป็นลักษณะจากแหล่งที่มา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆดังต่อไปนี้

1. น้ำเสียจากแหล่งชุมชน (Domestic wastewater)

น้ำเสียประเภทนี้ทั่วไปแล้วจะมาจากการใช้น้ำจากกิจกรรมต่าง ๆภายในครัวเรือนหรือสถานประกอบการต่าง ๆในชุมชน จึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 แหล่งใหญ่คือน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยได้แก่น้ำเสียที่เกิดจากสิ่งปฏิกูล น้ำเสียที่มาจากกิจกรรมอื่น ๆเช่น การประกอบอาหาร การล้างภาชนะและอุปกรณ์ การชำระล้างร่างกายเป็นต้น ต่อมาคือน้ำเสียจากสถานประกอบการต่าง ๆสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียประเภทนี้มีทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารต่าง ๆเช่นน้ำมันเครื่องจากอู่ซ่อมรถ การชุบโลหะของร้านชุบโลหะเป็นต้น

2. น้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม (Industrial wastewater)

น้ำเสียประเภทนี้มักจะมีลักษณะต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ ทั่วไปแล้วจะมีแหล่งที่มาจากน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนของเครื่องจักรและอุปกรณ์ น้ำที่ใช้ในการล้างวัตถุดิบ เครื่องจักร อุปกรณ์ ซึ่งรวมไปถึงพื้นโรงงานและขั้นตอนกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำเช่น น้ำหล่อเย็น (Cooling wastewater) น้ำล้าง (Wash wastewater) น้ำจากขบวนการผลิต (Process wastewater) และน้ำเสียอื่น ๆ(Miscellaneous wastewater)

3. น้ำเสียจากแหล่งการเกษตร (Agricultural wastewater)

น้ำเสียประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีแหล่งที่มาจากการเพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์หรืออุตสาหกรรมฟาร์มเช่น สุกร โค ปลาและกุ้งเป็นต้นทั่วไปแล้วน้ำเสียจากแหล่งนี้จะมาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่เช่น มูลสัตว์ นอกจากนั้นแล้วยังพบสารอนินทรีย์ด้วยเช่น ปุ๋ยเคมีที่ส่วนผสมของสารไนเตรตและฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 มาตรฐานคุณภาพของน้ำเสีย ในปัจจุบันทางหน่วยงานราชการได้ออกประกาศกำหนดข้อมูลมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับผู้ประกอบการในโรงงาน อุตสาหกรรมนั้นในการปฏิบัติงานต่าง ๆจะมีกฎหมายและข้อบังคับ สำหรับส่วนงานต่าง ๆไว้อย่างชัดเจนและในเรื่องการปล่อยน้ำทิ้งหรือน้ำเสีย ที่จะต้องทำตามอย่างเคร่งครัดเพื่อให้ผ่านการตรวจสอบและส่งผลดีต่อสภาพแวดล้อมและผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงสถานประกอบการ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำสามารถแบ่งได้ดังนี้ มาตรฐานน้ำเสียชุมชน มาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรมและมาตรฐานน้ำเสียเกษตรกรรม

1. มาตรฐานน้ำเสียชุมชน

จากราชกิจจานุเบกษาประกาศกระทรวงทรัพยากรกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ. 2553 เพื่อควบคุมมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนต้องมีค่าดังต่อไปนี้ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553)

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียชุมชน

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH (พี เอช)	5.5 - 9.0
2. ค่าบีโอดี (BOD หรือ Biological Oxygen Demand)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 20
กรณีหน่วยบำบัดสุดท้ายเป็นบ่อปรับเสถียร หรือบ่อผึ่ง	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 50*
3. สารแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 30
4. น้ำมันและไขมัน	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 5
5. ไนโตรเจนทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 20
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 2

หมายเหตุ กรณีหน่วยบำบัดสุดท้ายเป็นบ่อปรับเสถียร (Stability pond) หรือบ่อผึ่ง (Oxidation pond) ให้ใช้ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว (Filtrate BOD)

2. มาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม

จากราชกิจจานุเบกษา กระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการกำหนดมาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการประกอบกิจการโรงงานปรับปรุงเมื่อปี พ.ศ. 2560 น้ำจากการใช้น้ำของคนงานหรือน้ำจากกิจกรรมอื่นๆในโรงงานที่จะระบายออกจากโรงงานหรือเขตประกอบการอุตสาหกรรมต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH (พี เอช)	5.5 - 9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือTotal Dissolved Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (อาจแตกต่างขึ้นอยู่กับประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ต้องไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยมีค่าความเค็มไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าดีทีเอสทีมีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)
3. สารแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 30
4. อุณหภูมิ (Temperature) วัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง	องศาเซลเซียส	ไม่เกิน 40
5. สีหรือกลิ่น	-	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1
7. ไซยาไนด์ (Cyanide)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1
8. น้ำมันและไขมัน	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (อาจแตกต่างขึ้นอยู่กับประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ต้องไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร)
9. ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1
11. คลอรีนอิสระ ((Phenols)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม (ต่อ)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช (Pesticide)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร)
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร)
15. ค่าซีโอดี (COD หรือ Chemical Oxygen Demand)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร (อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร)
16. โลหะหนัก - สังกะสี (Zn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 5
- โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ (Hexavalent chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.25
- โครเมียมชนิดไตรวาเลนท์ (Trivalent chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.75
- ทองแดง (Cu)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 2
- แคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.03
- แคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.03
- แบเรียม (Ba)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียอุตสาหกรรม (ต่อ)

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
16. โลหะหนัก (ต่อ) - ตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.2
- นิกเกิล (Ni)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1
- แมงกานีส (Mn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 5
- อาร์เซนิค (As)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.25
- ซีลีเนียม (Se)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.02
- ปรอท (Hg)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.005

3. มาตรฐานน้ำเสียเกษตรกรรม

ในการทำการเกษตรมีหลายประเภททำให้การใช้สารเคมีแตกต่างกันตัวอย่างเช่น การใช้ปุ๋ยที่มีส่วนผสมของสารเคมีที่เป็นตัวเร่งการเจริญเติบโตของพืช นอกจากการเกษตรที่เกี่ยวกับการเพาะปลูกแล้วยังรวมถึงการเลี้ยงสัตว์เช่น ฟาร์มสุกรเป็นการทำการเกษตรด้านการเลี้ยงสัตว์ ในส่วนนี้ปัญหาน้ำเสียส่วนใหญ่ก็จะเกี่ยวข้องกับซากเศษอาหารและมูลสัตว์ ทำให้ค่าที่จำเป็นต้องควบคุมมากคือสารประกอบไนโตรเจนจำพวกแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรตที่เกิดขึ้นจากเศษอาหารและมูลสัตว์ สำหรับตัวอย่างมาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรคุณภาพมาตรฐานน้ำเสียเกษตรกรรม

ตัวแปรคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
		มาตรฐาน ก	มาตรฐาน ข และ ค
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH (พี เอช)	5.5 - 9.0	5.5 - 9.0
2. ค่าบีโอดี (BOD หรือ Biological Oxygen Demand)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 100
3. ค่าซีโอดี (COD หรือ Chemical Oxygen Demand)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 400
4. สารแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 150	ไม่เกิน 200
5. ไนโตรเจนในค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

1. มาตรฐาน ก ใช้ควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มประเภท ก และมาตรฐาน ข ใช้ควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์ม ประเภท ข และ ค

2. การแบ่งประเภทของฟาร์มสุกรจะใช้น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (Livestock Unit) เป็นเกณฑ์ เนื่องจากฟาร์มแต่ละแห่งจะประกอบด้วยสุกรที่มีความแตกต่างกันทั้งประเภท ขนาด และช่วงอายุซึ่งจะทำให้เกิดของเสียและน้ำเสียในปริมาณที่แตกต่าง โดยมีข้อกำหนดดังนี้

ประเภทของฟาร์มสุกรแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1 ประเภท ก มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์มากกว่า 600 หน่วย. เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว

2.2 ประเภท ข มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ตั้งแต่ 60 - 600 หน่วย. เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 500 - 5,000 ตัว

2.3 ประเภท ค มีน้ำหนักปศุสัตว์ตั้งแต่ 6 - น้อยกว่า 60 หน่วย. เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 50 - น้อยกว่า 500 ตัว (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

2.2.4 มาตรฐานคุณภาพของน้ำเสียผิวดิน ตามมาตรา 32 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 บัญญัติให้คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกำหนดมาตราฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นเป้าหมายในการรักษาคุณภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งได้มีการกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดินดังตารางที่ 2.4 และกำหนดมาตรฐานคุณภาพตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 การกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดิน

ประเภทแหล่งน้ำ	การใช้ประโยชน์
ประเภทที่ 1	ได้แก่แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและเป็นประโยชน์เพื่อ 1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน 2. การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน 3. การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ
ประเภทที่ 2	ได้แก่แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ 1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน 2. การอนุรักษ์สัตว์น้ำ 3. การประมง 4. การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การกำหนดประเภทแหล่งน้ำผิวดิน (ต่อ)

ประเภทที่ 3	ได้แก่แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและเป็นประโยชน์เพื่อ 1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน 2. การเกษตร
ประเภทที่ 4	ได้แก่แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและเป็นประโยชน์เพื่อ 1. การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน 2. อุตสาหกรรม
ประเภทที่ 5	ได้แก่แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ประเภทแหล่งน้ำผิวดิน				
		ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
1. สี กลิ่นและรส	-	ธ	ธ	ธ	ธ	-
2. อุณหภูมิ	ซ	ธ	ธ	ธ	ธ	-
3. พีเอช	-	ธ	5-9	5-9	5-9	-
4. ออกซิเจนละลาย	มก/ล	ธ	6.0	4.0	2.0	-
5. บีโอดี	มก/ล	ธ	1.5	2.0	4.0	-
6. ไนเตรต	มก/ล	ธ	5.0	5.0	5.0	-
7. แอมโมเนีย	มก/ล	ธ	0.5	0.5	0.5	-
8. ฟีนอล	มก/ล	ธ	0.005	0.005	0.005	-
9. ทองแดง	มก/ล	ธ	0.1	0.1	0.1	-
10. นิคเกิล	มก/ล	ธ	0.1	0.1	0.1	-
11. แมงกานีส	มก/ล	ธ	1.0	1.0	1.0	-
12. สังกะสี	มก/ล	ธ	1.0	1.0	1.0	-
13. แคดเมียม	มก/ล	ธ	0.005	0.005	0.005	-
14. ตะกั่ว	มก/ล	ธ	0.05	0.05	0.05	-
15. สารหนู	มก/ล	ธ	0.01	0.01	0.01	-
16. ไซยาไนด์	มก/ล	ธ	0.005	0.005	0.005	-

หมายเหตุ (ธ) เป็นไปตามธรรมชาติ, (ซ) องศาเซลเซียส, (มก/ล) มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทางกายภาพ คือกระบวนการที่อาศัยแรงต่าง ๆเพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยส่วนมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสียได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Grit removal) เป็นต้น

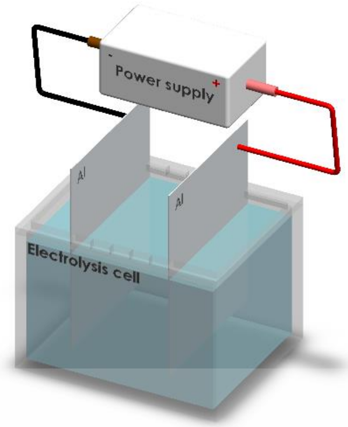
2. กระบวนการทางชีวภาพ คือกระบวนการที่อาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในการทำหน้าที่ย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ต่าง ๆไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำเสียจะถูกใช้เป็นสารอาหารให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง วิธีการบำบัดนี้เป็นได้ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้

3. กระบวนการทางเคมีชีวภาพ คือกระบวนการที่อาศัยสารเคมีผสมลงไปกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเพื่อให้ตกตะกอนและแยกเอามลสารต่าง ๆออกจากน้ำเสีย สารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารส้ม (Alum) ปูนขาว (Lime) เฟอรัส ซัลเฟต (Ferrous sulfate) เฟอริก คลอไรด์ (Ferric chloride) กระบวนการทางเคมีที่ใช้การบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภทได้แก่ โคแอกกูเลชัน (Coagulation) การตกผลึก (Precipitation) การปรับพีเอช การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ออกซิเดชัน-รีดันชัน (Oxidation-Reduction) ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีนี้ใช้สำหรับน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรดหรือด่างสูงเกินไป มีโลหะหนักที่เป็นพิษเช่น สังกะสี ดีบุก มีตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ยาก มีสารประกอบอนินทรีย์ละลายน้ำที่เป็นพิษเช่น ซัลไฟต์ ไขมันหรือน้ำมันละลายน้ำ

2.4 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยจากกระบวนการจะใช้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจากภายนอกจ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่ประกอบไปด้วยขั้วแอโนดและแคโทดเพื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปที่สารอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่อยู่ในน้ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสจะได้ 3 ส่วนคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก ขั้วอิเล็กโทรดและสารอิเล็กโทรไลต์ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อีกหลายรูปแบบเช่น ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีการชุบโลหะหรือการทำให้โลหะบริสุทธิ์ (ธนินทร์, 2561) หลักการทำงานของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนั้นจะเป็นไปตามดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

ในกระบวนการเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ภาชนะที่มีสารละลายผสมอยู่ในน้ำโดยผ่านขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวรีดิวซ์ไปสู่ตัวออกซิไดซ์ทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer) ภายในอะตอมของสารที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดันชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนดทำให้ขั้วนี้จะเกิดการสึกกร่อนมากกว่าขั้วลบหรือขั้วแคโทดที่จะเกิดปฏิกิริยารีดันชันในการเกิดปฏิกิริยารีดันชันที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทดนี้ในการเกิดปฏิกิริยาจะมีการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อเวลาผ่านไปน้ำหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะมีสภาพเป็นด่างและเกิดตะกอนในน้ำ ในที่นี้น้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในภาชนะมีการปนเปื้อนสารประกอบไนโตรเจนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเป็นไปดังสมการที่ (2.6) – (2.8) [15]

$$2NO_2^- + 4H_2O + 6e^- \rightarrow N_2 + 8OH^- \quad (2.6)$$

$$2NH_3 + 6OH^- - 6e^- \rightarrow N_2 + 6H_2O \quad (2.7)$$

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow NH_3 + H_2O \quad (2.8)$$

การเกิดปฏิกิริยารีดันชันจะเป็นไปดังสมการที่ (2.9) – (2.11)

$$2NO_3^- + 6H_2O + 10e^- \rightarrow N_2 + 12OH^- \quad (2.9)$$

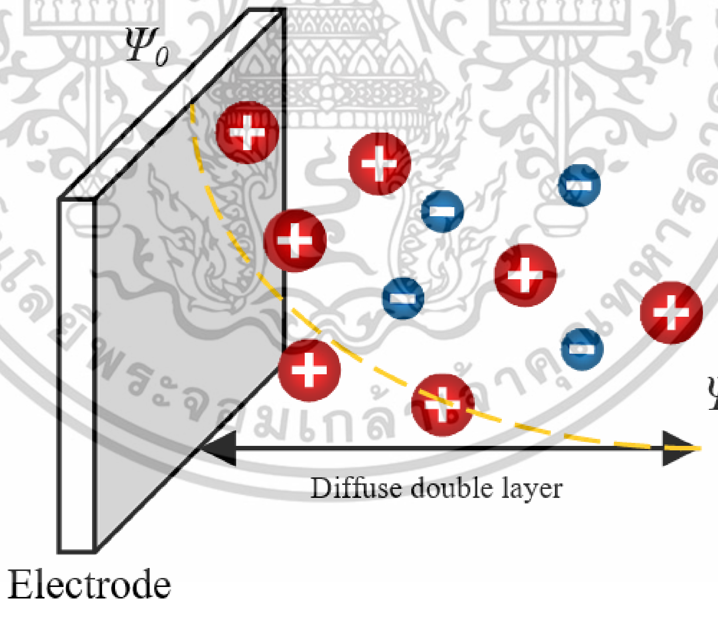
$$NO_3^- + H_2O + 2e^- \rightarrow NO_2^- + 2OH^- \quad (2.10)$$

$$NO_3^- + 6H_2O + 8e^- \rightarrow NH_4^+ + 9OH^- \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

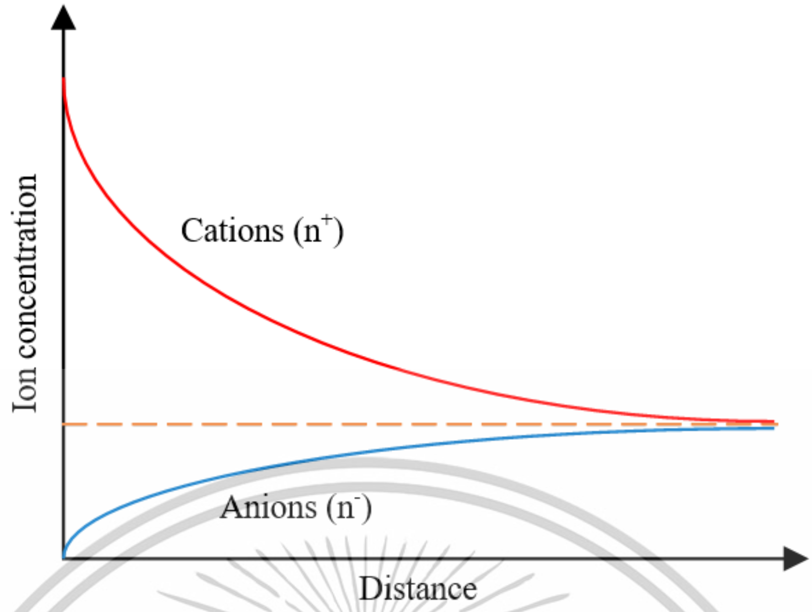
2.5 อิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์ (Electrical double layer)

เมื่ออนุภาคเกิดการกระจายตัวในน้ำ พื้นผิวของอนุภาคส่วนมากจะเกิดประจุ ในกรณีที่พื้นผิวของอนุภาคเกิดประจุลบ ระบบจะทำให้เกิดสมดุลด้วยการชดเชยประจุบวกที่หายไป โดยจะเกิดการดึงดูดกันของไอออนบวกที่อยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไอออนบวกที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุลบบนพื้นผิวอนุภาคเรียกว่า เคาเตอร์ไอออน (Counter ion) การดึงดูดกันระหว่างอนุภาคที่มีประจุลบกับเคาเตอร์ไอออนจะเกิดการแพร่เป็นชั้นบาง ๆ รอบพื้นที่พื้นผิวของอนุภาคซึ่งจะเรียกว่า ดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ (Diffuse double layer) แสดงดังรูปที่ 2.7 ในดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ปริมาณของเคาเตอร์ไอออนที่แพร่อยู่กับบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคจะสูง และลดลงเมื่อมีระยะออกห่างจากบริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ประจุที่แพร่อยู่ใกล้บริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคไม่ได้ประกอบด้วยเคาเตอร์ไอออนเพียงอย่างเดียว แต่บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคยังมี โคไอออน (Co-ion) ปรากฏอยู่ด้วย โดยโคไอออน หมายถึงไอออนที่ประจุทางไฟฟ้าเป็นลบเหมือนกับอนุภาค โคไอออนจะไม่ได้อยู่ใกล้บริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคมากเท่ากับเคาเตอร์ไอออนเพราะว่าอนุภาคและโคไอออนจะเกิดการผลักกัน และนอกจากนี้โคไอออนที่แพร่อยู่บริเวณรอบ ๆ อนุภาคจะมีปริมาณสูง และลดลงเมื่อมีระยะออกห่างจากบริเวณพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 ภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy และ Chapman (Liu *et al.*, 2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การกระจายของประจุในภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy และ Chapman (Liu *et al.*, 2019)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของเคาเตอร์ไอออนในสารแขวนลอยหรือเรียกว่า ดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วย Gouy (1910) และ Chapman (1913) ตามลำดับซึ่ง Gouy และ Chapman ได้ทำนายว่าค่าศักย์ไฟฟ้า (Ψ) จะลดลงโดยประมาณ จากเอกโพแนนเชียลที่มีระยะห่างเท่ากับ x จากพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นระนาบจนถึงสารละลายที่อยู่ถัดออกไป แสดงดังสมการที่ (2.12)

$$\Psi = \Psi_0 \exp(-kx) \tag{2.12}$$

โดยที่ Ψ_0 คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของอนุภาค k^{-1} คือความหนาของดับเบิลเลเยอร์จากสมการที่ (2.12) สังเกตได้ว่าเมื่อระยะห่างจากพื้นที่ผิวของอนุภาค ค่าศักย์ไฟฟ้าจะต่ำและค่าเอกโพแนนเชียลจะลดลง

ค่า $\frac{1}{k}$ หาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\frac{1}{k} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 RT}{F^2 \sum_{i=n} c_i z_i^2}} \tag{2.13}$$

เมื่อ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c_i คือความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte concentration)

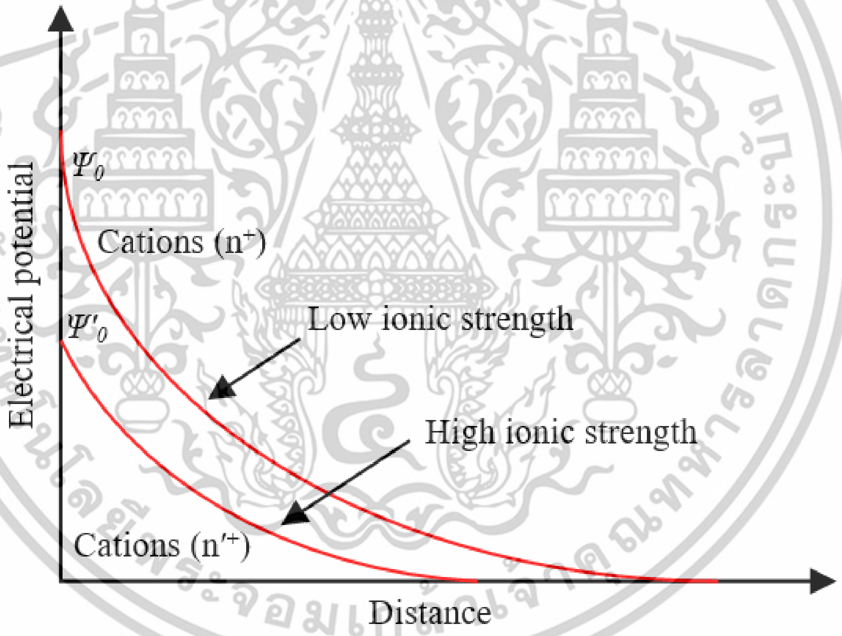
z_i คือเวเลนซีของไอออน (Valence of the ion)

ε_0 คือค่าคงที่ของไฟฟ้าของสารตัวกลาง (Dielectric constant of the medium)

R คือค่าคงที่ของแก๊ส ($1atm/molK$) (Gas constant)

T คืออุณหภูมิ (K) (Absolute temperature)

จากสมการที่ (2.13) จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์หรือความแรงไอออนเพิ่มขึ้น ความหนาของดิวฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์จะลดลงเนื่องจากเกิดการกดอัด การกดอัดของดับเบิลเลเยอร์ แสดงดังรูปที่ 2.9 นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ แต่ยังขึ้นอยู่กับประจุของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับพื้นผิวของอนุภาค ถ้าไอออนที่มีประจุสูงจะเกิดการกดอัดดับเบิลเลเยอร์มากกว่าไอออนที่มีประจุต่ำ

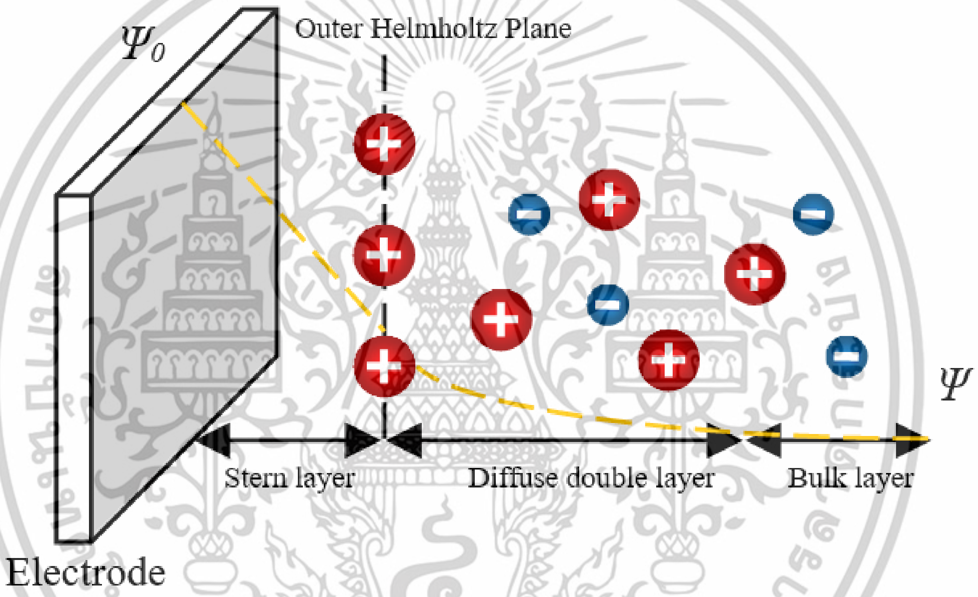


รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นของไอออนบวกเมื่อมีระยะห่างจากพื้นผิว [4]

จากทฤษฎีของ Gouy และ Chapman พบว่าถ้าสมมติให้เคาเตอร์ไอออนเป็นประจุที่อยู่เดี่ยว ๆ ในสารแขวนลอย โดยจะไม่ทำปฏิกิริยากันระหว่างผิวที่มีลักษณะเป็นแนวราบกับเคาเตอร์ไอออน ต่อมา Stern (1924) ได้ปรับปรุงทฤษฎีของ Gouy และ Chapman โดย Stern ได้อธิบายว่า ขนาดของเคาเตอร์ไอออนจะมีขอบเขตจึงทำให้ระยะห่างของเคาเตอร์ไอออนที่อยู่ใกล้กับบริเวณประจุที่พื้นผิวมีขีดจำกัดเช่นกันซึ่งจะเท่ากับรัศมีของไอออน ดังนั้นแบบจำลองอิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Stern ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนที่หนึ่งได้แก่ส่วนที่อยู่ชั้นในสุดคือชั้น Stern ส่วนที่สองได้แก่ดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy และ Chapman แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์ จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้น Stern จะลดลงเป็นแนวเส้นตรงที่มีระยะทางเท่ากับ δ ซึ่งวัดจากศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (Ψ_0) จนถึงศักย์ไฟฟ้า Stern (Ψ_δ) และเมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้า Stern จนถึงดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ในระหว่างชั้น Stern และดิฟฟิวส์เลเยอร์จะมีระนาบอีกระนาบหนึ่ง ระนาบดังกล่าวเรียกว่าระนาบ Helmholtz ซึ่งระนาบเฮมโฮลตจะอยู่ถัดจากชั้น Stern และระนาบ Helmholtz เรียกว่าระนาบเฉือน (Plane of shear) ศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบเฉือนเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) ซึ่งในทางปฏิบัติจะสมมติให้ศักย์ไฟฟ้าซีต้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้า Stern [4]

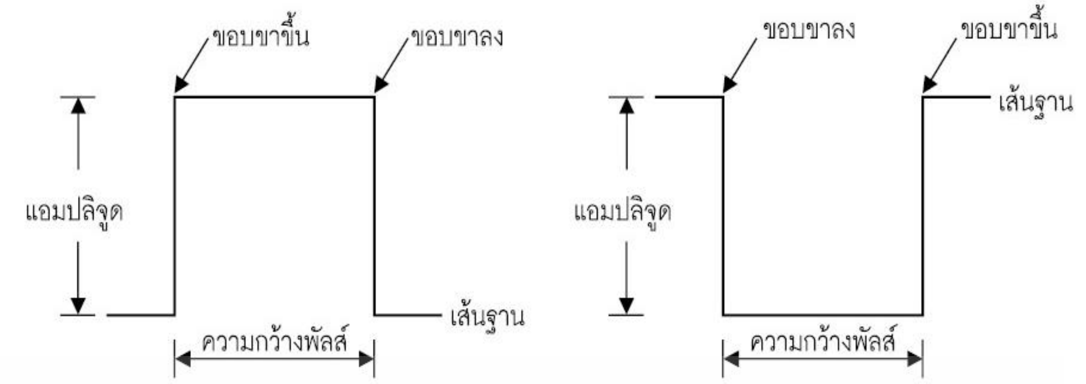


รูปที่ 2.10 ภาพจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Stern [4]

2.6 รูปแบบสัญญาณพัลส์

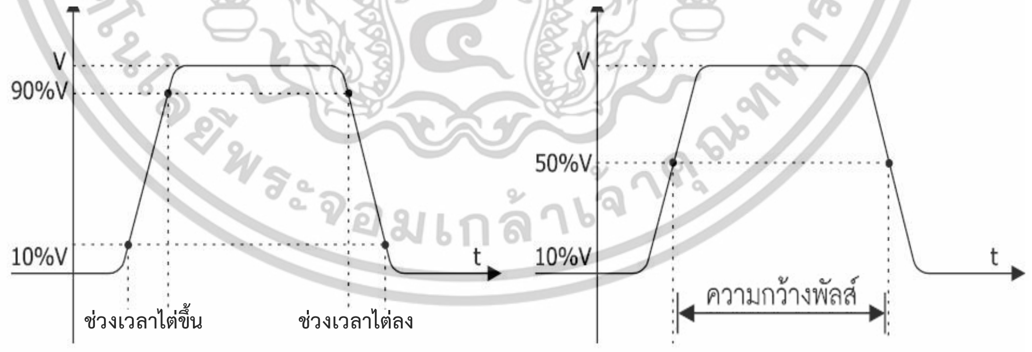
สัญญาณพัลส์ (Pulse) คือสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีรูปร่างหรือลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่ระดับของสัญญาณไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่งที่มีความแตกต่างกัน อาจมีความต่อเนื่องหรือไม่ก็ได้ ส่วนประกอบของสัญญาณพัลส์ที่สำคัญได้แก่ ระดับสัญญาณหรือแอมพลิจูด (Amplitude) , ขอบขาของสัญญาณ ซึ่งมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ ขอบขาขึ้น (Rising edge) และขอบขาลง (Falling edge), ความกว้างของสัญญาณ (Pulse width) และเส้นฐาน (based line) ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะขอบขาของสัญญาณพัลส์ (ชัยวัฒน์, 2561)

ลักษณะของสัญญาณพัลส์จะมีทั้งพัลส์บวกและพัลส์ลบ ขอบขาขึ้นของสัญญาณ หมายถึงขอบขาของสัญญาณที่เปลี่ยนระดับจากต่ำไปยังระดับสูง ส่วน ขอบขาลงของสัญญาณ หมายถึงขอบขาของสัญญาณที่เปลี่ยนระดับจากสูงลงมายังระดับต่ำ ส่วนแอมพลิจูดจะคำนวณหรือวัดจากระดับสัญญาณต่ำมายังระดับสัญญาณสูง หรือจากยอดของสัญญาณมายังเส้นฐานของสัญญาณพัลส์ สัญญาณพัลส์ในอุดมคติเป็นรูปสี่เหลี่ยม แต่ในความเป็นจริงสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นอาจไม่เหมือนกับสัญญาณพัลส์ในอุดมคติ ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในบางประเภทมีความเร็วในการทำงานหรือตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ได้ไม่เร็วเพียงพอ ทำให้เกิดช่วงเวลาก่อนที่ระดับสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงสู่ระดับที่มีเสถียรภาพดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.12 ลักษณะความกว้างของสัญญาณพัลส์ (ชัยวัฒน์, 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

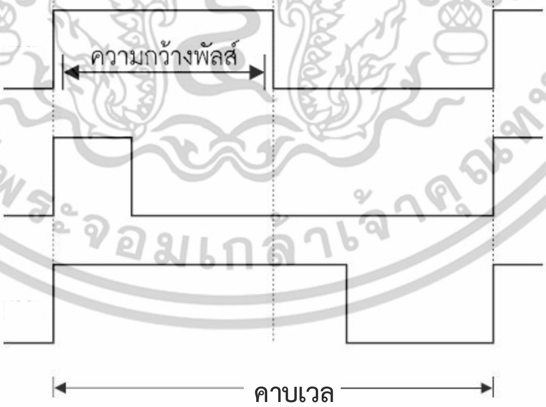
พารามิเตอร์ที่สำคัญของสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของสัญญาณประกอบด้วย

1. ช่วงเวลาไต่ขึ้น (Rise time) เป็นค่าของเวลาที่สัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุดไปยังระดับ 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุดหรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นช่วงเวลาของการเกิดขอบขาขึ้นของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.12

2. ช่วงวลาไต่ลง (Fall time) เป็นค่าของเวลาที่สัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงจากระดับ 90 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุดลงมายังระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ของสัญญาณสูงสุดหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นช่วงเวลาของการเกิดขอบขาลงของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.12

3. ความกว้างของพัลส์ (Pulse width) เป็นค่าของเวลาระหว่างจุดระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณกับจุดระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ขอบขาลงของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.12

สัญญาณพัลส์ลูกเดียวเรียกว่าพัลส์เดี่ยว (Single pulse) แต่ถ้าหากพัลส์ที่เกิดขึ้นมีความต่อเนื่องและเกิดคาบเวลาคงที่ (Periodic) จะเรียกสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นว่าพัลส์ต่อเนื่อง ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular waveform) ซึ่งความแตกต่างกันตรงที่สัญญาณสี่เหลี่ยมจะมีความกว้างของพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือสัญญาณในซีกบวกจะมีความกว้างเท่ากับสัญญาณในซีกลบ แต่ถ้าเป็นสัญญาณพัลส์ต่อเนื่องจะมีความกว้างของพัลส์ที่อิสระ โดยความกว้างของพัลส์ที่มีทั้งสัญญาณในซีกบวกกับสัญญาณในซีกลบรวมกันเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ 1 ลูกสัญญาณพัลส์ นั่นหมายความว่าความถี่ไม่มีผลต่อการปรับหรือเปลี่ยนแปลงของความกว้างของพัลส์ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์แตกต่างกันในขณะที่ความถี่ของสัญญาณไม่เปลี่ยนแปลง (ชัยวัฒน์, 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ความกว้างของพัลส์สามารถนำมาคำนวณหาค่าความถี่ (*Frequency*) จากสัญญาณในซีกบวกหรือช่วงเวลาเปิด ($time_{on}$) กับสัญญาณในซีกลบหรือช่วงเวลาปิด ($time_{off}$) ดังรูปที่ 2.14 และสมการที่ (2.14) – (2.16) [31]

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{time_{on}+time_{off}} \tag{2.14}$$

$$D = \frac{time_{on}}{T} = \left(\frac{time_{on}}{time_{on}+time_{off}}\right) \times 100 \tag{2.15}$$

$$i_{average}\ (A) = i \times \left(\frac{time_{on}}{time_{on}+time_{off}}\right) = i \times \frac{time_{on}}{T} \tag{2.16}$$

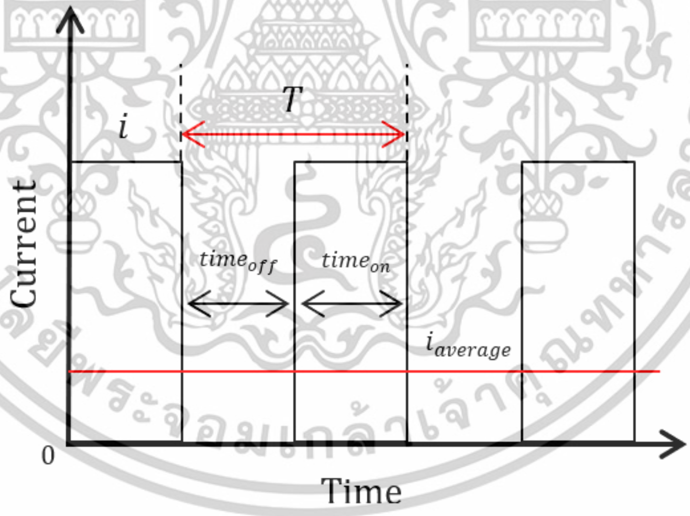
เมื่อ f คือค่าความถี่ (*Hz*)

D คืออัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาของความกว้างพัลส์ (*%*)

i คือกระแส (*A*)

$i_{average}$ คือกระแสเฉลี่ย (*A*)

T คือคาบเวลา (*second/cycle*)



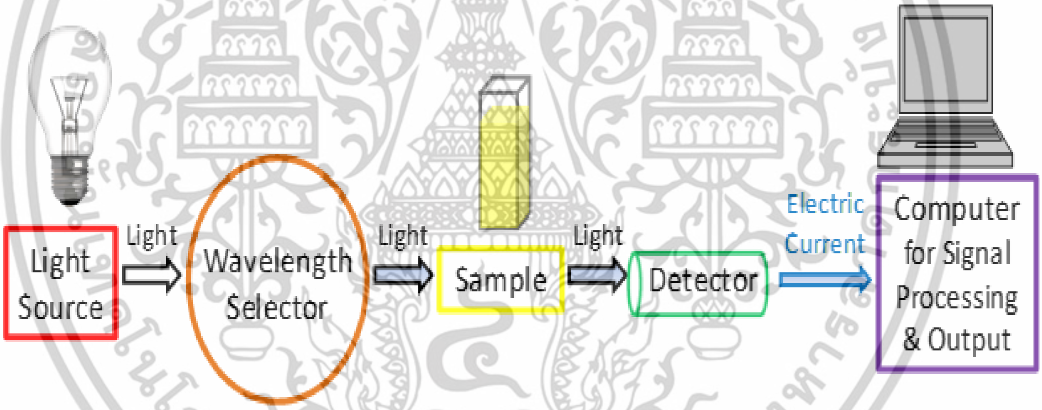
รูปที่ 2.14 รูปแบบสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม

2.7 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน

อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-visible spectrophotometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณของแสงและค่า intensity หรือความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีจนถึงช่วงแสงขาวที่เกิดจากทั้งการทะลุผ่าน การส่องผ่าน และการสะท้อนของวัสดุตัวอย่างที่ถูกวางไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวเครื่องมือ โดยที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วงการวัดจะมีความสัมพันธ์กับทั้งในเชิงปริมาณ และชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ โดยหลักการทั่วไปของการฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวที่มีพลังงานที่เหมาะสมนั้นไปที่วัสดุตัวอย่างจะทำให้เกิดการย้ายระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของสสารนั้นๆ ที่เกิดจากการดูดกลืนแสงดังกล่าว ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า แล้วเกิดการคายพลังงานออกมาอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่เหมาะสมในรูปของความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งตัวเครื่องจะทำการ detect ช่วงของพลังงานเหล่านั้น เพื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านการสะท้อน และการส่องผ่านจากวัสดุตัวอย่าง แล้วนำมาทำการเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert โดยค่าการดูดกลืนแสง หรือ ค่า absorbance ของสสารนั้นๆ จะแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้น เราจึงสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้สำหรับการระบุทั้งชนิด และปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างได้



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของ Ultraviolet-visible light spectrophotometer (Tom, 2023)

2.8 การวิเคราะห์พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับการตรวจวัดภาพพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งการสร้างภาพทำได้จากการเร่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนด้วยศักย์ไฟฟ้า 100 ถึง 30,000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่าจากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกดึงดูดลงโดยแผ่นแอโนด (Anode plate) ภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ ซึ่งต่อมาจะมีชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

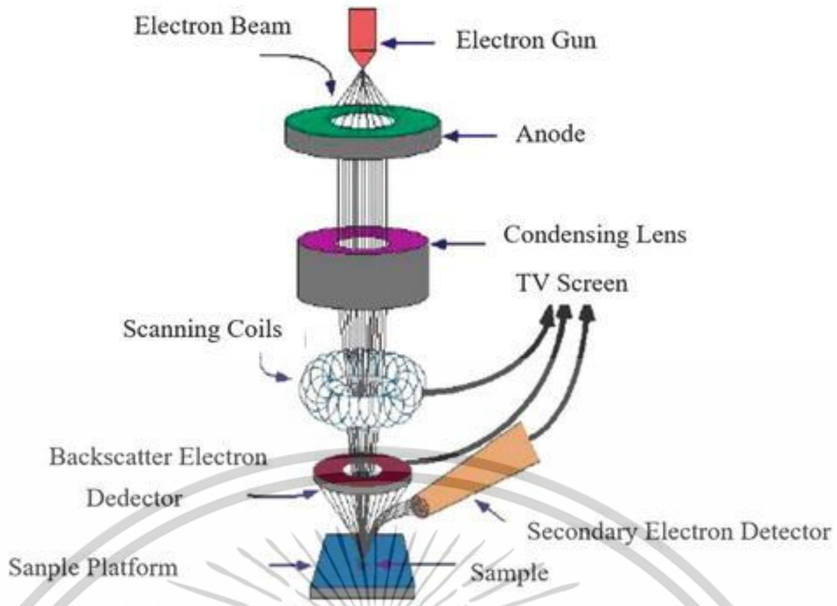
คอนเดนเซอร์เลนส์ที่ทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนให้มีจุดโฟกัสบนพื้นผิวของตัวอย่างที่เหมาะสม และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะมีชุดขดลวดควบคุมการกราด (Scan coil) ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ขณะที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) ชนิดต่าง ๆ จากสัญญาณอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จึงได้ภาพเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ภาพส่วนใหญ่ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างภายนอก ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็คตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดึง ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมีดังนี้

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electron image) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงและสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงาน เกิดที่บริเวณพื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ จะเกิดที่บริเวณพื้นผิวในระดับไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่พื้นผิวต่ำ

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-ray image) รังสีเอ็กซ์มีลักษณพเฉพาะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่าง ๆ ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมมีการรักษาสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนและต้องลดระดับพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เพื่อทำให้มีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่เสียไปจะมีการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงส่วนประกอบของ Scanning electron microscopy (Joshi and Bhattacharyya, 2008)

2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างตะกอน

เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และระบุชนิดของสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบจากตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) หลักการของเครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ เป็นการทำงานโดยอาศัยการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของรังสีเอ็กซ์เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เมื่อลำแสงของรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนพื้นผิวของตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) และเกิดมุมในการเลี้ยวเบนขึ้นซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบผลึกของตัวอย่าง ตัวอย่างแต่ละชนิดนั้นจะมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะเจาะจง จากกฎของแบรกก์ (Bragg's law) กล่าวว่าเมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึกและเกิดการแทรกสอด เมื่อใดที่ผลต่างของระยะห่างของรังสีเอ็กซ์ มีค่าเท่ากับจำนวนของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่ารูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ดังนั้นเมื่อเราทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน เราก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ ตามสมการที่ (2.17)

$$n\lambda = 2d\ sin\theta \quad (2.17)$$

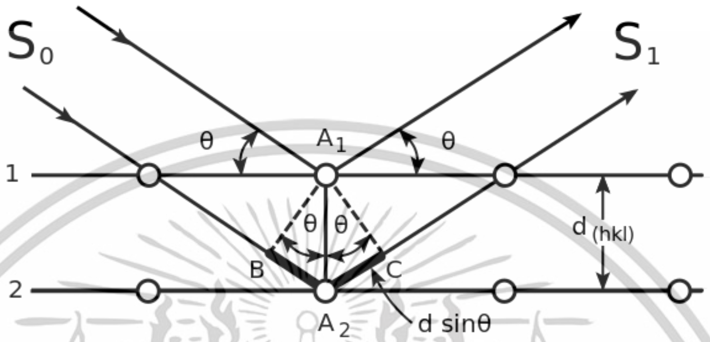
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

n คือเลขจำนวนเต็ม

θ คือมุมที่รังสีตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กระทำกับระนาบของผลึก

λ คือความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้



รูปที่ 2.17 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Kossolapov and Chugunova, 2021)

จากกฎของแบรกก์ตามสมการที่ (2.17) ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบไปด้วยระนาบของอะตอม โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ $(h\,k\,l)$ ซึ่งเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0, 1, 2, เป็นต้นไป ระยะห่างระหว่างระนาบจากชุดเดียวกันจะขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์และค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก $(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกจะแตกต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่าง ๆ ยกตัวอย่างความสัมพันธ์อย่างง่าย เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกแบบคิวบิค (Cubic) ที่มีค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกคือ $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90\ °c$ จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.18)

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \tag{2.18}$$

จากสมการที่ (2.17) เมื่อให้ค่า n = 1 และนำมาแทนค่าในสมการ (2.18) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกตามสมการที่ (2.19)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4sin^2\theta}{\lambda^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a คือค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant)

θ คือมุมของการเลี้ยวเบน

λ คือความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์

นอกจากนี้ระนาบต่าง ๆ จากผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์จะเรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) ส่วนมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบจะเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งจะมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างมาวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ จะได้ค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนเพื่อนำไปวิเคราะห์และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มกับมุมเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนแสดงดังรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสีย ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เพื่อนำมาปรับใช้ในทางปฏิบัติของงานวิจัยนี้ การเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์นี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและสร้างเทคโนโลยีที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารไนเตรตในน้ำเสีย โดยข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้เพื่อช่วยเสริมพื้นฐานทางทฤษฎีและปฏิบัติในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

A. S. Koparal และ Ü. B. Öğütveren ได้จัดทำบทความวิจัยเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการกำจัดไนเตรตออกจากน้ำโดยใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า บทความนี้ใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าโดยเฉพาะกระบวนการอิเล็กโทรรีดักชั่น (Electroreduction) และกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชั่น (Electrocoagulation) เพื่อตรวจสอบการกำจัดไนเตรตออกจากน้ำ ผลลัพธ์จากการวิจัยพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรอิเล็กโทรรีดักชั่นมีประสิทธิภาพสูงในการลดปริมาณไนเตรตลงถึงระดับที่ยอมรับได้ที่ช่วง pH 5-7 โดยมีการใช้พลังงานเพียง 1×10^{-3} kWh/g ในขณะที่กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชั่นสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไนเตรตได้ในช่วง pH 9-11 ด้วยการใช้พลังงานน้อยลงที่เพียง 0.5×10^{-4} kWh/g ทั้งสองวิธีนี้มีความสามารถในการกำจัดไนเตรตอย่างเต็มที่ ถึงแม้ว่าจะต้องใช้พลังงานที่มีระดับสูงขึ้น [17]

M. Guo, L. Feng, Y. Liu, และ L. Zhang ได้จัดทำบทความวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดสารเคมีไฟฟ้าและการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งของโรงบำบัดน้ำเสียในเทศบาล (MWTP) โดยใช้อิเล็กโทรดโลหะ ผลลัพธ์จากการศึกษาได้ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ระยะห่างของอิเล็กโทรไลต์, เวลาอิเล็กโทรลิซิส, และวัสดุอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟต การสังเกตได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่สูงขึ้นในการกำจัดทั้งสองสารพร้อมกัน โดยใช้อิเล็กโทรดอลูมิเนียมหรือเหล็ก สำหรับเงื่อนไขปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการบรรลุประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตและฟอสเฟตได้กำหนดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 8 mA/cm^2 และเวลาอิเล็กโทรลิซิส 1.5 ชั่วโมง การศึกษาได้ระบุว่าการกำจัดฟอสเฟตเป็นผลจากการตกตะกอนร่วมระหว่างไอออนโลหะฟอสเฟต, ไอออน, และไฮดรอกไซด์ไอออน, รวมทั้งการดูดซับฟอสเฟตโดยคอมเพล็กซ์โลหะไฮดรอกซิล นอกจากนี้การเปรียบเทียบการสูญเสียอิเล็กโทรดอลูมิเนียมและเหล็กพบว่าอลูมิเนียมมีการสูญเสียน้อยในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส, และยังคงประสิทธิภาพผลการบำบัดเดียวกัน ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียสามารถลดลงต่ำกว่า 15 mg/L ในเวลา 1.5 ชั่วโมง ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 8 mA/cm^2 โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำกว่า 5 mg/L ดังนั้นการศึกษานี้เสนอเป็นวิธีทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและประหยัดสำหรับการกำจัดไนเตรตและฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งของ MWTPs พร้อมกัน [13]

C. Polatides, M. Dortsiou และ G. Kyriacou ได้จัดทำบทความวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดไนเตรตด้วยไฟฟ้าเคมีออกจากสารละลายในน้ำและน้ำเสียโดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ซิ่ง การศึกษามุ่งเน้นไปที่การใช้อิเล็กโทรด Cu60Zn40 และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ซิ่งในรูปแบบที่แตกต่างกันคือพัลส์คลื่นสี่เหลี่ยม, ไซนัสและสามเหลี่ยม ผลลัพธ์พบว่าพัลส์คลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ และรอบการทำงานแคทอดิกและอะโนดิกที่แบ่งเป็น 80 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีประสิทธิภาพมากที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรต นอกจากนี้จากบทความยังกล่าวถึงการค้นคว้าอิเล็กโทรดที่สามารถใช้ได้ทั้งในการลดไนเตรตแบบแคทอดิกและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกซิเดชันอะโนดิกของแอมโมเนียที่ผลิตขึ้นทองแดง ซึ่งได้รับการระบุว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับการลดไนเตรต แม้ว่าการเกิดออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมีของแอมโมเนียเป็นไนโตรเจนนั้นเป็นที่ยากเมื่อพิจารณาศักยภาพคงที่ [27]

M. B. Hariri and G. G. Botte ได้จัดทำบทความวิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคนิคอิเล็กโทรไลซิสแบบพัลส์สำหรับการกำจัดแอมโมเนียและไนเตรตออกจากน้ำเสียพร้อมกันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CuNi/PtIr/C ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของ PtIr/C และ CuNi/C ที่ Pt_9Ir/C 60 เปอร์เซ็นต์ และ Cu_9Ni/C 40 เปอร์เซ็นต์ มีปฏิกิริยาสูงสุดสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันแอมโมเนียและปฏิกิริยาลดไนเตรตตามลำดับ สารปนเปื้อนไนโตรเจนถูกลบออกไปเรื่อย ๆ ในระหว่างที่ศักยภาพของพัลส์ทำให้เกิดไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจน อัตราการกำจัดแอมโมเนียเฉลี่ยอยู่ที่ 5.17 ppm-แอมโมเนีย/นาที และอัตราการกำจัดไนเตรตเฉลี่ยอยู่ที่ 0.074 ppm-ไนเตรต/นาที ค่าความสามารถของกระบวนการต่อแอมโมเนีย (Selectivity of ammonia) คือ 82 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราการลดลงของไนเตรตเฉลี่ยอยู่ที่ 65 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากบทความในงานวิจัยนี้ระบุว่าเทคนิคการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์สามารถกำจัดแอมโมเนียและไนเตรตได้และตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันแอมโมเนียและปฏิกิริยาลดไนเตรตซึ่งแสดงเสถียรภาพหลังจาก 10 รอบ [15]

J. Shu, R. Liu, Z. Liu, J. Du และ C. Tao ได้จัดทำบทความวิจัยเกี่ยวกับการใช้อิเล็กโทรลิซิสของกระแสพัลส์ (Pulse current) สำหรับการกู้คืนแมงกานีสพร้อมกันและการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนออกจากน้ำเสียแบบจำลอง จากการศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ซึ่งรวมถึงอุณหภูมิเริ่มต้น, ระดับ pH, และความเข้มข้นของการเติม NaCl ผลลัพธ์พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอิเล็กโทรลิซิสกระแสพัลส์ถูกกำหนดเป็น 30 mA/cm^2, ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ และรอบการทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในกระบวนอยู่ที่ 2.5 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของแมงกานีสในน้ำเสียลดลงจาก 160 mg/L เหลือเพียง 0.2 mg/L ในขณะที่แอมโมเนียไนโตรเจนถูกกำจัดออกจาก 80 mg/L เหลือเพียง 0.1 mg/L โดยที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ใช้คือ Ti/SnO_2-IrO_2-RuO_2 และในระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของกระแสพัลส์แมงกานีสไดออกไซด์จะถูกสะสมบนขั้วไฟฟ้าแอโนด นอกจากนี้จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าอุณหภูมิ, pH เริ่มต้นและความเข้มข้นของการเพิ่ม NaCl มีผลกระทบต่อกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของกระแสพัลส์ ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของกระแสพัลส์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดคือค่า pH เริ่มต้นที่ 10 และการเพิ่ม NaCl 0.008 mol/L ที่อุณหภูมิห้อง และการวิเคราะห์การจำแนกปริมาณตกตะกอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) และการกระจายตัวของเอ็กซ์เรย์ (XRD) ยืนยันการสะสมของแมงกานีสไดออกไซด์บนขั้วบวกและการกู้คืนแมงกานีสในรูปแบบของแมงกานีสไดออกไซด์ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดไนเตรตด้วยขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวมออกเป็น 4 ขั้นตอน คือการออกแบบอิเล็กโทรลิซิสเซลล์, การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์, การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษาเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) โดยแสดงแผนผังดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

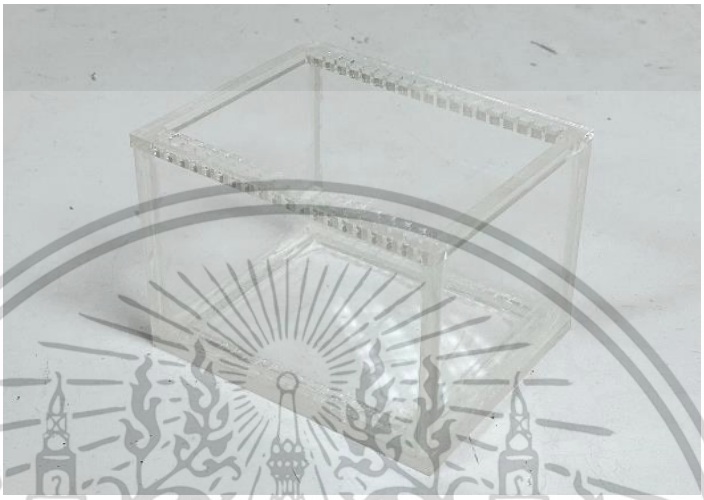
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาของการทดสอบในงานวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็นอุปกรณ์อิเล็กโทรลิซิส, สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งมีอุปกรณ์และเครื่องมือดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับอิเล็กโทรลิซิส

อิเล็กโทรลิซิสเซลล์ จัดทำอิเล็กโทรลิซิสเซลล์จากแผ่นอะคริลิคพลาสติกเนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับแผ่นขั้วไฟฟ้า มีขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรลิซิสเซลล์

แหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง (Power supply) ใช้เครื่องแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบหลายย่าน สามารถปรับแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0 ถึง 36 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 360 วัตต์ ยี่ห้อ GW INSTEK รุ่น PSW 30-36 ของบริษัท Good Will Instrument Co., Ltd แสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ใช้เครื่องยี่ห้อ DDS Function Generator รุ่น SG1003 ของบริษัท MCP lab electronics แสดงดังรูปที่ 3.4

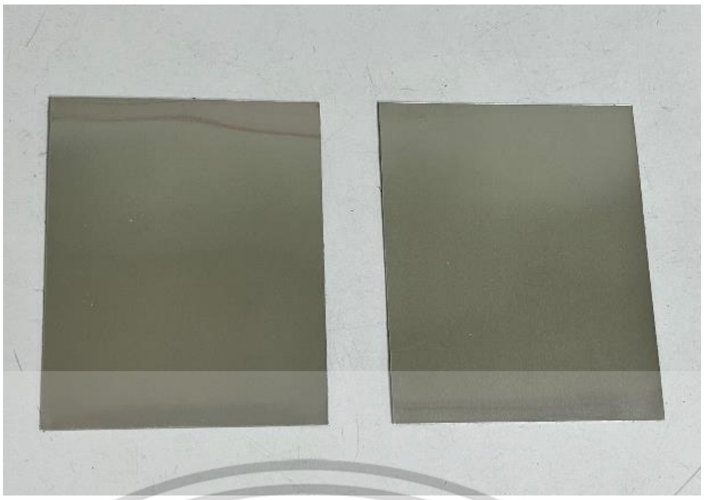
รูปที่ 3.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

โมดูล Mosfet D4184 สำหรับประกอบเป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 โมดูล Mosfet D4184

แผ่นอะลูมิเนียม สำหรับทำขั้วไฟฟ้าใช้อะลูมิเนียม 1100 ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ มีความกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร หนา 0.05 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผ่นอะลูมิเนียม

3.1.2 สารเคมีสำหรับการทดลอง

โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ยี่ห้อ Merck บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี แสดงดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 สารโพแทสเซียมไนเตรต

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ใช้เป็นเครื่องยี่ห้อ Keysight รุ่น DSO-X 2012A ของบริษัท Keysight Technologies แสดงดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 ออสซิลโลสโคป

เครื่องวัดความเข้มแสงหรือโฟโตมิเตอร์ (Photometer) สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารในงานวิจัยใช้เครื่องยี่ห้อ Hanna รุ่น HI83306 Environmental Analysis Photometer ของบริษัท Hanna Instruments (Thailand) Ltd. แสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความเข้มแสงหรือโฟโตมิเตอร์

เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) สำหรับการวัดค่ากระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัย ใช้เครื่องยี่ห้อ Keithley รุ่น 2100 Series ของบริษัท Keithley Instruments, Inc. แสดงดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงหรือสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารในงานวิจัยใช้เครื่องยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2600 UV-VIS spectrophotometer ของบริษัท Shimadzu Corporation

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันหรือการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab ของบริษัท Rigaku Corporation

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 ของประเทศอเมริกา

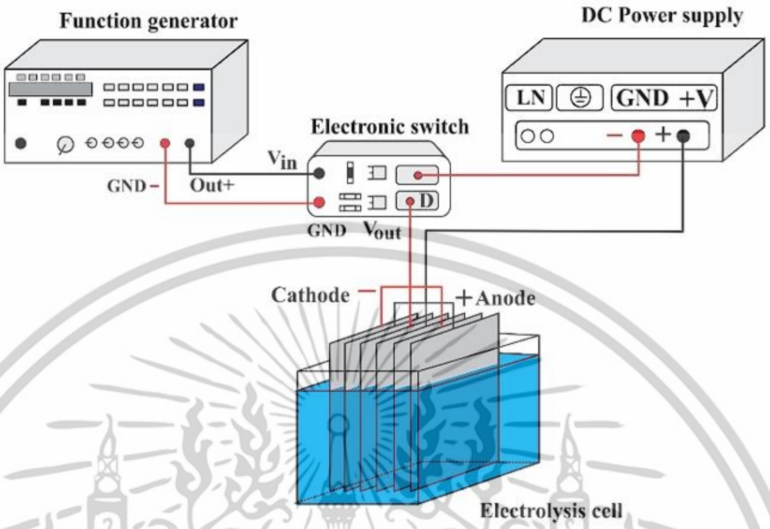
เครื่องชั่งไฟฟ้า เป็นเครื่องชั่งที่สามารถอ่านค่าน้ำหนักความละเอียดได้จุดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius

3.2 การเตรียมกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสสำหรับการทดลอง

ในการเตรียมกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสสำหรับการทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply), เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function generator), วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic switch circuit), ขั้วไฟฟ้า (Electrode) และเซลล์อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis cell) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของระบบ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบอิเล็กโทรลิซิส โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจะถูกส่งผ่านวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการแปลงสัญญาณกระแสตรงให้เป็นสัญญาณพัลส์ ความถี่และความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ได้ถูกควบคุมโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชัน (Function generator) เพื่อให้ได้ลักษณะของสัญญาณที่เหมาะสมกับการทดลอง จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ผ่านการปรับแต่งแล้วจะถูกส่งไปยังเซลล์อิเล็กโทรลิซิส ภายในเซลล์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 3 คู่ ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนดและแคโทดที่ทำจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99% ขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นมีขนาด 8 × 10 ตารางเซนติเมตร และมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นถูกจัดเรียงในลักษณะที่มีระยะห่างระหว่างกัน 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.11

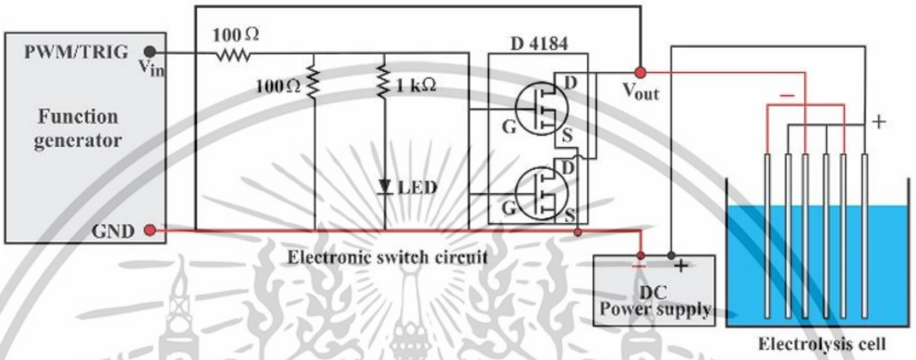


รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมระบบอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

กระบวนการทำงานเริ่มต้นโดยการเชื่อมต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้ากับขั้วแอโนดของเซลล์อิเล็กโทรลิซิส ขณะที่ขั้วแคโทดของเซลล์อิเล็กโทรลิซิสถูกเชื่อมต่อกับขั้ว Drain (D) ของโมดูล MOSFET D4184 และขั้ว Source (S) ของ MOSFET ถูกเชื่อมต่อกับกราวด์ของระบบ เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชันถูกใช้เพื่อควบคุมกลไกการเปิด-ปิดของ MOSFET โดยส่งสัญญาณพัลส์ความกว้างแบบปรับค่าได้ (Pulse-Width Modulation: PWM) ไปยังขั้ว Gate (G) ของ MOSFET เพื่อให้วงจรทำงานอย่างเสถียร ตัวต้านทานขนาด 100 โอห์มถูกเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับขั้ว Gate เพื่อควบคุมกระแสที่ไหลเข้าสู่ขั้วนี้ ซึ่งช่วยป้องกันกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปซึ่งอาจทำให้ MOSFET เสียหาย และลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนในสัญญาณ PWM จากแผนผังวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.12 มีการใช้ MOSFET จำนวน 2 ตัวในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังเซลล์อิเล็กโทรลิซิส เครื่องกำเนิดสัญญาณฟังก์ชันทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณ PWM ซึ่งเป็นตัวกำหนดสถานะการทำงานของ MOSFETs เมื่อสัญญาณ PWM อยู่ในสถานะสูง (High State) MOSFETs จะถูกเปิดใช้งาน ทำให้วงจรสมบูรณ์และกระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรลิซิส ในทางกลับกัน เมื่อสัญญาณ PWM อยู่ในสถานะต่ำ (Low State) MOSFETs จะหยุดการทำงาน ส่งผลให้วงจรถูกตัดและกระแสไฟฟ้าหยุดไหล กลไกการเปิด-ปิดของ MOSFET ที่ถูกควบคุมโดยสัญญาณ PWM นี้ ทำให้กระแสที่เข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรลิซิสมีลักษณะเป็นพัลส์ (Pulsed Current) ซึ่งมีข้อได้เปรียบอย่างมากในด้านประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงาน โดยการเปิด-ปิดกระแสเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วง ๆ ลักษณะของกระแสพัลส์ช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระแสตรงแบบต่อเนื่อง (Continuous DC) นอกจากนี้ การไหลของกระแสในลักษณะพัลส์ยังช่วยให้ไอออนภายในเซลล์อิเล็กโทรลิซิสกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ลดความเสี่ยงของความร้อนสะสมที่อิเล็กโทรด และช่วยลดการสึกหรอที่ไม่สมดุลของขั้วไฟฟ้า ด้วยการออกแบบที่คำนึงถึงประสิทธิภาพและความทนทานของวัสดุอิเล็กโทรด ระบบนี้จึงช่วยให้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด พร้อมทั้งลดการใช้พลังงานให้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.12 วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การกำจัดไนเตรตในแหล่งน้ำเสีย โดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ซึ่งเพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำและลดปัจจัยรบกวนที่อาจเกิดจากสารแขวนลอยและการปนเปื้อนของสารประกอบอื่น ๆ ในน้ำเสียจริง เช่น ฟอสฟอรัส จึงมีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ขึ้นมาใช้แทน น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกเตรียมโดยใช้สารโพแทสเซียมไนเตรตน้ำหนัก 0.1647 กรัม ซึ่งคำนวณจากสมการทางเคมีเพื่อให้ได้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้น สารโพแทสเซียมไนเตรตที่ชั่งน้ำหนักได้จะถูกละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบสม่ำเสมอและมีค่าความเข้มข้นไนเตรตตามที่กำหนดในการทดลองนอกจากนี้ การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นไนเตรตที่กำหนดไว้อย่างแม่นยำยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสในการกำจัดไนเตรตได้อย่างชัดเจน

ถ้าปริมาณค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ได้จากการเตรียมสูงกว่าค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ในงานวิจัย ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดค่าความเข้มข้นของไนเตรตไว้ประมาณ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องนำน้ำเสียสังเคราะห์นั้นมาทำการเจือจางด้วยการผสมน้ำปราศจากไอออนเข้าไปให้ได้ตามปริมาณที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1V_1 = C_2V_2 \tag{3.1}$$

เมื่อ C_1 คือค่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

C_2 คือค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

V_1 คือปริมาตรของสารละลายที่ต้องปิเปตมา

V_2 คือปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

นอกจากนี้การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไนเตรต 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องเตรียมสารโพแทสเซียมไนเตรต 0.0371 กรัม ซึ่งจะได้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใช้ในการทดสอบได้เพียงครั้งเดียว เนื่องจากการทดสอบหนึ่งครั้งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แต่ถ้าค่าความเข้มข้นไนเตรตที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร เมื่อเจือจางให้ได้ค่าความเข้มข้นของไนเตรต 46 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 2,222 มิลลิลิตร ใช้ในการทดสอบได้ประมาณสี่ครั้งทำให้ช่วยลดเวลาในเตรียมสารน้ำเสียสังเคราะห์เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยต้องมีการทดสอบซ้ำหลายครั้ง ซึ่งขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนไนเตรต

1. เตรียมสารโพแทสเซียมไนเตรตโดยการใช้เครื่องชั่งวิทยาศาสตร์ชั่งสารเคมีให้ได้ปริมาณ 0.1647 กรัม เตรียมใส่ในแก้วบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. เทน้ำปราศจากไอออนเพื่อทำละลายสารโพแทสเซียมไนเตรตในแก้วบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่เตรียมไว้ ให้ได้น้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ซึ่งได้น้ำสังเคราะห์ไนเตรต

3. เทน้ำสังเคราะห์ไนเตรตจากแก้วบีกเกอร์ถ่ายลงสู่ขวดกำหนดปริมาตร (Volumetric flask) 1,000 มิลลิลิตร และควรใช้น้ำปราศจากไอออนทำเป็นตัวทำละลายล้างแก้วบีกเกอร์แล้วเทใส่ขวดกำหนดปริมาตรด้วย เนื่องจากอาจมีสารบางส่วนที่ติดอยู่บริเวณผนังของแก้วบีกเกอร์

4. ทำการปรับปริมาตรน้ำด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ตามขีดบอกปริมาณจากขวดปรับปริมาตร โดยให้ส่วนโค้งล่างของระดับปริมาณน้ำปราศจากไอออนอยู่บริเวณขีดให้ระดับสายตา ซึ่งได้น้ำสังเคราะห์ไนเตรตค่าความเข้มข้นไนเตรตที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร

5. ทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน 1,222 มิลลิลิตร โดยคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องใช้จากสมการที่ 3.1 ทำให้ได้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนไนเตรตที่ค่าความเข้มข้นไนเตรตเท่ากับ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 2,222 มิลลิลิตร

6. นำน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนไนเตรตเติมในขวดเก็บสารเคมี (Reagent bottle) เพื่อเก็บไว้สำหรับการทดสอบต่อไป

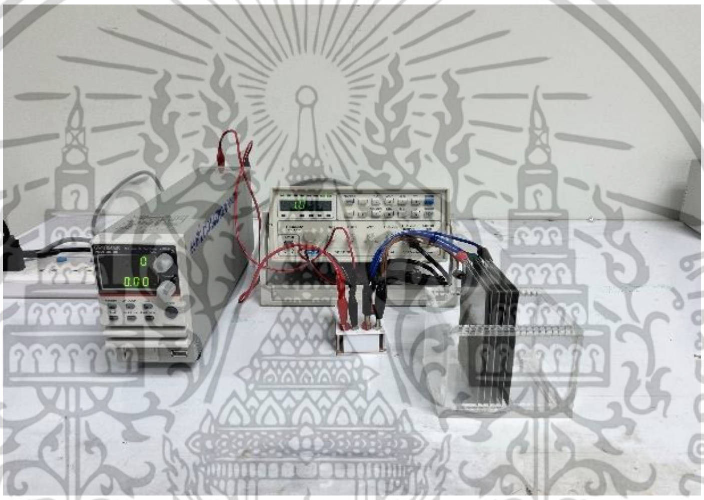
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการการทดสอบ

จากการทดสอบการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสและขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม โดยผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขที่จะทำการศึกษามีความกว้างพัลส์ 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ เปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดแบบกระแสตรง ในการทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนทำการทดสอบต้องนำแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาทำการชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกน้ำหนักก่อนผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส หลังจากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาประกอบกับอิเล็กโทรลิซิสเซลล์

2. ต่ออุปกรณ์แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดสัญญาณและวงจรควบคุมสำหรับสร้างพัลส์เข้ากับอิเล็กโทรลิซิสเซลล์ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ระบบอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้เทใส่อิเล็กโทรลิซิสเซลล์ควรระวังไม่ให้น้ำโดนบริเวณจุดเชื่อมต่อกับวงจร

4. กำหนดความกว้างพัลส์และความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในงานวิจัย มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ความกว้าง 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์
- แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ความกว้าง 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์
- แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ความกว้าง 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์
- แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ความกว้าง 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์
- แหล่งกำเนิดแบบกระแสตรง

5. เปิดสวิตช์ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและทำการจับเวลาในการกำจัดไนเตรต โดยงานวิจัยนี้กำหนดเวลาสิ้นสุดไว้ที่ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัดและนำน้ำที่ได้ไปทำการกรองเพื่อแยกตะกอนกับของเหลว ซึ่งเวลาที่จะทำการเก็บตัวอย่างมี 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที

7. เมื่อบำบัดครบตามกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ 3 ชั่วโมง ทำการปิดสวิตช์ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดสัญญาณ จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเช็ดให้แห้ง ส่วนตะกอนที่ได้ในข้อที่ 6 ให้ทำการอบให้แห้ง

8. น้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการบำบัดจะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อดูปริมาณของสารประกอบที่เหลืออยู่

9. นำแผ่นอะลูมิเนียมหลังจากการผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสมาชั่งน้ำหนักและนำไปวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สุดท้ายส่วนของตะกอนจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกและระบุชนิดของตะกอน

3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษา

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมด 2 ส่วนคือวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสและวิเคราะห์การสึกกรอนหรือสูญเสียน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

3.5.1 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำเสียสังเคราะห์

หลังจากทำการทดสอบครบตามเวลาที่กำหนด ผู้วิจัยจะทำการดูดน้ำเสียสังเคราะห์ขึ้นมาตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงเทใส่ที่กรองสารเพื่อแยกตะกอนกับของเหลว และเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ได้นำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารประกอบที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

3.5.2 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้ากับตะกอนที่เกิดขึ้น

หลังจากแยกตะกอนกับของเหลว ผู้วิจัยจะทำการนำตะกอนที่ได้เข้าเครื่องอบเพื่อให้ตะกอนนั้นแห้งสนิทซึ่งจะทำให้ได้เป็นผงตะกอนออกมา จากนั้นจึงทำการนำไปวัดโครงสร้างของตะกอนด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อระบุชนิดของตะกอนที่เกิดขึ้น ส่วนขั้วไฟฟ้านั้นจะทำการชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเพื่อหาค่าการสูญเสียน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ซึ่งจะศึกษาในเรื่องของประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าแบบพัลส์และศึกษาการสึกกรอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแบ่งการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ส่วนที่สองจะเป็นการการประเมินการสูญเสียหรือการสึกกรอนของขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจากการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ จากการทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์และอิเล็กโทรดอะลูมิเนียม ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ความเป็นไปได้ของการกำจัดไนเตรตโดยใช้อิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

4.1.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตโดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการวิเคราะห์นั้นใช้วิธีการสเปคโตรโฟโตเมตรี [28] เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารคำนวณหาปริมาณของสาร หลักการคือการให้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นเดียวค่าหนึ่งผ่านเข้าไปสู่สารตัวอย่าง ซึ่งแต่ละสารนั้นจะมีลักษณะในการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความเข้มข้นแสงที่แตกต่างกันสามารถนำค่ามาใช้เพื่อคำนวณหรือแปลงเป็นค่าปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในสารตัวอย่าง นอกจากนี้จากกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) กล่าวไว้ว่าแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวแสงนี้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนโดยจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเมื่อแสงถูกดูดกลืนไปแล้ว แต่ขึ้นอยู่กับความหนาของตัวกลาง ดังนั้นหากตัวกลางมีความหนาเท่ากันแสงที่ผ่านตัวกลางจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าความยาวคลื่นแสงที่ 218 นาโนเมตร อยู่ในช่วงของอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ของสเปกตรัมในการทดสอบเพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงของสารไนเตรตที่อยู่ในของเหลวและนำมาคำนวณกับสมการเชิงที่ได้จากการทำกราฟมาตรฐาน (Standard Curve) ซึ่งจะได้ค่าของปริมาณความเข้มข้นของสารไนเตรตที่อยู่ในของเหลวหลังจากการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยการทดสอบกำหนดค่าความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นที่ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.5 มิลลิแอมป์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 500 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการบำบัด 3 ชั่วโมง ในการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มีการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่มีแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

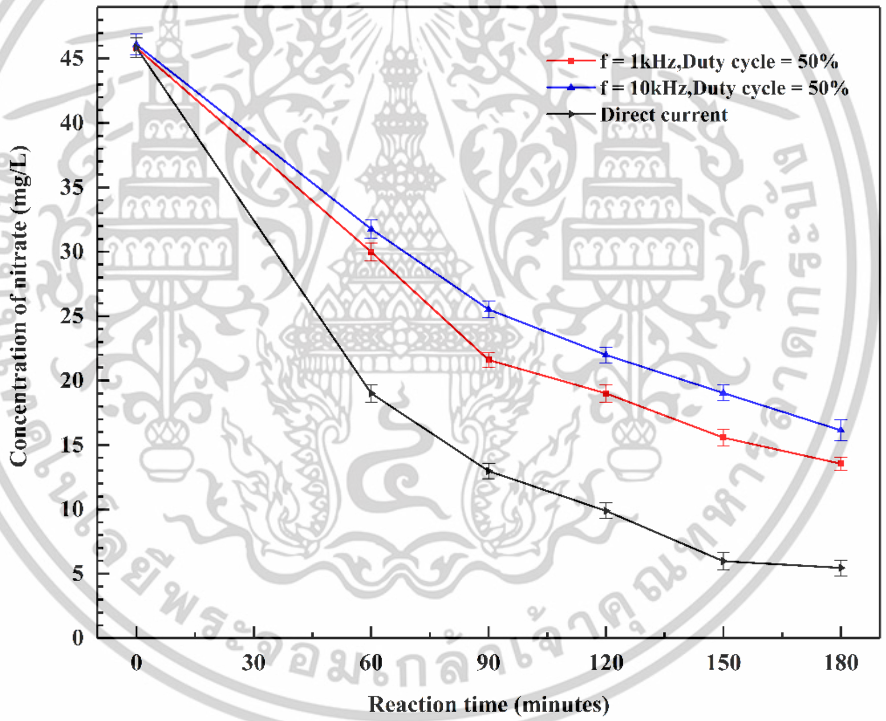
แบบพัลส์กับแบบกระแสตรงและหาเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพในการลดลงของไนเตรตมากที่สุดจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ ผู้วิจัยได้มีการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเริ่มต้นที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ เปรียบเทียบกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง ค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) [13]

$$R_{[NO_3^-]}(\%) = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t}{[NO_3^-]_0} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ $R_{[NO_3^-]}$ คือค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรต

$[NO_3^-]_0$ คือความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาเริ่มต้น

$[NO_3^-]_t$ คือความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาใด ๆ



รูปที่ 4.1 แผนภูมิความเข้มข้นของไนเตรตเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์

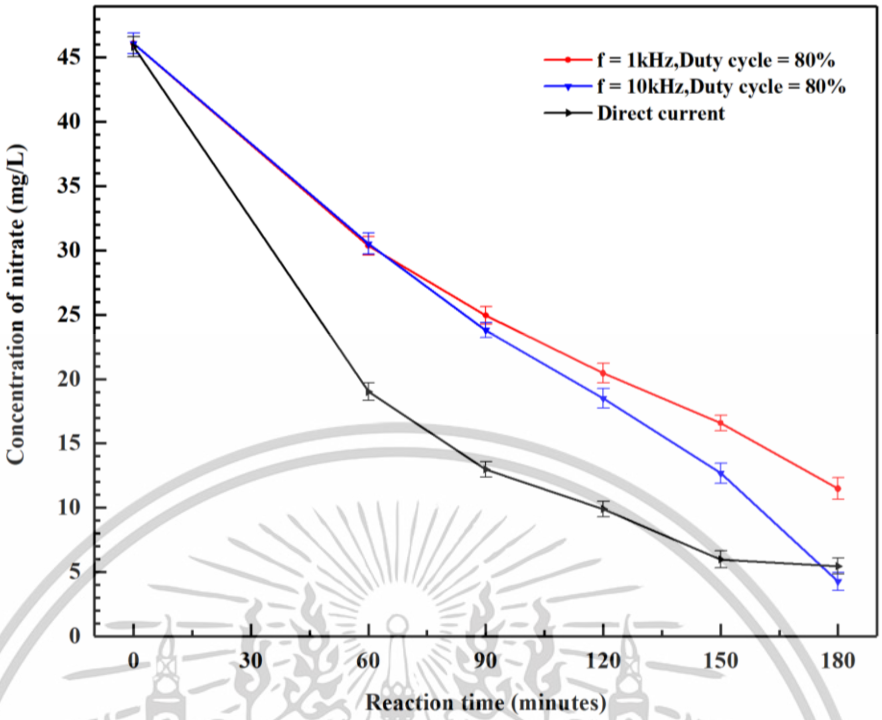
จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของไนเตรตกับเวลาที่ใช้ในการบำบัด สังเกตได้ว่าการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงในการลดไนเตรตมีประสิทธิภาพสูงในช่วงเวลาหนึ่งชั่วโมงแรก โดยสามารถลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นที่ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือเท่ากับ 19.016 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าอัตราการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที มีค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 58.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์แต่ละเงื่อนไขที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ จากค่าความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นเท่ากับ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านไปหนึ่งชั่วโมงสามารถลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตได้เท่ากับ 29.996 และ 31.760 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าอัตราการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 0.26 และ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที มีค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตคิดเป็นเท่ากับ 34.57 และ 31.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่หลังจากหนึ่งชั่วโมงผ่านไปกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 47.98 เปอร์เซ็นต์ จากค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 19.016 มิลลิกรัมต่อลิตร คงเหลือค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 9.892 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.18 และ 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่มากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 36.63 และ 30.76 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ลดลงจาก 29.996 และ 31.760 มิลลิกรัมต่อลิตร คงเหลือค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 19.007 และ 21.989 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเทียบค่าความเข้มข้นแล้วกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงสามารถลดค่าความเข้มข้นได้มากกว่า และสุดท้ายที่สามชั่วโมงกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงสามารถลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 5.456 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 44.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ แล้ว ค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ สามารถลดได้เท่ากับ 13.552 และ 16.143 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.09 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 28.70 และ 26.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงสามารถลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตได้มากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแหล่งจ่ายแบบกระแสตรงมีลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ขณะที่แหล่งจ่ายแบบพัลส์มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสลับระหว่างการเปิดและการปิด อย่างไรก็ตามกระแสตรงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากกว่า [22] ดังนั้นจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงทำการปรับเงื่อนไขการทดลองเพิ่มความกว้างพัลส์เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไนเตรตในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนภูมิความเข้มข้นของไนเตรตเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของไนเตรตกับเวลาที่ใช้ในการบำบัด โดยการทดลองใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่มีแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยได้ทำการปรับเงื่อนไขการทดลองจากความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของไนเตรตในการทดลอง พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อผ่านเวลาไปหนึ่งชั่วโมงมีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.26 และ 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 34.14 และ 33.41 เปอร์เซ็นต์ จากค่าความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นเท่ากับ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตได้เท่ากับ 30.355 และ 30.527 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากสองชั่วโมงผ่านไปกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.16 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 32.60 และ 39.37 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 20.458 และ 18.507 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไปสามชั่วโมงกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ลดลงเท่ากับ 0.15 และ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

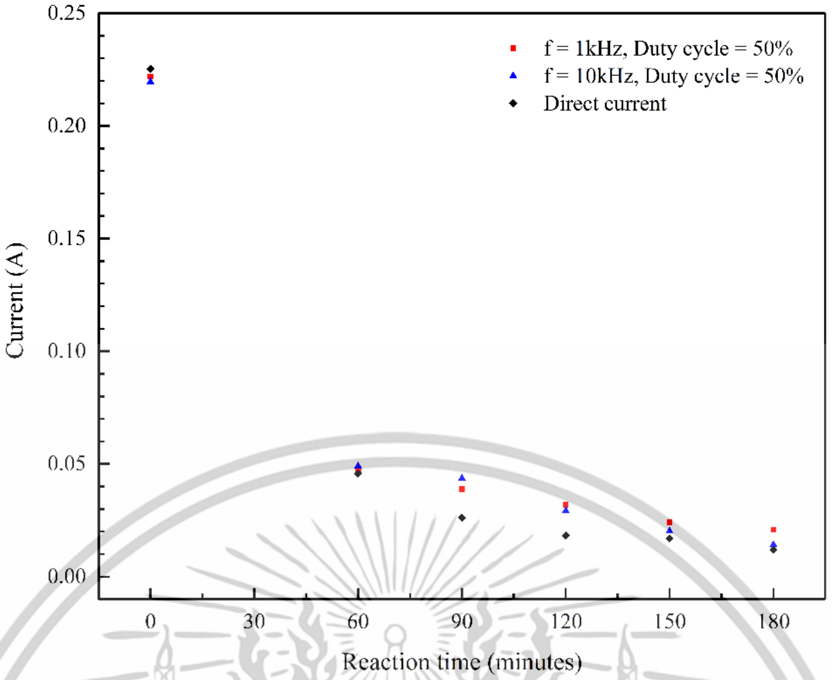
ต่อนาที คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 43.85 และ 76.95 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 11.487 และ 4.265 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพและอัตราการลดลงของไนเตรต

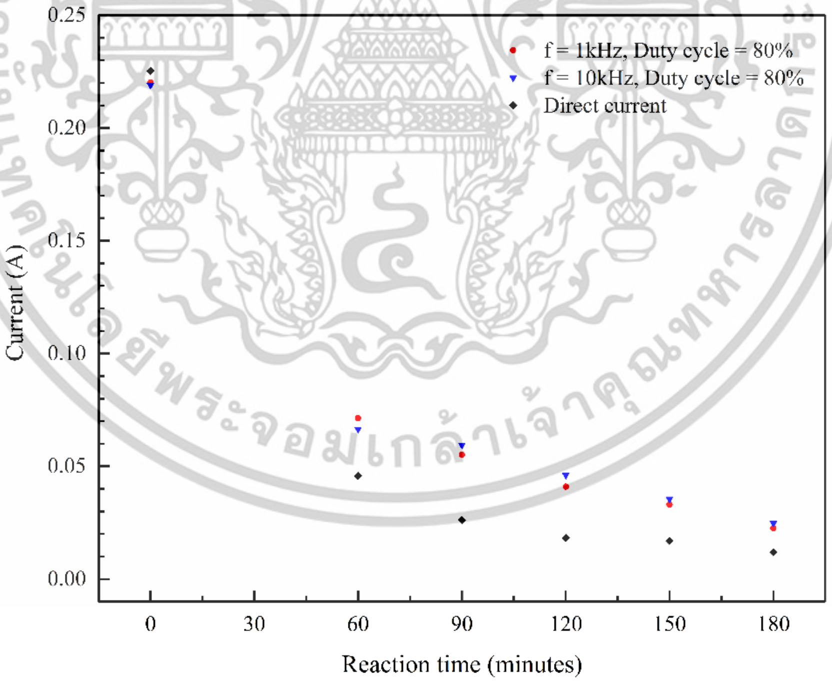
เงื่อนไขการทดสอบกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส			ค่าเฉลี่ยอัตราการลดลงของไนเตรต (mg/L/min)			ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการลดลงของไนเตรต (%)		
	ความกว้างพัลส์ (%)	ความถี่ (kHz)	0 - 1 ชั่วโมง	1 - 2 ชั่วโมง	2 - 3 ชั่วโมง	0 - 1 ชั่วโมง	1 - 2 ชั่วโมง	2 - 3 ชั่วโมง
แบบพัลส์	50	1	0.26	0.18	0.09	34.57	36.63	28.70
		10	0.24	0.16	0.10	31.09	30.76	26.59
	80	1	0.26	0.16	0.15	34.14	32.60	43.85
		10	0.26	0.20	0.24	33.41	39.37	76.95
แบบกระแสตรง			0.45	0.15	0.07	58.52	47.98	44.84

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เมื่อนำมาสรุปเป็นตารางที่ 4.1 พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบพัลส์ช่วงหนึ่งชั่วโมงแรกมีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่ค่อนข้างสูง แต่หลังจากหนึ่งชั่วโมงแรกค่าอัตราการลดลงของไนเตรตนั้นลดลงเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่ทำปฏิกิริยาในน้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสจะเกิดชั้นของขั้วประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวหรือการเกิดโพลาไรเซชันที่พื้นผิวสามารถเรียกปรากฏการณ์นี้ได้ว่าชั้นคู่ไฟฟ้าหรืออิเล็กทริคคอลดับเบิลเลเยอร์ (Electrical double layer, EDL) [4,34] การเกิดชั้นคู่ไฟฟ้าหรืออิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าลดลง จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะสังเกตได้ว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้านั้นลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส โดยพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีการลดลงของกระแสไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์การเกิดโพลาไรเซชันที่พื้นผิวของขั้วประจุไฟฟ้าที่เรียกว่าชั้นคู่ไฟฟ้าหรืออิเล็กทริกดับเบิลเลเยอร์ ในทางกลับกันการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์นั้นสามารถลดการเกิดชั้นคู่ไฟฟ้าในส่วนนี้ได้ สังเกตจากค่าอัตราการลดลงของไนเตรตที่เพิ่มขึ้นหลังจากหนึ่งชั่วโมงแรกและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์มีมากกว่าแบบกระแสตรง โดยสามารถอธิบายสาเหตุการที่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์นั้นสามารถลดการเกิดชั้นคู่ไฟฟ้าได้ ว่าเนื่องจากรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าแบบพัลส์มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างพัลส์ของช่วงเวลาการทำงานหรือเรียกว่าดิวตี้ ไซเคิล (Duty cycle) ซึ่งในช่วงเวลาของการเกิดขอบขาลงของสัญญาณจนถึงขอบขาขึ้นของสัญญาณจะเป็นช่วงที่ขั้วไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยหรือลดลงส่งผลให้ขั้วประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวที่เกาะอยู่หลุดออกจากขั้วไฟฟ้าแก้ไขปัญหาการเกิดชั้นคู่ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าจากการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสได้ [25,31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนภูมิปริมาณของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.4 แผนภูมิปริมาณของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ใช้เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80% และความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ สามารถลดความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำเสียได้อย่างมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพ โดยค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ผ่านการบำบัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ซึ่งกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน โดยเฉพาะแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทที่ต้องมีค่าความเข้มข้นของไนเตรตไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพของเงื่อนไขที่ใช้ความกว้างพัลส์ 80% และความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ เกิดจากความสามารถในการควบคุมการเกิดชั้นประจุไฟฟ้าคู่บริเวณขั้วไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทประจุที่ดีขึ้นและลดการเกิดพาสซิเวชัน (Passivation) ซึ่งอาจรบกวนกระบวนการรีดอกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ที่ต่ำกว่า เช่น 1 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งยังคงทำให้เกิดชั้นประจุไฟฟ้าคู่อยู่ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงหรือดีกว่ากระแสตรง นอกจากนี้การเพิ่มความถี่เกินกว่า 10 กิโลเฮิรตซ์ อาจทำให้ภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น แม้ว่ากระแสตรงจะสามารถลดไนเตรตได้ แต่ข้อเสียหลักของมันคือการเกิดพาสซิเวชันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าลดลงในระยะยาว ดังนั้น การใช้กระแสตรงแบบพัลส์ที่ความถี่และความกว้างพัลส์ที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในการลดความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำเสีย

4.1.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ไนไตรท์, แอมโมเนียและก๊าซไนโตรเจนที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์คือ ไนไตรท์ แอมโมเนียและก๊าซไนโตรเจน โดยใช้วิธีการสเปคโตรโฟโตเมตรีเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของไนเตรตจากหัวข้อ 4.1.1 วิธีการนี้เหมาะสำหรับการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างจากการดูดกลืนในช่วงของคลื่นแสงและคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างตามกฎของแลมเบิร์ต ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.5 แต่ในการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1.2 ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ไปในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการบำบัดแล้วเป็นเวลาสามชั่วโมง เพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์สุดท้ายจากการทดลองและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยในงานวิจัยมีการคำนวณค่าความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจน (Selectivity of nitrogen) จากสมการที่ (4.2) [13] เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพิ่มเติมสำหรับการหาข้อสรุปอีกด้วย

$$S_{N_2}(\%) = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t - [NO_2^-]_t - [NH_4^+]_t}{[NO_3^-]_0} \times 100\% \tag{4.2}$$

เมื่อ S_{N_2} คือค่าความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจน

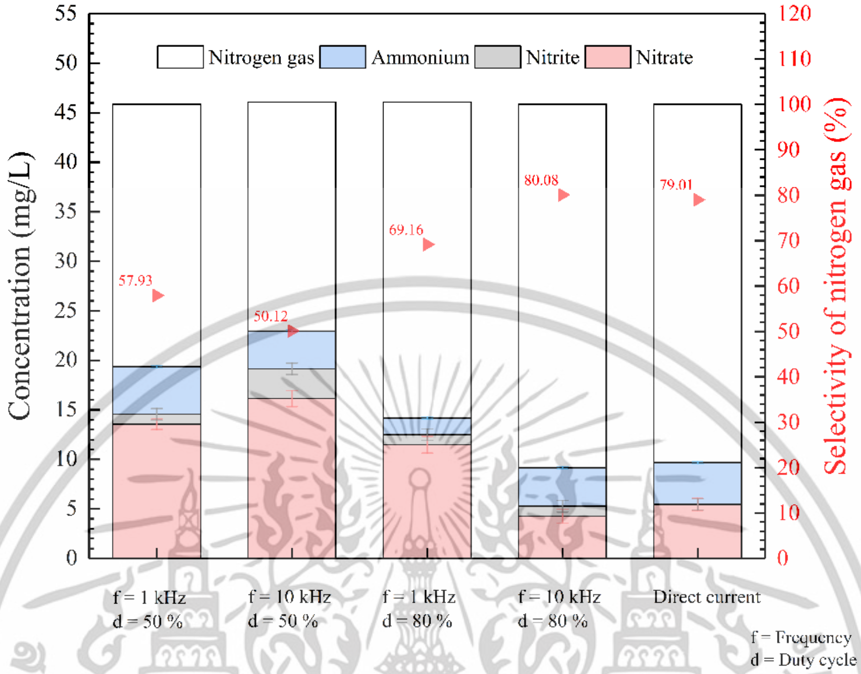
$[NO_3^-]_0$ คือความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาเริ่มต้น

$[NO_3^-]_t$ คือความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$[NO_2^-]_t$ คือความเข้มข้นของไนไตรท์ที่เวลาใด ๆ

$[NH_4^+]_t$ คือความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่เวลาใด ๆ



รูปที่ 4.5 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสและความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนกับเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงค่าความเข้มข้นของไนเตรต ไนไตรท์และแอมโมเนียมเปรียบเทียบกันแต่ละเงื่อนไขในการทดสอบบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส โดยผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบทั้งหมด 5 เงื่อนไขมีดังนี้ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ และกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง พบว่าหลังจากการทดสอบเป็นเวลาสามชั่วโมงค่าความเข้มข้นของไนเตรต, ไนไตรท์และแอมโมเนียมที่เหลืออยู่ในระบบบำบัดมีดังนี้ ที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์คือ 13.552, 1.0, 4.8 และ 26.49 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความกว้างพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ คือ 16.143, 3.0, 3.8 และ 23.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ คือ 11.487, 1.0, 1.7 และ 31.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ คือ 4.265, 1.0, 3.9 และ 36.68 มิลลิกรัมต่อลิตร เงื่อนไขสุดท้ายแหล่งจ่ายแบบกระแสตรงคือ 5.456, 0.0, 4.2 และ 36.19 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีประสิทธิภาพสูงในการลดความเข้มข้นของไนเตรต และในขณะเดียวกันกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ก็แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สูงในการลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตสูงเช่นกัน ซึ่งการใช้งานกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์นี้มีความโดดเด่นในการลดการใช้พลังงานเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่ได้ถูกจ่ายอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบสลับ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนี้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง [2] นอกจากนี้การวิเคราะห์เพิ่มเติมจากกราฟการเปลี่ยนรูปจากไนเตรตไปเป็นก๊าซไนโตรเจนเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างแหล่งจ่ายแบบกระแสตรงกับแบบพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนรูปจากไนเตรตไปเป็นก๊าซไนโตรเจนของแหล่งจ่ายแบบพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าค่าความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนใกล้เคียงกับแบบกระแสตรง โดยแบบพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ คือ 80.08 เปอร์เซ็นต์ และแบบกระแสตรงคือ 79.01 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1.2 พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงและกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีประสิทธิภาพที่สูงในการลดค่าความเข้มข้นของไนเตรตให้เหลือค่าความเข้มข้นได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำที่กำหนดไว้ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) และค่าความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนสูงในกระบวนการทดสอบของงานวิจัยนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในเรื่องของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงและแบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อประเมินความคุ้มค่าในแง่ของการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ที่ต้องการลดพลังงานที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส โดยการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกำจัดไนเตรตจะคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ (Energy consumption) จากสมการที่ (4.3) [37] จากการคำนวณพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีค่าพลังงานที่ใช้เท่ากับ 11.3 วัตต์ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม ซึ่งสูงกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ที่ใช้พลังงานเพียง 2.0 วัตต์ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม ความแตกต่างนี้ชี้ให้เห็นว่าแม้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงและแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ จะมีประสิทธิภาพสูงในการลดไนเตรตได้ใกล้เคียงกัน แต่การใช้พลังงานของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$EC_{Energy} = \frac{i \cdot t \cdot v \cdot \gamma^2}{\mathcal{v} \cdot (C_0 - C) \cdot 60} \quad (4.3)$$

เมื่อ EC_{Energy} คือค่าพลังงานที่ใช้

i คือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

v คือแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

γ คือดิวตี้ ไซเคิล

t คือเวลาที่ใช้ในการบำบัด

$\mathcal{v}$ คือปริมาณน้ำเสีย

C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของไนเตรต

C คือความเข้มข้นหลังการบำบัดของไนเตรต

4.2 การประเมินการสูญเสียแอโนดอะลูมิเนียมและการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

การกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนั้นจะเกิดการสูญเสียของขั้วไฟฟ้าแอโนด เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยทั่วไปเป็นกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในสารละลายคือ กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านในสารละลายจากขั้วไฟฟ้าที่เป็นแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าที่เป็นแคโทดระหว่างการส่งผ่านของกระแสไฟฟ้านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะอนุภาคในสารละลายเช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและรีดักชั่น ซึ่งกระบวนการออกซิเดชั่นที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดนั้นทำให้มีการเสื่อมสภาพของพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าคืออะลูมิเนียม ดังนั้นตามทฤษฎีทางเคมีแล้วอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าควรที่จะถูกออกซิไดซ์ทางเคมีไฟฟ้าได้ผลลัพธ์เป็นอะลูมิเนียมไอออน Al^{3+} ตามสมการที่ (4.4) [13,23] และในทางทฤษฎีอะลูมิเนียมไอออนที่ถูกออกซิไดซ์นั้นมีโอกาสที่จะเกิดการทำปฏิกิริยาภายในระบบอิเล็กโทรลิซิสกับไฮดรอกไซด์ไอออน OH^- ตามสมการที่ (4.5) [3] ทำให้เกิดตะกอนภายในระบบอิเล็กโทรลิซิส

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^- \quad (4.4)$$

$$Al^{3+} + 3OH^- \Leftrightarrow Al(OH)_3 \quad (4.5)$$

จากผลลัพธ์นั้นในระยะยาวอาจทำให้การทำงานของแอโนดและประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตลดลงได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการวิเคราะห์ในส่วนของการสูญเสียของขั้วไฟฟ้าแอโนดอะลูมิเนียมและตะกอนที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบการกำจัดไนเตรตด้วยขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมติดต่อกันเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงกับแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การวิเคราะห์การสูญเสียแอโนดอะลูมิเนียม

ในการทดสอบผู้วิจัยได้นำแผ่นอะลูมิเนียมที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามาทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งวิทยาศาสตร์ก่อนและหลังจากการบำบัด เพื่อจะวิเคราะห์ในเรื่องของการสูญเสียขั้วไฟฟ้าแอโนดทางกายภาพ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยจากผลการทดสอบพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการบำบัดเท่ากับ 0.0801 กรัม คิดเป็น 0.8 เปอร์เซ็นต์ จากน้ำหนักของแผ่นอะลูมิเนียมก่อนการบำบัด ส่วนกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการบำบัดเท่ากับ 0.1469 กรัม คิดเป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากการวิเคราะห์การสูญเสียทางกายภาพด้วยการชั่งน้ำหนักแล้ว ได้มีการคำนวณค่าการสูญเสียอิเล็กโทรด (Electrode consumption) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.6) [9] มาทำการวิเคราะห์การสูญเสียขั้วไฟฟ้าแอโนด พบว่าค่าการสูญเสียอิเล็กโทรดของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่เงื่อนไขความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ เท่ากับ 0.0830 กรัม ส่วนกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงเท่ากับ 0.1510 กรัม ซึ่งเมื่อนำค่าการสูญเสียขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ได้จากการชั่งน้ำหนักมาเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียอิเล็กโทรดทางทฤษฎีพบว่าผลลัพธ์มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงมีการสูญเสียของขั้วไฟฟ้าแอโนดมากกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

$$EC_{Electrode} = \frac{i \cdot t \cdot M}{z \cdot F \cdot v} \tag{4.6}$$

เมื่อ $EC_{Electrode}$ คือค่าการสูญเสียอิเล็กโทรด

i คือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

t คือเวลาที่ใช้ในการบำบัด

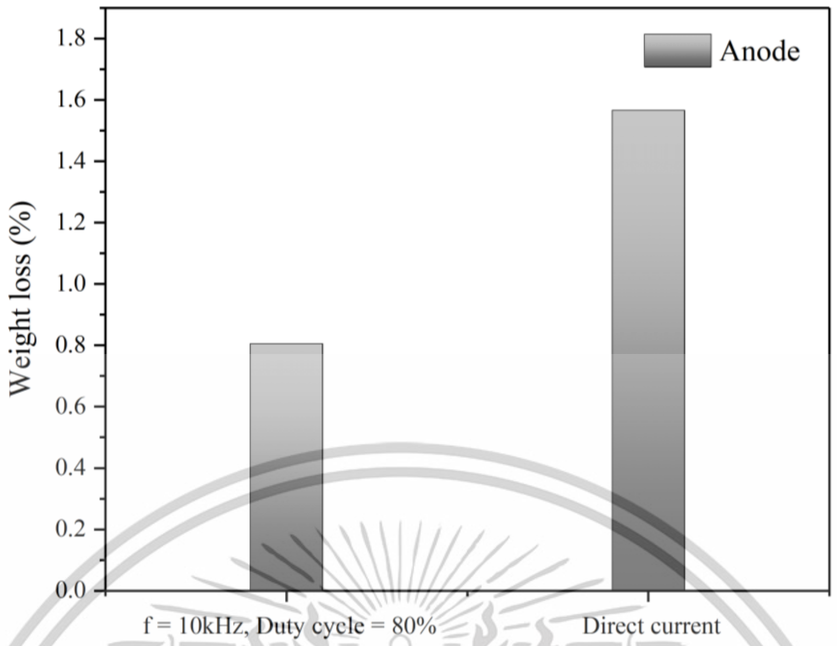
M คือมวลโมเลกุล

z คือเลขจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายโอน (The number of electrons transferred)

F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant)

v คือปริมาณน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



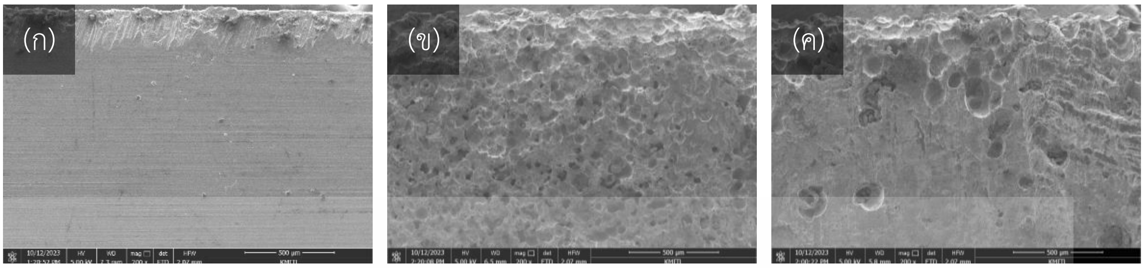
รูปที่ 4.6 ผลการสึกกรอนของอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมของระบบบำบัดไนเตรตแบบพัลส์กับกระแสตรง

4.2.2 การวิเคราะห์พื้นผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดอะลูมิเนียม

จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์การสูญเสียแอโนดอะลูมิเนียม ผู้วิจัยได้มีการนำแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดอะลูมิเนียมที่ได้หลังจากการบำบัดมาวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิง (Scanning Electron Microscopy: SEM) ซึ่งช่วยให้สามารถศึกษารายละเอียดของพื้นผิวตัวอย่างได้ โดยการวิเคราะห์ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าพื้นผิวของขั้วแอโนดอะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนหลังจากผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ในกรณีของอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ พบว่าการกัดกร่อนปรากฏในลักษณะของหลุมขนาดใหญ่ที่กระจายตัวในปริมาณน้อยบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ค) ลักษณะดังกล่าวเกิดจากการจ่ายกระแสเป็นช่วง ๆ ซึ่งในช่วงที่กระแสหยุดจ่าย (off-period) ชั้นประจุไฟฟ้าคู่ (Electric Double Layer: EDL) มีโอกาสกลับคืนสู่สมดุล ส่งผลให้เมื่อกระแสถูกจ่ายอีกครั้ง (on-period) กระแสไฟฟ้ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างสมดุล ในทางตรงกันข้าม อิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในลักษณะของหลุมขนาดเล็กจำนวนมากบนพื้นผิวขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข) การจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการสะสมของไอออนและสารเคมีที่บริเวณขั้วแอโนด ซึ่งนำไปสู่การเกิดชั้นประจุไฟฟ้าคู่ที่มีความเข้มข้นสูง (concentrated EDL) ส่งผลให้การกระจายตัวของกระแสไม่สม่ำเสมอและทำให้การกัดกร่อนรุนแรงเฉพาะจุด ดังนั้น อิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์จึงมีข้อได้เปรียบในการลดการกัดกร่อนที่ไม่สม่ำเสมอของขั้วแอโนดอะลูมิเนียม เนื่องจากสามารถควบคุมสมดุลของชั้นประจุไฟฟ้าคู่ได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรง ซึ่งช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าและทำให้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสมีประสิทธิภาพมากขึ้น



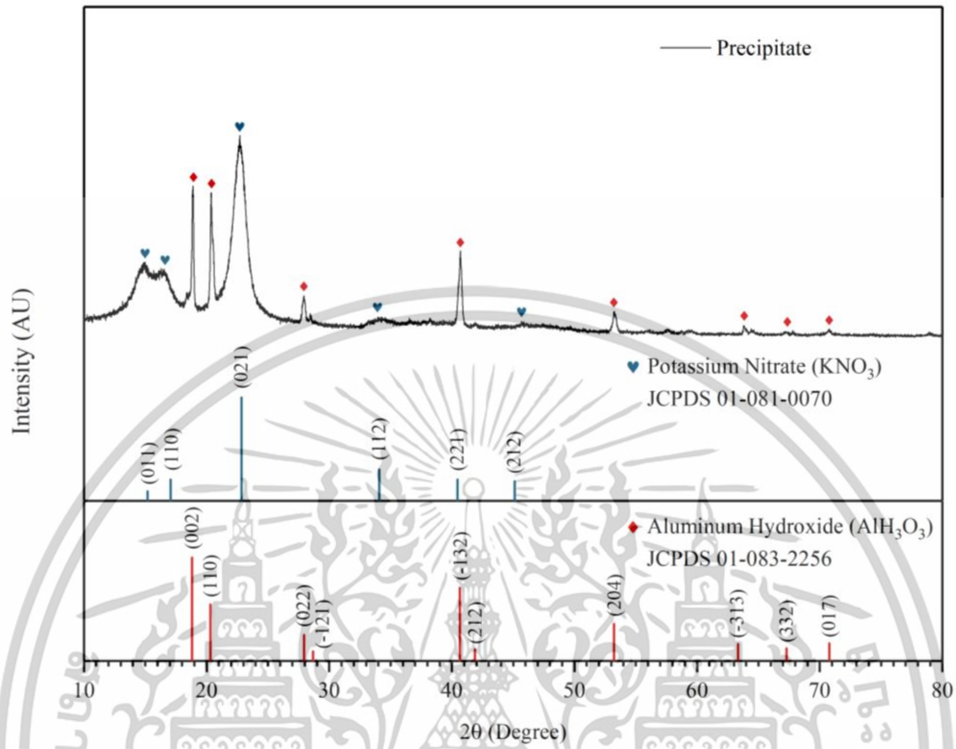
รูปที่ 4.7 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) ของแผ่นอิเล็กโทรด กำลังขยาย 200 เท่า (ก) ก่อนกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (ข) หลังกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง (ค) หลังกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์

4.2.3 การวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์และขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม หลังจากการทดสอบนั้นเกิดตะกอนขึ้นภายในระบบบำบัดตะกอนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันหรือวิธีการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นการอาศัยหลักการการตกกระทบของรังสีเอ็กซ์บนพื้นผิวสารตัวอย่างแล้วเกิดการกระเจิงและเลี้ยวเบน ซึ่งมุมในการเลี้ยวเบนนั้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกและระนาบ โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารตัวอย่างแต่ละชนิดนั้นมีการเลี้ยวเบนที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นจากวิธีการนี้จึงสามารถนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลเส้นเลี้ยวเบนมาตรฐานของสารชนิดต่าง ๆที่มีอยู่จากฐานข้อมูลมาตรฐาน (Joint Committee Powder Diffraction Society : JCPDS) เพื่อระบุโครงสร้างของสารประกอบและตรวจสอบหาชนิด โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดมุม 2θ ตั้งแต่มุม 10° ถึง 80° ใช้ความเร็วของการตรวจวัดเท่ากับ 10.00 องศา/นาที ความละเอียดของการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.01° พบว่าจากการวิเคราะห์โครงสร้างของตะกอนมีลักษณะเฉพาะของโครงสร้างออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) ซึ่งแสดงพีคของระนาบ (011), (110), (021), (112) และ (212) ที่มุมการเลี้ยวเบน 15.2°, 17.1°, 22.8°, 34.1° และ 45.1° ตามลำดับ มีความสอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบพีคกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-081-0070 นอกจากนั้นแล้วจากการวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่ายังมีลักษณะเฉพาะของโครงสร้างโมโนคลินิก (Monoclinic) ที่แสดงพีคของระนาบ (002), (110), (022), (-132), (204), (-313), (332) และ (017) ที่มุมการเลี้ยวเบน 18.8°, 20.3°, 27.9°, 40.7°, 53.2°, 63.3°, 67.3° และ 70.8° ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบพีคกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-083-2256 แสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนั้นเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างของตะกอนแล้ว ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่าตะกอนที่เกิดขึ้นมีส่วนผสมของโพแทสเซียมไนเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KNO_3 และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ *$Al(OH)_3$* ปะปนกันอยู่ เนื่องจากโครงสร้างของตะกอนแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบผสมระหว่างโครงสร้างออร์โธรอมบิกและโครงสร้างโมโนคลินิก



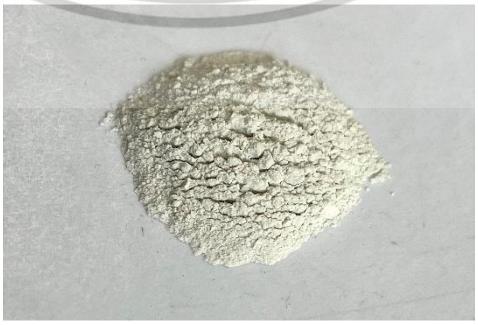
รูปที่ 4.8 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer) ของตะกอนจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าแบบพัลส์และการสึกกรอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากการใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ โดยการทดสอบกำจัดไนเตรตที่มีค่าความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นเท่ากับ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 500 มิลลิลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5.5 มิลลิแอมป์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตได้ดีและสรุปได้ว่าเงื่อนไขของพัลส์ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไนเตรตที่ใช้เวลาในการบำบัด 3 ชั่วโมง จากงานวิจัยนี้คือที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าอัตราการลดลงของไนเตรตเท่ากับ 90.73 เปอร์เซ็นต์ ค่าความสามารถของกระบวนการในการกำจัดก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 80.08 เปอร์เซ็นต์ และพลังงานที่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ใช้ในการกำจัดไนเตรตเท่ากับ 0.0020 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม ซึ่งน้อยกว่าการใช้พลังงานของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรงที่มีการใช้พลังงานในการกำจัดไนเตรตเท่ากับ 0.0113 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ที่ความกว้างพัลส์ 80 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีการสึกกรอนหรือสูญเสียของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่น้อยกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบกระแสตรง นอกจากนี้ตะกอนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 5.1 พบว่ามีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบผสมระหว่างออร์โธรอมบิกและโมโนคลินิก ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าตะกอนที่เกิดขึ้นมีโพแทสเซียมไนเตรต KNO_3 ที่เกิดจากการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไนเตรตด้วยสารโพแทสเซียมไนเตรต และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ที่เกิดจากอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยาภายในอิเล็กโทรลิซิสเซลล์ ซึ่งตะกอนแหล่งนี้สามารถกรองออกจากน้ำได้



รูปที่ 5.1 ตะกอนที่เกิดขึ้นในอิเล็กโทรลิซิสเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการกำจัดไนเตรตในน้ำสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสแบบพัลส์ พบว่าควรมีการขยายการศึกษาไปยังน้ำเสียจริงจากแหล่งชุมชน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการภายใต้สภาวะการใช้งานจริง ซึ่งอาจมีองค์ประกอบที่หลากหลายและซับซ้อนมากขึ้น เช่น ความผันแปรของความเข้มข้นไนเตรตตามฤดูกาล การมีอยู่ของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์อื่น ๆ ตะกอนแขวนลอย รวมถึงอุณหภูมิและค่า pH ของน้ำเสีย ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสในการลดไนเตรต

นอกจากนี้ควรให้ความสำคัญกับการศึกษาลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรด โดยเฉพาะในช่วงที่เกิดชั้นประจุไฟฟ้าคู่ ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่เหมาะสมเช่น Na_2SO_4 หรือ NaCl เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าในระบบก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยให้กระแสสามารถไหลผ่านได้สม่ำเสมอในเซลล์อิเล็กโทรลิซิส โดยเฉพาะในช่วงท้ายของกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบ เช่น แอมโมเนียเป็นไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ahmed, S.F., et al., *Threats, challenges and sustainable conservation strategies for freshwater biodiversity.* Environmental Research, 2022. **214**: p. 113808.

[2] Atkins, A.P. and A.J.J. Lennox, *Application of pulsed electrolysis in organic electrosynthesis.* Current Opinion in Electrochemistry, 2024. **44**: p. 101441.

[3] AlJaberi, F.Y., *Operating cost analysis of a concentric aluminum tubes electrodes electrocoagulation reactor.* Heliyon, 2019. **5**(8).

[4] Bergmann, E. and M. Voïnov, *Extension of the Gouy-Chapman double-layer theory to the interface between a liquid and a solid electrolyte.* Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, 1976. 67(2): p. 145-154.

[5] Chen, Y., et al., *Identification of point and nonpoint emission sources of neonicotinoid pollution in regional surface water.* Water Research, 2024. **248**: p. 120863.

[6] Dahlén, J., et al., *Determination of nitrate and other water quality parameters in groundwater from UV/Vis spectra employing partial least squares regression.* Chemosphere, 2000. **40**(1): p. 71-77.

[7] Demir, N., M.F. Kaya, and M.S. Albawabiji, *Effect of pulse potential on alkaline water electrolysis performance.* International Journal of Hydrogen Energy, 2018. **43**(36): p. 17013-17020.

[8] Focht, D.D. and A.C. Chang, *Nitrification and Denitrification Processes Related to Waste Water Treatment*, in *Advances in Applied Microbiology*, D. Perlman, Editor. 1975, Academic Press. p. 153-186.

[9] Gatsios, E., J.N. Hahladakis, and E. Gidarakos, *Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals.* Journal of Environmental Management, 2015. **154**: p. 117-127.

[10] Georgantas, D.A. and H.P. Grigoropoulou, *Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide.* Journal of Colloid and Interface Science, 2007. **315**(1): p. 70-79.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[11] Ghafari, S., M. Hasan, and M.K. Aroua, *Bio-electrochemical removal of nitrate from water and wastewater—A review.* Bioresource Technology, 2008. **99**(10): p. 3965-3974.

[12] Govindan, K., M. Noel, and R. Mohan, *Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches.* Journal of Water Process Engineering, 2015. **6**: p. 58-63.

[13] Guo, M., et al., *Electrochemical simultaneous denitrification and removal of phosphorus from the effluent of a municipal wastewater treatment plant using cheap metal electrodes.* Environmental Science: Water Research & Technology, 2020. **6**(4): p. 1095-1105.

[14] Han, W., Y. Tian, and X. Shen, *Human exposure to neonicotinoid insecticides and the evaluation of their potential toxicity: An overview.* Chemosphere, 2018. **192**: p. 59-65.

[15] Hariri, M.B. and G.G. Botte, *Simultaneous Removal of Ammonia and Nitrate from Wastewater Using a Pulse Electrolysis Technique.* Journal of The Electrochemical Society, 2023. **170**(5): p. 053502.

[16] Kim, K.-W., et al., *Electrochemical conversion characteristics of ammonia to nitrogen.* Water Research, 2006. **40**(7): p. 1431-1441.

[17] Koparal, A.S. and Ü.B. Öğütveren, *Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation.* Journal of Hazardous Materials, 2002. **89**(1): p. 83-94.

[18] Lacasa, E., et al., *Removal of nitrates by electrolysis in non-chloride media: Effect of the anode material.* Separation and Purification Technology, 2011. **80**(3): p. 592-599.

[19] Li, M., et al., *Simultaneous reduction of nitrate and oxidation of by-products using electrochemical method.* Journal of Hazardous Materials, 2009. **171**(1): p. 724-730.

[20] Li, S., et al., *Reduction of nitrogen and phosphorus loading from polluted sediment by electrolysis.* Ecological Engineering, 2021. **159**: p. 106088.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[21] Martínez-Villafañe, J.F., C. Montero-Ocampo, and A.M. García-Lara, *Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water.* Journal of Hazardous Materials, 2009. **172**(2): p. 1617-1622.

[22] Mazloomi, S.K. and N. Sulaiman, *Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 4257-4263.

[23] Mouedhen, G., et al., *Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process.* Journal of Hazardous Materials, 2008. **150**(1): p. 124-135.

[24] Mousavi, S., et al., *Development of nitrate elimination by autohydrogenotrophic bacteria in bio-electrochemical reactors – A review.* Biochemical Engineering Journal, 2012. **67**: p. 251-264.

[25] Olmstead, M.L. and R.S. Nicholson, *Influence of double-layer charging in chronopotentiometry.* The Journal of Physical Chemistry, 1968. **72**(5): p. 1650-1656.

[26] Palahouane, B., et al., *Cost-effective electrocoagulation process for the remediation of fluoride from pretreated photovoltaic wastewater.* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. **22**: p. 127-131.

[27] Polatides, C., M. Dortsiou, and G. Kyriacou, *Electrochemical removal of nitrate ion from aqueous solution by pulsing potential electrolysis.* Electrochimica Acta, 2005. **50**(25): p. 5237-5241.

[28] Pons, M.-N., et al., *Nitrates monitoring by UV–vis spectral analysis.* Ecohydrology & Hydrobiology, 2017. **17**(1): p. 46-52.

[29] Rajta, A., et al., *Role of heterotrophic aerobic denitrifying bacteria in nitrate removal from wastewater.* Journal of Applied Microbiology, 2020. **128**(5): p. 1261-1278.

[30] Reyter, D., D. Bélanger, and L. Roué, *Study of the electroreduction of nitrate on copper in alkaline solution.* Electrochimica Acta, 2008. **53**(20): p. 5977-5984.

[31] Shu, J., et al., *Manganese recovery and ammonia nitrogen removal from simulation wastewater by pulse electrolysis.* Separation and Purification Technology, 2016. **168**: p. 107-113.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[32] Sui, M., et al., *Sediment-based biochar facilitates highly efficient nitrate removal: Physicochemical properties, biological responses and potential mechanism.* Chemical Engineering Journal, 2021. **405**: p. 126645.

[33] Tanada, S., et al., *Removal of phosphate by aluminum oxide hydroxide.* Journal of Colloid and Interface Science, 2003. **257**(1): p. 135-140.

[34] Vangara, R., et al., *Electrolyte solution structure and its effect on the properties of electric double layers with surface charge regulation.* Journal of Colloid and Interface Science, 2017. **488**: p. 180-189.

[35] Zhang, B., et al., *High N2 selectivity in selective catalytic reduction of NO with NH3 over Mn/Ti–Zr catalysts.* RSC Advances, 2018. **8**(23): p. 12733-12741.

[36] Zhang, L., et al., *Electrochemical behaviors and influence factors of copper and copper alloys cathode for electrocatalytic nitrate removal.* Water Environment Research, 2019. **91**(12): p. 1589-1599.

[37] Zhou, R., et al., *Comparison of Cr(VI) removal by direct and pulse current electrocoagulation: Implications for energy consumption optimization, sludge reduction and floc magnetism.* Journal of Water Process Engineering, 2020. **37**: p. 101387.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ
ฉบับที่ ๘ (พ.ศ. ๒๕๓๗)
ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ
พ.ศ. ๒๕๓๕
เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๓๒ (๑) แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติประกาศกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ไว้ดังต่อไปนี้

หมวด ๑
<u>บททั่วไป</u>

ข้อ ๑ ในประกาศนี้

"แหล่งน้ำผิวดิน" หมายถึง แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ และแหล่งน้ำสาธารณะอื่นๆ ที่อยู่ภายในผืนแผ่นดิน ซึ่งหมายความรวมถึงแหล่งน้ำสาธารณะที่อยู่ภายในผืนแผ่นดินบนเกาะด้วย แต่ไม่รวมถึงน้ำบาดาล และในกรณีที่แหล่งน้ำนั้นอยู่ติดกับทะเลให้หมายความถึงแหล่งน้ำที่อยู่ภายในปากแม่น้ำหรือปากทะเลสาบ

ปากแม่น้ำและปากทะเลสาบให้ถือแนวเขตตามที่กรมเจ้าท่ากำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด ๒
ประเภทและมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ข้อ ๒ ให้แบ่งแหล่งน้ำผิวดินออกเป็น ๕ ประเภทคือ แหล่งน้ำประเภทที่ ๑ แหล่งน้ำประเภทที่ ๒ แหล่งน้ำประเภทที่ ๓ แหล่งน้ำประเภทที่ ๔ และแหล่งน้ำประเภทที่ ๕

(๑) แหล่งน้ำประเภทที่ ๑ ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมทุกประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

(ก) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน

(ข) การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน

(ค) การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ

(๒) แหล่งน้ำประเภทที่ ๒ ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

(ก) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน

(ข) การอนุรักษ์สัตว์น้ำ

(ค) การประมง

(ง) การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

(๓) แหล่งน้ำประเภทที่ ๓ ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

(ก) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน

(ข) การเกษตร

(๔) แหล่งน้ำประเภทที่ ๔ ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภทและสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

(ก) การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน

(ข) การอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๕) แหล่งน้ำประเภทที่ ๕ ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

ข้อ ๓ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ ๑ ต้องมีสภาพตามธรรมชาติ และสามารถใช้ประโยชน์ได้ตามข้อ ๒ (๑)

ข้อ ๔ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ ๒ ต้องมีมาตรฐานดังต่อไปนี้

(๑) ไม่มีวัตถุหรือสิ่งของที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งจะทำให้ สี กลิ่น และรสของน้ำเปลี่ยนไปตามธรรมชาติ

(๒) อุณหภูมิ (Temperature) ไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกิน ๓ องศาเซลเซียส

(๓) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าระหว่าง ๕.๐-๙.๐

(๔) ออกซิเจนละลาย (DO) มีค่าไม่น้อยกว่า ๖.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๕) บีโอดี (BOD) มีค่าไม่เกินกว่า ๑.๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๖) แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria) มีค่าไม่เกินกว่า ๕,๐๐๐ เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ ๑๐๐ มิลลิลิตร

(๗) แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria) มีค่าไม่เกินกว่า ๑,๐๐๐ เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ ๑๐๐ มิลลิลิตร

(๘) ไนเตรต (NO_3) ในหน่วยไนโตรเจน มีค่าไม่เกินกว่า ๕.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๙) แอมโมเนีย (NH_3) ในหน่วยไนโตรเจน มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๐) ฟีนอล (Phenols) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๑) ทองแดง (Cu) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๒) นิคเกิล (Ni) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๓) แมงกานีส (Mn) มีค่าไม่เกินกว่า ๑.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๔) สังกะสี (Zn) มีค่าไม่เกินกว่า ๑.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๕) แคดเมียม (Cd) ในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ $CaCO_3$ ไม่เกินกว่า ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร และในน้ำที่มีความกระด้างในรูปของ $CaCO_3$ เกินกว่า ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๑๖) โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเล้นท์ (Cr Hexavalent) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๗) ตะกั่ว (Pb) มีค่าไม่เกิน ๐.๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๘) ปรอททั้งหมด (Total Hg) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๐๒ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๑๙) สารหนู (As) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๑ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๒๐) ไซยาไนด์ (Cyanide) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๒๑) กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) มีค่ารังสีแอลฟา (Alpha) ไม่เกินกว่า ๐.๑ เบคเคอเรลต่อลิตร และรังสีเบตา (Beta) ไม่เกินกว่า ๑.๐ เบคเคอเรลต่อลิตร

(๒๒) สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด (Total Organochlorine Pesticides) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๕ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๒๓) ดีดีที (DDT) มีค่าไม่เกินกว่า ๑.๐ ไมโครกรัมต่อลิตร

(๒๔) บีเอชซีชนิดแอลฟา (Alpha-BHC) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๐๒ ไมโครกรัมต่อลิตร

(๒๕) ดิลดริน (Dieldrin) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๑ ไมโครกรัมต่อลิตร

(๒๖) อัลดริน (Aldrin) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๑ ไมโครกรัมต่อลิตร

(๒๗) เฮปตาคลอร์ (Heptachlor) และเฮปตาคลอร์อีปอกไซด์ (Heptachlorepoxide) มีค่าไม่เกินกว่า ๐.๒ ไมโครกรัมต่อลิตร

(๒๘) เอนดริน (Endrin) ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด

ข้อ ๕ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ ๓ ต้องมีมาตรฐานตาม ข้อ ๔ เว้นแต่

(๑) ออกซิเจนละลาย มีค่าไม่น้อยกว่า ๔.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๒) บีโอดี มีค่าไม่เกินกว่า ๒.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๓) แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด มีค่าไม่เกินกว่า ๒๐,๐๐๐ เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ ๑๐๐ มิลลิลิตร

(๔) แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม มีค่าไม่เกินกว่า ๔,๐๐๐ เอ็ม.พี.เอ็น. ต่อ ๑๐๐ มิลลิลิตร

ข้อ ๖ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ ๔ ต้องมีมาตรฐานตามข้อ ๔ (๑) ถึง (๕) และ (๘) ถึง (๒๘) เว้นแต่

(๑) ออกซิเจนละลาย มีค่าไม่น้อยกว่า ๒.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๒) บีโอดี มีค่าไม่เกินกว่า ๔.๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๗ คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำประเภทที่ ๕ ต้องมีมาตรฐานต่ำกว่าคุณภาพน้ำ ในแหล่งน้ำประเภทที่ ๔

ข้อ ๘ การกำหนดให้แหล่งน้ำผิวดินแหล่งใดแหล่งหนึ่งเป็นประเภทใดตามข้อ ๒ ให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา

หมวด ๓

วิธีการเก็บตัวอย่างและตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

ข้อ ๙ การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจสอบคุณภาพตามข้อ ๓ ถึง ข้อ ๗ ให้ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

(๑) แหล่งน้ำไหล ซึ่งได้แก่ แม่น้ำ ลำคลอง เป็นต้น ให้เก็บที่จุดกึ่งกลางความกว้างของแหล่งน้ำที่ระดับกึ่งกลางความลึก ณ จุดตรวจสอบ เว้นแต่แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดและแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม ให้เก็บที่ระดับความลึก ๓๐ เซนติเมตร ณ จุดตรวจสอบ

(๒) แหล่งน้ำนิ่ง ซึ่งได้แก่ ทะเลสาบ หนอง บึง อ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ให้เก็บที่ระดับความลึก ๑ เมตร ณ จุดตรวจสอบสำหรับแหล่งน้ำที่มีความลึกเกินกว่า ๒ เมตร และให้เก็บที่จุดกึ่งกลางความลึก ณ จุดตรวจสอบสำหรับแหล่งน้ำที่มีความลึกไม่เกิน ๒ เมตร เว้นแต่แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดและแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม ให้เก็บที่ระดับความลึก ๓๐ เซนติเมตร ณ จุดตรวจสอบ

จุดตรวจสอบตาม (๑) และ (๒) ของแหล่งน้ำที่กำหนดตามข้อ ๘ ให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด

ข้อ ๑๐ การตรวจสอบคุณภาพน้ำตามข้อ ๓ ถึงข้อ ๗ ให้ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจสอบอุณหภูมิ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

(๒) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่าง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH meter) ตามวิธีการหาค่าแบบอีเล็คโตรเมตริก (Electrometric)

(๓) การตรวจสอบค่าออกซิเจนละลาย ให้ใช้วิธีอะไซด์โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(๔) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ ๒๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๕ วันติดต่อกัน

(๕) การตรวจสอบค่าแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดและค่าแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม ให้ใช้วิธีมัลติเพิ้ล ทิ้วบ์ เฟอร์เมนเตชั่น เทคนิค (Multiple Tube Fermentation Technique)

(๖) การตรวจสอบค่าไนเตรตในหน่วยไนโตรเจน ให้ใช้วิธีแคดเมียมรีดัคชั่น (Cadmium Reduction)

(๗) การตรวจสอบค่าแอมโมเนียในหน่วยไนโตรเจน ให้ใช้วิธีดิสทิลเลชั่นเนสสเลอร์ไรเซชั่น (Distillation Nesslerization)

(๘) การตรวจสอบค่าฟีนอล ให้ใช้วิธีดิสทิลเลชั่น ๔ - อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation, 4-Amino antipyrene)

(๙) การตรวจสอบค่าทองแดง นิคเกิล แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเล้นท์ และตะกั่ว ให้ใช้วิธีอะตอมมิค แอบซอพชั่น ไดเร็ค แอสไพเรชั่น (Atomic Absorption - Direct Aspiration)

(๑๐) การตรวจสอบค่าปรอททั้งหมด ให้ใช้วิธีอะตอมมิค แอบซอพชั่น โคลด์เวเปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption-Cold Vapour Technique)

(๑๑) การตรวจสอบค่าสารหนู ให้ใช้วิธีอะตอมมิค แอบซอพชั่น แก๊สซัสไฮไดรด์ (Atomic Absorption - Gaseous Hydride)

(๑๒) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีไพริดีน บาร์บิทูริค แอซิด (Pyridine - Barbituric Acid)

(๑๓) การตรวจสอบค่ากัมมันตภาพรังสี ให้ใช้วิธีโลว์ แบ็คกราวด์ พรีอพพอร์ชั่นนอล เคาน์เตอร์ (Low Background Proportional Counter)

(๑๔) การตรวจค่าสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด ดีดีที บีเอชซีชนิดแอลฟา ดิลดริน อัลดริน เฮปตาคลอร์อีปอกไซด์ และเอนดริน ให้ใช้วิธีก๊าซ - โครมาโตกราฟี (Gas - Chromatography)

ข้อ ๑๑ การตรวจสอบค่าออกซิเจนละลายให้ใช้ค่าเปอร์เซ็นไทล์ที่ ๒๐ (20th Percentile Value) ส่วนการตรวจสอบค่าบีโอดี แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด และแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม ให้ใช้ค่าเปอร์เซ็นไทล์ที่ ๘๐ โดยจำนวนและระยะเวลาสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำดังกล่าว ให้เป็นไปตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ ๑๒ การเก็บตัวอย่างน้ำตามข้อ ๕ และการตรวจสอบคุณภาพน้ำตามข้อ ๑๐ จะต้องเป็นไปตามวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater) ซึ่ง American Public Health Association และ American Water Works Association กับ Water Pollution Control Federation ของสหรัฐอเมริการ่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ ๒๐ มกราคม พ.ศ. ๒๕๓๗
ชวน หลีกภัย
นายกรัฐมนตรี
ประธานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

(ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม ๑๑๑ ตอนที่ ๑๖ ง วันที่ ๒๔ กุมภาพันธ์ ๒๕๓๗)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลงานทางวิชาการ

Science Essence Journal Vol. 41 No. 1 (2025) | 24-38

Research Article

Nitrate Removal Enhancement Using Pulse Electrolysis and Aluminum Electrode

Prapavit Suwannimit[1,2], Aparporn Sakulkalavek[1,2], Bhanupol Klongratog[1,2], Nuttakrit Somdock[1,2] and Pisan Srirach[1*]

Received: 11 February 2025
Revised: 5 March 2025
Accepted: 6 March 2025

ABSTRACT

This work focuses on nitrate elimination from municipal wastewater by an electrochemical method with pulsed DC electrolysis. The performance of electroreduction of nitrate was investigated without alkaline electrolyte addition. The nitrate removal reactor was fabricated from acrylic and aluminum electrodes. The nitrate concentration was analyzed by the light absorption of the substance using UV-Vis spectroscopy. The precipitated compounds were determined by X-ray diffraction technique. The experimental results with 180 min treatment indicated the optimum condition for nitrate removal was carried out on the pulse frequency of 10 kHz, pulse width of 80%, and electric current density of 16 mA/cm^2. This condition was able to eradicate nitrate up to 90.73% (4.3 mg/L) from an initial nitrate concentration of 46.0 mg/L as well as showed a nitrogen selectivity of 80.08 %. Furthermore, the weight loss of aluminum anodes was as low as 0.8%. The main precipitation formed in the electrolyte cell was aluminum hydroxide.

Keywords: Nitrate in water sources, Nitrate removal method, Pulsed DC electrolysis

[1] Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

[2] Electronic and Optoelectronic Device Research Unit, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding author, email: pisan.su@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Introduction

Currently, general wastewater sources are often found to have a large accumulation of nitrogen compounds. The occurrence of nitrogen compounds in water sources comes from various sources, such as wastewater from communities that result from the use tap water or groundwater for household activities such as cooking, dish washing or cleaning. Nitrogen compounds from this type of wastewater typically arise from the decomposition of organic substances contaminated in the water. Wastewater from industrial factories may also originate from the production process involving chemicals that may be released without proper treatment. Wastewater from agriculture can result from the use of nitrogen fertilizers and the use of insecticides such as neonicotinoid insecticides. These chemicals that remain on the soil surface can flow into water sources due to runoff or rainwater washing, leading to the accumulation of nitrogen compounds in water sources [1-3].

The consequences of nitrogen compound accumulation in water sources lead to a process that converts these compounds into nitrate (NO_3^-), known as nitrification. This process occurs in two stages. The first stage is ammonia oxidation, where bacteria from the ammonia-oxidizing bacteria group, such as Nitrosomonas, oxidize ammonia (NH_3) or ammonium (NH_4^+) produced from the decomposition of organic matter in the water into nitrite (NO_2^-). The second stage is nitrite oxidation, where the nitrite formed in the first stage is further oxidized into nitrate, which is a stable form that can dissolve in water [4]. The nitrate formed from nitrification can be absorbed by aquatic plants. However, if there is an excessive amount of nitrate in water, it may lead to a condition known as eutrophication, which is the rapid growth of aquatic plants. This excessive growth of aquatic plants significantly reduces the dissolved oxygen in the water, leading to a loss of oxygen, which can cause the death of fish or other aquatic organisms and result in environmental problems [5].

Various technologies have been developed and used to remove nitrate from wastewater including: biological denitrification, physical process and electrochemical denitrification [6-8]. In biological denitrification process, bacteria was used to transform nitrate to nitrogen gas and evaporate into the air [9]. For wetlands wastewater treatment systems, aquatic plants and microorganisms were used to absorb and treat nitrate in water. Biological denitrification is the cheapest method for treatment of nitrate in wastewater. However, this process takes a long time to treat because the reaction or transformation of nitrate to nitrogen gas occurs naturally. Furthermore, for industrial wastewater, it greatly affect the microbial activity and hence biological denitrification technique is not suitable for nitrate removal from industrial wastewater [10].

Among the physical processes, ion exchange and reverse osmosis are the most widely applied treatment methods for nitrate removal [6]. Electrochemical denitrification process has been recognized as a promising method for nitrate removal through oxidative and reductive reaction into water, nitrogen and oxygen [11]. These methods include electroreduction and electrocoagulation [6, 8, 12]. In every electrochemical process, the electrode material is a key variable to be studied [7, 13]. Good electrode materials should have high catalytic activity, high stability, good corrosion resistance and low cost [14-16]. In addition, pulsed-electrocoagulation process for the treatment of different wastewaters has been

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

widely studied [10, 17, 18]. This is due to pulsed-electrocoagulation process is more efficient in wastewater treatment than the DC electrocoagulation technique [19].

The method known as water electrolysis has recently garnered significant attention due to its potential applications in wastewater treatment. This technique involves the use of electrical energy to split water molecules into oxygen and hydrogen gases, effectively removing nitrate contaminants without the need for chemical additives. One of the primary advantages of this method is its straightforward operation and ease of control, making it highly adaptable to various treatment requirements. Additionally, the flexibility in system design allows for integration into diverse wastewater treatment processes, enhancing its applicability and scalability. [20-23]. The efficiency of the electrolysis process is influenced by multiple factors, including the energy input, electrode configuration, and type of electrical supply used. Traditional electrolysis often employs a constant potential or current across the electrodes, a technique referred to as direct current (DC) electrolysis. For this process to proceed effectively, a minimum voltage exceeding 1.6 V is typically required [23]. However, in recent years, pulse electrolysis has emerged as a promising alternative to traditional DC electrolysis for wastewater treatment. This technique introduces periodic pulses of electrical current rather than a continuous flow, offering several key advantages. Pulse electrolysis has been shown to improve system efficiency by reducing energy consumption and mitigating issues such as electrode fouling and corrosion. These benefits position it as a superior and more sustainable approach for the effective removal of nitrate contaminants from wastewater compared to conventional methods [20].

This research aimed to study an eco-friendly approach for treating nitrate-contaminated wastewater by utilizing the pulse electrolysis method with aluminum electrodes, eliminating the need for chemical additives. The study examined the impact of varying the frequency and pulse width of electrical signals on key performance indicators, including nitrate removal efficiency, nitrogen selectivity, electrode corrosion rates, and electrical power consumption. A pulsed direct current (pulsed DC) was employed as the treatment signal due to its potential to reduce the ohmic drop and minimize capacitive losses during the formation of the electric double layer. The periodic switching of polarity in pulse electrolysis ensures that ions cannot fully align or store charge, leading to enhanced operational efficiency. This method not only facilitates the effective conversion of ammonia into nitrogen and hydrogen gases but also reduces energy consumption and mitigates electrode corrosion compared to conventional direct current methods. Consequently, the pulse electrolysis technique offers a promising and sustainable alternative for enhancing nitrate removal efficiency and minimizing the environmental footprint of wastewater treatment processes.

Experimental

Materials and chemicals

Synthetic wastewater used in the experiment was prepared using potassium nitrate (KNO_3) purchased from Merck, Germany, and was prepared at a concentration of 46.0 mg/L. In the electrolysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

process, aluminum electrode plates (no.1100, purity 99%) were used. Chemicals used for analyzing nitrites, ammonia, and ammonium were obtained from Hanna Instruments (Thailand) Ltd.

Synthesis of wastewater

Potassium nitrate with a weight of 0.1647 g was prepared and put in a 100-ml beaker. Deionized water was poured into the beaker for 50 ml to dissolve potassium and synthetic nitrate water was obtained.

Later, it was poured into a 1,000-ml volumetric flask. Deionized water was used as a solvent and poured into the volumetric flask. By adjusting the volume of deionized water according to the volume mark from the volume adjustment bottle until it gives synthetic nitrate water with a nitrate concentration of 100 mg/l for 1,000 ml water. Then, it was diluted with 1,222 ml of deionized water resulting in synthetic wastewater contained nitrate with a nitrate concentration of 46.0 mg/L and a volume of 2,222 m1.

Experimental setup

Figure 1 shows the schematic diagram of the experimental setup. The components consisted of a DC power supply, Function generator, Electronic switch circuit, electrode, electrolysis cell. DC power supply (GW Instek, PSW 30-36) with a maximum voltage of 30 V was used to supply a voltage of 5 V. Electrolysis cell was made of acrylic sheet with a dimension (W×L×H) of 8×10×7 cm^3 and a thickness of 4 mm. The electrodes inside the electrolysis cell consisted of 3 pairs of anode and cathode. The electrodes were made of aluminum (99% purity), each one has a dimension (W×L) of 8 x 10 cm^2 and a thickness of 0.5 mm. The distance between each electrode was 0.5 mm.

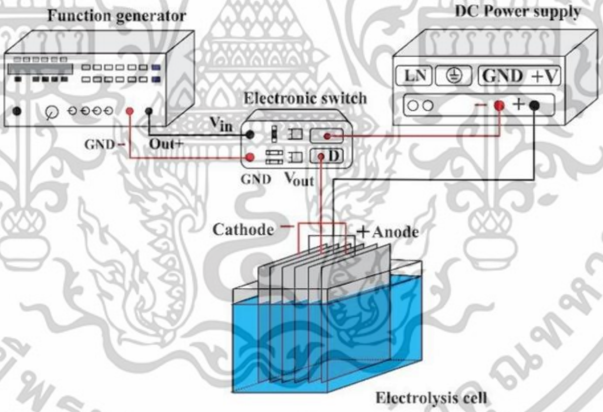


Figure 1 Schematic diagram of the experimental setup.

The operation begins by connecting the positive terminal of the DC power supply to the anode of the electrolysis cell. Meanwhile, the cathode of the electrolysis cell is linked to the drain (D) terminal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of a MOSFET D4184 module, with the system ground connected to the source (S) terminal. A function generator is utilized to manage the on-off switching mechanism by transmitting a pulse-width modulation (PWM) signal to the gate (G) terminal of the MOSFET. To ensure the circuit operates reliably, a 100-ohm resistor is inserted in series with the gate terminal to regulate the current flow, thereby preventing excessive current that could potentially damage the MOSFET and minimizing ripple effects in the PWM signal. In the circuit illustrated in Figure 2, two MOSFETs are employed to regulate the power supplied to the electrolysis cell. The function generator controls the PWM signal, which determines the switching state of the MOSFETs. When the PWM signal is in the high state, the MOSFETs are activated, effectively completing the circuit and allowing current to flow from the DC power supply to the electrolysis cell. Conversely, when the PWM signal is in the low state, the MOSFETs deactivate, interrupting the circuit and halting the flow of current. This on-off switching operation, governed by the PWM signal, induces a pulsed current flow into the electrolysis cell. The use of PWM control provides significant advantages in terms of operational efficiency and precision. By periodically switching the current, the pulsed nature of the flow mitigates energy losses associated with continuous direct current. Additionally, the pulsing action facilitates a more uniform distribution of ions within the electrolysis cell, reducing the risk of electrode overheating or uneven wear. This design ensures the efficient performance of the electrochemical process while preserving the integrity of the electrode materials and minimizing energy consumption.

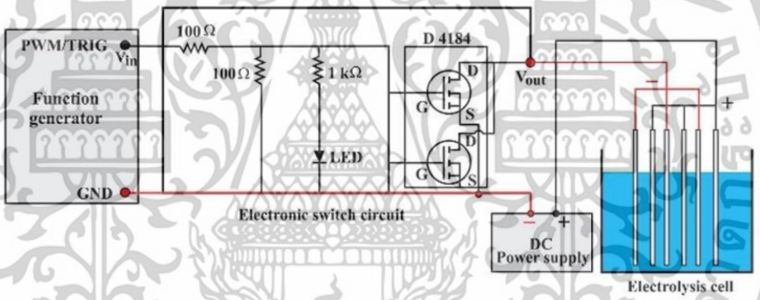


Figure 2 Diagram of pulsed direct current.

The duty cycle of the pulse, generated by the PWM, determines the proportion of time that the MOSFET remains open during each operational cycle. For instance, a duty cycle of 80% signifies that the MOSFET is open and allowing current to flow for 80% of the total cycle time, while the remaining 20% of the cycle is in an off-state. This characteristic plays a critical role in controlling the power delivery to the electrolysis cell, as the amount of energy imparted during each cycle directly correlates with the duration the MOSFET remains active. The pulse frequency, which refers to the number of complete on-off cycles per second, can be precisely adjusted according to the desired characteristics of the PWM signal. This adjustment is achieved using the function generator, allowing the frequency to be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

varied over a broad range, typically from a few hertz (Hz) to several kilohertz (kHz), depending on the specifications and capabilities of the function generator and the overall system design. Lower frequencies result in longer pulse durations, while higher frequencies provide shorter, more rapid pulses. Selecting the appropriate frequency is critical, as it influences the efficiency of ion movement and the uniformity of current distribution within the electrolysis cell. To ensure stable operation of the PWM circuit and to maintain signal integrity, a pull-down resistor is connected between the PWM signal leg and the ground. This resistor ensures that the PWM signal defaults to a low state when the function generator is not actively driving the signal, thereby preventing unintended activation of the MOSFET. The inclusion of this resistor is particularly important for minimizing noise and avoiding potential erratic behavior in the circuit caused by floating signals.

Additionally, an LED indicator is incorporated into the circuit to visually represent the status of the PWM signal. The LED provides real-time feedback on the operation of the PWM, illuminating when the signal is in a high state and turning off during the low state. A 1-kilo ohm resistor is placed in series with the LED to act as a current limiter, ensuring that the current passing through the LED does not exceed its rated capacity. This not only prolongs the lifespan of the LED but also protects the circuit from potential damage due to overcurrent conditions. The integration of these components ensures that the PWM signal is accurately controlled, visually monitored, and effectively grounded when necessary. This configuration is critical for achieving precise control of the pulsed current delivered to the electrolysis cell, enhancing the overall efficiency, reliability, and reproducibility of the electrochemical process.

Analytical and calculation methods

The nitrate concentration in the synthesized wastewater was measured using the UV-Vis spectrophotometer (Shimadzu, UV-2600). The absorbance at a wavelength of 218 nm correlates with the nitrate concentration. The nitrate concentration was determined using the equation obtained from the calibration curve. The nitrite and ammonia concentrations were measured by the colorimetric method using a multiparameter photometer (Hanna Instruments (Thailand), HI 83306). A scanning electron microscope (FEI, Quanta 250) was used to observe the surface morphology of electrode. The structure of precipitates from treated water was investigated by an X-ray diffractometer (Rigaku, Smartlab). The nitrate removal efficiency ($R_{[NO_3^-]}$) was calculated by Eq.(1) [24].

$$R_{[NO_3^-]}(\%) = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t}{[NO_3^-]_0} \times 100 \quad (1)$$

where $[NO_3^-]_0$ is the initial nitrate concentration and $[NO_3^-]_t$ is the nitrate concentration at regular time during the electrolysis process. The capability of nitrogen transformation (S_{N_2}) is estimated by Eq.(2) [24].

$$S_{N_2}(\%) = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t - [NO_2^-] - [NH_4^+]}{[NO_3^-]_0} \times 100 \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $[NO_2^-]$ and $[NH_4^+]$ are the concentrations of nitrite and ammonia at regular times during the electrolysis process, respectively. Electrical energy consumption (E) in kW.h was calculated from Eq.(3) [25].

$$E = \frac{UIt}{V \cdot (C_0 - C) \cdot 60} \quad (3)$$

where U is the voltage across the couple of aluminum electrodes, I is the average current, t is the treatment time, V is the wastewater volume, C_0 is the initial nitrate concentration and C is the nitrate concentration after treatment (mg/L). The loss of the anode (m) at a given electric current and electrolysis time was calculated by Eq.(4) [24-25].

$$m = \frac{ItM}{ZF} \quad (4)$$

where F is the Faraday's constant, M is the molecular mass of anode (g/mol) and Z is the number of electron transfers in the reaction.

Results and Discussion

Effect of frequency and duty cycle

Figures 3 and 4 show the performance of nitrate removal using different applied currents as a function of time for the duty cycle of 50% and 80%, respectively. It can be observed that the nitrate content in wastewater decreases with increasing reaction time. The nitrate removal state can be separated into 2 periods. For the first period (0-90 min) and the duty cycle of 50%, as shown in Figure 3 and Table 1, the treatment process using the direct current (DC) has a higher removal efficiency (71.78 %) as compared to that using the pulsed direct current (pulsed DC) with frequencies of 1 and 10 kHz (approximately 53 and 45%). The nitrate removal efficiency after 90 min still behaves similarly, but the removal efficiency changes to 57.98, 37.27, and 36.75% for the DC and pulsed DC signal at 1 and 10 kHz, respectively. In consideration of the removal rate of nitrate, the DC showed a more significant nitrate removal rate in the early period than the removal rate derived from the pulsed DC signal. However, in the second period (90-180 min), it is interesting to note that the elimination rate values of nitrate from all signals become the equivalent value of about 0.10 ppm/min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

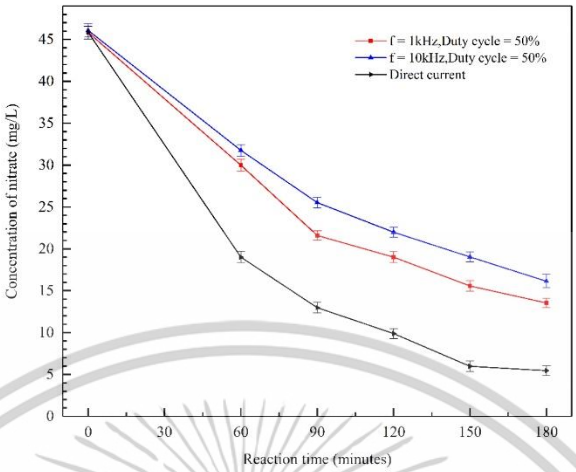


Figure 3 Nitrate declination with time for the treatment current of 50% duty cycle at 1 and 10 kHz.

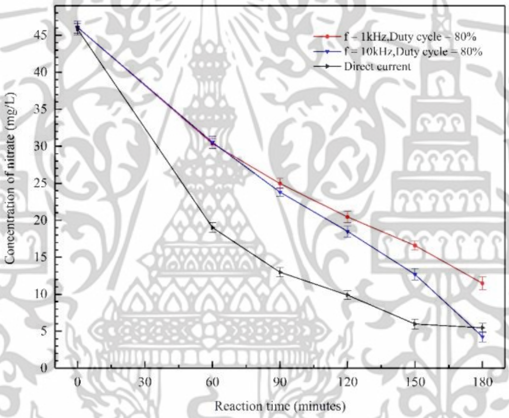


Figure 4 Nitrate declination with time for the treatment current of 80% duty cycle 1 and 10 kHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Removal rate and removal efficiency of nitrate from wastewater using various signals.

Conditional signal	Duty cycle (%)	Frequency (kHz)	Reduction rate (ppm/min)		Nitrate removal efficiency (%)	
			0-90 min	90-180 min	0-90 min	90-180 min
Pulsed DC	50	1	0.27	0.09	53.04	37.27
		10	0.23	0.10	44.52	36.75
	80	1	0.23	0.15	45.74	53.98
		10	0.25	0.22	48.24	82.09
DC	100	N/A	0.37	0.08	71.78	57.98

Regarding wastewater treatment using the pulsed DC with a duty cycle of 80%, as illustrated in Figure 4, there are no significant differences in the elimination rates of nitrate between 1 and 10 kHz. Their nitrate concentrations at 90 min treatment were still higher than the amount of nitrate in the wastewater treated by the DC. On the contrary, the elimination rate of nitrate of the pulsed DC after 90 min was greater than that of the DC, as seen in Table 1. The removal rate values were 0.15 and 0.22 ppm/min for nitrate removal at 1 and 10 kHz, respectively. These rates were larger about 1.9 and 2.8 times compared to the nitrate removal rate by using the DC. Considering nitrate removal efficiency, the using pulsed DC at duty cycle 80% and frequency 10 Hz display the highest value (82.09%) for treatment after 180 min. Meanwhile, the DC has a removal efficiency of only 57.98%. As a result, pulsed DC at duty cycle 80% and frequency 10 kHz was capable of nitrate elimination to about 5 ppm. These values were as low as those derived from using the direct current.

It can be concluded that the use of pulsed DC at 10 kHz and 80% duty cycle is the most suitable condition for reducing nitrate concentration in this experiment because it helps control the formation of electric double layer (EDL) at the electrode area, resulting in more efficient charge transfer and less passivation that may interfere with the redox process. Comparing to lower frequencies such as 1 kHz, which still cause the formation of electric double layer, 10 kHz pulses and 80% duty cycle give results comparable to or better than DC. Increasing the frequency above this may increase the electrical load unnecessarily. Although DC can reduce nitrate, it has the disadvantage of continuous passivation, which reduces the efficiency of the electrode in the long term.

In addition, the final concentration of nitrate did not exceed the limitation of nitrate concentration in the surface water (5 mg/L) proclaimed in the National Environment Board Announcement (NEBA) issued number 8 (https://www.pcd.go.th/laws/4168/) as seen in Table 2. Furthermore, the remnant total nitrogen of the treatment process using the pulsed DC of 10 kHz and 80% duty cycle was the lowest value (9.2 mg/L). The total nitrogen was considered in the summation of the amount of nitrate, nitrite, and ammonia. This value was lower than the quantity limitation of total nitrogen proclaimed in the Standards for controlling the effluent drainage from community wastewater treatment systems issued by The Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand (https://shorturl.at/rXNy6). Using the pulsed DC with these conditions can reduce the total nitrogen over 5 times as compared to the initial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

total nitrogen (46.0 mg/L). This indicates that total nitrogen was converted to the nitrogen gas approximately by 36.7 mg/L. In Figure 5, the treatment condition of duty cycle of 80% and frequency 10 kHz shows a little bit higher efficiency value in the nitrate to nitrogen gas conversion when compared with using DC treatment. However, the amount of ammonia in the treated water, as shown in Table 2, was in the range of 1.7 to 4.8 mg/L, which was relatively high compared to the ammonia concentration limit (0.5 mg/L) proclaimed in NEBA of Thailand. This issue is interesting for finding a treatment method to remove ammonia without further chemicals.

Table 2 Final concentration of nitrogen species in treated water for 180 min.

Condition			Amount of nitrogen species				
Current	Duty cycle (%)	Frequency (kHz)	Nitrate (mg/L)	Nitrite (mg/L)	Ammonia (mg/L)	Nitrogen gas (mg/L)	Total nitrogen (mg/L)
-	-	-	46.0	0.0	0.0	0.0	46.0
Pulsed	50	1	13.6	1.0	4.8	26.6	19.4
		10	16.1	3.0	3.8	23.1	22.9
	80	1	11.5	1.0	1.7	31.8	14.2
		10	4.3	1.0	3.9	36.8	9.2
DC	100	NA	5.5	0.0	4.2	36.3	9.7

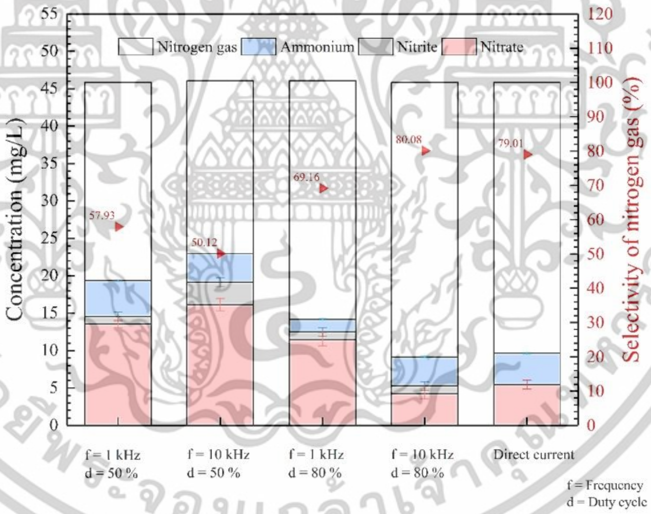


Figure 5 Final concentration of nitrogen species and nitrogen selectivity after water treatment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of energy consumption

The experiment revealed that both DC electrolysis and pulse electrolysis with an 80% duty cycle at 10 kHz are highly effective in reducing nitrate concentrations and possess high nitrogen gas removal capabilities. However, the energy analysis indicates that DC electrolysis consumes more energy than the pulse electrolysis with an 80% duty cycle at 10 kHz, using 0.0113 kW.h/$mg_{nitrate}$ compared to 0.0020 kW. h/ $mg_{nitrate}$ for the pulse process. This demonstrates that while both methods have similar nitrate reduction efficiencies, the pulse process is more energy-efficient.

Assessment of aluminum anode loss and analysis of sediments produced from the electrolysis process

In the electrolysis process, the aluminum anode electrode undergoes loss due to electrochemical oxidation, resulting in the formation of aluminum ions (Al^{3+}) [24, 26]. These oxidized aluminum ions can react with hydroxide ions (OH^{-}) within the electrolysis system [27], leading to the formation of precipitates within the electrolysis system.

Analysis of electrode consumption

Figure 6 shows that the pulse electrolysis process with a pulse width of 80% and a frequency of 10 kHz results in a weight loss of the aluminum electrode after treatment of 0.0801 g/m^3 or 0.8% of its initial weight before treatment. This weight loss is less compared to the DC electrolysis process, which has a weight loss of 0.1469 g/m^3 or 1.5% of the initial weight after treatment.

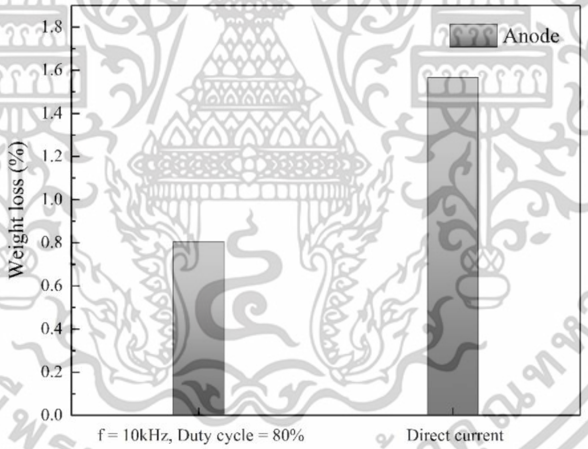


Figure 6 The precipitate results from aluminum electrodes in pulsed DC and DC nitrate treatment systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of electrode surface

From Figure 7, it is observed that the aluminum anode surface exhibits corrosion after undergoing electrolysis. In the case of pulse electrolysis, the corrosion appears as large pits with a small amount on the electrode surface, as shown in Figure 7(c). This is due to the current being supplied in pulses, where during the off-period, the electric double layer (EDL) has the opportunity to return to equilibrium, resulting in a more uniform current distribution during the on-period.

In contrast, corrosion resulting from DC electrolysis shows small pits with a large amount on the anode surface, as illustrated in Figure 7(b). The continuous current supply leads to the accumulation of ions and chemicals at the anode, forming a concentrated EDL, which causes corrosion to occur more intensely at certain spots due to the uneven distribution of the current.

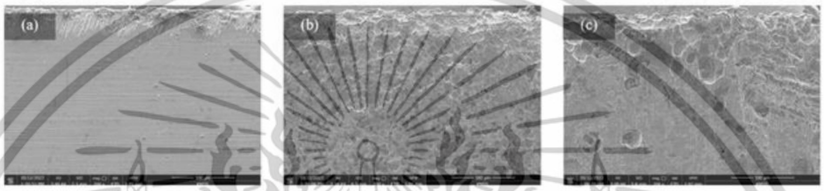


Figure 7 SEM images of the electrode at 200x magnification: (a) before the electrolysis process, (b) after the DC electrolysis process and (c) after the pulse electrolysis process.

Analysis of precipitate in the process

From the XRD analysis, which was performed over a 2θ range from 10° to 80° with a scanning speed of 10.00°/min and a step size of 0.01°, it was found that the precipitate exhibits specific structural characteristics. The analysis revealed that the precipitate has an orthorhombic structure, showing peaks corresponding to the (011), (110), (021), (112), and (212) planes at 15.2°, 17.1°, 22.8°, 34.1°, and 45.1°, respectively. These peaks align with the JCPDS standard database, number 01-081-0070.

Additionally, the analysis also identified monoclinic structural features, with peaks corresponding to the (002), (110), (022), (-132), (204), (-313), (332), and (017) planes at 18.8°, 20.3°, 27.9°, 40.7°, 53.2°, 63.3°, 67.3°, and 70.8°, respectively. These peaks correspond to the JCPDS standard database, number 01-083-2256.

The structure of the precipitate thus consists of a mixture of potassium nitrate (KNO_3) and aluminum hydroxide ($Al(OH)_3$), as illustrated in Figure 8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

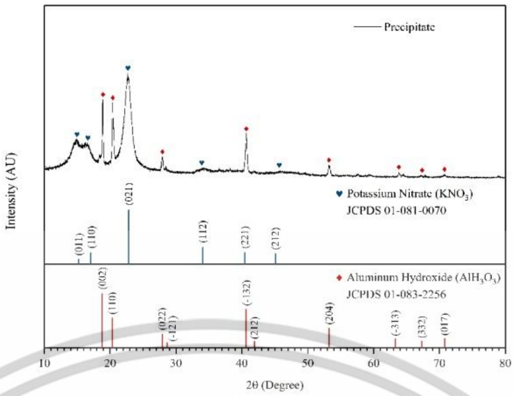


Figure 8 XRD patterns of precipitate produced.

Conclusions

The study on the efficiency of nitrate removal from synthetic wastewater using a pulse electrolysis process with aluminum electrodes found that the optimal conditions for this process are a pulse width of 80% and a frequency of 10 kHz. Under these conditions, nitrate reduction efficiency reaches 90.73%, nitrogen gas removal efficiency is 80.08%, and the energy consumption is 0.0020 $kW.h/mg_{nitrate}$.

In comparison, the direct current electrolysis process consumes 0.0113 $kW.h/mg_{nitrate}$. Thus, the pulse electrolysis process demonstrates significantly lower energy consumption. Additionally, the weight loss after treatment with the pulse process is 0.0801 g/m^3 which is 0.8%, compared to the DC process where the weight loss is 0.1469 g/m^3 or 1.5% of the initial aluminum sheet weight. Therefore, the pulse electrolysis process is a better alternative for nitrate removal as it is more energy-efficient compared to the DC electrolysis process.

Acknowledgements

The Research on "Research Title:" Nitrate removal enhancement using pulse electrolysis and aluminum electrode" by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) has received funding support from the NSRF (FRB660065/0258-RE-KRIS/FF66/58)

References

1. Chen Y, Ling J, Yu W, Zhang L, Wu R, Yang D, et al. Identification of point and nonpoint emission sources of neonicotinoid pollution in regional surface water. Water Res. 2024;248:120863.
2. Han W, Tian Y, Shen X. Human exposure to neonicotinoid insecticides and the evaluation of their potential toxicity: an overview. Chemosphere. 2018;192:59-65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Rajta A, Bhatia R, Setia H, Pathania P. Role of heterotrophic aerobic denitrifying bacteria in nitrate removal from wastewater. J Appl Microbiol. 2020;128(5):1261-78.
4. Focht DD, Chang AC. Nitrification and denitrification processes related to waste water treatment. In: Perlman D, editor. Advances in applied microbiology. 19: Academic Press;1975. p.153-86.
5. Ahmed SF, Kumar PS, Kabir M, Zuhara FT, Mehjabin A, Tasannum N, et al. Threats, challenges and sustainable conservation strategies for freshwater biodiversity. Environ Res. 2022;214:113808.
6. Xu D, Li Y, Yin L, Ji Y, Niu J, Yu Y. Erratum to: Electrochemical removal of nitrate in industrial wastewater. Front Environ Sci Eng. 2018;12(3):16.
7. Zhang L, Yin D, Zhai S, Liu Y, Dou C, Chen P, et al. Electrochemical behaviors and influence factors of copper and copper alloys cathode for electrocatalytic nitrate removal. Water Environ Res. 2019;91(2):1589-99.
8. Moussa DT, El-Naas MH, Nasser M, Al-Marri MJ. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. J Environ Manag. 2017;186:24-41.
9. Sui M, Li Y, Jiang Y, Wang L, Zhang W, Sathishkumar K, et al. Sediment-based biochar facilitates highly efficient nitrate removal: physicochemical properties, biological responses and potential mechanism. Chem Eng J. 2021;405:126645.
10. Asefaw KT, Bidira F, Desta WM, Asaithambi P. Investigation on pulsed-electrocoagulation process for the treatment of wet coffee processing wastewater using an aluminum electrode. Sustain Chem Environ. 2024;6:100085.
11. Koparal AS, Öğütveren ÜB. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. J Hazard Mater. 2002;89(1):83-94.
12. Govindan K, Noel M, Mohan R. Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches. J Water Process Eng. 2015;6:58-63.
13. Lacasa E, Cañizares P, Llanos J, Rodrigo MA. Removal of nitrates by electrolysis in non-chloride media: effect of the anode material. Sep Purif Technol. 2011;80(3):592-9.
14. Duca M, Sacré N, Wang A, Garbarino S, Guay D. Enhanced electrocatalytic nitrate reduction by preferentially-oriented (100) PtRh and PtIr alloys: the hidden treasures of the 'miscibility gap'. Appl Catal B: Environ. 2018;221:86-96.
15. Zhang R, Shuai D, Guy K, Shapley J, Strathmann T, Werth C. Elucidation of nitrate reduction mechanisms on a Pd-In bimetallic catalyst using isotope labeled nitrogen species. ChemCatChem. 2013;5.
16. Pérez-Gallent E, Figueiredo M, Katsounaros I, Koper M. Electrocatalytic reduction of nitrate on copper single crystals in acidic and alkaline solutions. Electrochim Acta. 2016;227:77-84.
17. Ren M, Song Y, Xiao S, Zeng P, Peng J. Treatment of berberine hydrochloride wastewater by using pulse electro-coagulation process with Fe electrode. Chem Eng J. 2011;169(1):84-90.
18. Vasudevan S. Effects of alternating current (AC) and direct current (DC) in electrocoagulation process for the removal of iron from water. Can J Chem Eng. 2012;90(5):1160-9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. Karamati-Niaragh E, Alavi Moghaddam MR, Emamjomeh MM, Nazlabadi E. Evaluation of direct and alternating current on nitrate removal using a continuous electrocoagulation process: economical and environmental approaches through RSM. J Environ Manag. 2019;230:245-54.
20. Bagheri Hariri M, Botte G. Simultaneous removal of ammonia and nitrate from wastewater using a pulse electrolysis technique. J Electrochem Soc. 2023;170(5):053502.
21. Atkins AP, Lennox AJJ. Application of pulsed electrolysis in organic electrosynthesis. Curr Opin Electrochem. 2024;44:101441.
22. Li S, Zheng C, Yang S, Ma T, Yang L, Gao Y. Reduction of nitrogen and phosphorus loading from polluted sediment by electrolysis. Ecologi Eng. 2021;159:106088.
23. Demir N, Kaya MF, Albawabiji M. Effect of pulse potential on alkaline water electrolysis performance. Int J Hydrogen Energy. 2018;43(36):17013-20.
24. Guo M, Feng L, Liu Y, Zhang L. Electrochemical simultaneous denitrification and removal of phosphorus from the effluent of a municipal wastewater treatment plant using cheap metal electrodes. Environ Sci: Water Res Technol. 2020;6(4):1095-105.
25. Zhou R, Liu F, Wei N, Yang C, Yang J, Wu Y, et al. Comparison of Cr(VI) removal by direct and pulse current electrocoagulation: Implications for energy consumption optimization, sludge reduction and floc magnetism. J Water Process Eng. 2020;37:101387.
26. Mouedhen G, Feki M, Wery MDP, Ayedi HF. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. J Hazard Mater. 2008;150(1):124-35.
27. AlJaberi FY. Operating cost analysis of a concentric aluminum tubes electrodes electrocoagulation reactor. Heliyon. 2019;5(8):e02307.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายประภวิษณุ์ สุวรรณนิมิตร
วัน เดือน ปีเกิด	11 พฤษภาคม พ.ศ. 2542
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/90 หมู่ 3 ตำบลลำไทร อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2563 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ เกรดเฉลี่ย 2.63 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Nitrate removal enhancement using pulse electrolysis and aluminum electrode. Science Essence Journal, Vol. 41 No. 1 (2025): 24–38.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้