

การพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ



นายทศไนย สุภนราพรรค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**A PROTOTYPE DEVELOPMENT OF WASTEWATER
TREATMENT SYSTEM BY USING UNDERWATER
PLASMA TECHNIQUE**



Tassanai Supanrnpa

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

การพัฒนาระบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



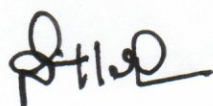
(รศ. ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

กรรมการ



(รศ. ดร.เพด็จ เพาละอ)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทัศนัย สุภนราพรณ์ : การการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ
(A PROTOTYPE DEVELOPMENT OF WASTEWATER TREATMENT SYSTEM BY
USING UNDERWATER PLASMA TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 119 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นด้วยการออกแบบและประยุกต์ใช้การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอลลำดับสำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ และกำจัดกลิ่น โดยได้สร้างถังปฏิกรณ์ที่สามารถให้กำเนิดพลาสมาได้น้ำ เมื่อป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้อิเล็กโตรด จากนั้นได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของไฟฟ้าแรงดันสูงประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz และแรงดันพัลส์กระแสตรง ต่อประสิทธิผลของการบำบัดน้ำเสียของระบบที่สร้างขึ้น น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำมาจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในเขตจังหวัดนครราชสีมา ผลการวิจัยพบว่าภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานค่าบีโอดีไม่เกิน 20-60 mg/L และค่าซีโอดีไม่เกิน 120-400 mg/L พลาสมาได้น้ำที่กำเนิดจากแรงดันพัลส์กระแสตรงมีประสิทธิผลในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามลำดับ ผลการวิจัยสรุปได้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่สร้างขึ้นสามารถบำบัดน้ำเสียได้เป็นอย่างดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ทัศนัย สุภนราพรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.บุญเรือง มะรังศรี

TASSANAI SUPANARAPAN : A PROTOTYPE DEVELOPMENT OF
WASTEWATER TREATMENT SYSTEM BY USING UNDERWATER
PLASMA TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUENG
MARUNGSRI, D. Eng., 119 PP.

UNDERWATER PLASMA/ELECTRICAL DISCHARGE/HYDROXYL
RADICAL/WASTEWATER TREATMENT

This thesis addresses the development of a prototype of a wastewater treatment system using an underwater plasma technique. The objective of this thesis is to develop a wastewater treatment system for treating the wastewater from the processed agricultural products industry to standard certified from the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment. This thesis begins with the design and applies the high voltage discharge technology to generate hydroxyl free radicals for decomposing organic substances and to eliminate odors in wastewater. A wastewater treatment chamber has been developed. Underwater plasma occurs inside the treatment chamber when applying high voltage to the electrodes. Then the effect of supply voltage has been studied, i.e., DC voltage, AC voltage 50 Hz, and DC pulse voltage, to compare the effectiveness of the wastewater treatment system. In this research, the wastewater was taken from the cassava starch factory in Nakhon Ratchasima province. The treatment process was conducted until the values of BOD and COD belong to the standard of 20-60 mg/L and 120-400 mg/L, respectively. By the treatment results, the fastest treatment process was taken from underwater plasma generated by DC pulse supplied voltage when compared to AC 50 Hz and DC

supplied voltages, respectively. The results confirm the effectiveness of a prototype of a wastewater treatment system as well.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

กมลวิทย์ ชื่นชูเกียรติ

Advisor's Signature

กมลวิทย์ ชื่นชูเกียรติ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำทั้งในด้านการเรียน การทำงานวิจัย และการแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ กลุ่มวิจัยรวมทั้งเพื่อน ๆ ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รัก ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด รวมทั้งครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนความรู้ให้ข้าพเจ้าตั้งแต่อนุบาลถึงปัจจุบัน จนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการทำงานเป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ทศไนย สุภณราพรรค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเรื่อง.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	4

2 ทัศนวิจารณ์กรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทัศนวิจารณ์กรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5

3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ.....	12
3.2 น้ำและความสำคัญ.....	12
3.3 น้ำเสีย.....	12
3.3.1 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิด	13
3.3.2 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก	13
3.4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย.....	14
3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2	ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย	16
3.4.3	ลักษณะทางชีวภาพของน้ำเสีย	18
3.5	Biochemical Oxygen Demand (BOD)	18
3.5.1	ปฏิกิริยาของ BOD.....	19
3.5.2	วิธีการหาค่า BOD	20
3.6	Chemical Oxygen Demand (COD)	22
3.6.1	การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด	22
3.6.2	การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด	23
3.6.3	การคำนวณหาค่า COD.....	23
3.7	กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	24
3.7.1	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร	24
3.7.2	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ	25
3.7.3	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์	26
3.7.4	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	27
3.7.5	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน	28
3.7.6	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ	29
3.8	กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	30
3.8.1	การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	30
3.8.2	โอโซน	32
3.8.3	การผลิตโอโซนโดยวิธีดีสารจไฟฟ้า.....	34
3.8.4	การบำบัดน้ำเสียด้วยการดีสารจสร้างโอโซน	34
3.9	ไฮดรอกซิลเรดิคัล	36
3.10	ดีสารจทางไฟฟ้า.....	37
3.10.1	ดีสารจไฟฟ้าสถิต	37
3.10.2	ดีสารจไฟฟ้าผ่า	38
3.11	พลาสมา.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.12	พลาสมาได้น้ำ	42
3.13	สรุป	47
4	วิธีการดำเนินการวิจัย	
4.1	กล่าวนำ.....	48
4.2	น้ำเสียที่ใช้ทดสอบ	48
4.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	50
4.3.1	การออกแบบต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ.....	50
4.3.2	การสร้างชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ.....	54
4.3.3	การทำงานของชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ	70
4.3.4	การเตรียมน้ำเสียสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ.....	72
4.3.5	วิธีการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ.....	73
4.4	วิธีการวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ.....	73
4.5	สรุป	74
5	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย	
5.1	กล่าวนำ.....	75
5.2	ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย	75
5.3	ผลการทดสอบ	75
5.3.1	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC	76
5.3.2	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse.....	77
5.3.3	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC	78
5.4	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD	79
5.4.1	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC	79
5.4.2	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC pulse.....	79
5.4.3	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย AC	81
5.4.4	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสีย	81
5.5	ประสิทธิภาพในการลดค่า COD	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5.1	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC	83
5.5.2	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC pulse.....	84
5.5.3	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย AC	84
5.5.4	ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสีย	85
5.6	การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน	87
5.6.1	การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC	87
5.6.2	การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC pulse.....	87
5.6.3	การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย AC	88
5.7	สรุป	88
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุป	90
6.2	ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง		93
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	ใบรายงานผลการวัดค่า BOD และ COD	97
ภาคผนวก ข.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	111
ประวัติผู้เขียน		119

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
4.1	ค่าพารามิเตอร์ R_2 ของแต่ละความถี่	62
4.2	เปรียบเทียบระหว่างความถี่จากการคำนวณและการทดลอง	64
4.3	รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ	72
4.4	เทคนิคในการวิเคราะห์ผลของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ	74
5.1	ค่า BOD และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง	75
5.2	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC	76
5.3	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse... ..	77
5.4	ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC	78
5.5	เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของค่า BOD	79
5.6	ผลการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบต่าง ๆ	82
5.7	เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของค่า COD	83
5.8	ผลการลดค่า COD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบต่าง ๆ	85

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องวัดค่าพีไอดี.....	19
3.2 เครื่องวัดค่าซีไอดี.....	23
3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ.....	25
3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์	26
3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	28
3.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน	29
3.7 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ	30
3.8 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	31
3.9 โครงสร้างโมเลกุลของแก๊สไอโซน	33
3.10 การผลิตไอโซนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ	35
3.11 อิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อสนามไฟฟ้าแบบต่าง	38
3.12 สถานะทั้ง 4 ของสาร	40
4.1 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	48
4.2 การวัดค่า pH ของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	49
4.3 ส่วนประกอบของระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ	50
4.4 ถึงปฏิกรณ์	51
4.5 ขนาดของถึงปฏิกรณ์	51
4.6 รายละเอียดถึงปฏิกรณ์	52
4.7 ขนาดแผ่นอิเล็กโทรด.....	53
4.8 ขนาดของแท่งสแตนเลสปลายแหลม.....	53
4.9 ลักษณะของอิเล็กโทรดปลายแหลม	53
4.10 อิเล็กโทรด	54
4.11 ถึงปฏิกรณ์และชุดอิเล็กโทรดปลายแหลม	55
4.12 ชุดปรับแรงดันให้หม้อแปลงทดสอบ	55
4.13 แผนภาพวงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุกระแสสลับ.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุกระแสลับ56
4.15	แผนภาพวงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานกระแสตรง57
4.16	วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานกระแสตรง58
4.17	การทำงานของแหล่งจ่าย DC Pulse60
4.18	วงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ของไอซีเบอร์ 55562
4.19	วงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง63
4.20	สัญญาณพัลส์ความถี่ 60 kHz64
4.21	สัญญาณพัลส์ความถี่ 70 kHz65
4.22	สัญญาณพัลส์ความถี่ 80 kHz65
4.23	สัญญาณพัลส์ความถี่ 90 kHz66
4.24	สัญญาณพัลส์ความถี่ 100 kHz66
4.25	วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค68
4.26	หัวโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง68
4.27	หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบค69
4.28	โครงสร้างการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบค69
4.29	ท่อพอลิส70
4.30	ระบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ71
4.31	ระบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ71
4.32	บริเวณที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย72
4.33	ลักษณะตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาใช้ทดสอบ73
5.1	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC76
5.2	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse77
5.3	ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC78
5.4	การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC80
5.5	การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse80
5.6	การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย AC81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย เปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย.....	82
5.8 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC	83
5.9 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse.....	84
5.10 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย AC	86
5.11 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย เปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาปัญหามลพิษทางน้ำได้กลายเป็นปัญหาใหญ่ของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และประเทศอุตสาหกรรม จึงมีผลผลิตทางการเกษตรและโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตรมากมาย ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำจากสารเคมีที่ตกค้างในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ชีวิตประจำวัน ทั้งจากการอุปโภคบริโภค และภาคการเกษตร ทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในประเทศ โดยน้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ซึ่งทำให้เกิดการเน่าเสีย และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งถ้ามีการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ดีพอเมื่อปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติก็จะส่งผลกระทบต่อชุมชนและสภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่โดยรอบโรงงาน

น้ำเสียที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติถ้าหากไม่ได้มีคุณภาพการบำบัดตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเพียงพอเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธี คือ วิธีทางชีวภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางไฟฟ้า โดยแหล่งน้ำเสียหลักในประเทศไทยคือโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมโดยมากมักนิยมการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธี ระบบสระผิ่ (Oxidation Pond) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) โดยระบบสระผิ่เป็นวิธีการบำบัดที่รวมวิธีทางชีวภาพและเคมีเข้าด้วยกัน แนวคิดหลักของระบบนี้คือการอาศัยการเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำด้วยพลังงานตามธรรมชาติ (แดด, ลม) โดยระบบสระผิ่จะทำการขุดบ่อขึ้นมาโดยจะมีลักษณะตื้น ๆ มีความลึกอยู่ระหว่าง 60-150 cm เพื่อให้แสงแดดสามารถส่องลงได้ทั่วถึง (Jern, 2549) จึงทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบสระผิ่มีประสิทธิภาพต่ำและใช้เวลาในการบำบัดนาน สำหรับวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้าที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าที่อาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย หรือสารปนเปื้อนที่มีตัวกลางเป็นน้ำ หลักการเบื้องต้น คือการให้กระแสไฟฟ้าตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนดละลายออกมาเป็นไอออน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคของสารแขวนลอย และสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำ

กล่าวคือทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ มีการหักล้างประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น และแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตกตะกอน หรือการลอยตะกอน แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ขั้วแอโนดจะค่อย ๆ ถูกกัดกร่อน และสูญเสียเนื้อของขั้วแอโนดไปอย่างต่อเนื่อง และอาจเกิดการระเบิดหรือฟิล์มบางเคลือบผิวขั้วไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ นอกจากนี้ยังทำได้ในระบบการบำบัดเล็ก ๆ (ศุภมาส คำนวณวิทยากุล, 2557) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นำเสนอ วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยทำให้เกิดการดิสชาร์จส่งผลให้เกิดพลาสมาได้น้ำผ่านขั้วอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบที่อยู่ภายในท่อพอร์รัส (Porous Tube) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical – OH) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ อีกทั้งไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถสลายตัวได้รวดเร็ว และไม่เกิดสารอันตรายตกค้างในน้ำ โดยเมื่อไฮดรอกซิลเรดิคัลสลายตัวจากกระบวนการบำบัดจะกลายเป็นโมเลกุลของออกซิเจน นอกจากนี้ไฮดรอกซิลเรดิคัลยังสามารถกำจัดสีและกลิ่นของน้ำเสียได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสร้างต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา โดยมีจุดมุ่งหมายในการขจัดกลิ่นรบกวน และบำบัดน้ำเสียจากโรงงานให้เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมก่อนปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ ให้อยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 1.2.2 เพื่อออกแบบสร้างชุดทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ
- 1.2.4 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ

1.3 ขอบเขตของงาน

- 1.3.1 กำหนดให้การศึกษาพลาสมาบางส่วนในถังปฏิกรณ์ของชุดทดสอบ โดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับปลายแหลม

1.3.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ทดสอบเป็นน้ำเสียที่ได้จากโรงงานแปรงมัน
สำปะหลังที่อยู่ในเขตจังหวัดนครราชสีมา

1.3.3 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ๕ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง อาคารศูนย์เครื่องมือ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปฏิกิริยารวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการ
พลาสมาได้น้ำ

1.4.2 การทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำกระทำที่อุณหภูมิต่ำ

1.4.3 การทดสอบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำโดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงในการ
ทดสอบในช่วง 0-30 kV ที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง กระแสตรงแบบพัลส์และกระแสสลับ

1.4.4 การทดสอบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำด้วยข้อต่อเล็ก โตรคแบบปลายแหลม
กับปลายแหลม

1.4.5 การทดสอบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำใช้ระยะเวลาในการทดสอบจน
จนกระทั่งค่า BOD และ COD อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการพลาสมาได้น้ำ

1.5.2 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของชนิดแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพในการ
บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ

1.5.3 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย
ด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ

1.5.4 ได้ชุดอุปกรณ์การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำ

1.5.5 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วย
เทคนิคพลาสมาได้น้ำ

1.6 การจัดรูปแบบวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำด้วยการประยุกต์ใช้ไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย การออกแบบชุดทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การเตรียมตัวอย่างน้ำเพื่อทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการดำเนินงานวิจัย วิธีใกล้เคียงที่เคยมีมาก่อน ผลการดำเนินงานวิจัยวิจัย และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานการวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE Science-Direct หนังสือ และแหล่งข้อมูลอ้างอิงจากเว็บไซต์ ผลการสำรวจสืบค้นปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาให้เข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับเรื่องการใช้ไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย ที่นักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นสาระสำคัญ แนวทางและประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยสามารถสรุปการดำเนินการวิจัย โดยแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1980	Glaze and Kang	ศึกษาพบว่าการใช้โอโซนร่วมกับแสง UV จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์พวกพอลิคลอริเนตไบฟีนีลที่เจือปนอยู่ในน้ำได้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1983	Hoigne and Bader	ศึกษาพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากโอโซนที่ค่า pH สูงร่วมกับการจ่ายกระแสไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากทำให้อัตราการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลล้วนขึ้นสามารถกำจัดคลอรีนไดออกไซด์ และไตรคลอโรเอทิลีน ได้สูงกว่าการบำบัดโดยใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว
1992	Galbraith	ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสลายตัวของ 1, 3, 5 – Trichlorobenze (TCB) โดยการใช้โอโซนโดยตรงอย่างเดียว O_3 /high p, O_3/H_2O_2 , O_3/UV และ $O_3/H_2O_2/UV$ พบว่า ที่ค่า pH = 7 อัตราการสลายตัวของ TCB เมื่อใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวจะช้ากว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลต และไฮดรอกซิลเรดิคอลร่วมด้วยรวมกันถึง 3 เท่า และในสภาพที่เป็นกรด อัตราการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลจะเกิดช้า ส่งผลให้อัตราการสลายตัวของ TCB ช้าลงตามไปด้วย
1998	Sun, Sato, Harano and Clements	ได้ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์เพื่อทำให้เกิดดีสารจันในน้ำส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
1998	สุเมธ และคณะ	ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เหล็กออกไซด์ประกอบกับโอโซน ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นเนื่องจากเหล็กออกไซด์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์สูงกว่าโอโซน
2001	Geenens, Bixio, and Thoeys	ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนสามารถลดความเป็นพิษด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน และยังสามารถลดค่าสัดส่วน COD/BOD ลงได้ 6 เท่า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2006	Grabowski, Van Veldhuizen, Pemen, and Rutgers	ทดลองปล่อยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ ทำให้เกิดพลาสมาเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ
2008	Burlica, Grim, Shih, Balkwill and Locke	ทดลองดิสชาร์จด้วยแรงดันแบบพัลส์เพื่อสร้างพลาสมาในอากาศเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย Escherichia Coli (E. coli)
2009	Yano, Uchiyama, Fukawa, Teranishi and Shimomura	ได้ทดลองบำบัดน้ำด้วยการดิสชาร์จแบบพัลส์พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการลดสีขึ้นกับแรงดันพัลส์ และขณะเกิดปฏิกิริยาถ้าทำให้แก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนลดสีเพิ่มขึ้นเช่นกัน
2009	Wu, Li, Li, Li, Qu, Sun and Sato	ได้พัฒนาการดิสชาร์จแบบพัลส์ใช้ในการสลายฟีนอลในน้ำ โดยนำทั้งสแตนด์มาทำเป็นอิเล็กโทรด ติดตั้งให้อยู่ภายในท่อพอลัส เพื่อแยกแก๊สและของเหลว และให้แรงดันที่อิเล็กโทรดเพื่อทำการดิสชาร์จโดยส่งผ่านรูพรุนของท่อเซรามิก เพื่อสลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำ ประสิทธิภาพในการสลายฟีนอลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลา และแรงดันของการเกิดดิสชาร์จ
2009	Bruggeman and Leys	ทดลองดิสชาร์จฟองอากาศในน้ำพบว่าสามารถลดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดีกว่าการดิสชาร์จในน้ำโดยตรง และการดิสชาร์จผ่านแก๊ส เนื่องจากอนุภาคนิวตริสต่าง ๆ เกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลน้ำเนื่องด้วยอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนโมเลกุลของน้ำ และการดิสชาร์จฟองอากาศทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนจำนวนมากถูกเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่จากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	Sato	ได้พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ใหม่โดยใช้ขั้วอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมเป็นขั้วบวก และแบบระนาบเป็นขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ และมีการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศที่บริเวณปลายแหลมของอิเล็กโตรดขั้วบวก พบว่าการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายอินทรีย์ได้มากขึ้น
2012	Sakiyama, Tomai, Miyano, and Graves	ได้ทำการทดลองดิสชาร์จได้น้ำเพื่อกำจัดเชื้อไวรัส โดยได้มีการทดลองใช้ลวดไทเทเนียมมาติเกลียวเป็นขั้วอิเล็กโตรดขั้วด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ ที่ความถี่สูง โดยภายในน้ำมีเชื้อ E. coli ผสมอยู่ จากการทดลองพบว่าเชื้อ E. coli กว่า 99.5% ถูกทำลาย หลังทำการดิสชาร์จด้วยเวลา 180 วินาที
2015	Fan, Sun and Yan	ได้พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาได้น้ำ โดยมีระบบหลัก 3 ระบบ คือ ระบบชาร์จ ระบบดิสชาร์จ และระบบทริกเกอร์ พบว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนอิเล็กโตรด จำนวนของอิเล็กโตรด แรงดันไฟฟ้า และระยะระหว่างช่องแคบ จะทำให้คุณสมบัติของการเกิดพลาสมาได้น้ำเปลี่ยนไป
2015	Kodama, Wang, Matsumoto, Namihira and Akiyama	ได้พัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาได้น้ำโดยใช้แรงดันแบบพัลส์ เพื่อสร้างพลาสมาสำหรับบำบัดน้ำเสีย พบว่าพลาสมาสามารถย่อยสลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้
2016	Zhao, Zhu, Yan, Liu, Liu, and Sun	ได้ทดลองสร้างพลาสมาด้วยขั้วอิเล็กโตรด ด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาผลของพลาสมาในน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดัน จะเกิดพลาสมาในน้ำเพิ่มขึ้น

จากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก และมีการนำพลาสมาเพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ทำให้ผู้วิจัยมองเห็นแนวทางในการศึกษาวิจัย ในส่วนถัดไปเป็นการสรุปงานวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ โดยกล่าวถึงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ โดยย่อ ดังนี้

โดยเริ่มจากการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาได้น้ำ ที่เกิดจากการปล่อยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ เพื่อให้เกิดการดีสชาร์จในน้ำ และเกิดพลาสมาเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ รวมถึงการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ (Grabowski et al., 2006) การทำลายแบคทีเรีย (Zhang et al., 2006) การทำลายเชื้อไวรัส (Hong et al., 2010) และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลของสารอินทรีย์ในน้ำ (Matsushima et al., 2006) โดยการดีสชาร์จเพื่อสร้างพลาสมาในการบำบัดน้ำเสียจะกระทำได้ในสามลักษณะคือ ดีสชาร์จในน้ำโดยตรง ดีสชาร์จผ่านแก๊ส และดีสชาร์จในฟองอากาศในน้ำ จากการทดลองของ Bruggemen พบว่าการดีสชาร์จในฟองอากาศในน้ำจะทำให้การลดของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดีที่สุด (Bruggemen et al., 2009) เนื่องจากอนุมูลอิสระต่าง ๆ เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล จะเกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลของน้ำเนื่องจากอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชน โมเลกุลของน้ำ จากการดีสชาร์จฟองอากาศทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก เมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากที่ถูกเร่งความเร็วในการเคลื่อนที่จากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน อัตราการก่อตัวของอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบมากขึ้น (Burlica et al., 2006)

นอกเหนือจากการดีสชาร์จเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นปัจจัยหลักในน้ำเสียแล้ว การดีสชาร์จได้น้ำนั้นยังสามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้ โดยได้มีการทดลองใช้หลอดไทเทเนียมมาตีเกลียวเป็นขั้วอิเล็กโทรดขั้วด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ความถี่สูงสร้างดีสชาร์จได้น้ำ โดยภายในน้ำมีเชื้อ E. coli ผสมอยู่ จากการทดลองพบว่าเชื้อ E. coli กว่า 99.5% ถูกทำลาย หลังเกิดดีสชาร์จ 180 วินาที (Sakiyama et al., 2009)

จากผลงานการวิจัยของ Bruggement et al. (2009) ได้รับการพัฒนาต่อยอดโดย Sato et al. (2010) ซึ่งใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบปลายแหลมเป็นขั้วบวก และแบบระนาบเป็นขั้วลบ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ และมีการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศที่บริเวณปลายแหลมของอิเล็กโทรดขั้วบวก พบว่าการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายอินทรีย์ได้มากขึ้น

ในขณะที่ทางฝั่งเอเชียได้มีการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศ ในขณะที่ทางฝั่งยุโรปได้มีการพัฒนาการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาได้น้ำด้วยการปรับปรุงขั้วอิเล็กโทรด โดยได้ทดลองใช้ท่อพอลัส ฟูมขั้วอิเล็กโทรดปลายแหลม โดยในการทดลองได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของการดีสชาร์จผ่านท่อพอลัสพบว่าการดีสชาร์จผ่านรูพุนที่ผิวของท่อ

พอลัส ทำให้สามารถลดการสึกหรอของขั้วอิเล็กโทรดจากปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระได้ (Lukes et al., 2009)

จากข้อมูลข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยบูรณาการข้อดีของวิธีต่าง ๆ โดยมีหลักการดังนี้ การดิสชาร์จได้น้ำนั้นจะทำให้เกิดพลาสมาขึ้น โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการก่อตัวของไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลนั้นมีคุณสมบัติในการออกซิไดส์สูงมาก จึงมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และยังสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในน้ำ จึงช่วยให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น บริเวณช่องว่างแคบระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบ จะมีน้ำเสียที่รอการบำบัด การสร้างพลาสมาไฟฟ้าได้น้ำทำได้โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ให้อิเล็กโทรด โดยขั้วบวกของอิเล็กโทรดเป็นแบบปลายแหลมที่อยู่ในท่อพอลัสเพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมของอิเล็กโทรด และขั้วลบแบบระนาบโค้ง ทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ระหว่างการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลของน้ำ เป็นผลให้อิเล็กตรอนของน้ำหลุดออกจากการโคจรรอบอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และโมเลกุลของไฮดรอกซิล และไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากโมเลกุลของน้ำจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีความเร็วสูงขึ้น วิ่งเข้าชนโมเลกุลของน้ำเป็นผลให้อิเล็กตรอนของน้ำหลุดออกจากการโคจรรอบอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และโมเลกุลของไฮดรอกซิล และไฮโดรเจน ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้วิ่งเข้าสู่อิเล็กโทรดขั้วบวก และเมื่อศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีสูงพอ จะเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วซึ่งเรียกว่าดิสชาร์จไฟฟ้า (Kozakova, 2011) จากนั้นปั๊มลมจะทำงานเพื่ออัดอากาศเข้าสู่ท่อพอลัสเพื่อใช้สร้างฟองอากาศในน้ำเสียที่จะทำการบำบัด เมื่อเกิดการดิสชาร์จระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองผ่านฟองอากาศ จะทำให้เกิดประจุพลาสมาในฟองอากาศ โดยกระแสพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีทั้งประจุบวกและประจุลบ และจากพลาสมาในฟองอากาศ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะแพร่กระจายไปสู่ น้ำต่อไป โดยประจุบวกและประจุลบของพลาสมาจะเข้าไปจับรอบพื้นผิวอนุภาคของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสีย หลังจากเข้าไปเกาะที่พื้นผิวรอบอนุภาคของเชื้อจุลินทรีย์แล้วประจุบวกและลบจะรวมพันธะ เป็น OH^- ที่เกาะกันอย่างเหนียวแน่น ไฮโดรเจน ($\text{H}^\bullet$) ที่อยู่ภายในเชื้อจุลินทรีย์จะถูกดึงเข้าไปรวมพันธะกับ OH^- จะกลายเป็น H_2O นั่นก็คือ น้ำ เมื่อเชื้อจุลินทรีย์ขาดองค์ประกอบของไฮโดรเจน โดยไฮโดรเจนคือองค์ประกอบของโปรตีนภายในเชื้อจุลินทรีย์ มีผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์ก็จะแตกสลาย และเชื้อจุลินทรีย์ก็จะตายลง และในส่วนของสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ จะทำให้เกิดกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า และค่าสภาพยอมไฟฟ้า ของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์

สามารถทำได้โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์ หรือเป็นช่วงเวลาเกิดจากการจ่ายพัลส์ แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงประมาณ 4×10^6 V/m และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10 ns ถึง 20 μ s ซึ่งสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของ ไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุน (Pores) เล็ก ๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (Programmed Cell Death) ซึ่งมีสองลักษณะคือ อะพอพโตซิส (Apoptosis) โดยจะทำให้เซลล์มีสัญญาณวิทยาเปลี่ยนแปลง และเนโครซิส (Necrosis) โดยการตายของเซลล์ลักษณะนี้คือ นิวเคลียสจะถูกทำลาย เมื่อจุลินทรีย์ในน้ำลดลงจะทำให้ความสกปรกของน้ำลดลงด้วย โดยสามารถตรวจวัดความสกปรกของน้ำได้จากการวัดได้จากค่า BOD และ ค่า COD นอกจากนี้ยังทำให้สีและกลิ่นของน้ำดีขึ้นอีกด้วย



บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้น จำเป็นต้องรู้ถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อน ในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับเรื่องน้ำและความสำคัญ น้ำเสีย การแบ่งประเภทของน้ำเสีย ลักษณะสมบัติน้ำเสีย การแบ่งประเภทของลักษณะสมบัติน้ำเสีย BOD (Biochemical Oxygen Demand: BOD) และ COD (Chemical Oxygen Demand: COD) กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้า และวิธีการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}^\cdot$) ดีสชาร์จทางไฟฟ้า กระบวนการเกิดพลาสมา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2 น้ำและความสำคัญ

น้ำถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผิวโลก โดยน้ำมีพื้นที่ถึง 71 % ของผิวโลก และเป็นปัจจัยสำคัญต่อชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกทั้งมนุษย์ สัตว์ พืช และจุลินทรีย์ น้ำถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญ โดยเฉพาะกับมนุษย์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำในการอุปโภค บริโภค มนุษย์บริโภคน้ำเข้าไปในร่างกาย และปล่อยน้ำออกจากร่างกายมากกว่าสารอื่น ๆ น้ำเป็นส่วนสำคัญของเนื้อเยื่อเกือบทุกชนิด และยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับลำเลียงถ่ายเทสารอาหารและของเสีย นอกจากนี้ยังทำหน้าที่รักษาสมดุลอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ โดยร่างกายของมนุษย์ประกอบด้วยน้ำมากถึงประมาณ 70% ของน้ำหนักตัว นอกจากนี้ น้ำยังใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์อีกหลายอย่าง เช่น ใช้ในการประกอบอาหาร ใช้ในการเกษตร ใช้ในการอุตสาหกรรม ใช้ผลิตไฟฟ้า จึงนับว่าน้ำเป็นทรัพยากรที่มีประโยชน์และมีความสำคัญต่อมนุษย์อย่างยิ่ง (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)

3.3 น้ำเสีย

ผลน้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ แล้ว ตัวอย่างเช่น การใช้ในชีวิตประจำวันของประชากร เช่น ใช้ในการอุปโภคและบริโภค การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การล้างวัตถุดิบ วัสดุอุปกรณ์ การหล่อเย็น

ซึ่งทำให้น้ำดังกล่าวมีลักษณะสมบัติต่างไปจากเดิม เนื่องจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับกิจกรรมที่ใช้ประโยชน์จากน้ำนั้น นอกจากนี้แล้วสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันออกไป (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552) น้ำเสียสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ เช่น การแบ่งตามแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย (Sources of Wastewater) การแบ่งตามชนิดของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Types of Impurities) (Jern, 2549)

3.3.1 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิด

การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิดเป็นที่นิยมใช้กันมาก ทั้งนี้เนื่องจากทำให้ทราบถึงแหล่งที่มาของน้ำเสีย รวมทั้งสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียด้วย การแบ่งประเภทของน้ำเสียโดยวิธีการนี้สามารถแบ่งน้ำเสียได้เป็น 3 ประเภท คือ

(1) น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าน้ำโสโครก (Sewage) ได้แก่ น้ำทิ้งที่มาจากชุมชน บ้านเรือนที่พักอาศัย อาคาร ร้านค้า ภัตตาคาร โรงแรม เป็นต้น โดยน้ำเสียดังกล่าวเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การอุปโภคบริโภค การชำระล้างร่างกาย การขับถ่าย การซักล้าง ตลอดจนการประกอบอาหาร เป็นต้น น้ำเสียชุมชนนี้มักปนเปื้อนสิ่งสกปรกจำพวกสารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร อุจจาระ ปัสสาวะ นอกจากนี้ยังมีผงซักฟอก สบู่ และสารลดแรงตึงผิวที่เป็นส่วนประกอบในผงซักฟอก สบู่ ตลอดจนจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และจุลินทรีย์ทั่วไป

(2) น้ำเสียเกษตรกรรม

น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural Wastewater) เป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากบริเวณที่มีกิจกรรมเกี่ยวกับการเกษตรไม่ว่าจะเป็นบริเวณเพาะปลูก หรือบริเวณเลี้ยงสัตว์ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากบริเวณเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่มักจะเป็นสารอินทรีย์ที่มาจากเศษอาหารสัตว์ และสิ่งขับถ่ายออกจากตัวสัตว์ ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้มักจะมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง รวมทั้งอาจมีความเข้มข้นของของแข็งไม่ละลายน้ำสูงด้วย ส่วนน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เพาะปลูก มักจะมีการปนเปื้อนสารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ที่ถูกใช้ในพื้นที่จะเพาะปลูก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าน้ำเสียจากการเกษตรมักจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากรวมทั้งสารเคมีด้วย

(3) น้ำเสียอุตสาหกรรม

น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) เป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรกที่แตกต่างกันและปริมาณของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนก็แตกต่างกันออกไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม วัตถุดิบที่ใช้ ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ โดยที่สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอาจเป็น

สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์หรืออาจเป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ก็ได้ น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักรอุปกรณ์ การระบายความร้อน รวมทั้งกิจกรรมต่าง ๆ ของพนักงานในโรงงาน เป็นต้น

3.3.2 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก

การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก การแบ่งประเภทของน้ำเสียโดยวิธีการนี้สามารถแบ่งน้ำเสียได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) น้ำเสียอินทรีย์

น้ำเสียอินทรีย์ (Organic Wastewater) เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารและแปรรูปอาหาร น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์และน้ำเสียจากห้องเย็น เป็นต้น

(2) น้ำเสียอนินทรีย์

น้ำเสียอนินทรีย์ (Inorganic Wastewater) เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี อุตสาหกรรมการชุบโลหะ และอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น

3.4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (Wastewater Properties) โดยทั่วไปจะมี 3 ลักษณะคือ ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ ลักษณะน้ำเสียทางเคมี และลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2542)

3.4.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย

ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย (Physical Characteristics) จะประกอบไปด้วย ปริมาณของแข็ง กลิ่น อุณหภูมิ สี และความขุ่น โดยแต่ละลักษณะจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เพื่อช่วยให้สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำเสียในทางกายภาพ

(1) ปริมาณของแข็ง (Solids) หมายถึง สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากที่ระเหยเอาน้ำออกจนหมด สิ่งที่เหลืออยู่หลังจากระเหยน้ำออกไปแล้วมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายน้ำได้หรือไม่ละลายน้ำก็ได้ ดังนั้นการแบ่งชนิดของของแข็งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอาจจะแบ่งตามลักษณะการละลาย ได้แก่ ของแข็งที่ละลายน้ำได้และของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ในการหาปริมาณของแข็งในน้ำเสียนั้นมีความสำคัญอย่างมากและสามารถหาได้ในหลายประเภท ดังนี้

- ค่าของแข็งตกตะกอน (Settleable Solids) มีความสำคัญมากโดยเฉพาะในการออกแบบถังตกตะกอนและขนาดของเครื่องสูบตะกอน ของแข็งตกตะกอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ของแข็งตกตะกอนระเหยได้และของแข็งตกตะกอนไม่ระเหย

- ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS) หมายถึง ของแข็งส่วนที่ไม่ละลายในน้ำแต่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ เช่น เกลือสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์

- ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) หมายถึง ของแข็งทั้งหมดที่เหลืออยู่หลังจากระเหยน้ำออกหมดแล้ว เพื่อให้ทราบว่าปริมาณสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียเป็นเท่าใด

- ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids: VS) หมายถึง ค่าของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิสูง ($550 \pm 50^{\circ}\text{C}$) ของแข็งนี้ได้แก่ สารอินทรีย์ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

(2) กลิ่น (Odor) กลิ่นจากน้ำเสีย ส่วนมากแล้วมาจากแก๊สที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แก๊สส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือแก๊สไข่เน่า ซึ่งเป็นสารประกอบชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจน สำหรับการกำจัดกลิ่น อาจใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดซ์สารที่ทำให้เกิดกลิ่น เช่น คลอรีน (Cl) ไฮโปคลอไรต์ (ClO^-) เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) หรือเครื่องกรองชนิดคาร์บอน (Carbon Filter)

(3) อุณหภูมิ (Temperature) น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยมากจะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ และเมื่อปล่อยทิ้งไปยังแม่น้ำ ลำคลอง จะทำให้สภาพแวดล้อมในแม่น้ำ ลำคลองนั้น ๆ เปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนี้

- น้ำในแม่น้ำ ลำคลองจะมีปริมาณของออกซิเจนลดลงกว่าปกติ เพราะค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำลดลง เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

- เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาชีวเคมีของพวกจุลินทรีย์ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยหมายความว่า ออกซิเจนในน้ำได้ถูกใช้เพิ่มมากขึ้น เช่น ในฤดูร้อน น้ำในแม่น้ำ ลำคลอง จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าในฤดูหนาว

- เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าปกติ การเจริญเติบโตของพืชที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำจะมีมากกว่าปกติ และอาจเกิดราขึ้นได้ในแหล่งน้ำนั้น

(4) สี (Color) สีของน้ำเสียเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปนเปื้อนมาแต่แรก เช่น สีของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า ฟอกย้อม เป็นต้น สีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียหลังจากการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่ง หรือเกิดขึ้นหลังจากผ่านการบำบัดเช่นในกรณีระบบบำบัดแบบบ่อฝั่ ที่อาศัยสาหร่ายเป็นตัวให้ออกซิเจนกับบ่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งตัวสาหร่ายเองนั้นจะทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีสีเขียว นอกจากนี้สีของน้ำเสียอาจเกิดขึ้นจากการย่อยสลายหรือน้ำเสียของสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น จากการย่อยสลายของเศษใบไม้หรือจุลินทรีย์สารอินทรีย์ต่าง ๆ มักจะเป็น

สีชา เป็นต้น ผลเสียของสีในน้ำเสียส่วนใหญ่จะส่งผลต่อการส่องผ่านของแสงแดดลงได้น้ำทำให้การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายลดลง

(5) ความขุ่น (Turbidity) ความขุ่น คือ สารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ จะกั้นหรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำได้มากถึง 100 % เช่นเดียวกับสี

3.4.2 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสีย

ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย (Chemical Characteristics) ที่จำเป็นในการตรวจวิเคราะห์ จะประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

(1) สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอาจจะอยู่ในรูปของสารละลาย สารแขวนลอยและอยู่ในรูปของแข็งากตะกอนได้ สารเหล่านี้อาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามคุณสมบัติในการย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ คือ สารที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์และสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์หรือย่อยสลายได้ยากโดยจุลินทรีย์ การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีการหาได้หลายรูปแบบ กล่าวคือ สามารถหาได้ในรูปของการหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการสลายสารอินทรีย์นั้น หรือหากทราบปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ในเรื่องของการวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติของน้ำเสียนั้นมักไม่นิยมที่จะวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ เช่น วิเคราะห์หาน้ำตาล โปรตีนหรือแป้ง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียโดยทั่วไปประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายประเภทผสมกันอยู่ การวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก การหาปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของการหาปริมาณความต้องการออกซิเจนจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 4 วิธี คือ

- ซีโอดี (COD: Chemical Oxygen Demand)
- บีโอดี (BOD: Biochemical Oxygen Demand)
- ทีโอดี (TOD: Total Organic Demand)
- ทีเอชโอดี (ThOD: Theoretical Oxygen Demand)

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ค่าแบบ BOD และ COD ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยค่า BOD ไม่ควรเกิน 20 – 60 mg/L และค่า COD ไม่ควรเกิน 120 - 400 mg/L (มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, 2539)

(2) สารอนินทรีย์ น้ำเสียทั่วไปจะมีปริมาณสารอนินทรีย์ปนเปื้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียนั้น ๆ โดยสารอนินทรีย์บางชนิดจะเป็นสารสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด แต่สารอนินทรีย์บางชนิดอาจจะมีอยู่ในน้ำเสียไม่ได้เพราะจะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

ปริมาณโลหะหนัก เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่จะละลายอยู่ในน้ำเสียในรูปของไอออนและส่วนใหญ่จะเป็นพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา กล่าวคืออาจจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียด้วย

ความเป็นด่าง (Alkalinity) ความเป็นด่าง หมายถึง ความจุของน้ำที่สะเทินกรด ความสามารถของน้ำที่จะทำให้กรดเป็นกลาง ความสามารถของน้ำที่จะได้รับไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพื่อทำให้กรดเป็นกลาง ค่าความเป็นด่างในน้ำเสียส่วนใหญ่จะเป็นผลมาจากไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตของโลหะต่าง ๆ เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) หรือแอมโมเนีย (NH_3) แต่น้ำเสียส่วนใหญ่ค่าความเป็นด่างมักมาจากแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) และแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ($Mg(HCO_3)_2$)

คลอไรด์ (Chloride; Cl^-) น้ำเสียส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของเกลือชนิดต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะเกลือคลอไรด์ ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารมักมีการปนเปื้อนของคลอไรด์เนื่องจากในอุตสาหกรรมอาหารจะมีการใช้เกลือคลอไรด์ในกระบวนการผลิต คลอไรด์ในน้ำเสียหากมีปริมาณไม่มากอาจจะไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมมากนัก แต่หากมีปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสีย

สารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur Compounds) สารประกอบซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำเสียมีอยู่หลายรูปแบบตามชนิดและแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย สารประกอบซัลเฟอร์อาจจะอยู่ในรูปของซัลเฟอร์อินทรีย์ เช่น โปรตีน และกรดอะมิโนแอซิด (Amino Acid) สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารประกอบซัลเฟตและธาตุซัลเฟอร์ เป็นต้น สารประกอบซัลเฟอร์สามารถเปลี่ยนรูปไปมาได้โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์เป็นสำคัญ วิธีการวิเคราะห์หาค่าซัลเฟตมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกันมากและใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียคือ การวิเคราะห์โดยการวัดความขุ่น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วแล้วสามารถหาซัลเฟตในน้ำตัวอย่างในปริมาณต่ำ ๆ หากน้ำตัวอย่างมีปริมาณซัลเฟตสูงจะต้องทำการเจือจางก่อน

แก๊ส (Gas) แก๊สที่พบในน้ำเสียมีทั้งอยู่ในน้ำเสียเดิมหรือเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีโดยจุลินทรีย์ในน้ำเสียหรือระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย และมีเทน (CH_4) ความสามารถในการละลายของแก๊สต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของเกลือต่าง ๆ ในน้ำเสีย หรือสารแขวนลอยในน้ำเสีย

3.4.3 ลักษณะทางชีวภาพของน้ำเสีย

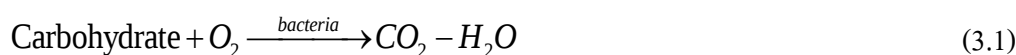
ลักษณะน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Characteristics) ซึ่งจุลินทรีย์ที่กล่าวถึงจะมีทั้งแบบจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดโรค (Normal Flora) ได้แก่ พวกแบคทีเรีย (Bacteria) โปรโตซัว (Protozoa) สาหร่ายหรือราบางชนิด และจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคในสิ่งมีชีวิต (Pathogenic Bacteria) ได้แก่ ไวรัส แบคทีเรีย โปรโตซัว และหนอนพยาธิ เป็นต้น น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ น้ำเสียที่มาจากชุมชน หรือโรงพยาบาล ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ จากการขับถ่ายซึ่งบางครั้งอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อโรค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจหาและทำการทำลายก่อนจะระบายลงสู่แม่น้ำลำคลองหรือพื้นที่สาธารณะ

3.5 Biochemical Oxygen Demand (BOD)

การวิเคราะห์ค่าบีโอดีเป็นการวัดความสกปรกของน้ำคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่ลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย (Bacteria) นำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจนนี้ สารอินทรีย์เปรียบเสมือนเป็นอาหารของแบคทีเรียใช้ในการเจริญเติบโต แบ่งตัวและขยายพันธุ์สืบต่อไปกระบวนการนี้ทำให้ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำถูกใช้ไปเป็นอาหารของแบคทีเรีย ทำให้ลดจำนวนน้อยลงเรื่อย ๆ เกิดการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย ผลผลิตสุดท้ายได้พวกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียและน้ำ แบคทีเรียใช้ออกซิเจนเพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจแบ่งการย่อยสลายเป็น 2 ระยะ (“Biochemical Oxygen Demand,” เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2, 2547) คือ

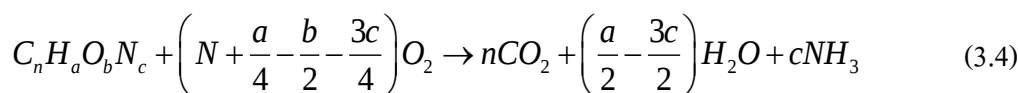
ระยะที่ 1 เป็นการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอน เช่น พวกแป้งและโปรตีน ให้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียและน้ำ ดังสมการเคมีที่ 3.1 และสมการเคมีที่ 3.2



ระยะที่ 2 เป็นการย่อยสลายสารแอมโมเนียให้เป็นพวกไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic Nitrogen) โดยแบคทีเรียพวกไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) หรือพวกออโตโทรฟริกแบคทีเรีย (Autotrophic Bacteria) จะออกซิไดซ์ดังสมการเคมีที่ 3.3 ตามลำดับ



ปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวทั้งสองระยะอาจเขียนสมการทั่ว ๆ ไปดังสมการเคมีที่ 3.4



จากสมการเคมีที่ 3.4 พบว่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้นั้น (Decomposable Organic Matter) จะให้ผลผลิตสุดท้ายของการย่อยสลายเป็นสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแอมโมเนีย การหาปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำในรูปของบีโอดี โดยการหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปทั้งหมดในระหว่างสิ่งมีชีวิตใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรีย) จึงใช้ค่าบีโอดีบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสียต่าง ๆ ได้โดยวิเคราะห์ออกมาในรูปของออกซิเจนละลายน้ำ สำหรับการวิเคราะห์ค่า BOD ในงานวิจัยนี้ได้ใช้บริการที่หน่วยบริการทางห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในส่วนงานของการทดสอบคุณภาพน้ำมีการทดสอบวิเคราะห์ค่าบีโอดีด้วยวิธี 5 Day BOD Test ตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 Accreditation ทำให้ค่าที่ได้รับสามารถเชื่อถือได้ ตัวอย่างเครื่องวัดค่า BOD แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องวัดค่าบีโอดี

(ที่มา : <https://legatool.com/th/lovibond-bd600-bod-oxidirect-complete-system-with-6-sensors>)

3.5.1 ปฏิกิริยาของ BOD

การย่อยสลายตัวในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ BOD เป็นไปตามธรรมชาติเกิดขึ้นที่ 20 °C ที่เป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในน้ำธรรมชาติทั่วไป สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้หมดอย่างสมบูรณ์นั้นช้ามาก ฉะนั้นในทางปฏิบัติถือว่าระยะเวลา 20 วัน จะมีการย่อยสลายได้เกือบสมบูรณ์

ส่วนใหญ่จะมีการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 5 วัน ดังนั้นในการหาค่า BOD ซึ่งเกี่ยวกับการวัดค่าออกซิเจนของแบคทีเรียเพื่อใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สารในน้ำเสีย ภายใต้สภาวะที่เหมือนธรรมชาติที่สุด เพื่อการย่อยสลายที่คงที่ ต้องเก็บตัวอย่างน้ำไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน ถ้าเวลาน้อยกว่านี้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปจะน้อยมาก และเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ O₂ ในระยะที่ 2 ซึ่งพวกไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะไปย่อยสลายพวกสารแอมโมเนียให้สารไนโตรทามกจะทำให้ค่าของ BOD ผิดจากความเป็นจริงไปมาก ค่าของ BOD ที่ 5 วันใช้สัญลักษณ์ BOD₅ (5 - day BOD) ค่าของ 5 - day BOD นี้ เป็นปริมาณที่ได้ถึง 70 – 80 % ของ Total BOD การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยพวกแบคทีเรียในน้ำภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนพบว่าปริมาณของสารอินทรีย์จะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากในปฏิกิริยาต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์และค่าของ BOD ก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายหมด ค่า BOD ที่ได้ จะเป็นค่า BOD ทั้งหมดของน้ำนั้นเรียกว่า Ultimate BOD จะเห็นได้ว่าค่า BOD ทั้งหมดของน้ำใด ๆ เปรียบได้กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายน้อยลง ดังนั้นปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ไปจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย ซึ่งสามารถหาค่าของ BOD ที่มีการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์หรือจะหาค่าของ BOD เมื่อมีการย่อยสลายไปได้ ณ เวลาไหนก็ได้เช่นกันจากการคำนวณดังสมการที่ 3.5

$$Y = L(1 - 10^{-kt}) \quad (3.5)$$

เมื่อ Y = ค่า BOD ที่เวลา t

L = Total BOD หรือ Ultimate BOD มีหน่วยเป็น mg/L

K = เป็นค่าคงตัวซึ่งแปรผันไปตามอุณหภูมิของน้ำ ชนิดของแบคทีเรียและสารอินทรีย์หา

ได้จากการทดลองค่าประมาณ 0.05 – 0.3 ต่อวัน ประกติประมาณ 0.1 ต่อวัน

3.5.2 วิธีการหาค่า BOD

วิธีการหาค่า BOD มี 2 วิธี คือ

(1) วิธีตรง (Direct Method)

วิธีตรงเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้กับตัวอย่างน้ำที่มีความสกปรกน้อย คือมีค่า BOD ไม่เกิน 7 mg/L (ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างน้ำเสียมีความสกปรกมาก ทางหน่วยบริการทางห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในส่วนงานของการทดสอบคุณภาพน้ำ จึงไม่ได้ใช้วิธีตรงในการวัด) ส่วนใหญ่เป็นน้ำจากแม่น้ำ วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเจือจางตัวอย่างน้ำด้วยน้ำกลั่นสามารถใช้ตัวอย่างน้ำมาหาค่า BOD โดยตรง การหาค่า BOD ทำได้ด้วยวิธีการหาออกซิเจนที่ละลาย

น้ำ (dissolved oxygen: DO) โดยการหาค่าความต่างของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในตัวอย่างน้ำที่วัดได้วันแรก (DO_0) กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในตัวอย่างน้ำเดียวกันที่เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 วัน (DO_5) ดังสมการที่ 3.6 (อรดี แจ่มอุลิตร์ตัน, 2554)

$$BOD = DO_0 - DO_5 \quad (3.6)$$

เมื่อ BOD = ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในเวลา 5 วัน มีหน่วยเป็น mg/L
 DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่ไต่เตรตได้ในวันแรก
 DO_5 = ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายในน้ำที่ไต่เตรตได้ หลังจากเก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 วัน

(2) วิธีเจือจาง (Dilution Method)

วิธีเจือจางถูกนำมาใช้เมื่อตัวอย่างน้ำมีค่า BOD สูงกว่า 7 mg/L (หน่วยบริการทางห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในส่วนงานของการทดสอบคุณภาพน้ำได้ใช้วิธีเจือจางในการวัดค่า BOD ของทุกตัวอย่างน้ำในงานวิจัยนี้) คือตัวอย่างน้ำที่มีความสกปรก เช่น น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม น้ำเหล่านี้จะมีค่า BOD_5 เกิน 7 mg/L ดังนั้นถ้าไม่ทำการเจือจางลง ปริมาณออกซิเจน ในตัวอย่างจะมีไม่พอที่จะใช้ย่อยสารอินทรีย์ในน้ำ นั่นคือไม่สามารถวัดค่าของ DO_5 เนื่องจากมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงต้องทำให้ตัวอย่างน้ำเจือจางก่อนด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเนื่องจากอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือ ดังนั้น ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในตัวอย่าง ก็ถูกทำให้เจือจางเป็นปฏิกาลโดยตรงกับเปอร์เซ็นต์ของการทำให้เจือจาง โดยมีวิธีการคำนวณดังสมการเคมีที่ 3.7 และสมการเคมีที่ 3.8

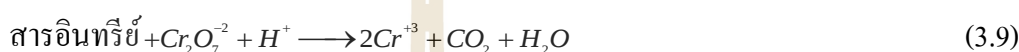
$$BOD = \frac{DO_0 - DO_5}{\%mixture} \quad (3.7)$$

$$BOD = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2) \times 100}{\%mixture} \quad (3.8)$$

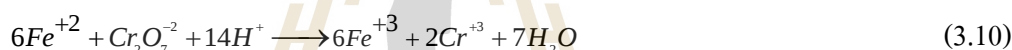
เมื่อ $D_1 = DO_0$ ของตัวอย่างที่เจือจางแล้ว
 $D_2 = DO_5$ ของตัวอย่างที่เจือจางแล้ว
 $B_1 = DO_0$ ของน้ำเจือจาง
 $B_2 = DO_5$ ของน้ำเจือจาง

3.6 Chemical Oxygen Demand (COD)

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลปฏิกิริยาสุดท้าย โดยจะถูกวัดในรูปของปริมาณ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ที่หายไปในช่วงการทำรีฟลักซ์ (Reflux) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์จะเริ่มจากการต้มน้ำเสียกับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด สารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมต ดังสมการเคมีที่ 3.9 (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2552)



จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณสารโพแทสเซียมไดโครเมต ที่เหลืออยู่ด้วยการไตเตรดกับแอมโมเนียมเฟอร์ริซัลเฟต (NH_4) โดยมีเฟอโรอิน (Ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ดังปฏิกิริยาดังสมการเคมีที่ 3.10



การรีฟลักซ์มี 2 วิธี คือ การรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux) และการรีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux) โดยในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดเพียงวิธีเดียว เนื่องจากวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดนั้นจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากกว่า เพราะมีการสัมผัสกับสารโพแทสเซียมไดโครเมต ได้นานกว่าวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิด และหน่วยบริการทางห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในส่วนงานของการทดสอบคุณภาพน้ำมีการทดสอบวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดที่ได้มาตรฐาน ISO/IEC 17025 Accreditation ทำให้ค่าที่ได้รับสามารถเชื่อถือได้

3.6.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบเปิดเริ่มจากนำสารประกอบอินทรีย์ไปออกซิไดซ์ด้วย โพแทสเซียมไดโครเมต ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยใช้ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะที่ร้อนและมีความเป็นกรดสูง สารผสมดังกล่าวออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในสารละลาย การวิเคราะห์ค่าซีโอดีทำได้ด้วยการหาปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ทั้งหมดในสารละลายตัวอย่างแล้วคำนวณเป็นปริมาณออกซิเจน

ส่วนโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือหลังการรีฟลักซ์หาได้ด้วยการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐาน แอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟต (Standard Ammonium Ferrous Sulfate Solution) โดยใช้เฟอร์โรอิน (Ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ (ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข, 2553)

3.6.2 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิดต้องผสมตัวอย่างน้ำที่มีสารแขวนลอยให้เข้ากันให้ดี เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง และวิธีนี้จะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย เพราะสามารถถูก ออกซิไดซ์ได้มากกว่าวิธีฟลักซ์แบบเปิดเนื่องจากมีการสัมผัสกับสารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ได้นานกว่าวิธีฟลักซ์แบบเปิด ตัวอย่างเครื่องวัดค่า COD แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดค่าซีโอดี

(ที่มา : <https://legatool.com/th/Lovibond-multidirect>)

3.6.3 การคำนวณหาค่า COD

ค่า COD สามารถคำนวณ โดยใช้สมการที่ 3.11

$$COD = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{T} \quad (3.11)$$

เมื่อ A = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทแบลงค์
 B = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ
 N = นอร์มัลลิตีของ FAS
 T = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mg/L)

3.7 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ทั้งหมด 6 แบบ ดังนี้ (สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย และกรมควบคุมมลพิษ, 2540)

3.7.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ผสมในน้ำเสีย ซึ่งแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 รูปแบบ คือ บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) บ่อแฟคัลทีทีฟ (Facultative Pond) บ่อแอโรบิก (Aerobic Pond)

(1) บ่อแอนแอโรบิก เป็นระบบที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงโดยไม่ต้องใช้ออกซิเจน บ่อนี้จะถูกออกแบบให้มีอัตรารับสารอินทรีย์สูงมาก จนสาหร่ายและการเติมออกซิเจนที่ผิวหน้าไม่สามารถผลิตและป้อนออกซิเจนได้ทัน ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนภายในบ่อ จึงเหมาะกับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และปริมาณของแข็งสูง เนื่องจากของแข็งจะตกลงสู่ก้นบ่อและถูกย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก น้ำเสียส่วนที่ผ่านการบำบัดจากบ่อนี้จะระบายต่อไปยังบ่อแฟคัลทีฟเพื่อบำบัดต่อไป

(2) บ่อแฟคัลทีฟ เป็นบ่อที่นิยมใช้กันมากที่สุด ภายในบ่อมีลักษณะการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนของบ่อเป็นแบบแอโรบิกได้รับออกซิเจนจากการถ่ายเทอากาศที่บริเวณผิวหน้าและจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และส่วนล่างของบ่ออยู่ในสภาพแอนแอโรบิก บ่อแฟคัลทีฟนี้โดยปกติแล้วจะรับน้ำเสียจากที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาก่อน กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในบ่อแฟคัลทีฟ เรียกว่า การทำความสะอาดตัวเอง (Self-Purification) สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประเภทที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เพื่อเป็นอาหารและสำหรับการสร้างเซลล์ใหม่และเป็นพลังงาน โดยใช้ออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่อยู่ในบ่อส่วนบน สำหรับบ่อส่วนล่างจนถึงก้นบ่อซึ่งแสงแดดส่องไม่ถึง จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ จนเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition) และมีจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สเช่นเดียวกับบ่อแอนแอโรบิก แต่แก๊สที่ลอยขึ้นมาจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่อยู่ช่วงบนของบ่อทำให้ไม่เกิดกลิ่นเหม็น

(3) บ่อแอโรบิก (Aerobic Pond) บ่อแอโรบิกเป็นบ่อที่มีแบคทีเรียและสาหร่ายแขวนลอยอยู่ เป็นบ่อที่มีความลึกไม่มากนักเพื่อให้ออกซิเจนกระจายทั่วทั้งบ่อและมีสภาพเป็นแอ

โรบิคตลอดความลึก โดยอาศัยออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และการเติมอากาศที่ผิวน้ำ และยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ส่วนหนึ่งโดยอาศัยแสงแดด

3.7.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon หรือ AL) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) ที่ติดตั้งแบบทุ่นลอยหรือยึดติดกับแท่นก็ได้ เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้มีปริมาณเพียงพอ สำหรับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่าบีโอดี ได้ร้อยละ 80-95 โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยมีเครื่องเติมอากาศซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อด้วย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงภายในบ่อ หลักการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งน้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่มีความสกปรกค่อนข้างมาก และน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยปกติจะออกแบบให้บ่อมีความลึกประมาณ 2-6 m ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Detention Time) ภายในบ่อเติมอากาศประมาณ 3-10 วัน และเครื่องเติมอากาศจะต้องออกแบบให้มีประสิทธิภาพสามารถทำให้เกิดการผสมกันของตะกอนจุลินทรีย์ ออกซิเจนละลายในน้ำ และน้ำเสีย นอกจากนี้จะต้องมีบ่อป้อม (Polishing Pond หรือ Maturation Pond) รับน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศเพื่อตกตะกอนและปรับสภาพน้ำทิ้งก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้จะต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำภายในบ่อป้อมและระยะเวลาเก็บกักให้เหมาะสมไม่น้อยเกินไป เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตเพิ่มปริมาณของสาหร่าย (Algae) ในบ่อป้อมมากเกินไป ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศมีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ

(ที่มา : http://www.isma.fr/en_lagunage-documentation.html)

3.7.3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland) บึงประดิษฐ์ มี 2 ประเภทได้แก่ แบบ Free Water Surface Wetland (FWS) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับบึงธรรมชาติ และแบบ Vegetated Submerged Bed System (VSB) ซึ่งจะมีชั้นดินปนทรายสำหรับปลูกพืชน้ำและชั้นหินรองก้นบ่อเพื่อเป็นตัวกรองน้ำเสีย ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มีลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

(ที่มา : https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id029539.html)

(1) ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Free Water Surface Wetland (FWS) เป็นแบบที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านการบำบัดจากบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond) แล้ว ลักษณะของระบบแบบนี้จะเป็นบ่อดินที่มีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูพื้นให้ได้ระดับเพื่อให้ น้ำเสียไหลตามแนวนอนขนานกับพื้นดิน บ่อดินจะมีความลึกแตกต่างกันเพื่อให้เกิดกระบวนการบำบัดตามธรรมชาติอย่างสมบูรณ์

(2) ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Vegetated Submerged Bed System (VSB) ระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้จะมีข้อดีกว่าแบบ Free Water Surface Wetland คือ เป็นระบบที่แยกน้ำเสียไม่ให้ถูกรบกวนจากแมลงหรือสัตว์ และป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดโรคมานปนเปื้อนกับคนได้ ในบางประเทศใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเกรอะ (Septic Tank) และปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization Pond) หรือใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบแอกติเวเต็ดจ์สแลจจ์ (Activated Sludge) และระบบอาร์บีซี (RBC) หรือใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระบายออกจากอาคารคักน้ำเสีย (CSO) เป็นต้น

3.7.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge Process) เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยา โดยใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเดินระบบประเภทนี้จะมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ในปัจจุบัน ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์มีการพัฒนาใช้งานหลายรูปแบบ เช่น ระบบแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mix) กระบวนการปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Process) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) หรือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) เป็นต้น หลักการทำงานของระบบ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ถังเติมอากาศ (Aeration Tank) และถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) โดยน้ำเสียจะถูกส่งเข้าถังเติมอากาศ ซึ่งมีสลัดจ์อยู่เป็นจำนวนมากตามที่ต้องการไว้ สภาวะภายในถังเติมอากาศจะมีสภาพที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบแอโรบิก จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ออกจากน้ำ สลัดจ์ที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับเข้าไปในถังเติมอากาศใหม่เพื่อรักษาความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังเติมอากาศให้ได้ตามที่กำหนด และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นสลัดจ์ส่วนเกิน (Excess Sludge) ที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป สำหรับน้ำส่วนบนจะเป็นน้ำทิ้งที่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์มีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์

(ที่มา : <https://www.aireo2.com/en/applications/activated-sludge/>)

3.7.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch ; OD) เป็นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) ประเภทหนึ่ง ที่ใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และเจริญเติบโตเพิ่มจำนวน ก่อนที่จะถูกแยกออกจากน้ำทิ้งโดยวิธีการตกตะกอน หลักการทำงานของระบบการทำงานของระบบคลองวนเวียนจะเหมือนกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์โดยทั่วไป คือ อาศัยจุลินทรีย์มากมายหลายชนิด โดยจุลินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา และโปรโตซัว เป็นต้น ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเป็นสภาวะแอโรบิก โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ในระบบ จากนั้นจึงแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านบำบัดแล้ว โดยวิธีการตกตะกอนในถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) เพื่อให้ได้น้ำใส (Supernatant) อยู่ส่วนบนของถังตกตะกอน ซึ่งมีคุณภาพน้ำดีขึ้น และสามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียนมีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบคลองวนเวียน
(ที่มา : <https://www.aireo2.com/en/applications/oxidation-ditches>)

3.7.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor; RBC) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางลักษณะทรงกระบอกซึ่งวางจุ่มอยู่ในถังบำบัด ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้า ๆ เมื่อหมุนขึ้นพ้นน้ำและสัมผัสอากาศ จุลินทรีย์ที่อาศัยติดอยู่กับตัวกลางจะใช้ออกซิเจนจากอากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่สัมผัสติดตัวกลางขึ้นมา และเมื่อหมุนจมลงก็จะนำน้ำเสียขึ้นมาบำบัดใหม่สลับกันเช่นนี้ตลอดเวลา หลักการทำงานของระบบกลไกการทำงานของระบบในการบำบัดน้ำเสียอาศัยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศจำนวนมากที่ยึดเกาะติดบนแผ่นจานหมุนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยการหมุนแผ่นจานผ่านน้ำเสีย ซึ่งเมื่อแผ่นจานหมุนขึ้นมาสัมผัสกับอากาศก็จะพาเอาฟิล์มน้ำเสียขึ้นสู่อากาศด้วย ทำให้จุลินทรีย์ได้รับออกซิเจนจากอากาศเพื่อใช้ในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเซลล์จุลินทรีย์ ต่อจากนั้นแผ่นจานจะหมุนลงไปสัมผัสกับน้ำเสียในถังปฏิกริยาอีกครั้ง ทำให้ออกซิเจนส่วนที่เหลือผสมกับน้ำเสีย ซึ่งเป็นการเติมออกซิเจนให้กับน้ำเสียอีกส่วนหนึ่ง สลับกันเช่นนี้ตลอดไปเป็นวัฏจักร แต่เมื่อมีจำนวนจุลินทรีย์ยึดเกาะแผ่นจานหมุนหนาเกินไป จะทำให้มีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วน หลุดออกจากแผ่นจานเนื่องจากแรงเฉือนของการหมุน ซึ่งจะรักษาความหนาของแผ่นฟิล์มให้ค่อนข้างคงที่โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยที่ไหลออกจากถังปฏิกริยานี้ จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอน

จุลินทรีย์และน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบนี้มีคุณภาพดีขึ้น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ

(ที่มา : <https://www.wateronline.com/doc/rotating-biological-contactor-rbc-retrofit-solutions-001>)

3.8 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้า

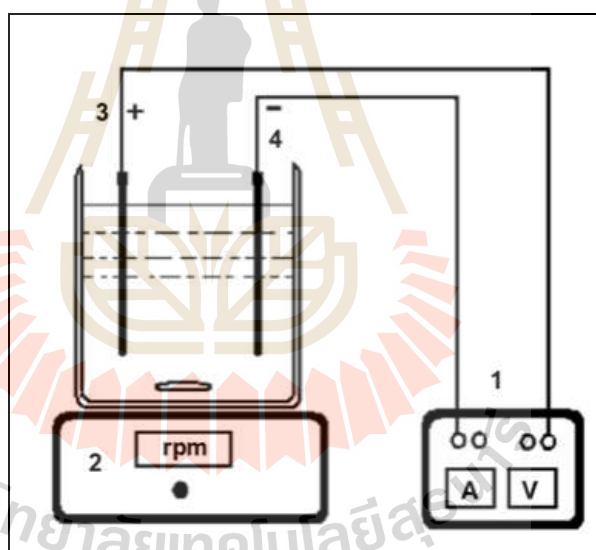
3.8.1 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารเคมีที่ละลาย และไม่ละลายน้ำ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสิ่งที่ทำให้เกิดโรค เป็นกระบวนการที่สะดวกในการควบคุม มีตะกอนสลัดน้อย ไม่ต้องเติมสารเคมี กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า อาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย หรือสารปนเปื้อนที่มีตัวกลางเป็นน้ำ หลักการเบื้องต้น เกิดจากการให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนด ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดไฮดรอกซิลอนุมูลอิสระละลายออกมาเป็นไฮดรอกซิลในน้ำเสีย ขณะเดียวกันที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเกิดแก๊สไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค หรือไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในน้ำ กล่าวคือทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ มีการหักล้างประจุจนมีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการปล่อยให้ตะกอน หรือการลอยตะกอน ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ดังรูปที่ 3.8 ขั้วทั้งสองอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยส่วนมากจะใช้อลูมิเนียม หรือเหล็ก เมื่อจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี และเกิดไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียม (Al^{3+}) หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe^{2+}) ขึ้นที่ขั้วแอโนด ไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ

กระบวนการนี้สอดคล้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีแบบดั้งเดิมซึ่งใช้สารเร่งตะกอน (Coagulant) ส่วนใหญ่เป็นเกลือของอะลูมิเนียมหรือเหล็ก

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำให้ไอออนของโลหะชนิดนั้น ๆ หลุดออกมา และเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น ไอออนที่หลุดออกมามีสภาพขั้วแตกต่างจากอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำ ทำให้อนุภาคดังกล่าวมีสภาพขั้วเป็นกลางจึงเกาะรวมตัวกันง่ายขึ้น กลายเป็นตะกอน และแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ทำให้กำจัดตะกอนได้ง่าย

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีข้อเสียคือขั้วแอโนดจะค่อย ๆ ถูกกัดกร่อน และสูญเสียเนื้อไปอย่างต่อเนื่อง และอาจเกิดคราบ หรือฟิล์มบางเคลือบผิวขั้วไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพลดลง หากไอออนของอะลูมิเนียมหรือเหล็ก ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความเข้มข้นสูงมาก อาจต้องกำจัดก่อนปล่อยทิ้ง (พลกฤษณ์ จิตรีโธ, 2559)



รูปที่ 3.8 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

- (1) เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (2) เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
(3) ขั้วไฟฟ้าแอโนด (4) ขั้วไฟฟ้าแคโทด

3.8.2 โอโซน (Ozone)

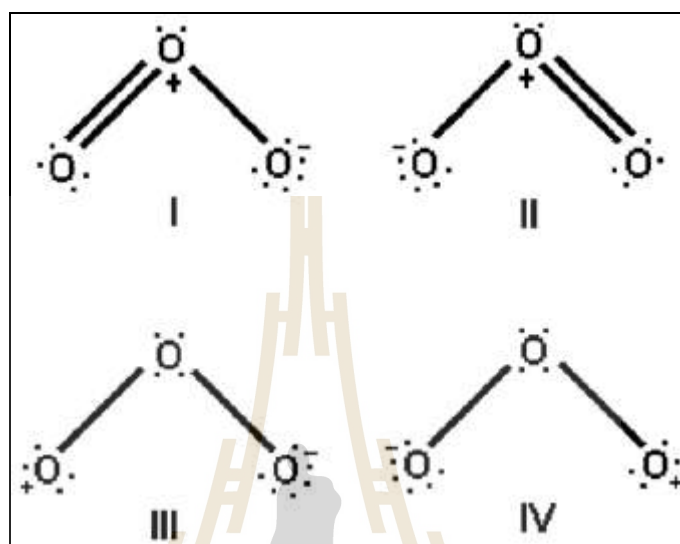
โอโซน คือ รูปแบบหนึ่งของออกซิเจน ปกติออกซิเจนหนึ่งโมเลกุลจะมี 2 อะตอม (O_2) เมื่ออยู่ในรูปของโอโซนหนึ่งจะมี 3 อะตอม (O_3) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษกว่าออกซิเจนปกติ โอโซนถูกพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1840 โดย ดร. คริสเตียน ฟรีดริช เซินไบน์ (Dr. Christian Friedrich Schonbein) นักเคมีชาวเยอรมัน โดยตั้งชื่อเป็นภาษากรีกว่า “Ozein” ที่แปลว่า “คม” (ภักดีวัฒน์ เลาคา, 2549)

ชั้นบรรยากาศของโลกที่ระดับความสูง 20-40 km เหนือพื้นโลกที่เรียกว่า ชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ปกคลุมด้วยชั้นโอโซน ซึ่งมีประมาณ 5-10 ppm (ส่วนในล้าน) ส่วนช่วยป้องกันรังสีจากภายนอกโลก โดยเฉพาะรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ ในช่วงความยาวคลื่น 290-390 nm ไม่ให้ตกกระทบผิวโลกมากจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ โอโซนยังพบได้ในธรรมชาติบนพื้นโลก โดยเฉพาะบริเวณชายหาดและบนยอดภูเขา ซึ่งมีปริมาณเพียง 0.01-0.05 ppm โดยเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์หรือจากสายฟ้าแลบในขณะฝนตก เนื่องจากโอโซนมีเสถียรภาพต่ำ จึงสลายตัวเป็นแก๊สออกซิเจนได้ง่าย แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยนี้สามารถทำให้มลพิษที่มีอยู่ในอากาศถูกทำลายจนหมด จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่อากาศในบริเวณนี้บริสุทธิ์และสดชื่นมากกว่าอากาศในเมืองใหญ่ซึ่งมีมลพิษค่อนข้างสูง

คุณสมบัติเด่นของโอโซน คือเป็นแก๊สที่มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว สามารถรับรู้ได้ถึงความเข้มข้นต่ำในอากาศประมาณ 0.01 ppm สามารถมองเห็นเป็นสีน้ำเงินเข้มได้ที่ความเข้มข้นสูงหลายพันส่วนในล้านส่วน เป็นแก๊สที่ไม่เสถียรจะสลายตัวเป็นออกซิเจนหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งรอบตัวอยู่ตลอดเวลา มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิบรรยากาศ มีสถานะเป็นของเหลว (จุดเดือด) ที่ $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ (มีสีน้ำเงินเข้ม) และมีสถานะเป็นของแข็งหรือแข็งตัว (จุดหลอมเหลวหรือจุดเยือกแข็ง) ที่ $-251\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าแก๊สออกซิเจน เป็นแก๊สที่มีพลังงานในการเกิดออกซิเดชันสูง (2.07 V) ซึ่งสูงกว่าคลอรีน (1.36 V) 1.52 เท่า มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีน 3125 เท่า สามารถย่อยสลายสี กลิ่น แก๊สพิษและสารเคมีได้ดี

โอโซน เป็นแก๊สที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิปกติ โอโซนไม่มีสี แต่จะเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าเมื่อแก๊สมีความหนาแน่นสูง จะมีสีน้ำเงินเข้มในสถานะของเหลว และมีสีม่วงเข้มในสถานะของแข็ง แก๊สโอโซนมีกลิ่นฉุน ปริมาณน้อยที่สุดที่มนุษย์สามารถได้กลิ่น คือ 0.02-0.05 ppm สำหรับโอโซนบริสุทธิ์และ 0.5 ppm เมื่อเจือจางในอากาศ แก๊สโอโซนทั้ง 3 สถานะมีความไวอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างฉับพลันหรือการกระเทือนรุนแรงและอาจเป็นผลให้เกิดการระเบิด เนื่องจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วของโมเลกุลโอโซนจำนวนมาก (สุรพล บุญดวง, 2549)

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีการกระจายของอิเล็กตรอน (Electron Diffraction) ทำให้ทราบว่าโอโซนในสภาวะแก๊สมีการจัดเรียงอะตอมทั้งสามเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงสร้างโมเลกุลของแก๊สโอโซน (Oehlschlaeger, 1978)

ดัชนีหักเหของแก๊ส โอโซนที่อุณหภูมิ $273^{\circ}K$ มีค่าเท่ากับ 1.0533, 1.0200 และ 1.0502 ที่ความยาวคลื่นแสง 480, 546 และ 670.5 nm ตามลำดับในสภาวะของเหลวโอโซนมีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.2236, 1.2226 และ 1.2213 ที่ความยาวคลื่นแสง 535, 589 และ 670.5 nm ตามลำดับ

โอโซนในสภาวะแก๊สดูดกลืนแสงได้ตั้งแต่ช่วงอินฟราเรดช่วงที่ตามองเห็น จนถึงช่วงอัลตราไวโอเลต ($14.2\ \mu m$ -220 nm) การดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 260 m และต่ำสุดที่ 200 nm

แก๊สโอโซนสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ ในชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ ซึ่งช่วยป้องกันโลกจากรังสีอัลตราไวโอเลตและยังพบโอโซนในบริเวณพื้นผิวโลก ซึ่งโอโซนนี้ถือเป็นโอโซนระดับล่าง (Ground-level Ozone) เป็นพิษและก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ โอโซนในชั้นบรรยากาศและโอโซนระดับล่างมีโครงสร้างโมเลกุลเดียวกัน แต่โอโซนระดับล่างเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compound) กับออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) โดยมีแสงเข้าร่วมในปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้เกิดกลุ่มหมอก (Smog) ของโอโซนปกคลุมผิวโลกชั้นสตราโทสเฟียร์ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

3.8.3 การผลิตไอซอนโดยวิธีดิสชาร์จไฟฟ้า

บริเวณช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งมีออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนในแก๊สผสมอิเล็กตรอนอิสระที่ปรากฏอยู่จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น (มากขึ้นขึ้นอยู่กับระยะทางอิสระเฉลี่ย) ระหว่างการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมของออกซิเจนที่ยังรวมตัวเป็น โมเลกุลออกซิเจนอยู่ เป็นผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรรอบอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและ โมเลกุลออกซิเจนที่มีประจุบวกอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีความเร็วสูงขึ้นวิ่งเข้าชนโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระเป็นเช่นอย่างต่อเนื่อง ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนก็ถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าสู่อิเล็กโทรดบวกเกิดการสะสมประจุลบบริเวณผิวอิเล็กโทรดบวก และโมเลกุลออกซิเจนที่มีประจุบวกก็จะถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าสู่อิเล็กโทรดลบด้วยเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่กว่าอิเล็กตรอนมากทำให้เคลื่อนที่ได้ช้า จึงเกิดการกระจายตัวทั้งช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยมีความหนาแน่นสูงบริเวณผิวอิเล็กโทรดลบ

เมื่อการสะสมประจุที่ผิวอิเล็กโทรดทั้งสองมีมากพอและศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าสูงพอ จะเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขึ้นโดยอาศัยอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุลบและแก๊ส ซึ่งขณะนี้มีสภาพเป็นไอออนบวกเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ดิสชาร์จไฟฟ้า เมื่อไอออนของแก๊สระหว่างอิเล็กโทรดเริ่มนำกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีความเร็วต่ำ เนื่องจากสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สเป็นช่วงที่เรียกว่า สปราร์คดิสชาร์จ

ถ้ามีการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงพอ จำนวนไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้ความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น ปริมาณไอออนบวกที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการชนกันเองของไอออนเหล่านี้ และกับ โมเลกุลออกซิเจนโดยมีความหนาแน่นสูงที่บริเวณผิวอิเล็กโทรดลบ โมเลกุลของออกซิเจนและไอออนบวกที่ชนกันนั้น จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนสู่สภาวะถูกกระตุ้น เมื่อกลับสู่สภาพปกติจะมีการปลดปล่อยโฟตรอน ปรากฏเป็นชั้นเรืองแสงปกคลุมผิวอิเล็กโทรดลบเรียกว่าโคโรนาดิสชาร์จ เมื่อการชนกันของอิเล็กตรอนและโมเลกุลออกซิเจนมีมากขึ้นจนถึงระดับ โมเลกุลแก๊สในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งหมดแตกตัวเป็นประจุการนำไฟฟ้าจะเกิดได้เต็มที่เรียกช่วงนี้ว่า สปราร์คดิสชาร์จ

ถ้าหากว่าเกิดสปราร์คดิสชาร์จยังคงเกิดอยู่อย่างต่อเนื่อง จะเป็นผลให้อุณหภูมิของแก๊สระหว่างช่องว่างอิเล็กโทรดสูงขึ้นมาก อิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดมีพลังงานสูง และกลายเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าค่าความหนาแน่นกระแสจะมีค่าสูงสุด เรียกช่วงนี้ว่า อาร์คดิสชาร์จ

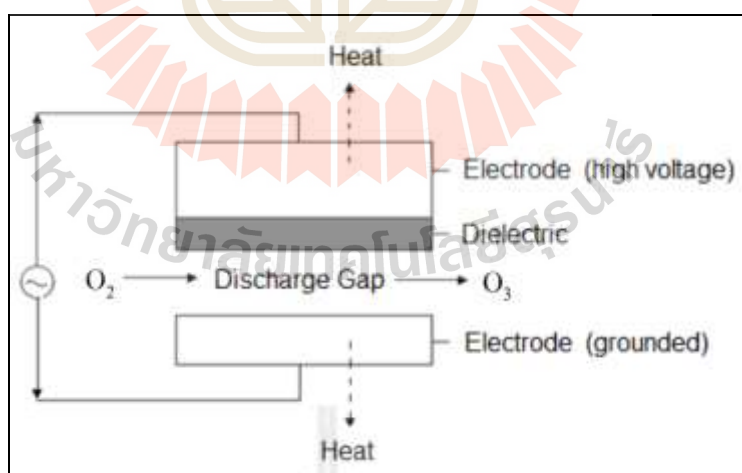
3.8.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยการดิสชาร์จสร้างไอซอน

ในการบำบัดน้ำเสียด้วยการดิสชาร์จสร้างไอซอน ในระบบอิเล็กโทรดเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ระบบอิเล็กโทรดแบบไม่สม่ำเสมอสูง จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น สำหรับ

อิเล็กโตรดที่มีตัวกลางเป็นอากาศ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินความคงทนของอากาศ (22 kV/cm) ก็จะทำให้เกิดอากาศที่อยู่รอบ ๆ อิเล็กโตรดแตกตัว ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากดีสชาร์จคือ โอโซน (O_3) เนื่องจากในอากาศที่ใช้ผลิตโอโซน มีส่วนประกอบหลักคือ แก๊สไนโตรเจน (78.084%) แก๊สออกซิเจน (20.9476%) แก๊สอาร์กอน (0.934%) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (0.0314%) อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจากดีสชาร์จแบบโคโรนาจะชนกับอะตอมของออกซิเจนทำให้อะตอมของออกซิเจนมีระดับพลังงานสูงขึ้น และเมื่อรวมตัวกับโมเลกุลปกติของออกซิเจนจะทำให้เกิดโอโซน (ศราวุธ กาญจนเลขา, 2551)

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ พบว่าการบำบัดด้วยโอโซนนั้น โอโซนจะทำให้เกิดการออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่น โดยโอโซนจะเข้าไปออกซิไดส์โครโมฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ และดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งโอโซนจะไปทำลายพันธะคู่ดังกล่าว ทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ไม่สามารถดูดซับแสง เป็นสาเหตุให้สีของน้ำเสียลดลง ในสถานะที่น้ำเสียเป็นกรดโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ดี แต่ในสถานะเป็นด่างจะเกิดการสลายตัวของโอโซน (Gottschalk et al., 2000)

การผลิตโอโซนที่อาศัยการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ นั้นอธิบายลักษณะของการเกิดแก๊สโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การผลิตโอโซนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (ศราวุธ กาญจนเลขา, 2551)

จากรูปที่ 3.10 ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโตรดที่วางขนานกัน อิเล็กโตรดด้านที่ต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงจะมีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่น เพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์และมีช่องว่าง

ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเกิดแก๊สโอโซน เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดดังกล่าวจนถึงระดับที่ทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดมีค่ามากกว่าค่าสนามวิกฤตจะทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ โดยสังเกตเห็นเป็นแสงสีม่วงเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ดังนั้นเมื่อทำการปล่อยออกซิเจนหรืออากาศผ่านบริเวณดังกล่าว จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวออก เนื่องจากกระบวนการไอออไนเซชันโดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นกระบวนการในการผลิตโอโซน ดังสมการเคมีที่ 3.12



เมื่อมีการปล่อยออกซิเจนผ่านเข้าสู่บริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด



เมื่อกระบวนการสร้างแก๊สโอโซนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ถึงจุดที่สามารถประพังตัวเองได้และนำไปสู่การเบรกคาวน์แล้ว ในระหว่างการผลิตจะมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้แก๊สโอโซนเกิดการสลายตัวดังสมการเคมีที่ 3.15



3.9 ไฮดรอกซิลเรดิคัล

ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical: $OH^\cdot$) เป็นหนึ่งในอนุมูลอิสระ (Free Radicals) อนุมูลอิสระ คือ อะตอม โมเลกุล หรือสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวและไม่เสถียร เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Unpaired Electron) อยู่ในวงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล จึงพยายามหาอิเล็กตรอนจากสารอื่นมาจับคู่เพื่อความเสถียรทำให้เกิดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา มีผลทำให้คุณสมบัติของสารที่โดนดึงอิเล็กตรอนไป เกิดการบกพร่องหรือทำให้เซลล์ถูกทำลาย ในวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่ใช้ออกซิเจน จะมีอนุมูลอิสระของออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นต้น อนุมูลอิสระเหล่านี้เกิดได้จากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของเซลล์ การดีสชาร์จ นอกจากนี้ปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกยังสามารถเหนี่ยวนำให้มีการก่อตัวของ

อนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นอนุมูลอิสระที่มีปฏิกิริยารุนแรง เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง และสามารถตอบสนองได้ดีกับสารอินทรีย์รวมทั้งองค์ประกอบของเซลล์สิ่งมีชีวิต และยังสามารถลดแรงตึงผิวของน้ำได้ สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ได้ทันทีที่ถูกสร้างขึ้น (Halliwell, 1988) ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีพลังงานการเกิดออกซิเดชัน 5.23 eV ซึ่งมากกว่าโอโซนที่ 3.75 eV (Sahmi et. Al, 2006) และในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยการการดิสชาร์จได้น้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกใช้ในการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ในการดิสชาร์จสร้างไฮดรอกซิลจะมีผลต่อการผลิตอนุมูลของไฮดรอกซิล ยิ่งค่าการนำไฟฟ้าของน้ำต่ำเท่าไรจะสามารถผลิตอนุมูลของไฮดรอกซิลได้ดียิ่งขึ้น

กลไกในการผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัลโดยทั่วไปคือการแยกตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนของน้ำเนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอน ดังสมการเคมีที่ 3.16 (Hayashi et. Al, 2016)



โดยการดิสชาร์จจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระวิ่งไปชนกับโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลน้ำ ได้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัล แต่เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัลมีช่วงทำปฏิกิริยาสั้นก่อนจะสลายตัว จึงต้องมีการดิสชาร์จตลอดเวลาเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัลอย่างต่อเนื่อง แหล่งจ่ายสำหรับการดิสชาร์จแบบพัลส์จะช่วยให้เกิดอนุมูลของไฮดรอกซิลได้ดีที่สุดเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์ (Morimito et. Al, 2015)

3.10 ดิสชาร์จทางไฟฟ้า

ดิสชาร์จทางไฟฟ้าเริ่มจากการสะสมประจุไฟฟ้าสถิต ผลของการสะสมประจุได้จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า หรือแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ก็จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงถึงค่าวิกฤตจะทำให้เกิดการดิสชาร์จ เป็นดิสชาร์จทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge) หรือดิสชาร์จฟ้าผ่า (Lighting Discharge) (สำรวย สังข์สะอาด, 2537)

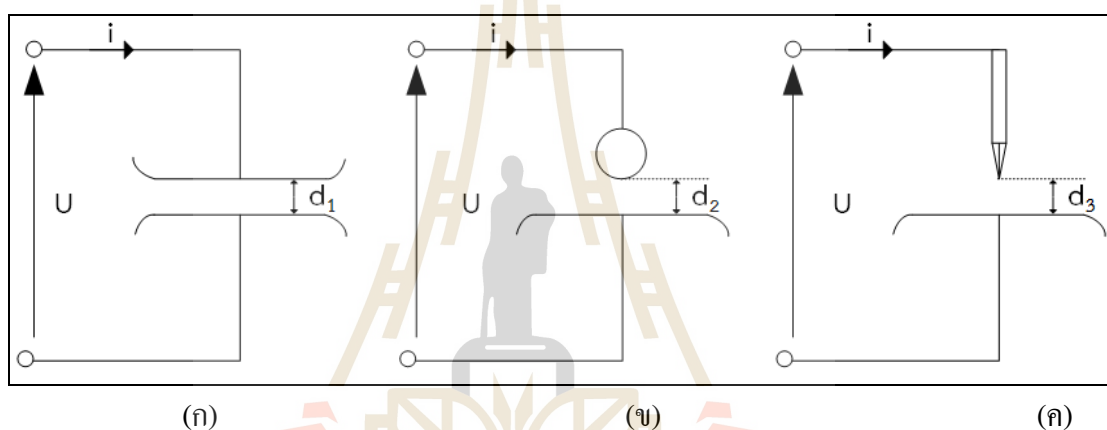
3.10.1 ดิสชาร์จไฟฟ้าสถิต

ปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าสถิตจะเป็นการดิสชาร์จที่แรงดันไม่สูงมาก เกิดจากการสะสมประจุจากการเสียดสีของวัสดุต่างชนิดกัน โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของคน เช่น

การเข็นรถเข็นในห้างสรรพสินค้า ล้อรถกับพื้นเกิดการเสียดสีกัน ทำให้เกิดการเก็บประจุไว้ในตัวรถเข็นผ่านเข้ามายังคนที่เข็นรถ เมื่อคนเดินเข้าใกล้ส่วนที่ต่อลงดิน ก็จะเกิดดิสชาร์จขึ้น

3.10.2 ดิสชาร์จฟ้าผ่า

การเกิดดิสชาร์จฟ้าผ่าจะเกิดจากการสะสมประจุไฟฟ้าสถิตในลักษณะเดียวกับ ดิสชาร์จทางไฟฟ้าสถิต แต่เป็นการสะสมประจุไฟฟ้าที่สูงกว่ามาก เช่นในก้อนเมฆ เมื่อเกิดการดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เห็นได้ตามธรรมชาติที่เรียกว่า “ฟ้าแลบ” และถ้าเกิดการดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เห็นได้ตามธรรมชาติที่เรียกว่า “ฟ้าผ่า” โดยประจุที่สะสมในก้อนเมฆนั้นมีศักย์ไฟฟ้าเทียบกับพื้นดินสูงถึง 10-100 MV



(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

(ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-uniform Field)

(ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-uniform Field)

รูปที่ 3.11 อิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อสนามไฟฟ้าแบบต่าง

เมื่อเกิดการดิสชาร์จจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าคือปริมาณที่ใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าเกิดแรงกระทำกับอนุภาคโดยรอบ จะมีมากหรือน้อยนั้นสามารถวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเรียกค่าแรงนั้นว่า “ความเครียดสนามไฟฟ้า” โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าอาจแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยสนามไฟฟ้าชนิดไม่สม่ำเสมอแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง ลักษณะของสนามไฟฟ้านั้นจะถูกกำหนดด้วยชนิดของอิเล็กโทรด ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ ที่วางในระยะห่าง d_1 , d_2 และ d_3 ที่เท่ากันในอากาศดังรูปที่ 3.11 จะพบว่าจะมีกลไกและแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ไม่เท่ากัน ในกรณีของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ทันที โดยไม่มีการเกิดโคโรนา ในส่วนของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงนั้น ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ที่ปลายแหลมของอิเล็กโทรด เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าจะไม่เกิดการเบรกดาวน์ แต่จะเริ่มเกิดโคโรนา หากเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลงจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้น

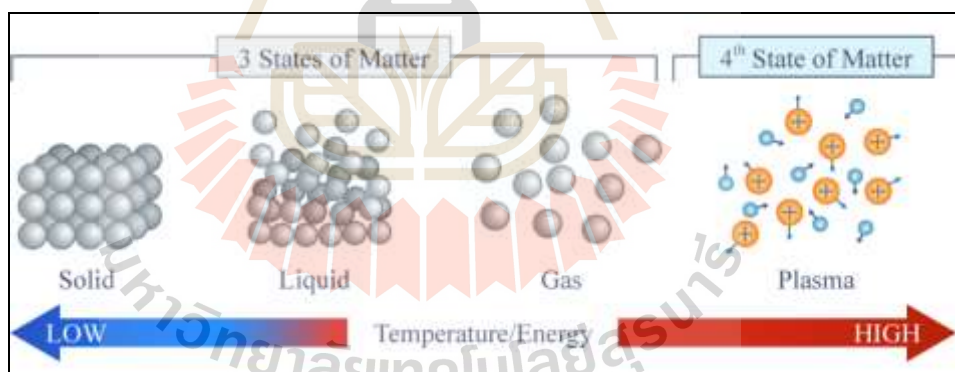
เมื่อมีของไหลอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองข้างในขณะเกิดการดีสชาร์จ จะทำให้เกิดการแตกตัว (Ionization) ของอากาศหรือของไหลที่ไหลผ่านวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีพลังงานไฟฟ้าอยู่ การปล่อยประจุแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแรงของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้าสูงพอที่จะสร้างย่านความนำไฟฟ้าโดยรอบ แต่ไม่แรงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ หรือเกิดประกายไฟ (Arcing) กับวัตถุใกล้เคียง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) โดยมาก โคโรนาดีสชาร์จจะพบเป็นแสงสีน้ำเงินอ่อน (Bluish) เรืองแสงอยู่ในอากาศที่อยู่โดยรอบวัสดุตัวนำไฟฟ้าแรงสูง โดยธรรมชาติการคายประจุแบบโคโรนาไม่เป็นที่พึงปรารถนา เพราะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแรงสูง หรือได้สารประกอบที่ไม่พึงประสงค์หรือเป็นอันตรายในกิจกรรมทางเคมี โคโรนา เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลจากขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงได้กระจายตัวไปยังของไหลที่อยู่แวดล้อม โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นอากาศ ผ่านการไอออนในเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดพลาสมารอบ ๆ ขั้วไฟฟ้า ในที่สุดไอออนที่เกิดขึ้นก็จะผ่านไปยังพื้นที่ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ แล้วไอออนก็จะรวมตัวเป็นกลางอีกครั้ง เมื่อสนามไฟฟ้า ณ จุดใดจุดหนึ่งในของไหลแวดล้อมมีค่าสูงพอ ของไหล ณ จุดนั้นก็จะแตกตัวเป็นไอออน และก็จะกลายเป็นสื่อกระแสไฟฟ้า เมื่ออากาศกลายเป็นสื่อตัวนำจะมีผลให้เปรียบเสมือนมีการเพิ่มขนาดของตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นย่านของการนำไฟฟ้าใหม่จะไม่ปรากฏขอบเขตชัดเจน การแตกตัวของไอออนอาจจะไม่ขยายขอบเขตไปไกลมากนัก ด้านนอกของขอบเขตดังกล่าวจะมีประจุตรงข้ามกับภายในตัวนำเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ทำให้มีสภาพเป็นกลาง โดยโคโรนาดีสชาร์จเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูง วิ่งหลุดออกจากบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูง เช่น ขอบแหลมบนตัวนำไฟฟ้า หรือแม้แต่นวนไฟฟ้าก็ตาม เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงชนเข้ากับโมเลกุลแก๊สในอากาศ ก็ทำให้เกิดการแตกตัว และให้พลังงานในการแตกตัวออกมาบางส่วนในรูปของการเรืองแสง บางส่วนเป็นเสียงซ่า และอื่น ๆ โมเลกุลของอากาศที่ถูกชนจนแตกตัวนั้นจะเปลี่ยนจากสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าไปสู่สภาพขั้ว และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้

3.11 พลาสมา

พลาสมา (Plasma) คือ แก๊สที่มีสภาพเป็นไอออน และถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้ หมายความว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 อะตอม ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระนี้ทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น แม้ว่าพลาสมาเป็น

เทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา แต่ประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีพลาสมา กลับไปไกลถึงศตวรรษที่ 18 Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799), ศาสตราจารย์คณิตศาสตร์ ใน Göttingen (ประเทศเยอรมนี) ได้ค้นพบพลาสมาโดยบังเอิญขณะทดลองการปล่อยกระแสไฟฟ้า ระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรด แต่ยังไม่ทราบว่าพลาสมาที่พบนั้นคืออะไร

ต่อมาในวันที่ 22 สิงหาคมปี ค.ศ. 1879 Sir William Crookes ได้ค้นพบสสารที่ 4 ซึ่งคือ พลาสมา จากการดัดสารรังแก๊ส โดยได้บรรยายการค้นพบที่งานประชุมของสมาคมเพื่อความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์อังกฤษ ซึ่งนั่นเป็นครั้งแรกที่โลกได้รู้จักกับสสารที่ 4 พลาสมา ต่อมาในปี ค.ศ. 1928 นักเคมีและฟิสิกส์ชาวอเมริกาชื่อ เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) คิดคำว่าพลาสมาขึ้นมา แทนสถานะที่ 4 ของสสาร พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและประจุลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่รวมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasineutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ สถานะทั้ง 4 ของสสารมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สถานะทั้ง 4 ของสสาร

(ที่มา : <https://tetronics.com/our-technology/what-is-plasma/>)

หลังจากการค้นพบของ Sir William Crookes เป็นเวลาว่าสองทศวรรษ และในปี ค.ศ. 1897 Sir Joseph John Thomson ได้ตั้งสมมติฐานว่าอะตอมของสารใด ๆ จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนและไอออนอยู่ โดยสมมติฐานนี้ได้รับการยืนยันจากนักเคมีชาวเยอรมัน Eugen Goldstein ผู้ที่ศึกษา รังสีจากแก๊สไฮโดรเจนและพบว่าอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนมีอนุภาคที่มีประจุบวกอันเป็นที่มาของ สูตรทางเคมีของแก๊สไฮโดรเจนคือ H^+ ดังนั้นพลาสมาจึงถูกระบุว่าเป็นส่วนผสมของอิเล็กตรอนและ

ไอออน และจากคุณสมบัติของพลาสมาดังที่กล่าวมา ทำให้พลาสมาได้ถูกประยุกต์มาใช้งานด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลายในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 เช่น การประดิษฐ์หลอดแสงจันทร์ (Mercury Discharge Lamp) หรือหลอดไอปรอทในปี ค.ศ. 1902 และหลอดแสงจันทร์ผ่านบาลาสต์ (The High-pressure Mercury Lamp) ในปี ค.ศ. 1906 เป็นต้น ในช่วงครึ่งหลังของ ศตวรรษที่ 20 มีการใช้พลาสมามากขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลายเช่น ใช้ในหลอดนีออนแบบพลาสมาสุญญากาศ และการตัดด้วยพลาสมาแบบร้อน ในช่วงกลางทศวรรษที่ 1990 มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีพลาสมาเป็นอย่างมาก เช่น ค้นพบการตัดด้วยพลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อน การประดิษฐ์หลอดนีออนแบบไม่ใช้พลาสมาสุญญากาศ เนื่องจากระบบสุญญากาศมีต้นทุนค่อนข้างสูงและมีความซับซ้อน และลดต้นทุนในการบำรุงรักษา นอกจากนี้ในด้านวิศวกรรมในทศวรรษนี้ได้มีการนำเทคโนโลยีพลาสมามาใช้ในภาคการแพทย์ โดยในปี ค.ศ. 1996 Laroussi ได้นำเสนอวิธีการทำหัตถ์โดยใช้พลาสมาดิสชาร์จที่สร้างขึ้นภายใต้ความดันบรรยากาศ

พลาสมาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสมาอุณหภูมิสูง (Thermal Equilibrium Plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Nonthermal Equilibrium Plasma)

พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ พลาสมาที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลานานภายใต้ความดันแก๊สที่ 5 kPa หรือมากกว่า อุณหภูมิของอิเล็กตรอนและแก๊สจะใกล้เคียงกัน เนื่องจากพลังงานไอออนในเซชันของอะตอมจะมีมากกว่า eV ทำให้อิเล็กตรอนและไอออนบางตัวกลายเป็นอนุภาพพลังงานสูง โดยทั่วไปอุณหภูมิของพลาสมาอุณหภูมิสูงจะสูงถึงหลายพันองศาเซลเซียสหรือมากกว่านั้น พลาสมาชนิดนี้จึงใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน หรือให้แสงสว่างสำหรับโคมและหลอดไฟ

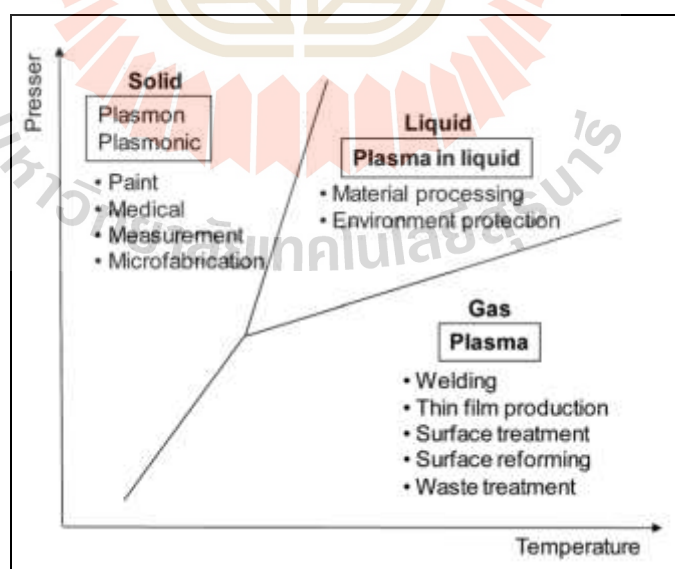
พลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้น อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าอุณหภูมิของแก๊ส และอิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะพลังงานสูง โดยมากพลาสมาอุณหภูมิสูงจะถูกนำมาใช้ในการผลิตสารกึ่งตัวนำ การใช้งานพลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้นจะต้องควบคุมความดันไม่ให้สูงเกินไป ดังนั้นในการใช้งานการกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำนั้นจึงต้องทำให้ห้องปฏิกรณ์สุญญากาศ

ในทางไฟฟ้าพลาสมาสามารถเกิดได้โดยเมื่อมีอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันมาก ๆ เช่น 15 kV และกราวด์โดยวางที่ระยะห่างกัน โดยระยะห่างนั้นขึ้นกับงานที่ประยุกต์ใช้ โดยอากาศหรือของไหลที่อยู่ระหว่างระยะช่องว่างนี้ จะถูกไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงจะทำให้ไอออนในอากาศหรือของไหลถูกกระตุ้น และรับพลังงานเข้าไป ทำให้ความต้านทานของอากาศหรือของไหลลดลงถึงจุด ๆ หนึ่ง ที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ส่งผลให้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสามารถกระโดดจากด้านที่มีศักย์สูงไปยังด้านที่มีศักย์ต่ำได้ เรียกว่า การปลดปล่อยแบบดิสชาร์จ (Spark Discharge) ถ้าความต่างศักย์ไม่สูงมากหรือมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องว่างจะทำให้ไม่เกิดการดิสชาร์จ แต่จะเกิดการเปล่งแสงอ่อน ๆ ออกมา ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น โคโรนาดิสชาร์จ สตริเมอร์ดิสชาร์จ เป็นต้น การดิสชาร์จแบบต่าง ๆ นั้นเป็นพื้นฐานของพลาสมา โดยบริเวณที่เกิดพลาสมาคือ บริเวณที่มีการ

ปล่อยแสงอ่อน ๆ ซึ่งอาจมีอุณหภูมิสูงมากตั้งแต่ 1,000 K จนถึง 10,000 K ส่งผลให้อากาศหรือของไหลที่อยู่รอบ ๆ เกิดการแตกตัว ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการเกิดดิสชาร์จคือ โอโซน (O_3) เนื่องจากในอากาศ มีส่วนประกอบหลักคือ แก๊สไนโตรเจน (78.0840 %) แก๊สออกซิเจน (20.9476 %) แก๊สอาร์กอน (0.9340 %) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (0.0314 %) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการดิสชาร์จ ไปชนกับอะตอมของออกซิเจนทำให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น และเมื่อรวมตัวกับโมเลกุลปกติของแก๊สทำให้เกิดเป็นโอโซน ถ้าหากเกิดพลาสมาในของไหลจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล ($OH^\cdot$) เนื่องจากการที่อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการดิสชาร์จ ไปชนกับอะตอมของน้ำทำให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัว กลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล (Goldston, 1995)

3.12 พลาสมาได้น้ำ

พลาสมาได้น้ำนั้นมีการใช้งานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1987 โดย Douglas Clements โดยการสร้างพลาสมาจากการปล่อยพัลส์แรงดันสูงในน้ำ ถือเป็นการกำเนิดพลาสมาได้น้ำเป็นครั้งแรก หลังจากนั้นได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้พลาสมาได้น้ำในงานหลาย ๆ ประเภท เช่น การตัดด้วยพลาสมา และการบำบัดน้ำเสีย จากการค้นพบพลาสมาได้น้ำ ทำให้มีการใช้พลาสมาในหลาย ๆ สถานะทั้งในของแข็ง และในแก๊สแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.13

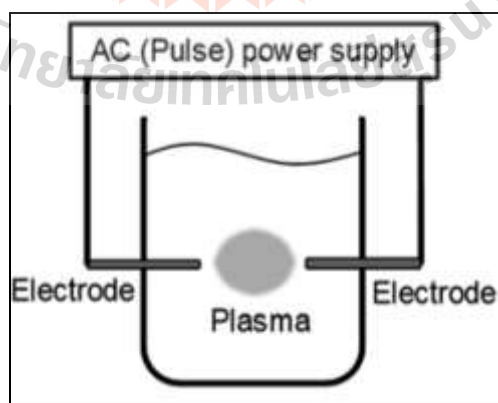


รูปที่ 3.13 สถานะทั้ง 4 ของสสาร
(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)

หลักการที่สำคัญในการสร้างพลาสมาได้น้ำคือ การปล่อยแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด ที่วางตัวในน้ำเพื่อให้เกิดการดีสชาร์จระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ควบคู่ไปกับขณะทำการปล่อยแรงดันไฟฟ้าจะทำการปั๊มลมในน้ำให้เกิดฟองอากาศ หรือใช้คลื่นกระแทก การอัดแก๊สเพื่อให้เกิดฟองอากาศก็ได้ เพื่อฟองอากาศกระทบกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการดีสชาร์จ ส่งผลให้ช่องว่างภายในฟองอากาศเกิดพลาสมาขึ้น ในการทำให้เกิดพลาสมาได้น้ำแรงดันไฟฟ้าที่ต้องใช้อยู่ระหว่าง 50-400 kV ขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ใช้งาน แต่ในภาคอุตสาหกรรมเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงอย่างคงที่เป็นการสิ้นเปลือง และเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นในการสร้างพลาสมาได้น้ำจึงนิยมจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบพัลส์มากกว่า ปฏิกริยาของพลาสมาได้น้ำจะทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต คลื่นกระแทก ความร้อน และอนุมูลอิสระ เป็นผลพวงมาจากปฏิกิริยาการสร้างพลาสมาได้น้ำด้วยวิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Horiloshi and Serpone, 2017)

ปัจจุบันวิธีในการสร้างพลาสมาได้น้ำสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท และเนื่องจากแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องเลือกวิธีการสร้างพลาสมาได้น้ำที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์และการใช้งาน โดยวิธีการสร้างพลาสมาได้น้ำมีดังนี้

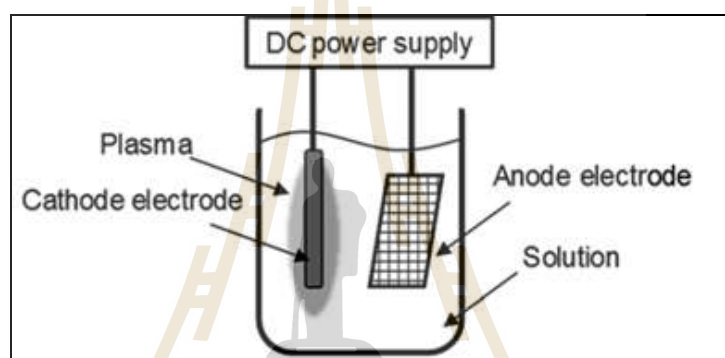
1. การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยการดีสชาร์จระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เกี่ยวข้องกับการคายประจุไฟฟ้าโดยตรงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 อิเล็กโทรดทั้งสองจะมีส่วนที่แช่อยู่ในน้ำ และมีการอัดอากาศเข้าบริเวณที่ว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเพื่อสร้างฟองอากาศ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง จะเกิดการดีสชาร์จระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเพื่อสร้างพลาสมาได้น้ำขึ้นมา



รูปที่ 3.14 การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)

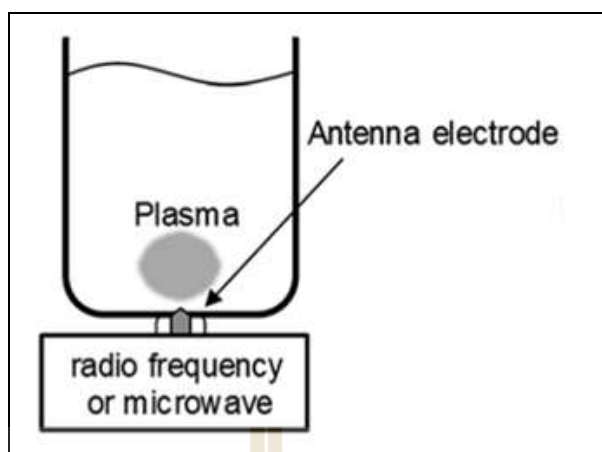
2. การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยการดีสชาร์จระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (รูปที่ 3.15) มีความคล้ายคลึงกับวิธีการสร้างพลาสมาได้น้ำวิธีที่ 1 ที่อิเล็กโทรดทั้งสองขั้วจะอยู่ในน้ำ แต่ขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วจะ ไม่มีความใกล้เคียงกันโดยอิเล็กโทรดขั้วบนจะใหญ่กว่าอิเล็กโทรดขั้วบน โดยบริเวณรอบ ๆ อิเล็กโทรดขั้วบนจะมีการอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศ เพื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดพลาสมาได้น้ำขึ้นที่บริเวณอิเล็กโทรดขั้วบน แต่ข้อเสียของวิธีการสร้างพลาสมาได้น้ำด้วยวิธีนี้คือการกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจากการคายประจุ และเมื่อต้องการสร้างพลาสมาได้น้ำด้วยวิธีนี้เป็นเวลานานจะนิยมใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์มากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปกติ



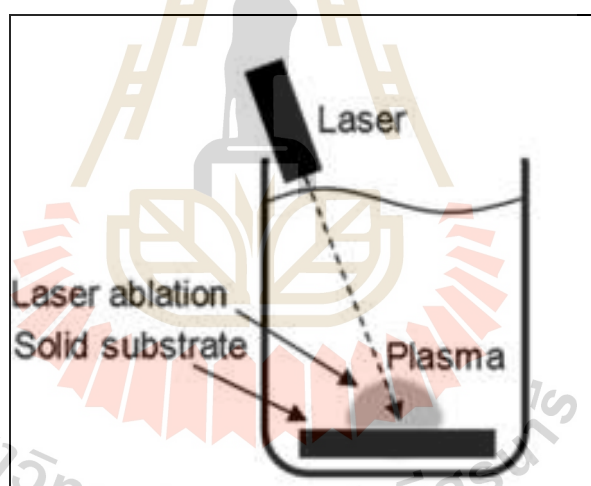
รูปที่ 3.15 การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)

3. การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยการฉายคลื่นความถี่วิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 มีการติดตั้งอิเล็กโทรดเสาอากาศ (Antenna Electrode) สำหรับกระจายคลื่นความถี่วิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟ โดยการสร้างพลาสมาได้น้ำวิธีนี้จะใช้น้ำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำมาก หรือน้ำที่ไม่นำไฟฟ้า

4. การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยใช้เทคนิคการระเหยของเลเซอร์ ภายในถังปฏิกรณ์จะมีระนาบของแข็งวางอยู่ในน้ำและทำการฉายแสงเลเซอร์จากผิวน้ำให้กระทบพื้นผิวของแข็งที่วางอยู่ภายในน้ำ ก่อให้เกิดพลาสมาได้น้ำที่บริเวณผิวของแข็ง มีลักษณะดังรูปที่ 3.17 วิธีการสร้างพลาสมาได้น้ำวิธีนี้ถูกนำไปใช้กับกระบวนการสร้างอนุภาคนาโน



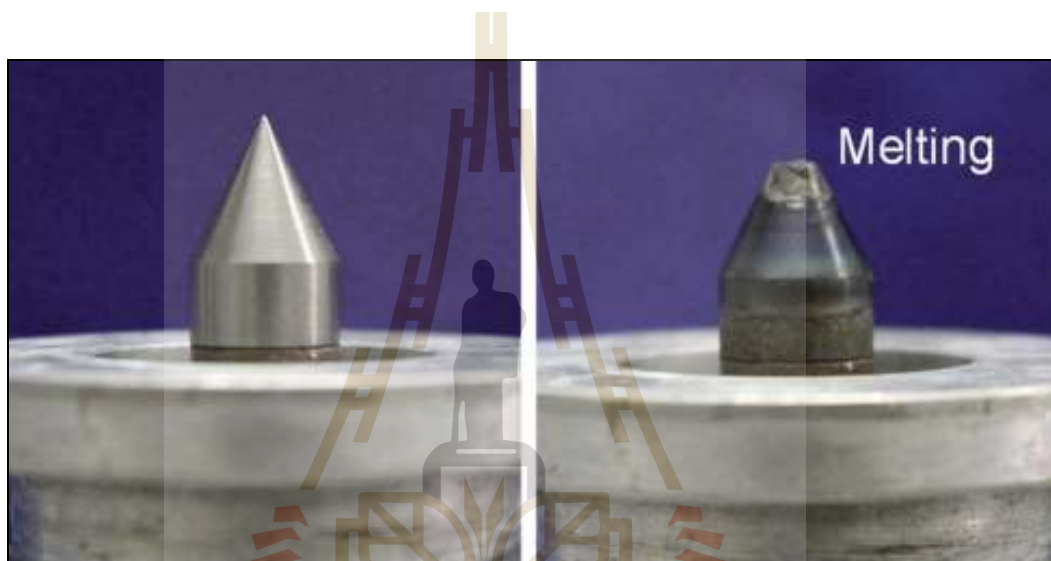
รูปที่ 3.16 การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยการฉายคลื่นความถี่วิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟ
(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)



รูปที่ 3.17 การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยใช้เทคนิคการระเหยของเลเซอร์
(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)

ในการสร้างพลาสมาได้น้ำอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง เมื่อเทียบกับการสร้างพลาสมาในสุญญากาศ หรือภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสองขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นจึงมีการศึกษาวัสดุที่นำมาใช้สร้างขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้น้ำ พลาสมาได้น้ำถูกสร้างขึ้นโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหลากหลายวัสดุเช่น ทังสเตน, อลูมิเนียม, ทองแดง, สแตนเลส และคาร์บอนอิเล็กโทรดที่ทำจากคาร์บอน, โมลบดีนัม

และสแตนเลส ใช้เวลาไม่เกิน 5 นาทีในการการสร้างพลาสมาได้น้ำสำหรับข้อเล็กโทรดที่ทำจาก อลูมิเนียมและทองแดง เมื่อทำการสร้างพลาสมาได้น้ำอย่างต่อเนื่อง (เป็นเวลา 10 นาที) ทำให้ ผิวหน้าของข้อไฟฟ้าเริ่มเสื่อมสภาพ ดังรูปที่ 3.18 ในทางตรงกันข้ามสำหรับวัสดุข้อเล็กโทรดที่มีจุด หลอมเหลวสูง เช่น ทังสเตน และสแตนเลส เมื่อนำมาทำเป็นข้อเล็กโทรดสามารถทนต่อการใช้งาน ในระยะยาวได้ดีกว่าข้อเล็กโทรดที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของ พื้นผิวข้อเล็กโทรดยังสามารถเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานพลาสมาได้น้ำ (Horiloshi and Serpone, 2017)



รูปที่ 3.17 การสร้างพลาสมาได้น้ำโดยการใช้เทคนิคการระเหยของเลเซอร์
(ที่มา : Horiloshi and Serpone, 2017)

การประยุกต์ใช้งานพลาสมาได้น้ำสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น การ สังเคราะห์วัสดุนาโน (Nanomaterials Synthesis) และหนึ่งในประโยชน์ที่สำคัญของการเกิด พลาสมาได้น้ำคือการนำมาใช้งานในการบำบัดน้ำเสีย โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ เสียได้จากการคุณสมบัติของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากพลาสมาได้น้ำ สามารถทำได้โดยการจ่าย แรงดันไฟฟ้าให้กับข้อเล็กโทรดเพื่อสร้างพลาสมาได้น้ำ โดยแรงดันไฟฟ้าที่สามารถสร้างพลาสมา ได้น้ำได้ เริ่มจาก 1 kV เป็นต้นไป ปฏิบัติการเกิดพลาสมาได้น้ำจะได้อนุมูลอิสระร่วมด้วย คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรง กลไกการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล โดยพลาสมาได้น้ำแสดงได้ดังสมการที่ 3.17 ข้อเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากพลาสมาได้น้ำจะเหนี่ยวนำ ให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นอะตอมของไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลเรดิคัล และเมื่อในน้ำมีความ

เข้มข้นของออกซิเจนสูงจะยิ่งเพิ่มปริมาณของไฮดรอกซิลเรดิคอลลตามไปด้วย ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้น ดังสมการเคมีที่ 3.17



ในกระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ ในโตรเจนเกิดขึ้น และยังทำให้สารแขวนลอยจับรวมตัวกันเนื่องจากการวิ่งชนของอิเล็กตรอนรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ ทำให้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาได้น้ำนั้นไม่จำเป็นต้องเติมสารตะกตะกอนให้กับน้ำเสีย (Schremmer, 2016)

3.13 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องและใช้ในการวิจัยการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำและความสำคัญ น้ำเสีย การแบ่งประเภทของน้ำเสีย ลักษณะสมบัติน้ำเสีย การแบ่งประเภทของลักษณะสมบัติน้ำเสีย BOD และ COD กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ กระบวนการการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้า และวิธีการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคอลล (Hydroxyl Radical; OH^-) คีสารจทางไฟฟ้า กระบวนการเกิดพลาสมา และการวัดคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด โดยเมื่อทราบทฤษฎีและขั้นตอนเหล่านี้จึงนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาได้น้ำ ดังแสดงไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 กล่าวนำ

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยนำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมานำมาทำการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยดำเนินการบำบัดที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในบทนี้ผู้ทำวิจัยกล่าวถึงการออกแบบชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ วิธีดำเนินการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างหลังจากการทดสอบ การนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่า BOD และ COD โดยรายละเอียดแสดงไว้ดังนี้

4.2 น้ำเสียที่ใช้ทดสอบ

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยนำตัวอย่างน้ำเสียมาจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ดังแสดงใน รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ตั้งอยู่ที่ 61 หมู่ 3 ถนนราชสีมา-ปัทมชัย ต. หนองจะบก อ. เมืองนครราชสีมา จ. นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 044-357938, 044-3579940 เปิดกิจการมาแล้วกว่า 35 ปี เป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง สามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ 190 ตันแป้ง/วัน โดยน้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้ทำการวัดค่า pH เครื่องวัดค่า pH แบบดิจิตอลมีย่านการวัดที่ pH 0.00-14.00 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 0.01 pH สามารถวัดได้ที่อุณหภูมิ 0-60 °C โดยก่อนทำการวัดกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ทำการสอบเทียบตามคู่มือการใช้งานโดยวัดค่า pH ของน้ำกลั่นภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 25 °C ได้ค่า pH 6.86 ตรงตามคู่มือ จึงได้ทำการตักน้ำเสียขึ้นมาทำการวัดค่า pH ได้ค่า 5.49 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งถือเป็นกรดอ่อน ๆ

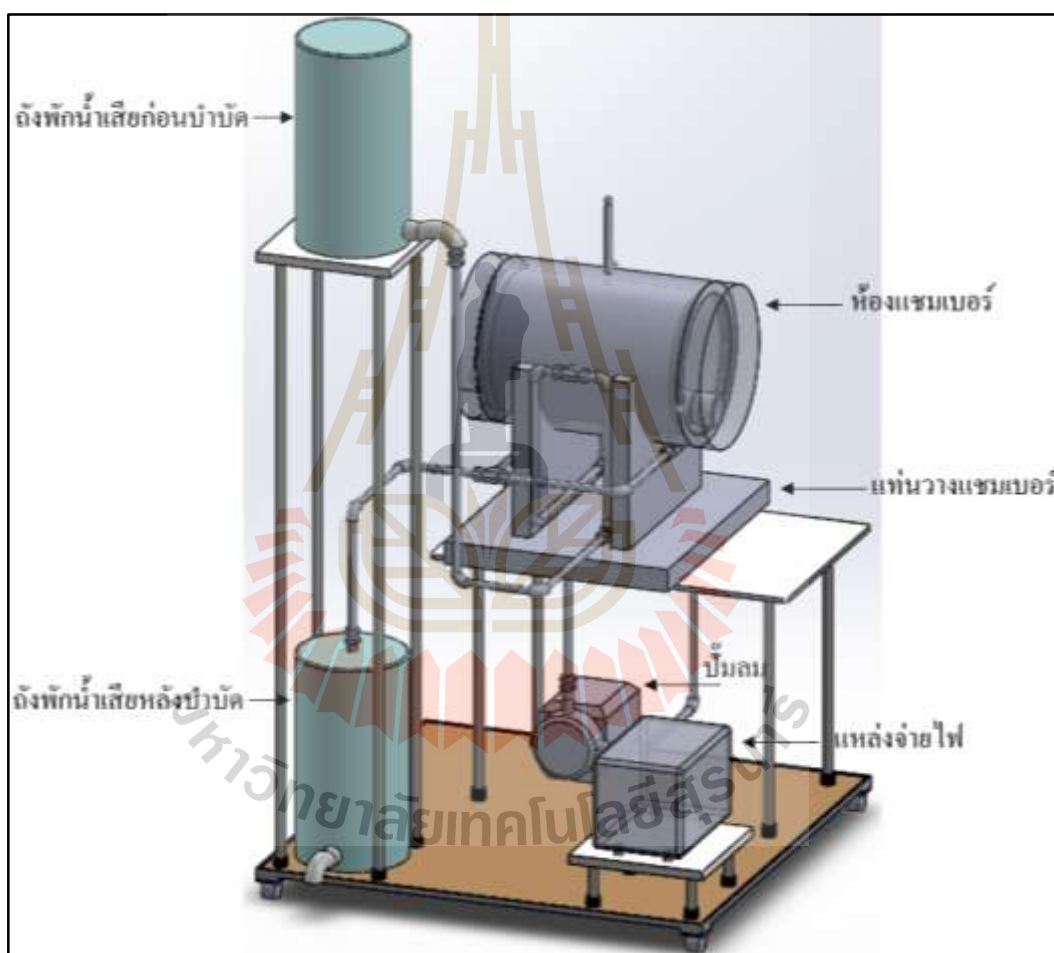


รูปที่ 4.2 การวัดค่า pH ของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

4.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4.3.1 การออกแบบชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานและมีความปลอดภัยในการดำเนินการทดลอง ระบบดังกล่าวมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สำหรับส่วนกำเนิดแรงดันจะมีด้วยกันสองส่วน โดยจะขอกกล่าวในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

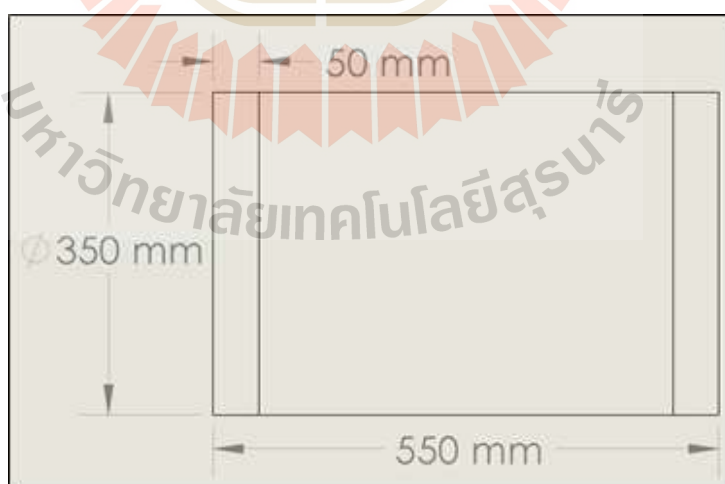
(1) ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำทำจากอะคริลิกใส ลักษณะเป็นทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 4.4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm และยาว 55 cm

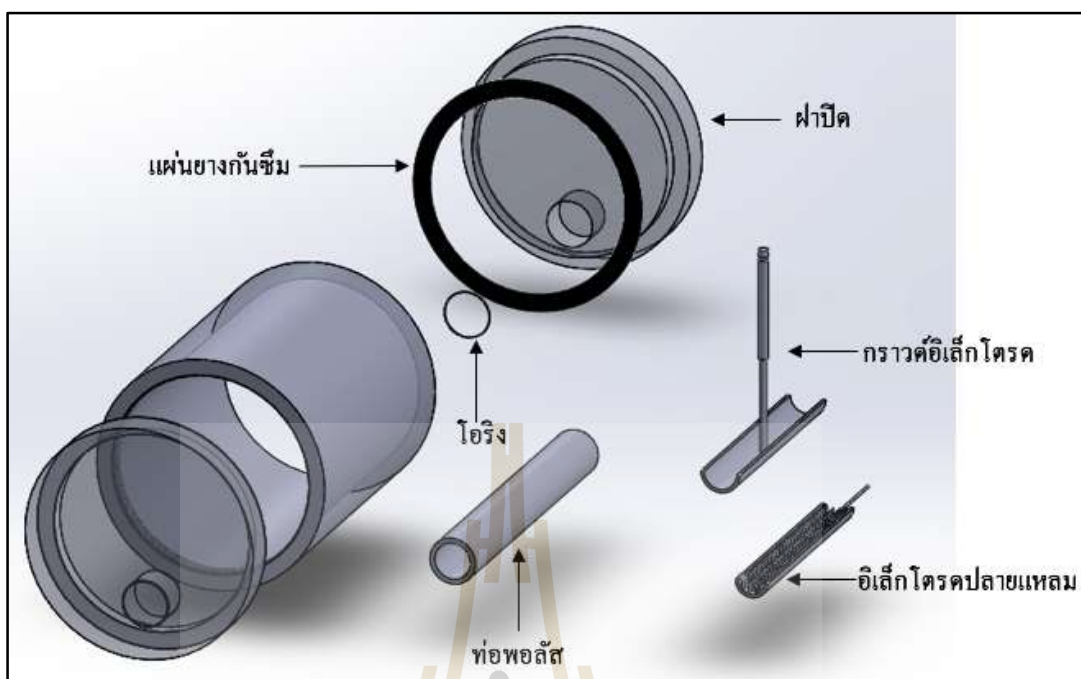
เนื่องจากเป็นท่ออะคริลิกใสทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่สุดเท่าที่หาได้ตามท้องตลาด เหมาะสำหรับ การบำบัดน้ำเสียเป็นจำนวนมากพอสำหรับการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ท่อด้านบนทั้งสองข้าง ของถังปฏิกรณ์ใช้สำหรับติดตั้งทางน้ำเข้าของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด สำหรับท่อด้านล่างและพื้นที่ บริเวณเหนือท่อด้านล่างของถังปฏิกรณ์เป็นที่ติดตั้งของอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมสำหรับสร้าง พลาสมาได้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 ถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.5 ขนาดของถังปฏิกรณ์



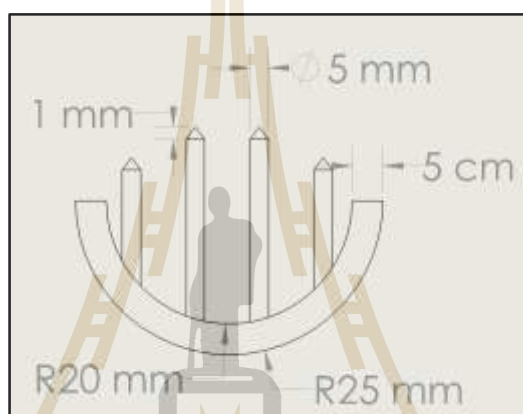
รูปที่ 4.6 รายละเอียดถึงปฏิกรณ์

(2) อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

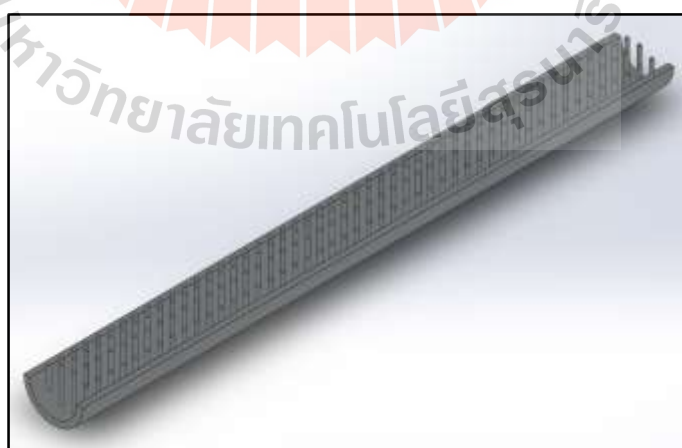
อิเล็กโทรดแบบปลายแหลมเป็นส่วนที่สำคัญเนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้สำหรับสร้างดีสชาร์จ์เพื่อให้เกิดพลาสมาได้น้ำ ในการออกแบบใช้แผ่นสแตนเลสที่ถูกขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกนำมาทำการผ่าครึ่งขนาดยาว 500 mm กว้าง 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยสาเหตุที่เลือกใช้สแตนเลสทรงกระบอก ความกว้าง 50 mm เนื่องจากเป็นขนาดที่สามารถใส่ได้พอดีในท่อพอลิส ส่วนปลายแหลมของอิเล็กโทรดใช้แท่งสแตนเลสสำหรับรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm โดยที่บริเวณส่วนปลายของแท่งสแตนเลสขึ้นรูปเป็นปลายแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm ยาว 1 mm วางตัวเป็นแนบระนาบขนานกัน 4 แถว ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นนำแผ่นสแตนเลสที่ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกและผ่าครึ่งแล้วและแท่งสแตนเลสปลายแหลมมาเชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 4.9 การวางอิเล็กโทรดปลายแหลมแบบนี้เพื่อสร้างความเครียดสนามไฟฟ้า โดยอิเล็กโทรดด้านหนึ่งเป็นขั้วที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ขณะที่อีกขั้วหนึ่งนั้นเป็นส่วนที่ต่อลงดิน ดังรูปที่ 4.10 สาเหตุที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้สแตนเลสเนื่องจากสแตนเลสนั้นมีความทนทานต่อการเกิดสนิมมากกว่าเหล็ก



รูปที่ 4.7 ขนาดแผ่นอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.8 ขนาดของแท่งสแตนเลสปลายแหลม



รูปที่ 4.9 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลม



รูปที่ 4.10 อีเล็กโตรด

4.3.2 การสร้างชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

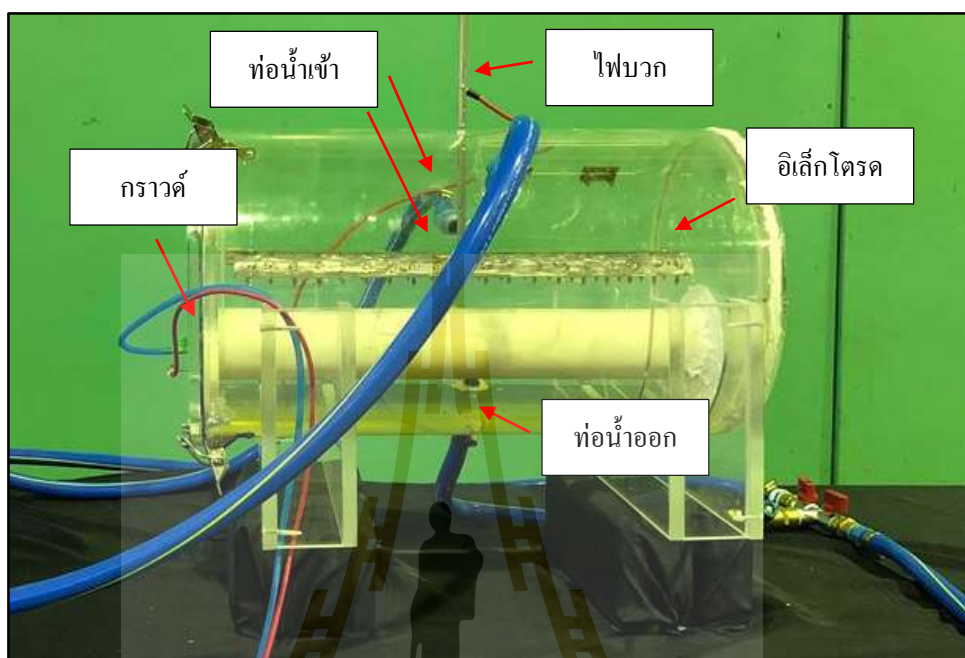
ชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำที่ออกแบบเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ ชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ และภาคกำเนิดแรงดัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) ชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสีย โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพลาสมาได้น้ำ ส่วนประกอบหลักในชุดระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ คือ ถังปฏิกิริยาอะคริลิกทรงกระบอกเพื่อใส่น้ำเสียสำหรับการบำบัด ชุดอีเล็กโตรดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง ถังพักน้ำเสีย ปั๊มลม และปั๊มน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ถังปฏิกิริยา สำหรับใส่น้ำเสียในการบำบัด และชุดอีเล็กโตรดปลายแหลมเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง ถังปฏิกิริยาทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm และยาว 55 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับอีเล็กโตรดที่ใช้เป็นแบบปลายแหลม โดยให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง 3 ชนิด ชนิดแรกคือกล่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ประดิษฐ์ขึ้น ขนาด 30 kV pulse ชนิดที่ 2 และ 3 ใช้หม้อแปลงทดสอบขนาด 100kV, 5 kVA ความถี่ 50 Hz แปลงเป็นขนาด 30 kV DC และขนาด 30 kV AC ความถี่ 50 Hz เพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอีเล็กโตรดปลายแหลม สำหรับกรณีที่ใช้ไฟฟ้าแรงสูงขนาด 30 kV AC ความถี่ 50 Hz จะติดตั้งตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุบนโครงสร้างเหล็กที่ติดตั้งหม้อแปลง เพื่อแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงให้ลดลง และส่งต่อไปยังดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multi Meter หรือ DMM) โดยที่ดิจิตอลมัลติมิเตอร์จะทำงานร่วมกับ วาไรแอค (Variac)

เพื่อปรับแรงดันของหม้อแปลงให้ได้ตามที่ต้องการทดสอบ โดยการวัดด้วยระบบโวลเตจดิไวเดอร์อ้างอิง (Reference Voltage Divider) ดังรูปที่ 4.12



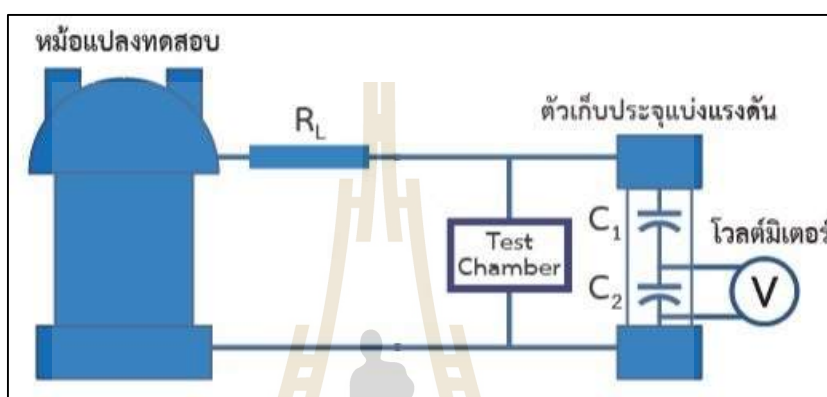
รูปที่ 4.11 ถังปฏิกรณ์และชุดอิเล็กโตรดปลายแหลม



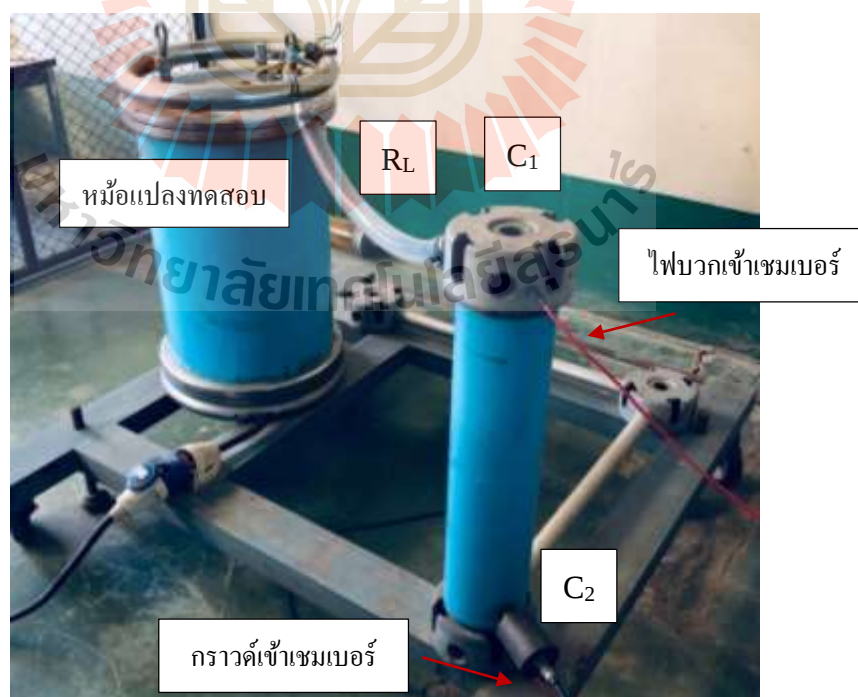
รูปที่ 4.12 ชุดปรับแรงดันให้หม้อแปลงทดสอบ

(2) ภาคกำเนิดแรงดันสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

กรณีการใช้แรงดัน AC 30 kV 50 Hz ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ นั้นในการใช้แรงดัน AC 30 kV 50 Hz ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นวิธีการแบ่งแรงดันของ ตัวเก็บประจุจึงนำมาช่วยแปลงแรงดันจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำเพื่อให้สามารถวัดค่าด้วยโวล มิเตอร์ที่มีพิกัดแรงดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 แผนภาพวงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุกระแสสลับ



รูปที่ 4.14 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุกระแสสลับ

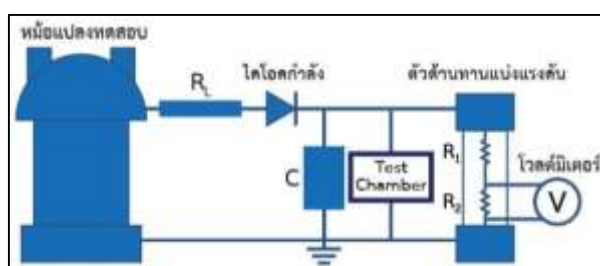
จากรูปที่ 4.13 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานประกอบด้วยตัวเก็บประจุภาคแรงสูง C_1 และตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ C_2 การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงสูงเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (4.1)$$

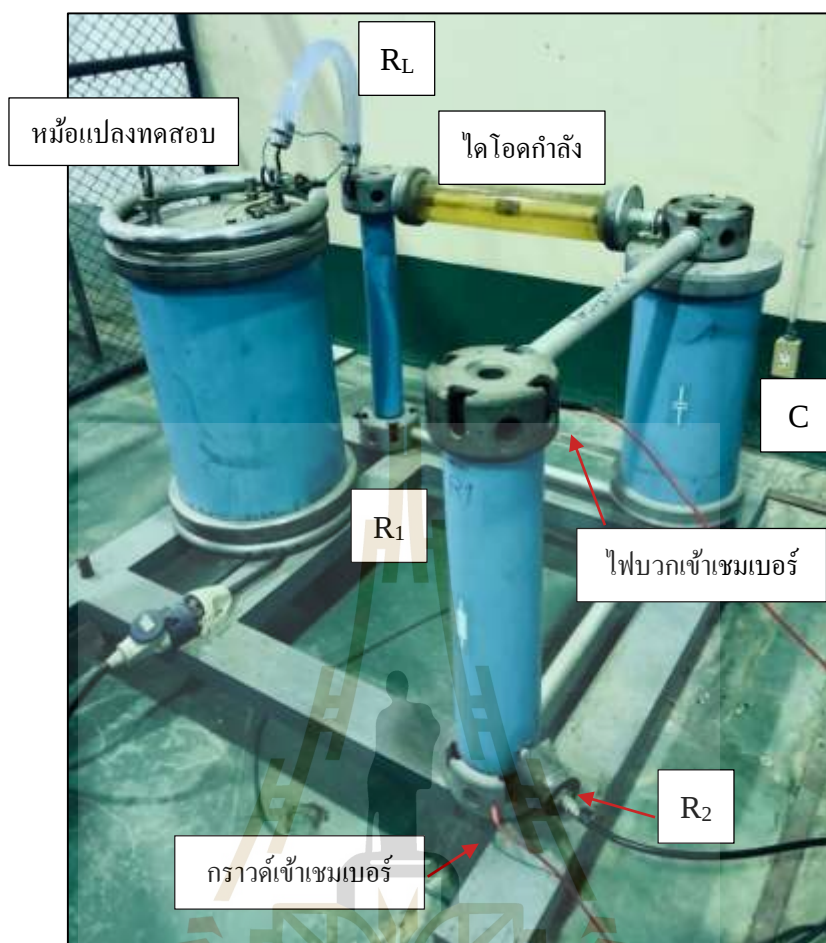
โดย C_1 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูงมีขนาด 100 pF
 C_2 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ มีขนาด 110 nF
 U คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV) ที่ตกคร่อมหม้อแปลงแรงดัน
 U_2 คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V) ที่วัดจากโวลต์มิเตอร์หรือที่ตกคร่อม R_2

แรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกแบ่งแรงดันให้เหลือเพียงแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำดังนั้นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ สามารถกำหนดได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากการคำนวณ จากนั้นใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐานเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายเข้ากับชุดทดสอบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เป็นจริงตามที่ต้องการ ดังนั้น ถ้าต้องการจ่ายแรงดันให้ชุดทดสอบ คือ $U = 30$ kV ฉะนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้ว่าต้องปรับหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้จนกว่าแรงดันที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ U_2 จะมีค่าเท่ากับ 24.73 V

กรณีการใช้แรงดัน DC 30 kV ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้นในกรณีการใช้แรงดัน DC 30 kV ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นวิธีการแบ่งแรงดันของตัวต้านทานจึงนำมาช่วยแปลงแรงดันจากแรงดันสูงเป็นแรงดันต่ำเพื่อให้สามารถวัดค่าด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีพิสัยแรงดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 แผนภาพวงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานกระแสดตรง



รูปที่ 4.16 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานกระแสตรง

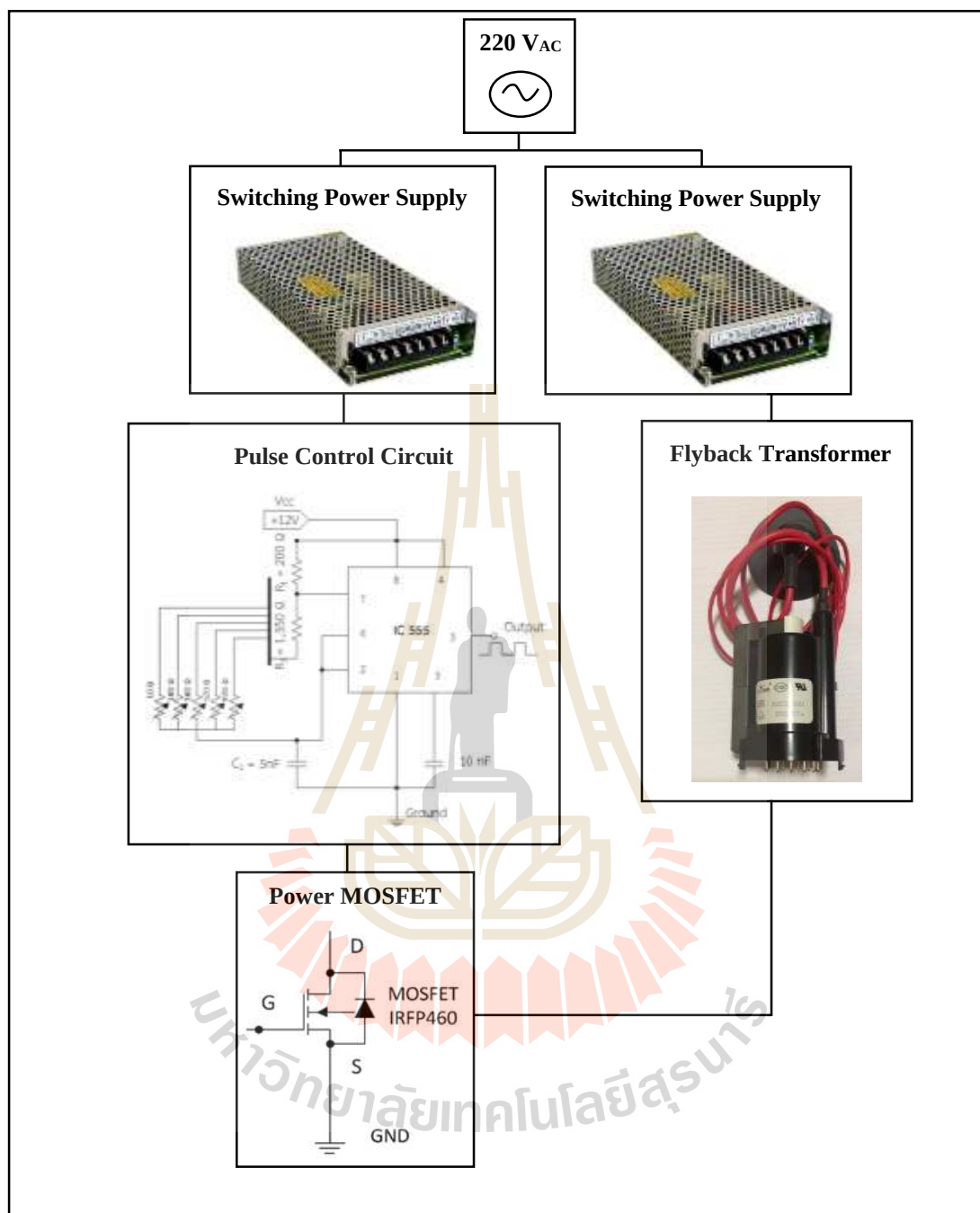
จากรูปที่ 4.15 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทานประกอบด้วยตัวต้านทานภาคแรงสูง R_1 และตัวต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 การแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากแรงสูงเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad (4.2)$$

โดย	R_1	คือ ตัวต้านทานด้านแรงสูงมีขนาด 400 M Ω
	R_2	คือ ตัวต้านทานด้านแรงต่ำ มีขนาด 330 k Ω
	U	คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง (kV) ที่ตกคร่อมหม้อแปลงแรงดัน
	U_2	คือ แรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำ (V) ที่วัดจากโวลต์มิเตอร์หรือที่ตกคร่อม R_2

แรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกแบ่งแรงดันให้เหลือเพียงแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำดังนั้นการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับชุดทดสอบ สามารถกำหนดได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าออกมาจากการคำนวณ จากนั้นใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงมาตรฐานเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายเข้ากับชุดทดสอบ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและปรับจนให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เป็นจริงตามที่ต้องการ ดังนั้น ถ้าต้องการจ่ายแรงดันให้ชุดทดสอบ คือ $U = 30 \text{ kV}$ ฉะนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้ว่าต้องปรับหม้อแปลงแรงดันปรับค่าได้จนกว่าแรงดันที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ U_2 จะมีค่าเท่ากับ 24.73 V

กรณีการใช้แรงดัน DC Pulse ขนาด 30 kV นั้นจะทำการสร้างกล่องกำเนิดแรงดันขึ้นมา โดยประยุกต์นำหลักการของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ามาใช้งาน โดยมีการนำไฟฟ้ากระแสสลับ 220 Vac 50 Hz จากไฟฟ้าบ้านมาเข้าวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator) ต่อผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรงแรงสูงแบบพัลส์ขนาด 30 kV จากนั้นจ่ายแรงดันไปยังขั้วอิเล็กโตรดชั้นตอนการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ จะแสดงในรูปที่ 4.17 โดยขั้นตอนเริ่มจากการรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 Vac 50 Hz จากเต้ารับของไฟฟ้าบ้าน เข้าสู่วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า เพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 Vdc และ 24 Vdc จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 Vdc จ่ายให้กับวงจรสร้างสัญญาณพัลส์เบิ้ลยูเอ็ม (PWM Generator) เพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซิงมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ส่งผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง โดยในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงชนิดฟลายแบค (Flyback Transformer) โดยหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะส่งแรงดันเข้าที่พุทกระแสตรงแบบพัลส์ขนาด 30 kV จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโตรดปลายแหลม โดยมีอิเล็กโตรดที่ต่อศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์มีระยะห่างระหว่างกัน (gap) ทำให้เกิดการดีสชาร์จเพื่อสร้างพลาสมาต่อไป



รูปที่ 4.17 การทำงานของแหล่งจ่าย DC Pulse

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่แรงดันอินพุตกระแสตรงเท่ากับ 24 V_{dc} ให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตใช้งานเป็นแรงดันกระแสตรงแบบพัลส์ขนาด 30 kV

เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_{in} เท่ากับ 24 V จากสวิทช์เพาเวอร์ซัพพลาย และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{out} ที่ต้องการเท่ากับ 30 kV ในการออกแบบจำนวนขดลวดปฐมภูมิ (N_p) เท่ากับ 10 รอบ ดังนั้นจึงใช้สมการที่ 4.3 เพื่อหาจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ (N_s)

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (4.3)$$

เมื่อทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาจำนวนขดลวดปฐมภูมิ

$$N_s = \frac{V_s N_p}{V_p} \quad (4.4)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.4 จะได้

$$N_s = \frac{(30 \times 10^3 V) \times 10}{24V}$$

จะได้ขดลวดทุติยภูมิ

$$N_s = 12500 \text{ รอบ}$$

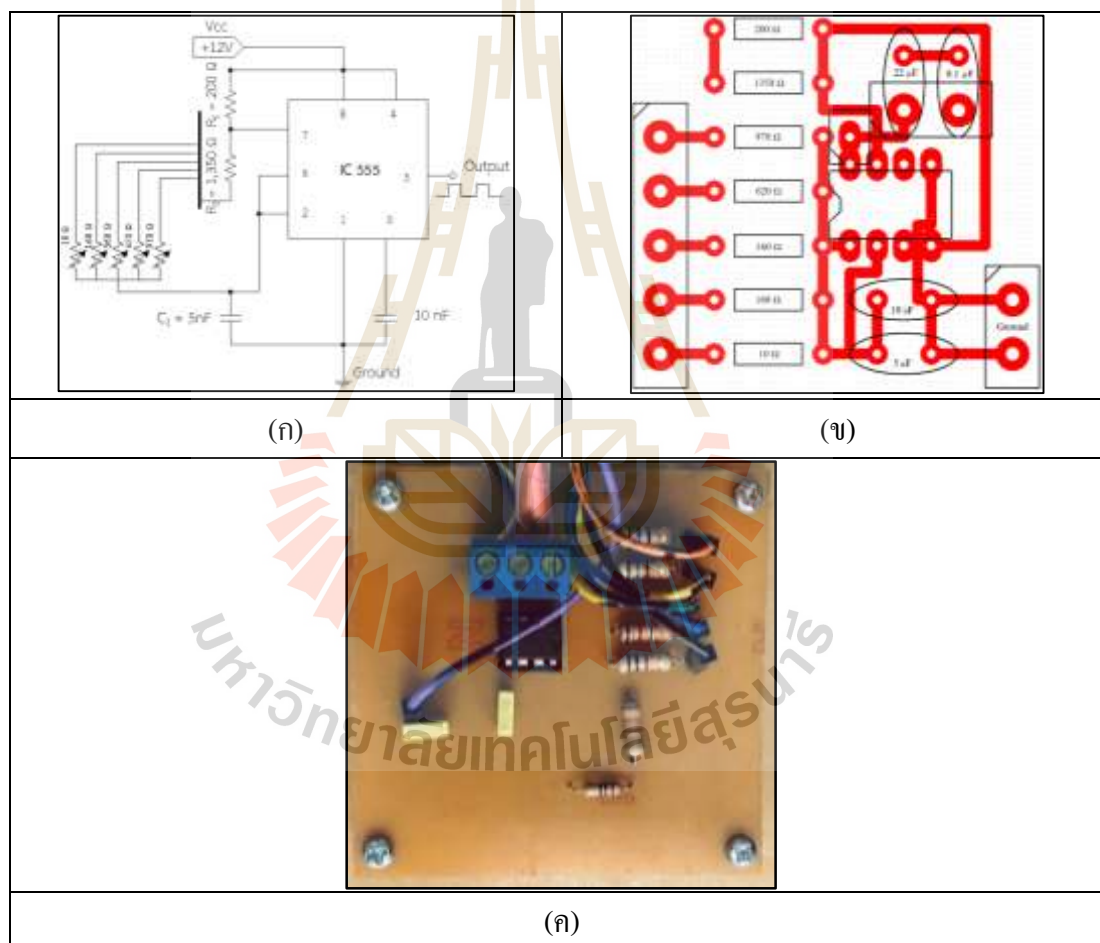
การออกแบบวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ 555 โดยใช้งานในโหมดคอเสติยร ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มควบคุมการทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณพัลส์ของไอซีเบอร์ 555 นั้น สามารถกำหนดความถี่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ R_1 , R_2 และ C_1 ดังสมการที่ 4.5

$$F = \frac{1.4}{[(R_1 + 2R_2) \times C_1]} \quad (4.5)$$

ในการออกแบบนั้นได้กำหนดค่า $R_1 = 200$ และค่า $C_1 = 5 \text{ nF}$ เป็นค่าคงที่ โดยสามารถคำนวณค่า R_2 ในช่วงความถี่ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ R_2 ของแต่ละความถี่

ลำดับ	ความถี่ (kHz)	R_2 (k Ω)
1	60	2.80
2	70	3.53
3	80	4.73
4	90	7.15
5	100	14.4



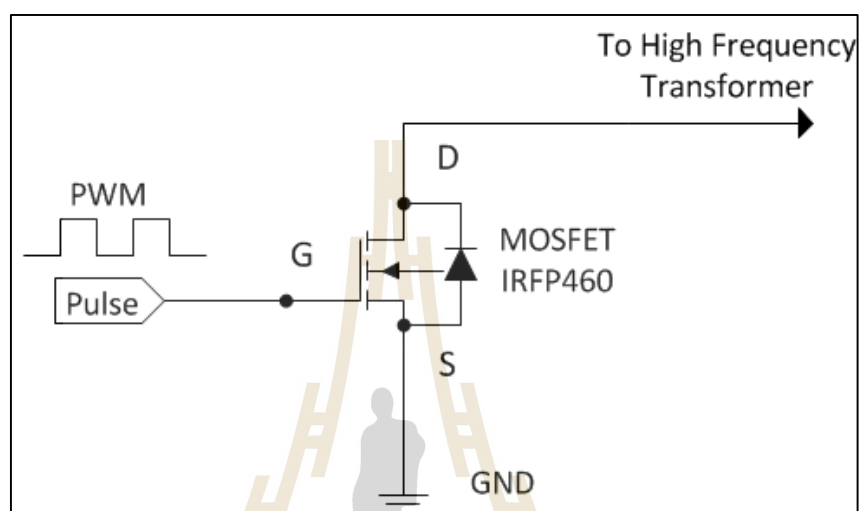
(ก) การทำงานของวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ไอซีเบอร์ 555

(ข) ลายวงจรการทำงานของวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ไอซีเบอร์ 555

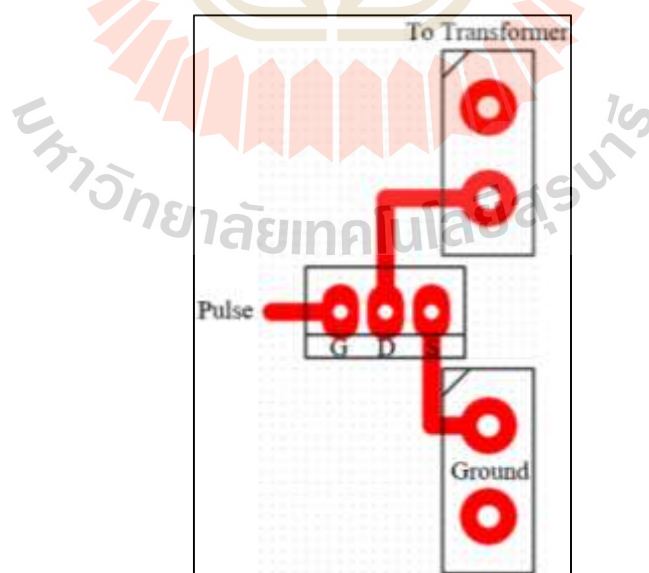
(ค) แผงวงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ไอซีเบอร์ 555

รูปที่ 4.18 วงจรควบคุมสัญญาณพัลส์ของไอซีเบอร์ 555

การออกแบบวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงวงจรควบคุมหม้อแปลงความถี่สูงนั้น จะรับสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม มาจากวงจรในภาคสัญญาณพัลส์ผ่านทางขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ 555 เพื่อทำการขับมอสเฟตกำลัง ซึ่งในการออกแบบได้เลือกใช้สวิตช์ควบคุมมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) เบอร์ IRFP460 สำหรับควบคุมหม้อไฟฟ้าแปลงความถี่สูง ดังรูปที่ 4.19



(ก) การทำงานของควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

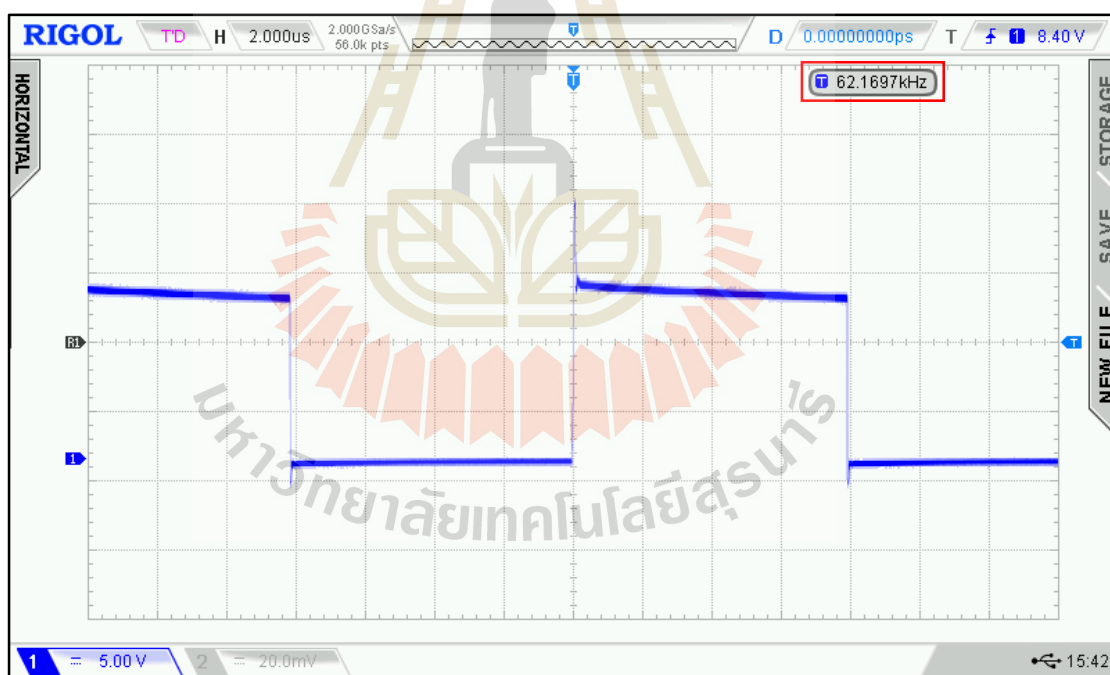


(ข) ลายวงจรการทำงานของวงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง
รูปที่ 4.19 วงจรควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

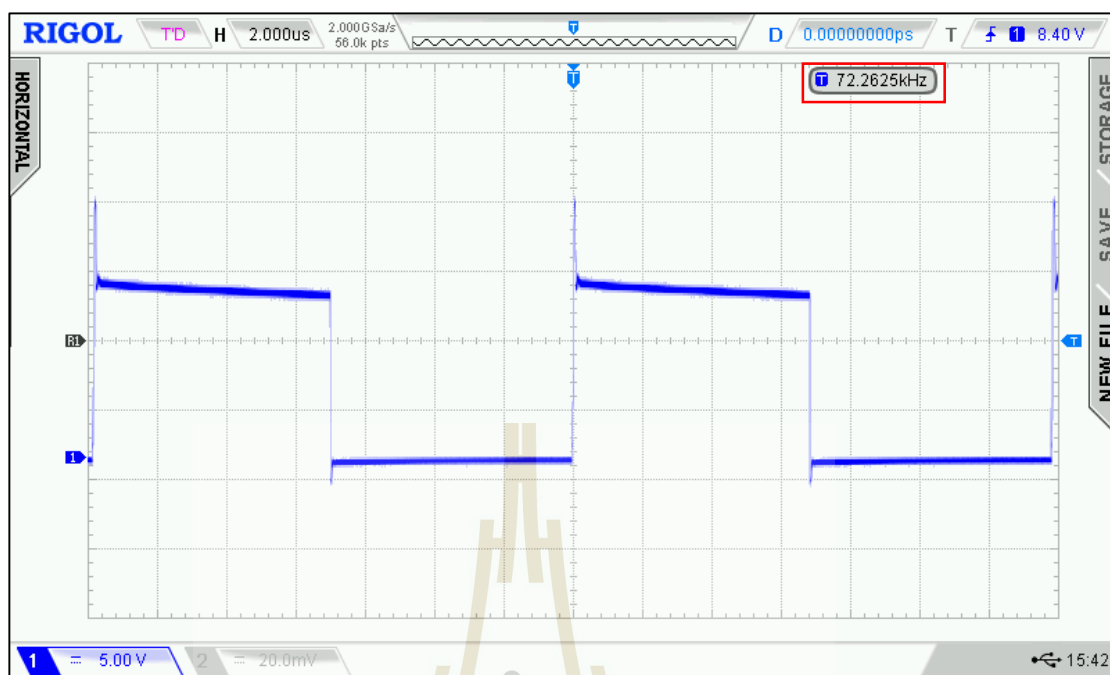
จากการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณพัลส์จากไอซีเบอร์ 555 สามารถวัดสัญญาณความถี่โดยใช้ออสซิลโลสโคป ได้ดังตารางที่ 4.2 โดยแต่ละค่าความถี่แสดงในรูปแบบที่ 4.20-4.24 โดยในการทดลองได้ใช้งานที่ความถี่สูงสุดที่ 100 kHz

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบระหว่างความถี่จากการคำนวณและการทดลอง

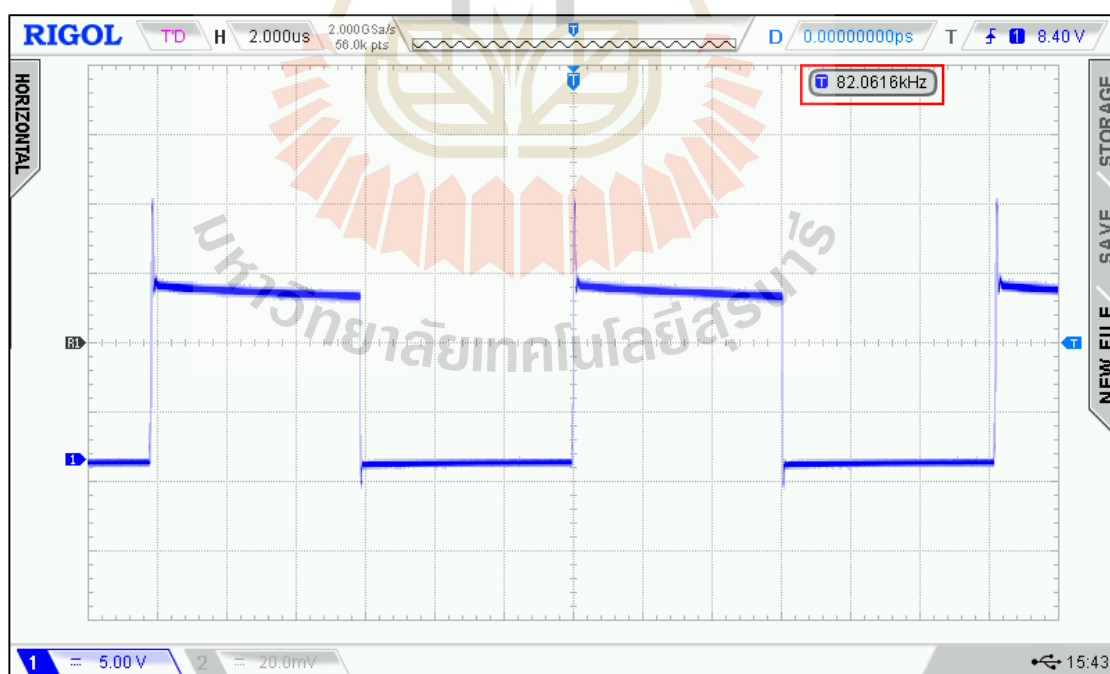
ลำดับ	ความถี่คำนวณ (kHz)	ความถี่ทดลอง (kHz)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	60.00	62.17	3.49
2	70.00	72.26	3.13
3	80.00	82.06	2.51
4	90.00	91.60	1.74
5	100.00	100.04	0.04



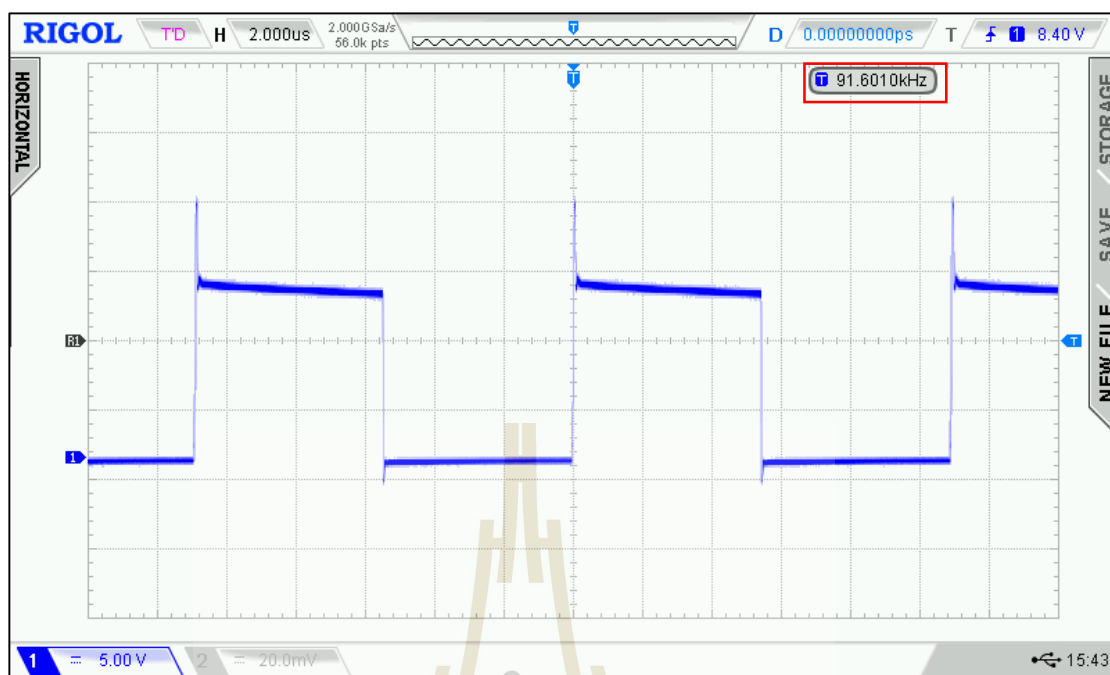
รูปที่ 4.20 สัญญาณพัลส์ความถี่ 62.17 kHz



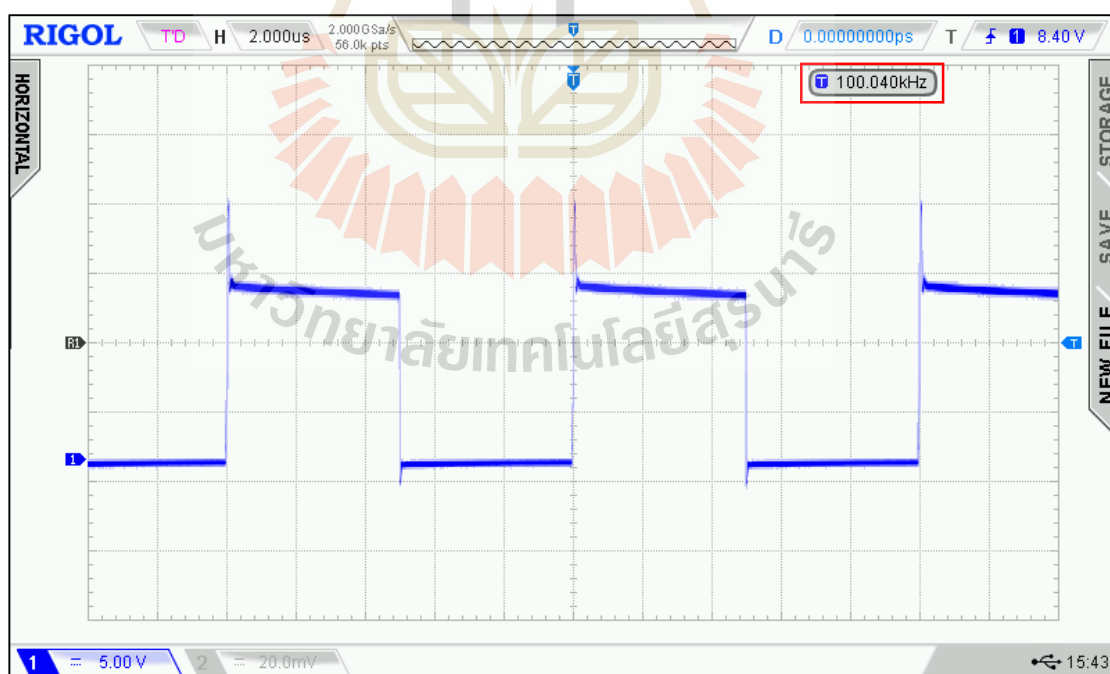
รูปที่ 4.21 สัญญาณพัลส์ความถี่ 72.26 kHz



รูปที่ 4.22 สัญญาณพัลส์ความถี่ 82.06 kHz



รูปที่ 4.23 สัญญาณพัลส์ความถี่ 91.60 kHz



รูปที่ 4.24 สัญญาณพัลส์ความถี่ 100.04 kHz

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในการทำวิจัยนี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่รับกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์ทางขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดการพองตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ส่งผลให้มีการพองตัวและยุบตัวที่ขดลวดทุติยภูมิด้วย ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแรงสูงทางด้านขาออก ซึ่งระดับแรงดันสูงเอาต์พุต (V_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3

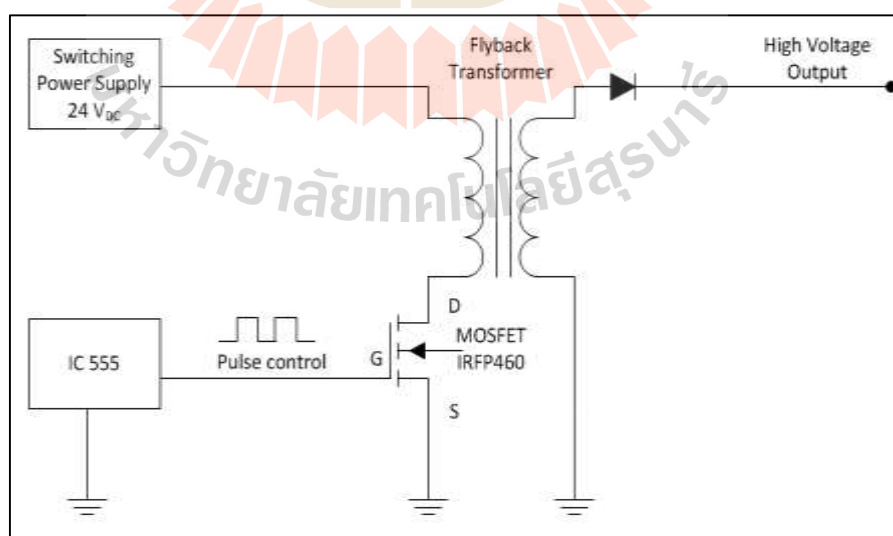
$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (4.3)$$

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านฉนวนและความปลอดภัยในการใช้งานหม้อแปลงแรงดันสูง ในการออกแบบหม้อแปลงแรงสูงแบบฟลายแบค จึงได้ทดสอบโดยการพิจารณาการพันขดลวดด้านปฐมภูมิ และทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

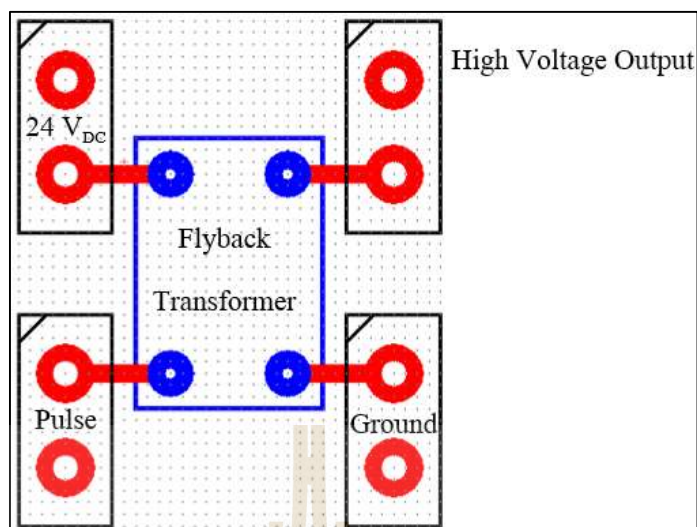
1) พันขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค โดยใช้ขดลวดขนาด 0.2 mm มาพันเกลียวโดยใช้ขดลวด 7 เส้น จากนั้นนำไปพันจำนวน 12 รอบ โดยมีระยะสายเป็นฉนวนในการพันขดลวด จากนั้นเคลือบผิวด้วยการฉนวน (ไกรสกล ศรีสุวรรณ, 2557)

2) ทดสอบสมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีไดอะแกรมการทำงานของวงจรดังรูปที่

4.25



(ก) การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค



(ข) ลายวงจรการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค
รูปที่ 4.25 วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงแบบฟลายแบค

หัวโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (High voltage probe) เป็นอุปกรณ์เสริมที่ใช้ต่อเข้ากับมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าที่พุดก่อนที่จะต่อเข้าอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลม ในการศึกษาได้เลือกใช้หัววัดไฟฟ้าของ Testec รุ่น HVP40 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งสามารถวัดไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงได้ในช่วง 0-40 kV มีค่าความถูกต้อง $\pm 2\%$ ในช่วง 1-20 kV และมีค่าความถูกต้อง $\pm 3\%$ ในช่วง 20-40 kV



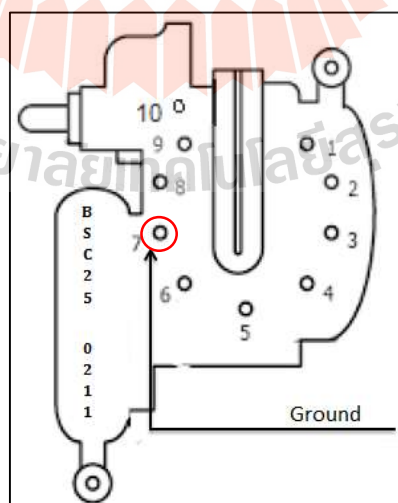
รูปที่ 4.26 หัวโพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง

ลำดับขั้นตอนการทดสอบ เริ่มจากจ่ายแรงดันกระแสตรง ขนาด 24 V ให้กับขดลวดที่พันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบคในด้านปฐมภูมิ โดยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบคมีลักษณะดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบค

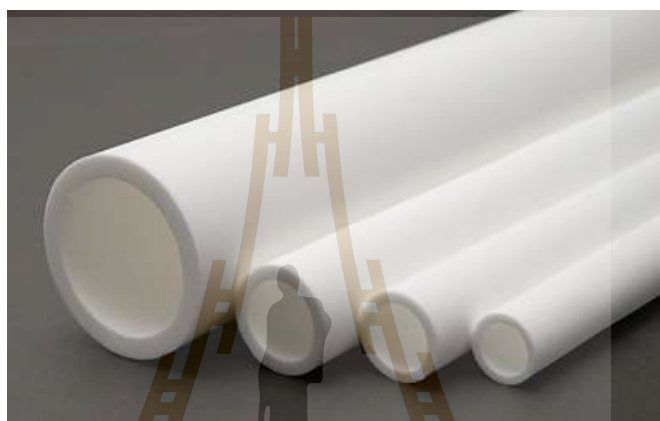
จากนั้นนำสัญญาณพัลส์จากไอซีเบอร์ 555 จ่ายเข้าขาเกต (ขา 7) ของมอสเฟตกำลังโดยปรับความถี่ตั้งแต่ 10 ถึง 50 kHz ให้ขับหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นทำงานวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้สำหรับโครงสร้างของขาใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 โครงสร้างขาใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบฟลายแบค

(ที่มา : http://nazya.com/freeshipping/single/34617310/orig_desc.html)

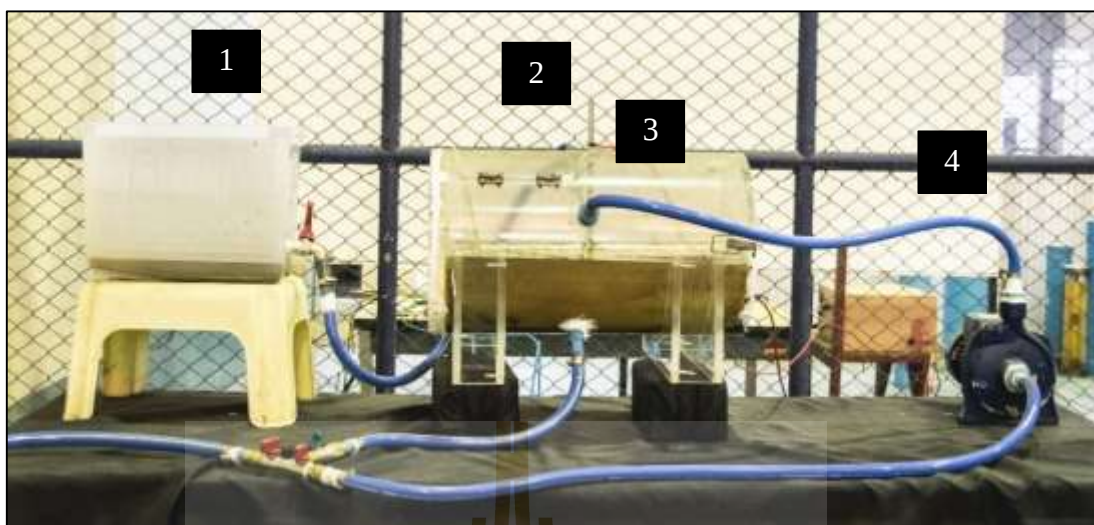
ท่อพอลัส (porous tube) เป็นท่อที่ทำจากเซรามิกผสมอลูมินา (Alumina) โดยมีคุณสมบัติที่น้ำไม่สามารถผ่านพื้นผิวของท่อได้ แต่อากาศสามารถไหลผ่านพื้นผิวของท่อได้ โดยท่อยังมีคุณสมบัติที่ทนการกัดกร่อนทางเคมี และยังทนต่อความร้อนได้สูงถึง 1800°C จึงสามารถนำมาใช้ในการครอบอเล็กโตรดละลายแหลม และกราวด์อเล็กโตรดในการดิสชาร์จเพื่อทำให้เกิดพลาสมาในการบำบัดน้ำเสียต่อไปได้ โดยในการวิจัยนี้ใช้ท่อพอลัสทรงกระบอกยาว 50 cm เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 7 cm ท่อพอลัสมีลักษณะดังรูปที่ 4.29



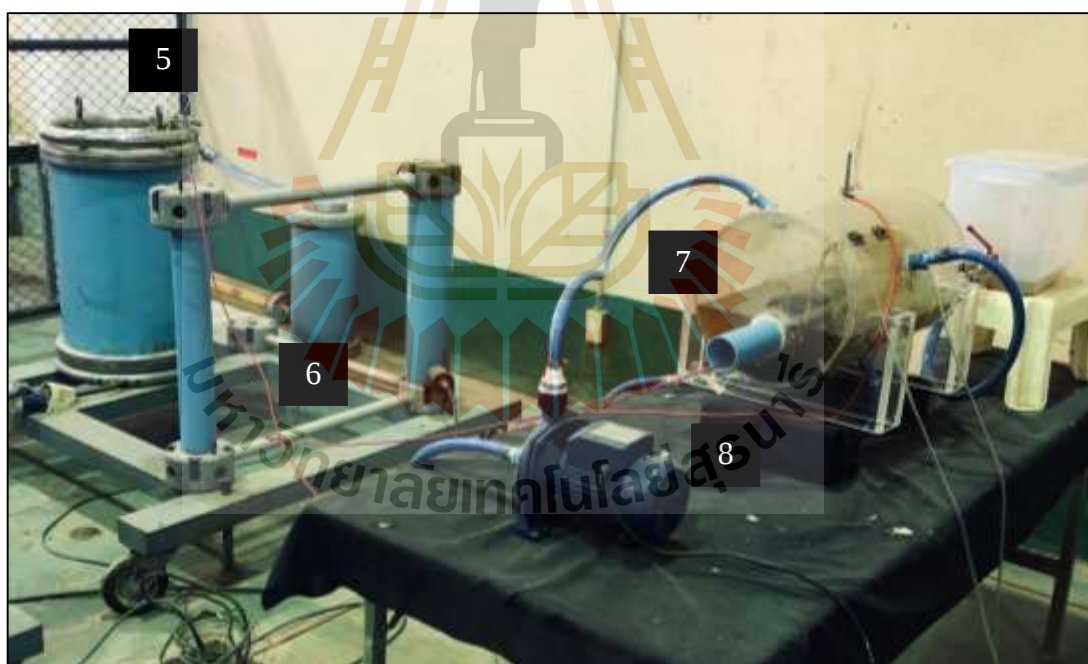
รูปที่ 4.29 ท่อพอลัส

4.3.3 การทำงานของชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ถึงปฏิกิริยาจะถูกต่อกับเครื่องปั้มน้ำ เพื่อให้มีการไหลเวียนของน้ำเสียในขณะบำบัด โดยมีชุดควบคุมการทำงานของเครื่องปั้มน้ำและปั้มลมติดตั้งไว้กับระบบบำบัดน้ำเสียนี้ด้วย โดยชุดควบคุมการทำงานของเครื่องปั้มน้ำและปั้มลมมีหน้าที่ควบคุมการเปิด ปิดเครื่องปั้มน้ำและปั้มลม รูปแบบของชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ เมื่อประกอบสร้างเสร็จจะมีสัดส่วน แสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 ระบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ



รูปที่ 4.31 ระบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

หมายเลข	อุปกรณ์
1	ถังพักน้ำเสีย
2	ถังอะคริลิกใสทรงกระบอกเพื่อใส่น้ำเสียในการบำบัด
3	อิเล็กทรอนิกส์
4	เครื่องปั๊มน้ำ
5	หม้อแปลงไฟฟ้า
6	โวลต์เตจดีไวเดอร์
7	ท่อพอลิส
8	ปั๊มน้ำ

4.3.4 การเตรียมน้ำเสียสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

น้ำเสียสำหรับทดสอบการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในเขตจังหวัดนครราชสีมา บริษัท อุตสาหกรรมแป้ง โคราซ จำกัด การบำบัดมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่ผ่านมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยน้ำเสียนั้นนำมาจากบ่อพักรวมน้ำเสียดังแสดงในรูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 บริเวณที่เก็บตัวอย่างน้ำเสีย



รูปที่ 4.33 ลักษณะตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาใช้ทดสอบ

4.3.5 วิธีการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

การทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ทำการทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้าแรงสูง DC, AC จากหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียว 100 kV, 5 kVA โดยทดสอบอย่างต่อเนื่องภายใต้ระดับแรงดัน 30 kV (อาจมีการแปรผันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับความชื้น ความดันอากาศ และอุณหภูมิขณะทดสอบ) และทำการทดสอบภายใต้แรงดันไฟฟ้าแรงสูง DC pulse 30 kV จากกล่องกำเนิดแรงดัน เพื่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการสร้างพลาสมา โดยน้ำเสียจากถังพักน้ำเสียจะถูกฉีดเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากอะคริลิกใสทรงกระบอกผ่านเครื่องปั๊มน้ำ ส่วนปั๊มลมจะทำการอัดออกซิเจนผ่านรูพอร์ของท่อพอลิสที่วางตัวอยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ทำการทดสอบการบำบัดน้ำเสีย เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วไปวิเคราะห์ผลเพื่อให้ทราบค่า BOD และ COD ทำการทดสอบจนกว่า BOD และ COD มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

4.4 วิธีการวิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

เทคนิคในการวิเคราะห์ผลของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เทคนิคในการวิเคราะห์ผลของน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

ตัวแปร	วิธีการวิเคราะห์
BOD	5 Day BOD Test
COD	Close Reflux

4.5 สรุป

ในบทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การออกแบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ประกอบด้วย การออกแบบถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ที่ทำจากอะครีลิคใสและอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลม-ปลายแหลมที่ใช้สำหรับดิสชาร์จเพื่อสร้างพลาสมาได้น้ำ การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้น ได้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบ น้ำเสียสำหรับทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว ของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในเขตจังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้นำมาทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ นำตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการทดสอบแล้วมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ซึ่งจะขอกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

5.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 4 ผู้วิจัยกล่าวถึงวิธีทดสอบและการออกแบบสำหรับชุดทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การวิเคราะห์ผลหลังการทดสอบนั้นทำเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี ด้วย การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD และ COD ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด เปรียบเทียบกับน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง โดยผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

5.2 ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย

ผลการวิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ในเขตจังหวัดนครราชสีมา ก่อนนำมาบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำพบว่าค่า BOD และ COD สูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรมมาก (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l และค่า COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2539) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าคุณภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตแป้งมัน ซึ่งน้ำจากกระบวนการผลิตเหล่านี้อาจก่อให้เกิดปัญหาทั้งมลพิษทางกลิ่น และต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้างโดยตรง หากไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

ตารางที่ 5.1 ค่า BOD และ COD ของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง
BOD (mg/l)	751
COD (mg/l)	2580

5.3 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ สำหรับค่า BOD และ COD เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยแหล่งจ่ายทั้ง 3 รูปแบบ (DC 30 kV, DC pulse 30 kV และ AC 30 kV) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 48 ชั่วโมง เพื่อทำการวัดค่า BOD

และ COD ของน้ำเสีย และทำซ้ำจนกว่าจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l และค่า COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l)

5.3.1 ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC

สำหรับการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC 30 kV เมื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 48 ชั่วโมง เพื่อทำการวัดค่า BOD และ COD สามารถสรุปค่า BOD และ COD ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC

จำนวนชั่วโมง	BOD (mg/l)	COD (mg/l)
48	461	1130
96	360	860
144	223	607
192	156	440
240	135	295
288	17	71

หลังจากการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC พบว่า สีของตัวอย่างน้ำเสียจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาเก็บตัวอย่างน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC

ก. 48 ชั่วโมง ข. 96 ชั่วโมง ค. 144 ชั่วโมง
ง. 192 ชั่วโมง จ. 240 ชั่วโมง ฉ. 288 ชั่วโมง

5.3.2 ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse

สำหรับการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse 30 kV เมื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 48 ชั่วโมง เพื่อทำการวัดค่า BOD และ COD สามารถสรุปค่า BOD และ COD ได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse

จำนวนชั่วโมง	BOD (mg/l)	COD (mg/l)
48	432	1048
96	333	710
144	193	548
192	119	319
240	53	128
288	13	50

หลังจากการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse พบว่าสีของตัวอย่างน้ำเสียจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาเก็บตัวอย่างน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ DC Pulse

ก. 48 ชั่วโมง ข. 96 ชั่วโมง ค. 144 ชั่วโมง
 ง. 192 ชั่วโมง จ. 240 ชั่วโมง ฉ. 288 ชั่วโมง

5.3.3 ผลการทดสอบการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC

สำหรับการทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC 30 kV เมื่อทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 48 ชั่วโมง เพื่อทำการวัดค่า BOD และ COD สามารถสรุปค่า BOD และ COD ได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC

จำนวนชั่วโมง	BOD (mg/l)	COD (mg/l)
48	635	2180
96	397	1360
144	275	1180
192	216	1040
240	77	215
288	13	50

หลังจากการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC พบว่า สีของตัวอย่างน้ำเสียจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาเก็บตัวอย่างน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบ AC

ก. 48 ชั่วโมง ข. 96 ชั่วโมง ค. 144 ชั่วโมง
ง. 192 ชั่วโมง จ. 240 ชั่วโมง ฉ. 288 ชั่วโมง

5.4 ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD

ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ที่ทำการบำบัด จะวัดจากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า BOD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l) สามารถแสดงผลการทดลองได้ตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปอร์เซนต์ที่ลดลงของค่า BOD

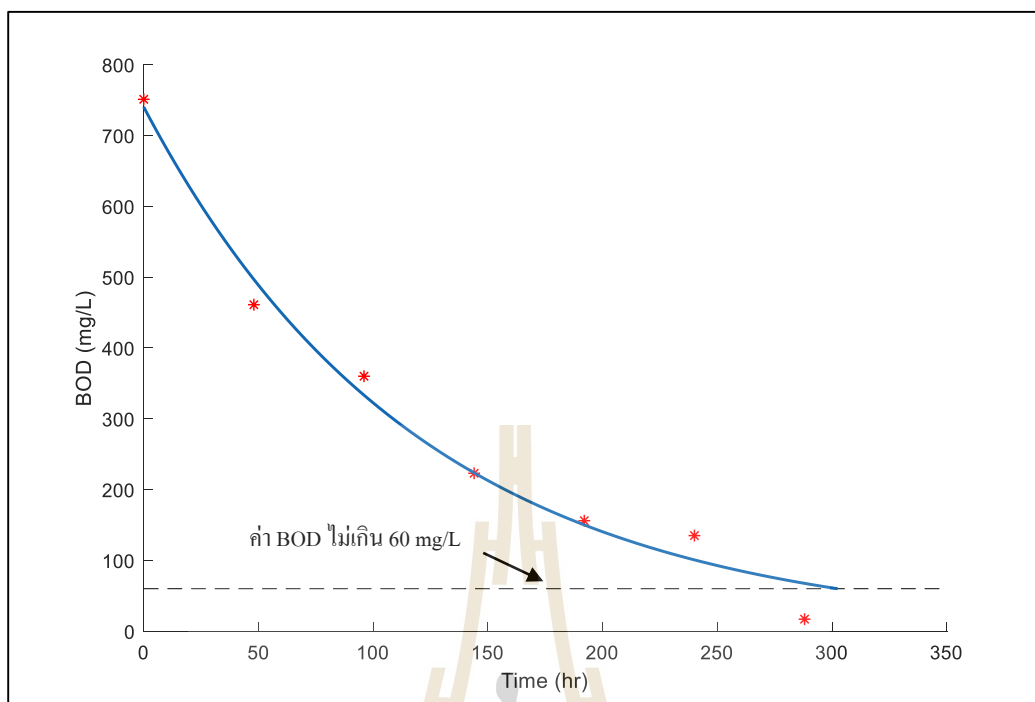
จำนวนชั่วโมง	เปอร์เซนต์ที่ลดลงของค่า BOD (%)		
	DC	DC Pulse	AC
48	38.61	42.47	15.44
96	52.06	55.65	47.13
144	70.31	74.30	63.38
192	79.22	84.15	71.24
240	82.02	92.94	89.74
288	97.73	98.27	98.27

5.4.1 ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC

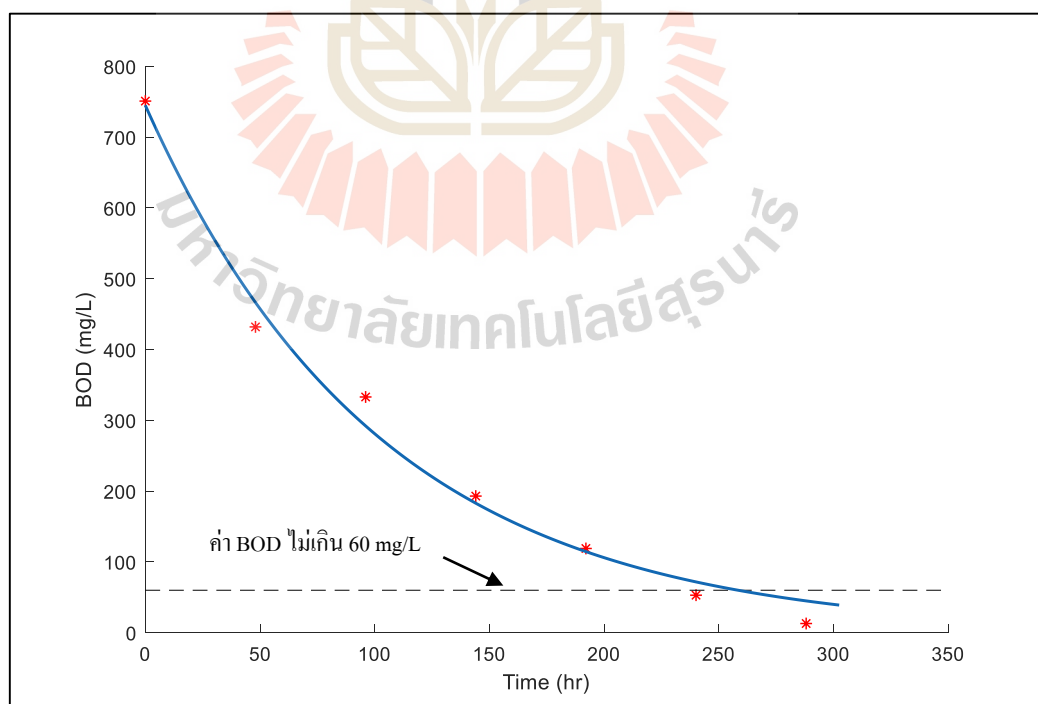
จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย DC ที่ระยะเวลาการบำบัด 288 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลงเหลือ 17 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลง 97.73 เปอร์เซนต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.4

5.4.2 ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC pulse

จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse ที่ระยะเวลาการบำบัด 240 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลงเหลือ 53 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลง 92.94 เปอร์เซนต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.5



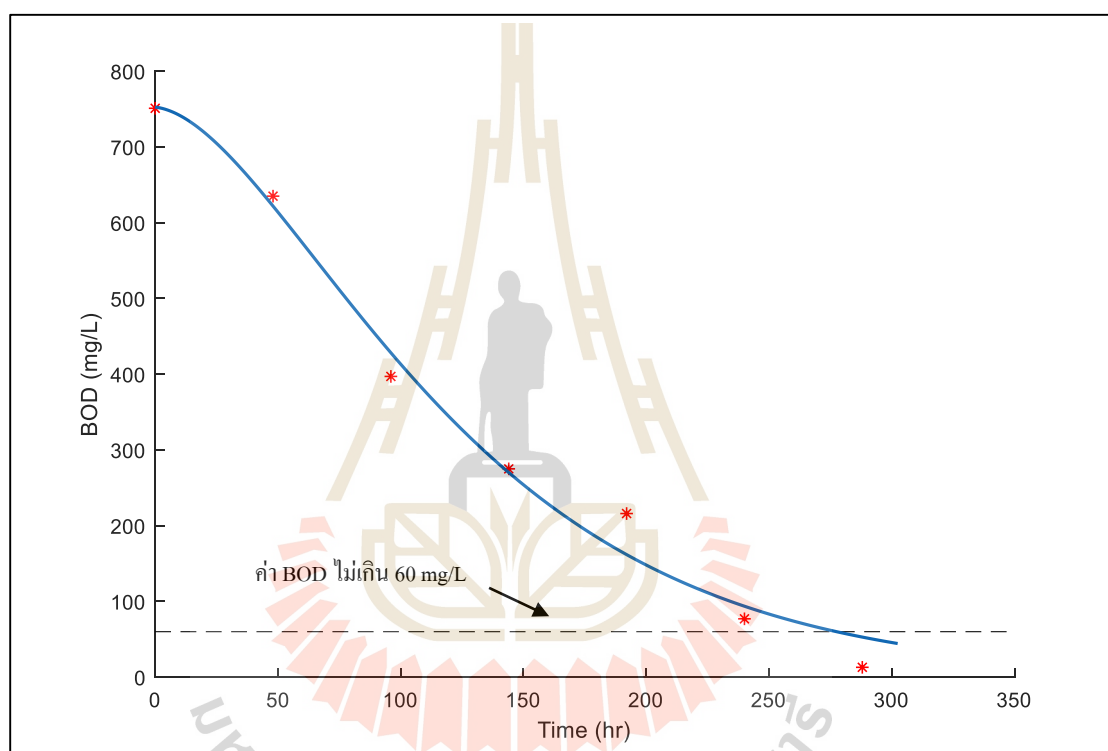
รูปที่ 5.4 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC



รูปที่ 5.5 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse

5.4.3 ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย AC

จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย AC ที่ระยะเวลาการบำบัด 288 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลงเหลือ 13 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า BOD ลดลง 98.27 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.6



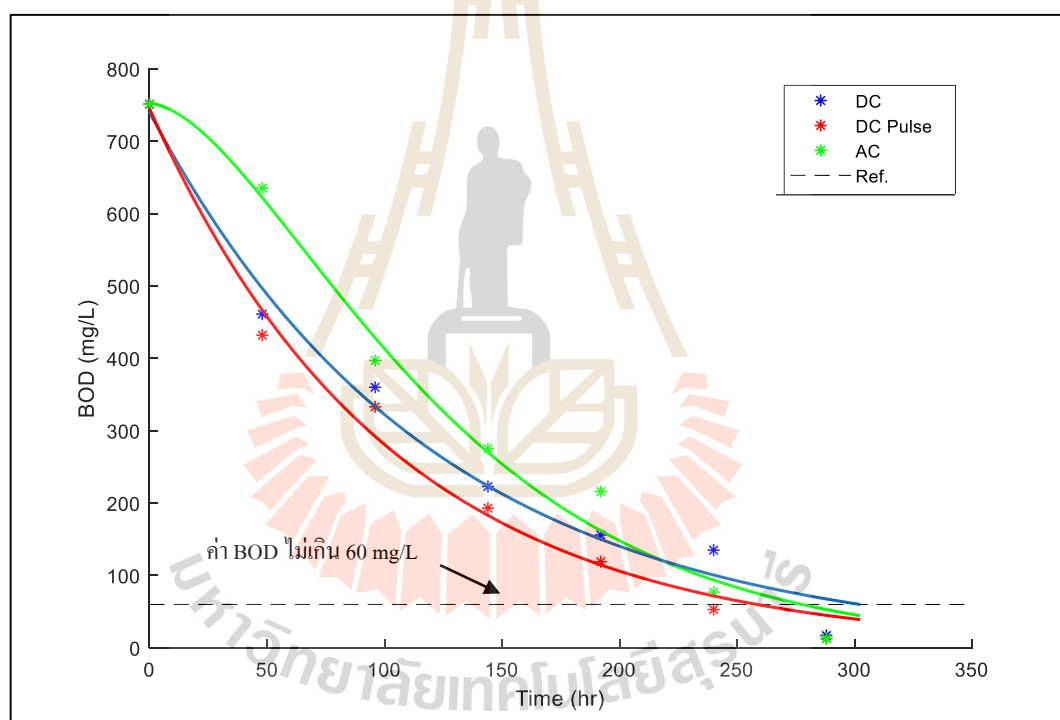
รูปที่ 5.6 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย AC

5.4.4 ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของน้ำเสีย

จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่ายทั้ง 3 ประเภท พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า BOD เมื่อใช้แหล่งจ่าย DC Pulse มีการลดลงของค่า BOD มากที่สุด ที่ระยะเวลาเท่ากันที่ 240 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5.6 ซึ่งผลการวัดค่า BOD ของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (BOD ไม่เกิน 20 - 60 mg/l) ประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ของแหล่งจ่าย DC Pulse สูงกว่าแหล่งจ่าย DC และสูงกว่าแหล่งจ่าย AC ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.6 ผลการลดค่า BOD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบต่าง ๆ

จำนวนชั่วโมง	DC (mg/l)	DC Pulse (mg/l)	AC (mg/l)
48	461	432	635
96	360	333	397
144	223	193	275
192	156	119	216
240	135	53	77
288	17	13	13



รูปที่ 5.7 การลดลงของค่า BOD ในน้ำเสีย เปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย

5.5 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD

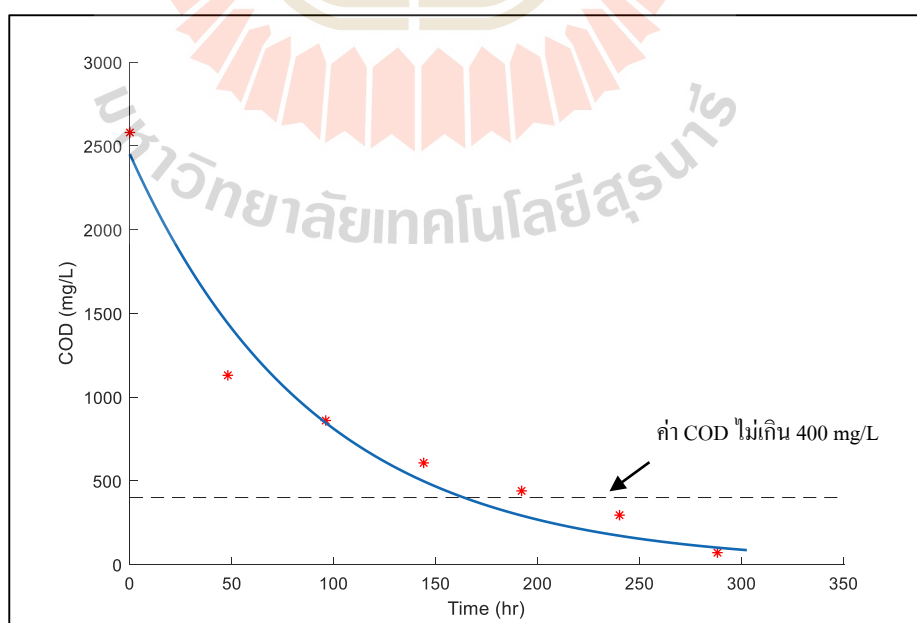
ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการบำบัด จะวัดจากน้ำเสีย ตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า COD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของค่า COD

จำนวนชั่วโมง	เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของค่า COD (%)		
	DC	DC Pulse	AC
48	56.20	59.37	15.50
96	66.66	72.48	47.28
144	76.47	78.76	54.26
192	82.94	87.63	59.69
240	88.56	95.03	91.66
288	97.25	98.06	98.06

5.5.1 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC

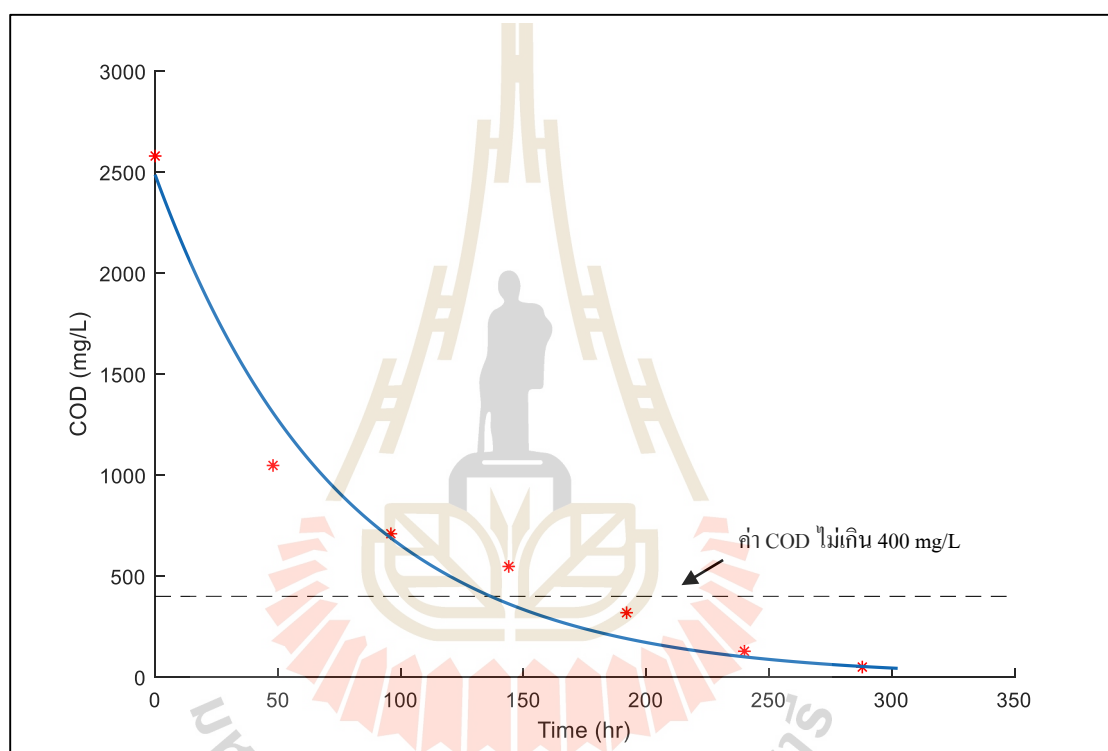
จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย DC ที่ระยะเวลาการบำบัด 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลงเหลือ 295 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า COD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลง 88.56 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC

5.5.2 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย DC pulse

จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse ที่ระยะเวลาการบำบัด 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลงเหลือ 128 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า COD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลง 95.04 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย DC pulse

5.5.3 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่าย AC

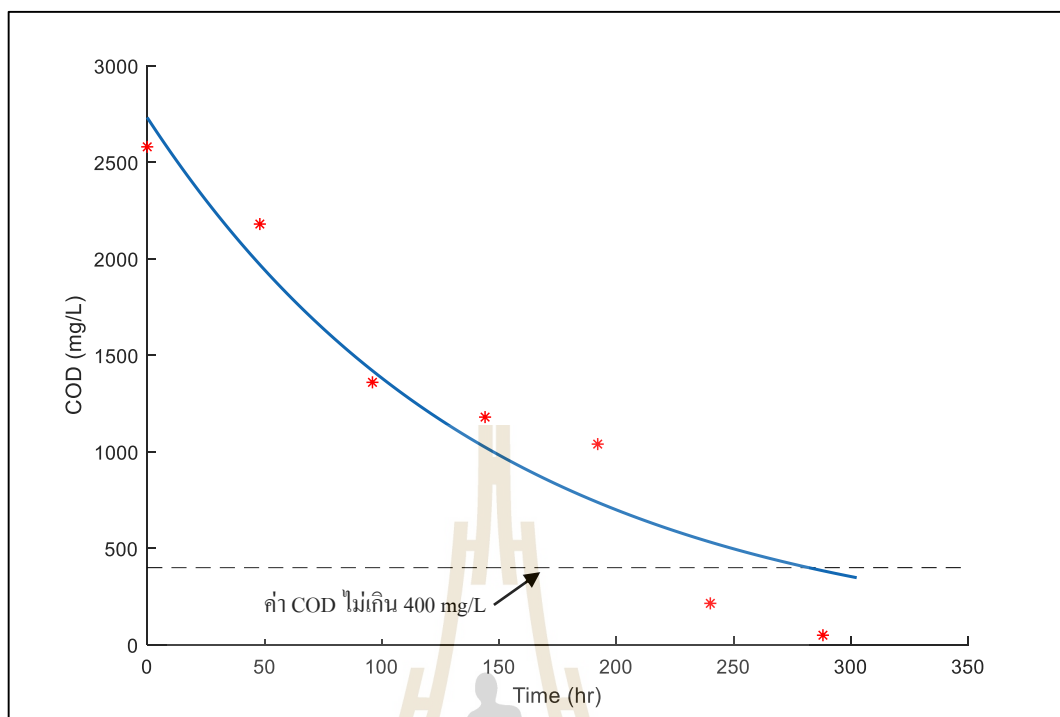
จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่าย AC ที่ระยะเวลาการบำบัด 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลงเหลือ 215 mg/l ซึ่งผลการบำบัดที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการลดค่า COD ได้ คือ ที่ระยะเวลา 240 ชั่วโมง ค่า COD ลดลง 91.66 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.10

5.5.4 ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย

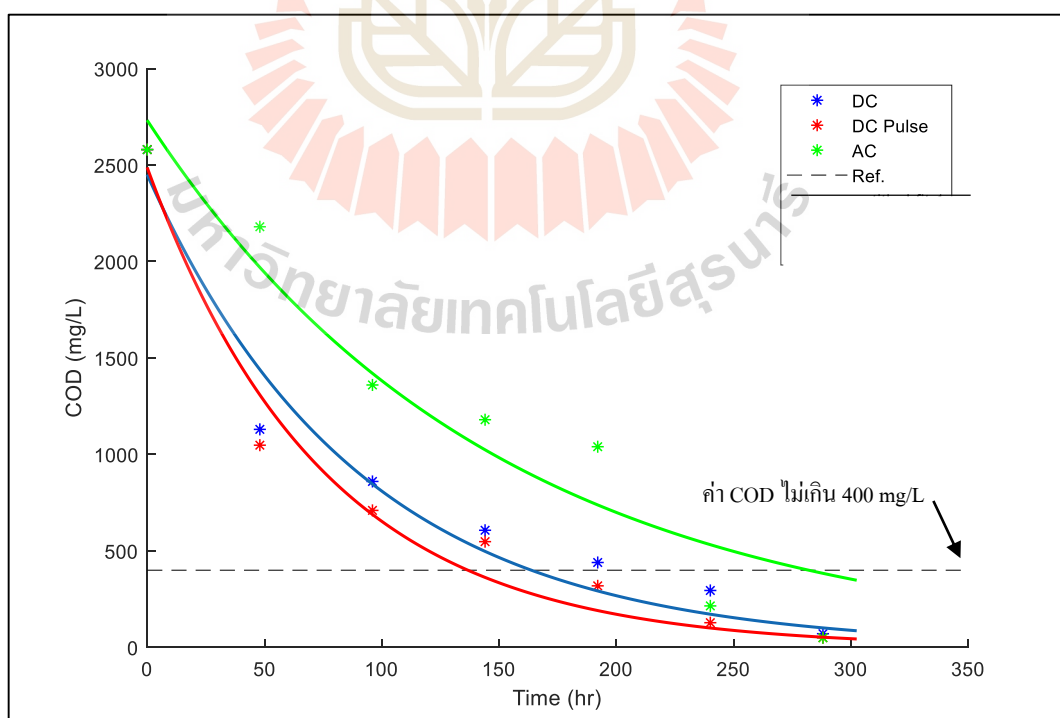
จากข้อมูลการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำโดยใช้แหล่งจ่ายทั้ง 3 ประเภท พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า COD เมื่อใช้แหล่งจ่าย DC Pulse มีการลดลงของค่า COD เร็วที่สุด ที่ระยะเวลาเท่ากันที่ 240 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5.8 ซึ่งผลการวัดค่า COD ของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (COD ไม่เกิน 120 - 400 mg/l) ประสิทธิภาพของการลดค่า COD ของแหล่งจ่าย DC Pulse สูงกว่าแหล่งจ่าย DC และสูงกว่าแหล่งจ่าย AC ดังแสดงในรูปที่ 5.11

ตารางที่ 5.8 ผลการลดค่า COD ของน้ำเสียเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบต่าง ๆ

จำนวนชั่วโมง	DC (mg/l)	DC Pulse (mg/l)	AC (mg/l)
48	1130	1048	2180
96	860	710	1360
144	607	548	1180
192	440	319	1040
240	295	128	215
288	71	50	50



รูปที่ 5.10 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย โดยใช้แหล่งจ่าย AC



รูปที่ 5.11 การลดลงของค่า COD ในน้ำเสีย เปรียบเทียบทั้ง 3 แหล่งจ่าย

5.6 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน

การเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่าย จะทำโดยใช้แคลมป์มิเตอร์ (Digital Clamp Meter) วัดสายไฟที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันทั้ง 3 แหล่งจ่าย การคิดค่าไฟฟ้าจะอ้างอิงจากวิธีคำนวณของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและคิดเป็นเดือนละ 30 วัน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.095 บาท ค่าบริการ 8.19 บาท ค่าการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (F_p) -11.6 สตางค์/หน่วย เป็นอัตราที่การไฟฟ้าส่วนภูมิกานำมาใช้ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2558 จนถึงปัจจุบัน โดยการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อเดือนจะมีด้วยกัน 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าฐาน ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (F_p) และส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% โดยมีการคำนวณดังนี้ (กองอัตราและธุรกิจการไฟฟ้า (กอร.) มกราคม 2562)

5.6.1 การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC

แหล่งจ่าย DC ที่จ่ายให้กับการบำบัดน้ำเสียมีการใช้กระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 0.35 A คิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 77 W คิดเป็นปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าต่อวันคือ 1848 W ในการทดลอง 288 ชั่วโมง คือ 12 วัน จะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 22176 W คิดเป็น 22.176 หน่วย ดังนั้น

ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าฐาน

ค่าพลังงานไฟฟ้า	56.66	บาท
ค่าบริการ	8.19	บาท
รวมค่าไฟฟ้าฐาน	64.85	บาท

ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (F_p)

จำนวนพลังงานไฟฟ้า $\times$ ค่า F_p	-2.57	บาท
--------------------------------------	-------	-----

ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

(ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า F_p) $\times$ 7%	4.36	บาท
--	------	-----

รวมเงินค่าไฟฟ้า	66.64	บาท
-----------------	-------	-----

5.6.2 การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC pulse

แหล่งจ่าย DC Pulse ที่จ่ายให้กับการบำบัดน้ำเสียมีการใช้กระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 0.2 A คิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 44 W คิดเป็นปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าต่อวันคือ 1056 W ในการทดลอง 288 ชั่วโมง คือ 12 วัน จะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 12672 W คิดเป็น 12.672 หน่วย ดังนั้น

ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าฐาน

ค่าพลังงานไฟฟ้า	29.76	บาท
ค่าบริการ	8.19	บาท
รวมค่าไฟฟ้าฐาน	37.95	บาท

ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (F_v)

จำนวนพลังงานไฟฟ้า $\times$ ค่า F_v -1.47 บาท

ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

(ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า F_v) $\times$ 7% 2.55 บาท

รวมเงินค่าไฟฟ้า 39.03 บาท

5.6.3 การใช้พลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่าย AC

แหล่งจ่าย AC ที่จ่ายให้กับการบำบัดน้ำเสียมีการใช้กระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 0.35 A คิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงที่ 77 W คิดเป็นปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าต่อวันคือ 1848 W ในการทดลอง 288 ชั่วโมง คือ 12 วัน จะใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 22176 W คิดเป็น 22.176 หน่วย ดังนั้น

ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าฐาน

ค่าพลังงานไฟฟ้า 56.66 บาท

ค่าบริการ 8.19 บาท

รวมค่าไฟฟ้าฐาน 64.85 บาท

ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (F_v)

จำนวนพลังงานไฟฟ้า $\times$ ค่า F_v -2.57 บาท

ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

(ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า F_v) $\times$ 7% 4.36 บาท

รวมเงินค่าไฟฟ้า 66.64 บาท

การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้นการใช้แหล่งจ่าย DC Pulse มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด และจากตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของค่า BOD และค่า COD ที่มากที่สุดจาก 3 ทั้งแหล่งจ่าย จึงสามารถสรุปได้ว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่าย DC Pulse มีความคุ้มค่ามากที่สุด

5.7 สรุป

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการนำตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำมาวิเคราะห์หาค่าความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อาทิเช่น การวิเคราะห์การลดลงของค่า BOD และการลดลงของค่า COD ของน้ำเสีย และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบำบัดของแหล่งจ่ายทั้ง 3 ชนิด พบว่า

ประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ในถังปฏิกรณ์ จะวัดจากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า BOD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า BOD ไม่

เกิน 20 – 60 mg/l) พบว่าน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมแปงโคราช จำกัดมีค่า BOD ก่อนบำบัด 751 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า BOD มีค่าลดลง 97.73 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 17 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC pulse ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า BOD มีค่าลดลง 98.27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 13 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ AC ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า BOD มีค่าลดลง 98.27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 13 mg/L

ประสิทธิผลของการลดค่า COD ในถังปฏิกรณ์ จะวัดจากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัด ทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า COD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า COD ไม่เกิน 120 – 400 mg/l) พบว่าน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมแปงโคราช จำกัดมีค่า COD ก่อนบำบัด 2580 mg/l ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า COD มีค่าลดลง 97.25 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 71 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC pulse ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า COD มีค่าลดลง 98.06 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 50 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ AC ที่ระยะเวลา 288 ชั่วโมง ค่า COD มีค่าลดลง 98.06 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 50 mg/L

เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าของการใช้งานแหล่งจ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการลดลงของค่า BOD และค่า COD ประกอบกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยแหล่งจ่าย DC Pulse มีความคุ้มค่าที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการลดลงของค่า BOD 98.27 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการลดลงของค่า COD 98.06 เปอร์เซ็นต์ และใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 66.64 บาท ตลอดการบำบัดทั้ง 288 ชั่วโมง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเพื่อลดค่า BOD และค่า COD ในน้ำเสียให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยเป็นบทได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการนำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา โดยกล่าวถึงความสำคัญของน้ำ ปัญหาของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มาตรฐานก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพเพียงพอที่จะปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ และยังคงกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 เป็นการนำเสนอการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าของนักวิจัยหลาย ๆ ท่านเพื่อศึกษาแนวทางการดำเนินงานวิจัย และนำข้อดี ข้อด้อยของงานวิจัยเหล่านี้มาเพื่อประยุกต์ และพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีทางไฟฟ้าแรงสูง โดยกล่าวถึงความสำคัญของน้ำ น้ำเสีย ประเภทของน้ำเสีย และลักษณะของน้ำเสียประเภทต่าง ๆ วิธีการวัดและความหมายของค่า BOD (Biochemical Oxygen Demand: BOD) วิธีการวัดและความหมายของค่า COD (Chemical Oxygen Demand: COD) กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในประเทศ ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางไฟฟ้า กระบวนการเกิดและประโยชน์ของไฮดรอกซิลเรดิคัล ลักษณะคุณสมบัติของท่อพอลัส กระบวนการเกิดพลาสมา เพื่อให้เข้าใจและทราบถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าแรงสูง จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วทำให้เห็นทั้งประโยชน์ ข้อดีและข้อด้อยต่าง ๆ มากมาย ดังนั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบ

และสร้างชุดทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัยต่าง ๆ โดยจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัยต่าง ๆ โดยกล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ การออกแบบชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ประกอบด้วยการออกแบบตัวถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้นทำจากอะคริลิกใส และอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ปลายแหลมที่เป็นส่วนที่สำคัญที่ใช้สำหรับสร้างพลาสมา และการสร้างชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ สำหรับการเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำนั้น ได้อธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยคือ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในเขตจังหวัดนครราชสีมา

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการนำตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำมาวิเคราะห์หาค่าความเปลี่ยนแปลงของ ค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสีย ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ประสิทธิภาพของการลดค่า BOD ในถังปฏิกิริยา จะวัดจากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า BOD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า BOD ไม่เกิน 20 – 60 mg/l) พบว่าน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด ที่ยังไม่ผ่านการบำบัดมีค่า BOD ก่อนบำบัด 751 mg/L ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC DC pulse และ AC เป็นระยะเวลา 288 ชั่วโมง พบว่าค่า BOD มีค่าลดลง 97.73% 98.27% และ 98.27% ตามลำดับ และมีค่า BOD คงเหลือ 17 mg/L 13 mg/L และ 13 mg/L ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของการลดค่า COD ในถังปฏิกิริยา จะวัดจากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดทุก ๆ 48 ชั่วโมง จนกว่าค่า COD ที่ลดลงจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ค่า COD ไม่เกิน 120 – 400 mg/l) พบว่าน้ำเสียจากบริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัดมีค่า COD ก่อนบำบัด 2580 mg/l ประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC DC pulse และ AC เป็นระยะเวลา 288 ชั่วโมง พบว่าค่า COD มีค่าลดลง 97.25% 98.06% และ 98.06% ตามลำดับ ทำให้ค่า COD คงเหลือ 71 mg/L 50 mg/L และ 50 mg/L ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดโดยใช้เทคนิคพลาสมาได้น้ำด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC pulse และ AC เป็นระยะเวลา 288 ชั่วโมงจะมีค่า BOD และ COD คงเหลือเท่ากัน

นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย DC DC pulse และ AC เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 288 ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 22.176 kW 12.673kW และ 22.176 kW เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าของการใช้งานแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการลดลงของค่า BOD และค่า COD ประกอบกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยแหล่งจ่าย DC Pulse มีความคุ้มค่าที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการลดลงของค่า BOD 98.27 % และประสิทธิภาพการลดลงของค่า COD 98.06 % และใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 66.64 บาท ตลอดการบำบัดทั้ง 288 ชั่วโมง รองลงมาคือแหล่งจ่าย AC และ DC ตามลำดับ

เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์เริ่มมาจากการเกิดดีสชาร์จซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายแหลมของอิเล็กโทรด จากการใช้แหล่งจ่าย DC DC pulse และ AC กระแสจากแหล่งจ่าย DC pulse จะมีจุดฟลักสูงสุดที่เกิดบ่อยกว่าการใช้แหล่งจ่าย AC และแหล่งจ่าย DC มีการจ่ายแรงดันที่เป็นค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นแหล่งจ่าย DC pulse จึงให้ประสิทธิภาพในการเกิดเบรกดาวน์ที่ส่งผลให้เกิดพลาสมาได้ดีกว่านำไปสู่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่สูงมากขึ้นด้วยเช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

(1) สามารถนำชุดทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ ประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้ ด้วยการทำชุดต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียมาต่อเพิ่มได้

(2) ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ และเทคนิคต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงเพิ่มเติมจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อหาข้อดีและข้อเสียที่ได้จากงานวิจัยเหล่านี้ แล้วนำมาปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำให้มีประสิทธิผลมากที่สุด

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2539) มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ฉบับที่ 3). 85-89. ได้จาก; http://infofile.pcd.go.th/law/3_4_water.pdf?CFID=10541294&CFTOKEN=49980956.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2542). การบำบัดน้ำเสีย.
- ศราวุธ กาญจนเลข (2551). การศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบทพซ้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- จริยา ยี่มรัตน์บวร (2547). เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลกฤษณ์ จิตรโต (2559). การบำบัดน้ำเสียเสียใหม่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ ปีที่ 7 ฉบับที่ 2
- ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข (2553). การวิเคราะห์ค่าซีโอดี. สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน.
- ภักวิวัฒน์ เลาคา (2549). การเตรียมและศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปลงด้วยโอโซน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2544). ระบบน้ำเสีย
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย และกรมควบคุมมลพิษ. (2540). ระบบบำบัดน้ำเสีย
- สันทัต ศิริอนันต์ไพบุลย์ (2552). ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา.
- สุรพล บุญดวง (2549). การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ลำรวย สังข์สะอาด. (2547). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.
- สุเมธ ชวเดช. (2541). การพัฒนากระบวนการออกซิเดชัน โอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- อรดี แจ่มอุลิตรัตน์ (2554). บีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD). สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6.

- Bruggeman, P., and Leys, C. (2009). Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. *Journal of Physics*. Vol. 42, No. 5.
- Burlica, R., Grim, R. G., Shihh, K. Y., Balkwill, D., and Locke, B. R. (2008). Bacteria Inactivation Using Low Power Pulsed Gliding Arc Discharges with Water Spray. *Plasma Processes and Polymers*. 640-649.
- Burlicaa, R., Kirkpatrickb, M. J., and Locke, B. R. (2006). Formation of reactive species in gliding arc discharges with liquid water. *Journal of Electrostatics*.
- Fan, A., Sun, Y., and Yan, P. (2015). Experimental study of the underwater plasma based on the phased array vibrator system. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*. 1-5.
- Galbraith, M. (1992). Hazardous and industrial waste. *Proc. 24th Mid-Atlantic industrial waste conference*, Morgantown.
- Geenens, D., Bixio, B., and Thoeye, C. (2001). Combined ozone-activated sludge treatment of landfill leachate. *Water Sci Technol*. 44(2-3): 359-65.
- Glaze, W. H., and Kang, J. W. (1980). Oxidation of Water Supply Refractory Species by Ozone with Ultraviolet Radiation. *US Environment Protection Agency*, Washington DC.
- Goldston, R. J., and Rutherford, P. (1995). *Introduction to Plasma Physics*. Plasma Physics Laboratory Princeton University.
- Gottschalk, C., J. Libra, A., and Saup, A. (2000). *Ozonation of water and wastewater*. Germany: Wiley-VCH verlag GmbH.
- Grabowski, L. R., Veldhuizen, E. M., Pemen, A. J. M. and Rutgers, W. R. (2006). Corona Above Water Reactor for Systematic Study of Aqueous Phenol Degradation. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. 26, No. 1.
- Halliwell, B., Grootveld, M., and Gutteridge, J. M. (1988). Methods for the Measurement of Hydroxyl Radicals in Biochemical Systems: Deoxyribose Degradation and Aromatic Hydroxylation. *Methods of Biochemical Analysis*. Vol. 33.
- Hayashi, H., Akamine, S., Ichiki, R., and Kanazawa, S. (2016). Comparison of OH Radical Concentration Generated by Underwater Discharge Using Two Methods. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. Vol. 10 No. 1.
- Hoigne, J., and Bader, H. (1983). Rate constant of the reaction of ozone with organic and inorganic compounds in water. *Wat. Res.*

- Hong, Y. C., Park, H. J., Lee, B. J., Kang, W., and Uhm, H. S. (2010). Plasma formation using a capillary discharge in water and its application to the sterilization of E. Coli. PHYSICS OF PLASMAS.
- Horikoshi, S., and Serpone, N. (2017). In-liquid plasma: A novel tool in the fabrication of nanomaterials and in the treatment of wastewaters. Royal Society of Chemistry.
- Kodama, S., Wang, D., Matsumoto, S., Namihira, T., and Akiyama, H. (2015). Treatment of persistent organic pollutants in wastewater by nano-seconds pulsed discharge Plasma. IIAI 4th International Congress on Advanced Applied Informatics. 695-698.
- Kozakova, Z. (2011). Electrical Discharge in Water Solution. Doctoral dissertation. Faculty of Chemistry, Brno University of Technology.
- Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., and Sunka, P. (2011). The Role of Surface Chemistry at Ceramic/Electrolyte Interfaces in the Generation of Pulsed Corona Discharges in Water Using Porous Ceramic-coated Rod Electrodes. Plasma Processes and Polymers.
- Matsushima, Y., Yamazaki, T., Maeda, K., Noma, T., and Suzuki, T. (2005). Plasma Oxidation of a Titanium Electrode in dc-Plasma Above the Water Surface. Journal of the American Ceramic Society.
- Morimoto, M., Shimizu, K., Teranishi, K. and Shimomura, N. (2015). Generation of Hydroxyl Radical on Water Treatment using Nanosecond Pulsed Powers and its Effect. IEEE Pulsed Power Conference (PPC).
- Sahni, M. and Locke, B. R. (2006). Quantification of Hydroxyl Radicals Produced in Aqueous Phase Pulsed Electrical Discharge Reactors. Industrial & Engineering Chemistry Research.
- Sakiyama, Y., Tomai, T., Miyano, M., and Graves, D. B. (2012). Disinfection of E. coli by nonthermal microplasma electrolysis in normal saline solution. APPLIED PHYSICS LETTERS.
- Sato, M. (2009). Degradation of organic contaminants in water by plasma. International Journal of Plasma Environmental Science and Technology. 8-14.
- Sun, B., Sato, M., Harano, A., and Clements, J. (1998). Non-uniform pulse discharge-induced radical production in distilled water. Journal of Electrostatics. 115-126.
- Wu, Y., Li, J., Li, G., Li, N., Qu, G., Sun, C., and Sato, M. (2009). Decomposition of Phenol in Water by Gas Phase Pulse Discharge Plasma. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1-4.

- Wun Jern, N. G. (2006). Industrial Wastewater Treatment.
- Yano, T., Uchiyama, I., Fukawa, F., Teranishi, K., and Shimomura, N. (2009). Decolorization of indigo carmine solution using nanosecond pulsed power. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- Zhang, R., Wang, L., Wu, Y., Guan, Z., and Jia, Z. (2006). Bacterial Decontamination of Water by Bipolar Pulsed Discharge in a Gas-Liquid-Solid Three-Phase Discharge Reactor. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. Vol. 34, No. 4.
- Zhao, X., Zhu, X., Yan, Z., Liu, Y., Liu, H., and Sun, B. (2016). Optical Study of Active Species Produced by Microwave Discharge in Water. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. Vol.44, No. 8.



ภาคผนวก ก

ใบรายงานผลการวัดค่า BOD และ COD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ ศร 5632(3)Rep.1564



20 กันยายน 2561

เรียน คุณศักดิ์นัย คุณงามพรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ลวศร544/61

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep.ลวศร511544

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 11 กันยายน 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 11 - 18 กันยายน 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : T. START หมายเลขตัวอย่าง : ลวศร56362/61 ตัวอย่าง : ขยะเหลวชุมชนตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	751
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : IS-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	2,560
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2. 48 Hr หมายเลขตัวอย่าง : ลวศร56363/61 ตัวอย่าง : ขยะเหลวชุมชนตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	432
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : IS-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	1,048

ศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ศักดิ์
(ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรองรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับรองเฉพาะค่าที่ได้จากการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้น
- ห้ามคัดลอก นำไปใช้ในรายงานผลการทดสอบแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

FM-S10-01-01/Rev.No.02501/2555

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ศักดิ์

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 Tel: 0-4422-3000 Fax: 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)Rep.0037



2 ตุลาคม 2561

เรียน คุณกัตติยา คุณนราพรศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ มวคณ1608/61

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep/วคณ611608

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 21 กันยายน 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 21 - 27 กันยายน 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือ ที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1. 98 Hrs
			หมายเลขตัวอย่าง : มวคณ56767/61
			ตัวอย่าง : ของเหลวใสไม่มีกลิ่น
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	333
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	710
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือ ที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2. 144 Hrs
			หมายเลขตัวอย่าง : มวคณ56768/61
			ตัวอย่าง : ของเหลวใสไม่มีกลิ่น
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	193
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	548

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.อ.กัตติยาพรศรี ศร. ภาควิชา ควบคุมคุณภาพน้ำ)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้ใช้เฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้เท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำ ทำสำเนาในรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนเกินกว่าที่ระบุไว้โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

PM-510-01-01 Rev. No.2/25/01/2555

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์

111 ถนนมหาวิทยาลัย อ.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel 0-4422-3000 Fax 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)Rep.0057



๑ ตุลาคม 2561

เรียน คุณกิติยา คุณวาทวรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ พวศน1649/61

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repพวศน611649

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 27 กันยายน 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 27 กันยายน - 2 ตุลาคม 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อย่อตัวอย่าง : 192 Hr
			หมายเลขตัวอย่าง : พวศน6907/61
			ตัวอย่าง : ของเหลวฟุ้งตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	119
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	319

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร. ภคณิชา คุณพิทยานันท์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรองรายงานผลการทดสอบ

- ขอรับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบและระบุไว้ข้างต้น
- ห้ามคัดลอกข้อมูลในรายงานผลการทดสอบเพื่อไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากฝ่ายปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Sukhothai Rajabhat University

FM-510-01-01 Rev. No. 225/01/2555

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร. ภคณิชา

111 ถนนมหาวิทยาลัย, สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District, Suranaree, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)/Rep.0157



๒๑ ตุลาคม ๒๕๖๑

เขียน ศุภรัตน์ โสสุภะพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวศท0067/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep/วศท0067

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 16 ตุลาคม 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 16 – 24 ตุลาคม 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ	
			ตัวอย่างที่ 1 : 1.144 Hr	ตัวอย่างที่ 2 : 2.240 Hr
			หมายเลขตัวอย่าง : ผวศท50275/62	หมายเลขตัวอย่าง : ผวศท50276/62
			ตัวอย่าง : ของเหลวฟุ้งมีตะกอน	ตัวอย่าง : ของเหลวฟุ้งมีตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	223	53
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	in-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	607	128

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร. ภคณิจ ศุภพิชญ์พันธ์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรองรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้เท่านั้นและไม่ควรใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น
- ห้ามคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology
PM-510-01-01 Rev.No.256102555

ลิขสิทธิ์ : สุรนารี เทคโนโลยี

111 ถนนมหาวิทยาลัย อ.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax: 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)/Rep.0753



๒๕ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๒

เรียน คุณกิตติโย สุคนธาพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวศน0680/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repผวศน0620680

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 12 กุมภาพันธ์ ๒๕๖๒

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 12 - 21 กุมภาพันธ์ ๒๕๖๒

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1. 288 DC prise หมายเลขตัวอย่าง : ผวศนS2508/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ขอบเขตสูง มีตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	17
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017., Part 5220-D	71
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2. 286 AC หมายเลขตัวอย่าง : ผวศนS2510/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ขอบเขตสูง มีตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	13
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017., Part 5220-D	50

(ผู้ร่วมตรวจสอบอาจารย์ นายอัครเทพ อมระภูมิ ศูนย์เครื่องมือ)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับมอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำอย่างอื่นในรายงานผลการทดสอบแต่เพียงอย่างเดียวและห้ามนำทั้งฉบับไปใช้รับความยินยอมเป็นเอกสารยืนยันหลักฐานจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

PM-510-01-01/Rev.No.2/25/01/2565

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์

111 ถ.มหาวิทยาลัย อ.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)sep.0299



2 พฤศจิกายน 2562

เรียน ศุภณัฏฐ์ โสภณ สุคนธรารักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผ่วคณ0206/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repผ่วคณ0206

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 22 ตุลาคม 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 22 - 30 ตุลาคม 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 48 Hr หมายเลขตัวอย่าง : ผ่วคณ0759/62 ตัวอย่าง : ของเหลวขุ่นมีตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	461
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-Q1-Q7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA&WEF, 23 rd ed, 2017., Part 5220 D	1,130

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร. ภคณิชา ศูนย์วิทยาศาสตร์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เป็นผู้รับผิดชอบและดำเนินการทดสอบวิเคราะห์ตัวอย่าง

ผู้รับบริการ : ศุภณัฏฐ์ โสภณ สุคนธรารักษ์

- รายงานนี้เป็นรายงานผลการทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดเท่านั้น
- ห้ามคัดลอกหรือเผยแพร่รายงานผลการทดสอบโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

FM-510-01-01 Rev.No.2/2561/2555

ผู้จัดทำ : ศุภณัฏฐ์ โสภณ สุคนธรารักษ์

111 ถนนมหาวิทยาลัย, ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel.0-4422-3000 Fax.0-4422-6070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศช 5632(3)/Rep.0201



๕ พฤศจิกายน 2561

เรียน คุณศักดิ์ โสภณพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ พวคN0114/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ RepพวคN020114

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 24 ตุลาคม 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 24 - 30 ตุลาคม 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือ ที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ:	
			ตัวอย่าง : 1.96 Hr	ตัวอย่าง : 2.192 Hr
			หมายเลขตัวอย่าง : พวคNS0393/62	หมายเลขตัวอย่าง : พวคNS0394/62
			ตัวอย่าง : ของเหลวขุ่น มีตะกอน	ตัวอย่าง : ของเหลวขุ่น มีตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	360	156
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed. 2017., Part 5220 D	860	440

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายวิชาญพรณ์ ตระกูลดี ศูนย์นิเทศน์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับรองเฉพาะข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำอย่างใดในรายงานผลการทดสอบและใช้ผลการรายงานเกินกว่าที่ระบุไว้ในรายงานและขอเป็นลายลักษณ์อักษรจากฝ่ายปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

PM-510-01-01/Rev.No.2/25/01/2559

ได้จัดพิมพ์ที่ ศาลิน วิเศษศิริ

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel.0-4422-3000 Fax.0-4422-4075

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)/Rep.0299



26 พฤศจิกายน 2561

เรียน ศุภกิตติ์ โสภณพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ: ศร.วค.0206/02

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep.วค.0206/02

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง: 13 พฤศจิกายน 2561

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ: 13 - 21 พฤศจิกายน 2561

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 240 Hr
			หมายเลขตัวอย่าง : ศร.วค.0759/02
			ตัวอย่าง : ของเหลวสูงโมเลกุลชนิดน้ำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	135
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA&WEF, 23 rd ed, 2017., Part 5220 D	295

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลทิพย์ นาคหิรัญขมา)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้เป็นเฉพาะที่จะใช้สำหรับการทดสอบตามที่ระบุไว้เท่านั้น
- ห้ามคัด คัดลอก ตัดต่อในรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนยกเว้นถ้าทั้งฉบับได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Suranaree University of Technology
FM-510-01-01/Rev.No.2/2561/2555
ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร.กมลทิพย์ นาคหิรัญขมา

111 ถนนมหาวิทยาลัย อ.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070
111 University Avenue, Sub District Suranaree, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
หน้า | ๑๖ | 1

ที่ ศร 5832(3)/Rep.0628



4 กุมภาพันธ์ 2562

เรียน คุณศักดิ์โนะ สุภะพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เขตที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวคท0551/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep.ผวคท0551

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 23 มกราคม 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 23 - 30 มกราคม 2562

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1, 240 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคท52010/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวฐาน ไม้ตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	77
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-Q1-Q7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	215
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2, 288 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคท52011/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวฐาน ไม้ตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	13
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-Q1-Q7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	50

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.อ.ดร.พรหมพร ดร. ภคณิศา ศูนย์เทคโนโลยี)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้เป็นของเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำส่วนในรายงานผลการทดสอบนี้เพื่อเผยแพร่อย่างอื่นทั้งทางอิเล็กทรอนิกส์โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

PM-515-Q1-Q1/Rev.No.225/01/2555

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์

111 มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 Tel. 0-4423-3000 Fax. 0-4423-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศธ 5632(3)/Rep.1564



14 มกราคม 2562

เรียน ศุภกิจโนน สุรนารินทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวทศ1546/61

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repผวทศ611544

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 8 มกราคม 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 8 - 15 มกราคม 2562

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1. START หมายเลขตัวอย่าง : ผวทศ56362/61 ตัวอย่าง : ของเหลวในถังตกตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	751
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	2,580
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2. 48 Hr หมายเลขตัวอย่าง : ผวทศ56363/61 ตัวอย่าง : ของเหลวในถังตกตะกอน
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	635
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22 nd ed. 2012, Part 5220 D	2,180

ศาสตราจารย์ ดร. สุรนารินทร์
ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผู้รับส่งรายงานผลการทดสอบ

- * รายงานนี้รับรองผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบตามที่ระบุไว้เท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำอย่างอื่นในรายงานผลการทดสอบและถือเป็นการละเมิดกฎหมายว่าด้วยการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลโดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Suranaree University of Technology
TM-510-01-01/Rev. No.2/25/01/2555
ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร. สุรนารินทร์

111 ถนนมหาวิทยาลัย ส.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070
TIT University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
หน้า 1 จาก 1

ที่ ศร 5632(3)/สป.0553



17 มกราคม 2562

เรียน คุณทศไนย์ คุณนราพรพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวคณ0484/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rep#คณ620484

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 8 มกราคม 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 8 - 15 มกราคม 2562

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1- 96 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคณ1728/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวขุ่นมาก
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	397
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-G1-G7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	1,360
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2- 144 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคณ1729/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวขุ่นมาก
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	275
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-G1-G7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	1,180

ผู้รับบริการ : คุณทศไนย์ คุณนราพรพงศ์ ศ. วิชาไฟฟ้า วิศวกรรมไฟฟ้า

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแผนกวิเคราะห์ตัวอย่างเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย อ.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax: 0-4422-4070

Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Mukdang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

FM-510-01-01 Rev. No. 225/01/2555

หน้า 1 จาก 1

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร. นราพร

ที่ ศร 5632(3)Rep.0254



18 มกราคม 2562

เรียน คุณกัศโนะ คุณนราพรศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวศน0165/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repผวศน620165

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 8 มกราคม 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 9 - 16 มกราคม 2562

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 192 hr
			หมายเลขตัวอย่าง : ผวศนSO598/62
			ตัวอย่าง : ของเหลวฟุ้งกระจายสีฟ้า
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	216
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-Q7 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed. 2017, Part 5220 D	1,040

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร. ภคินจ. คูบดีชัชวาลย์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับมอบหมายจากผลการทดสอบ

- รายงานนี้ใช้เฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามเงื่อนไขข้างต้น
- ห้ามคัด ทำซ้ำหรือทำซ้ำในรายงานผลการทดสอบนี้โดยไม่แจ้งก่อนล่วงหน้าโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suranaree University of Technology

SM-510-01-01/Rev.No.2/2501/2555

ผู้จัดทำ : ศาสตราจารย์ ดร.ภคินจ. คูบดีชัชวาลย์

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070

111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

หน้า 1 จาก 1

ที่ ศอ 5632(3)Rep.0628



4 กุมภาพันธ์ 2562

เรียน คุณทัศนัย สุคนาพรศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ ผวคณ0551/62

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Repผวคณ0551

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 23 มกราคม 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 23 - 30 มกราคม 2562

รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 1. 240 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคณ0551/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวข้น มีตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	77
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	215
รายการที่	รายการทดสอบ	วิธีการเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ
			ชื่อตัวอย่าง : 2. 258 หมายเลขตัวอย่าง : ผวคณ0551/62 ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง : ของเหลวข้น มีตะกอนสีดำ
1	Biochemical Oxygen Demand (mg/l)	5 Day BOD Test	13
2	Chemical Oxygen Demand (mg/l)	In-house method : TE-504-01-07 based on Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 23 rd ed, 2017, Part 5220 D	50

(ผู้เชี่ยวชาญสาขาอื่นและผู้ตรวจ ศร. ภาคณิจ ศูนย์เครื่องมือ)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ข้อมูล ที่นำเสนอในรายงานผลการทดสอบนี้เพียงบางส่วนเท่านั้นที่ส่งมอบโดยไม่ได้มีความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel: 0-4422-3000 Fax: 0-4422-4070

Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Sub. District: Suranaree, Muang District: Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

SM-513-01-01 Rev.No.22501/2555

หน้า 1 จาก 1

ผู้จัดทำ : คานัน วัฒนศิริ

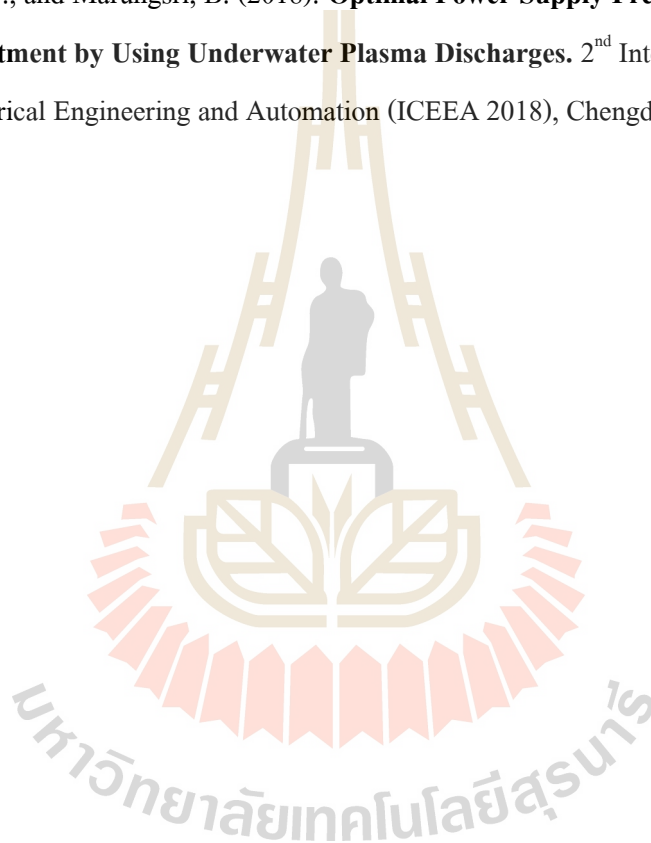
ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Supanarapan, T., Chombo, P., Minja, K., Hussein, S., Novatus, M., Mmary, E., and Marungsri, B. (2017). **Effect of Power Supply Frequencies on The Effective of Underwater Discharge Plasma for Wastewater Treatment.** IEEJ PE&S – IEEE PES Thailand Symposium on Advanced Technology in Power System, Bangkok, Thailand.
- Supanarapan, T., and Marungsri, B. (2018). **Optimal Power Supply Frequency for Wastewater Treatment by Using Underwater Plasma Discharges.** 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018), Chengdu, China. pp. 53-55.



Effect of power supply frequencies on the effective of underwater discharge plasma for wastewater treatment

Tassanai Supanarapan, Pius V. Chombo, Kelvin M. Minja, Hussein S. Hussein, Novatus M. Kimenyuka, Elifuraha R. Mmary, Narupon Promvichai and Boonruang Marungsri *

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand, Tel. 098-202-9237, Email: supanarapan@gmail.com

* Corresponding Author Tel. 08-9717-7065-, Email: bmslvvee@sut.ac.th

Abstract— Recently, water pollution is the main environmental problem in Thailand. Efficient treatments of advanced equipment have been in discussion for a long time. This paper presents the development of a new testing chamber for treating wastewater by using underwater discharge plasma with hydroxyl radical. In the laboratory, a reactor made of acrylic with multiple positive rods at the cathode and stainless-steel plate at the ground was used. A supply voltage of 24 kV_{rms} with the adjustable frequency of 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz was applied into the wastewater for 6 hours, 12 hours and 24 hours. For the stressing voltage, frequencies and periods, the quality of treated water were compared with the Biological Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD) based on the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand. A comparison of the BOD and COD of treated water under the consequences of frequencies are presented.

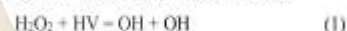
Keywords—Wastewater; Discharge plasma; BOD; COD

I. INTRODUCTION

Up to now, water pollution has become a disruption of the environment in large extent due to the social and industrial facilities [1]. However, the discharge treatment technology has become widely suitable method for treating the contaminated water compared to the chemical and biological treatments [2,3]. Many types of research have been investigated the decomposition of organic materials in wastewater by using plasma-technology: plasma-chemical reaction, ultraviolet rays, ions, electrons and radicals, electrical breakdown, thermal plasma, nonthermal plasma, microwave discharge [3,4,5,6].

Thailand is a relative developed country that faces water pollution problem especially as affected by human activities. Recently, hydroxyl radical has been used to decolorate contamination in water by underwater discharge plasma [7]. It was showed that increase the speed reaction between plasma and pollutants may improve the efficiency of water

treatment in discharge plasma chamber. Discharge in the water has become the useful technique for decomposing organic materials in water due to high energy electrons. Hydroxy Radical produced by the discharge is diffused into the water and decomposed into some kinds of extremists. Hydroxy Radical can be produced in the reactor and shown in (1). Most of the experiments were considered temperature, the shape of the reactor, invariant frequencies, voltage, phenol solution as factors to increase reaction, pH value and ozone [3,8,9,10,11,12,13,14]. But in their investigations, the factor of changing frequencies couldn't contemplated.



In this paper, the effect of power supply frequencies affecting underwater plasma in the treatment of wastewater is investigated. The supply frequencies in the reactor for wastewater treatment were set for 6 hours, 12 hours and 24 hours in ambient temperature.

II. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURE

These experiments were performed under the condition of underwater discharges in the ambient temperature. The mains supply of 220 V 50 Hz was converted into 24 kV_{rms} with the variable frequencies of 10 kHz to 100 kHz by using a separately designed power supply kit. All experiments were conducted in the same supply voltage (24 kV_{rms}), ambient temperature, electrodes materials and electrode gaps but variable power supply frequencies and stressing periods.

A. Sample

Nine Samples of wastewater were collected from a wastewater storage (sewage) pond in Suranaree University. This wastewater was collected in sewage pond after being utilized from different parts around the university. Sampling was done during daytimes. The samples were taken in a plastic bottle (see Fig. 1) to a laboratory for measurement.



Fig. 1. Sample of wastewater (a) From the wastewater pond (b) Prepared for the treatment

B. Test cell

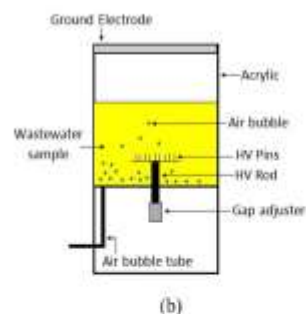
Fig. 2 shows the test cell used for treating wastewater taken from the sewage pond. Cylindrical plastic was made the test cell with 140 mm height, 93 mm diameter and 15 mm thickness. Fig. 2 (a) shows a complete test cell and Fig. 2 (b) shows an arrangement of the test cell. The internal space of the test cell supports electrodes and wastewater sample. HV electrode was made with stainless-steel plate and 16 pins connected in the high-voltage supply. The ground electrode was also made of stainless-steel plate. Holes for the air bubbles were set to the bottom of the ground electrode to generate small bubbles. 16 pins in HV electrode have 20 mm diameter, 38 mm high and 30° curvature. The pin-plane configuration with the gap of 70 mm between HV electrode and ground was later used for treatment.



(a)

C. Test Condition

The conditions for treating wastewater are shown in Table I. The supply voltage of 24 kV_{rms} was applied throughout the treatment.



(b)

Fig. 2. Treatment of wastewater (a) arrangement of the experiment (b) test cell

Supply frequencies of 20 kHz, 40 kHz, 60 kHz were set into different wastewater samples for 6 hours, 12 hours, 24 hours. Oxygen gas was pumped from the air and injected into the treatment process, held pumping until the end of the treatment.

TABLE I. TABLE CONDITION

Voltage	24 kV _{rms}
Frequency	20 kHz, 40 kHz, 60 kHz
Temperature	Ambient
Period	6 hours, 12 hours, 24 hours

III. RESULTS AND DISCUSSION

The results of COD and BOD of treated wastewater under different frequencies and stressing periods are shown in Table II. The amounts of COD and BOD of treated wastewater were compared with standards based on the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand. The recommended values of COD and BOD are 120 mg/l – 400 mg/l and 20 mg/l – 60 mg/l respectively [15,16,17]. These are very important quantitative parameters for wastewater when disposed into the environment. They specify the amount of oxidizable materials contained in the wastewater and their influence in the life cycle of micro-organisms present in the environment. The higher values of COD and BOD indicate the greater amount of oxidizable organic materials in the wastewater which reduce the amount of dissolved oxygen. Dissolved oxygen in water provides favourable life conditions to micro-organisms especially aquatic organisms. The lack of dissolved oxygen in wastewater is dangerous to the aquatic life and environment at all. Wastewater before treatment showed COD and BOD of 440 mg/l and 45 mg/l respectively. Figs. 3 – 4 show the effect of supply frequencies while Figs. 5 – 6 show the effect of stressing periods in the treatment of wastewater.

2017 IEEE PE&S – IEEE PES Thailand Symposium on Advanced Technology in Power System, Bangkok, Thailand, 7-8 March 2017

be treated within the shortest stressing period of 6 hours for best results of COD and BOD.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Laboratory of High Voltage and Laboratory of Environmental Engineering of Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] J. S. Clements, M. Sato, and R. H. Davis, "Preliminary Investigation of Prebreakdown Phenomena and Chemical Reactions Using a Pulsed High-Voltage Discharge in Water," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A-23, pp. 224-235, 1987.
- [2] S. Kodama, S. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira and H. Akiyama, "Treatment of persistent organic pollutants in wastewater by nanoseconds pulsed discharge Plasma," *IAI 4th International Congress on Advanced Applied Informatics*, pp. 695-698, January 2016
- [3] M. Sato, "Degradation of organic contaminants in water by plasma," *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol.3, no.1, March 2009.
- [4] K. Kouto, T. Sakugawa, K. Kawamoto, S.H.R. Hussein, S. Katsuki, H. Akiyama, M. Hara and Z. Li, "Generation of discharge plasma in water by high repetition rate pulsed power modulator," *Pulsed Power Conference*, 2009
- [5] R. Burlica and B. Locke, "Pulsed plasma gliding arc discharge with water spray," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 44, no 2, March 2008.
- [6] X. Zhao, X. Zhu, Z. Yan, Y. Liu, H. Liu, and Bing Sun, "Optical study of active species produced by microwave discharge in water," *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 44, no 8, August 2016.
- [7] S. Ming, C. Weigang, M. Jing, "Measurement of Non-Thermal Plasma in Negative Discharge with Water Atomized," *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011.
- [8] S. B. Gupta and H. Blum, "The Potential of pulsed underwater streamer discharges as a disinfection technique," *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 38, no 4, August 2008.
- [9] A. T. Sugiarto and T. Oshima, "Active species formation of pulsed plasma in water with ring-to-cylinder reactor type electrode," *International conference on automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)*, October 2015.
- [10] Y. Huang, Y. Kou, C. Zheng, Y. Xu, Z. Liu and K. Yan, "Escherichia Coli Inactivation in Water Using Pulsed Discharge," *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 44, NO. 6, June 2016.
- [11] R. Burlica and B. R. Locke, "Pulsed Plasma Gliding-Arc Discharges With Water Spray," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 44, NO. 2, March 2008.
- [12] Y. Wu, J. Li, G. Li, G. Qu, C. Sun and M. Sato, "Decomposition of Phenol in Water by Gas Phase Pulse Discharge Plasma," *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2009.
- [13] Y. Huang, L. Zhang, H. Yan, Z. Liu and K. Yan, "The Influence of Water Characteristics on Plasma-Containing Bubble Dynamics," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol 43, Issue 9, September 2015.
- [14] Y. Sun, I. V. Timoshkin, M. J. Given, M. P. Wilson, T. Wang, S. J. MacGregor, and N. Bonifazi, "Impulsive Discharges in Water: Acoustic and Hydrodynamic Parameters," *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 44, No. 10, October 2016.
- [15] The standard of the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand (2010) Online document : [http://www.pcd.go.th/info_serv/rep_std_water04.html]
- [16] Chemical Oxygen Demand (COD) Online document : [<http://realtechwater.com/chemical-oxygen-demand/>]
- [17] Biochemical Oxygen Demand (BOD) Online document : [<http://realtechwater.com/biochemical-oxygen-demand/>]

Optimal Power Supply Frequency for Wastewater Treatment by Using Underwater Plasma Discharges

Tassanai SUPANARAPAN and Boonruang MARUNGSRI*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding author

Abstract—This paper presents the development of an underwater plasma for wastewater treatment. A treatment reactor made of acrylic with multiple stainless-steel rods as the cathode electrode and stainless-steel plate as the ground was used. To find the suitable frequency for treatment, 25 kV pulse high voltage with the adjustable frequency of 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz, was applied to the cathode electrode inside the treatment reactor for generating plasma discharge. The quality of treatment process was evaluated by standard levels of the Biological Oxygen Demand (BOD) and the Chemical Oxygen Demand (COD). By the treatment results, it was found that 25 kV pulse high voltage with 20 kHz frequency was more suitable for wastewater treatment when compared with the other two frequencies due to the faster reduction in COD and BOD values were measured.

Keywords—wastewater treatment; wastewater; COD; BOD; underwater plasma discharge

1. INTRODUCTION

Presently, water pollution has become an interruption of the environment in the broad boundary given the agricultural and industrial factory. That is important to protect the environment for future arrangements it should start today. The objective of this research is a proposed case study of power frequency effect of prototype underwater plasma for treat wastewater.

Recently, the remnant of a chemical compound in used water from industry factory and agriculture area has mostly reported affecting human health. The Oxidation Pond method is a famous method for wastewater treatment. However, this technique required a long time for treatment and generated the terrible smells from H₂S in a treatment process. Many researchers have been researched the decomposition of organic materials in wastewater, and the treatment techniques were investigated. Such as arc discharge [1], microwave discharge [2], high repetition discharge plasma [3], surface plasma [4] and gas pulse discharge [5]. Up to now, the process for wastewater treatment is widely developed. However, it is not enough to treat a lot of wastewater from many activities of a human. Recently, electrical discharge treatment technique by applying a high voltage in the liquid phase was widely interested. Many technologies have been researched to degrade contaminants. Such as non-thermal plasma was investigated by Sun et al. [6]. Corona streamer discharge was studied by San et al. [7], Sato et al. [8], and Joshi et al. [9]. Spark discharge was introduced by Sun et al. [10]. Underwater plasma is a new trend for decomposing organic materials in water [11].

The effect of supply frequency for wastewater treatment by using underwater plasma was studied in this paper. Three levels of power supply frequency, i.e., 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz were applied to the water treatment reactor for treated wastewater at the ambient temperature.

II. EXPERIMENTAL

In the experimental, a 25 kV high voltage pulse power supply with the variable frequencies of 20 kHz to 60 kHz converted from 220 Vac, 50 Hz was used as a power source. The treatment process was implemented under the test conditions for underwater plasma discharges at ambient temperature.

A. Wastewater Sample

Wastewater sampling was collected from a wastewater storage pond in the Suranaree University of Technology as shown in Fig. 1. The wastewater sampling was taken during daytimes, and it was kept in a plastic bottle as shown in Fig. 2. The COD and the BOD levels of the wastewater sampling were measured before treatment.



FIGURE 1. WASTEWATER STORAGE POND



FIGURE II. THE WASTEWATER SAMPLE

B. Treatment Chamber

The treatment reactor for wastewater treatment was made of a cylinder thermoplastic with 140 mm height, 93 mm diameter and 15 mm thickness. The experimental arrangement is shown in Fig. III. High voltage electrode and grounding electrode were installed in the intramural space of the treatment chamber to generate plasma discharge. A high voltage electrode is a group of 16 stainless steel pins attached to the plate. The dimension of an HV electrode pin is 20 mm diameter, 38 mm high and 30° curvature. HV electrode installed at the upper part in the intramural space of the treatment chamber while grounding electrode installed at the bottom portion. Holes were drilled at the grounding plate for injecting the compressed air to generating small air bubbles. The gap between the HV electrode and the grounding electrode is 70 mm.



FIGURE III. TREATMENT CHAMBER AND THE EXPERIMENTAL ARRANGEMENT

Wastewater was filled in the treatment chamber for treatment, and the HV electrode was dipped in wastewater. Compressed air was pumped and was injected into the treatment process. The treatment process was conducted until the COD, and the BOD levels belong to the standard of the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand. The standard level for the COD is 120 – 400 mg/l and the standard level for the BOD is 20 – 60 mg/l.

A 25 kV high voltage pulse with adjustable frequency power supply was used as the power supply in this study. Three levels of frequency were used, i.e. 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz, respectively. The power supply started with 220 Vac 50 Hz.

Then a 220 Vac 50 Hz was rectified into 12 Vdc and 24 Vdc. A 12 Vdc was used to supply a PWM Generator to generate the control signal for the switching Power MOSFET (IRFP460) operation. A 24 Vdc was used to supply the Flyback transformer to generating 25 kV high voltage pulse.

C. Test Conditions

The conditions for wastewater treatment process are shown in Table I. The experiment was performed under the same electrical stress magnitude at ambient temperature. A 25 kV high voltage pulse was continuously applied during the treatment process.

TABLE I. TEST CONDITIONS

Voltage	25 kV pulse
Frequency	20 kHz, 40 kHz, 60 kHz
Temperature	Ambient
Period	Until COD and BOD value is in range

III. RESULTS AND DISCUSSION

Before treatment wastewater, the COD and the BOD of wastewater were measured. The COD and the BOD levels at 440 mg/l and 45 mg/l were measured from the wastewater sample, respectively. Wastewater was treated until the COD, and the BOD levels reach the standard of the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand. These levels are the quality parameters for treated water before disposed into the environment. Decreasing in the COD level along the treatment time is shown in Fig. 4. The role of power supply frequency can be seen from the experimental results. Faster reduction in the COD level was obtained when a 25 kV high voltage pulse with the frequency of 20 kHz was subjected to the treatment chamber compared with the frequency of 40 kHz and 60 kHz.

As seen in Fig. 4, after 24 hours of treatment, even the same voltage stress magnitude, the more significant reduction of the COD level was obtained from the wastewater sample subjected to a 25 kV high voltage pulse with 20 kHz of frequency. 60% of the COD reduction was measured while 57.73% of the COD reduction was measured when subjected to 40 kHz of the frequency and 55% of the COD reduction was measured when subjected to 60 kHz of the frequency, respectively.

Decreasing in the BOD level along the treatment time is shown in Fig. 5. Similar to the COD, the role of power supply frequency can also be seen from the experimental results. Faster reduction in the COD level was obtained when a 25 kV high voltage pulse with the frequency of 20 kHz was subjected to the treatment chamber comparing with frequencies of 40 kHz and 60 kHz.

From Fig. V, after 24 hours of treatment, even the same voltage stress magnitude, the more significant reduction of the BOD level was obtained from the wastewater sample subjected to a 25 kV high voltage pulse with 20 kHz of frequency. 60% of the BOD reduction was measured while 48.89% of the BOD reduction was measured when subjected to 40 kHz of the frequency and 40% of the BOD reduction was measured when

subjected to 40 kHz of the frequency, respectively. The experimental results confirmed the effectiveness of treatment chamber.

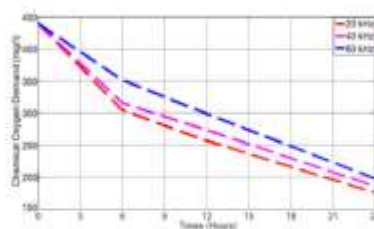


FIGURE IV. THE REDUCTION OF THE COD LEVEL

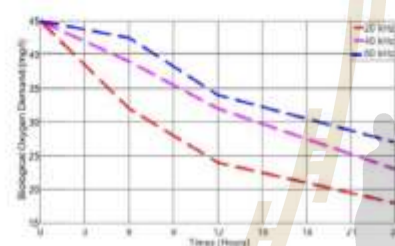


FIGURE V. THE REDUCTION IN THE BOD LEVEL

IV. CONCLUSION

The prototype of the treatment chamber for treating wastewater by using underwater plasma technique was proposed in this work. Wastewater taken from wastewater storage pond in the Suranaree University of Technology was treated to evaluate the effectiveness of the treatment chamber. A 25 kV high voltage pulse was supplied to the treatment chamber with the frequencies of 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz. The COD and BOD were used to confirm the quality of treated water. The treatment process was stopped when the COD and the BOD levels reached the standard of the Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand, i.e., 120-400 mg/l for the COD and 20-60 mg/l for the BOD, respectively. The experimental results showed that shortest treated time was obtained when the treatment chamber subjected to a 25 kV high voltage pulse with the frequencies of 20 kHz.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the High Voltage Laboratory of the Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] R. Burlacu, R. Grim, K. Shih, D. Balkwill, B. R. Locke, Bacteria Inactivation Using Low Power Pulsed Gliding Arc Discharges with Water Spray, *Plasma Processes and Polymers*, 2010.
- [2] X. Zhao, X. Zhu, Z. Yan, Y. Liu, H. Liu, B. Sun, Optical Study of Active Species Produced by Microwave Discharge in Water, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, 2006.
- [3] K. Kouno, T. Sakagawa, K. Kawatoto, S. Howein, S. Katsuki, H. Akiyama, M. Hara, Generation of discharge plasma in water by high repetition rate pulsed power modulator, *IEEE Pulsed Power Conference*, 2009.
- [4] M. Sato, T. Soutome, S. Mit, T. Ohshima, Y. Yamada, Decomposition of Phenol in Water Using Water Surface Plasma in Wetted-wall Reactor, *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2007.
- [5] Y. Wu, J. Li, G. Li, N. Li, G. Qu, C. San, M. Sato, Decomposition of Phenol in Water by Gas Phase Pulse Discharge Plasma, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2009.
- [6] M. Sen, W. Chen, J. Min, Measurement of Non-Thermal Plasma in Negative Discharge with Water Atomized, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011.
- [7] B. Sun, M. Sato, J. S. Clements, Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water, *Journal of Electrostatics*, 1997.
- [8] M. Sato, T. Ohgiyama, J. Clements, Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high voltage discharge in water, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994.
- [9] A. Joshi, B. Locke, P. Arce, W. Finney, Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution, *Journal of Hazardous Materials*, 1995.
- [10] B. Sun, M. Sato, A. Harano, J. Clements, Non-uniform pulse discharge-induced radical production in distilled water, *Journal of Electrostatics*, 1998.
- [11] A. Sugiarto, T. Ohshima, Active species formation of pulsed plasma in water with ring-to-cylinder reactor type electrode, *International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro-Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)*, 2015.

ประวัติผู้เขียน

นายทัศนัย ศุภนราพรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536 ที่อำเภอเมือง จังหวัด จันทบุรี เริ่มศึกษาระดับอนุบาล จนถึงชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนกิตติวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดตราด และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนตราษตระการคุณ อำเภอเมือง จังหวัดตราด เมื่อปี พ.ศ. 2555 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปีพ.ศ. 2559 จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสนเป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการของ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี อาทิ เช่น ปฏิบัติการวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน และ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะ ศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบ ไฟฟ้าแรงสูง

