

๒๕

เครื่องกำเนิดโอโซนโดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ - 6

Atmospheric Pressure Plasma Ozonizer ๑/๑๐

๑๐ ขวัญชัย เทพนวน

Thawatchai Tepnuan

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

๗๐ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ๖ คณะวิทยาศาสตร์

Master of Science Thesis in Physics

Prince of Songkla University

2542

Order Key	19621
BIB Key	156156

เลขหมู่	TD461 ๖๖๖
เลขทะเบียน	2542
๕-1 ๒๘.๙	2542

๘. 2 (1)

ชื่อวิทยานิพนธ์

เครื่องกำเนิดไอโซน โดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

ผู้เขียน

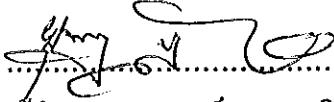
นายธวัชชัย เทพนวล

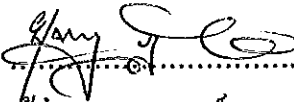
สาขาวิชา

ฟิสิกส์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธนา ฐิระวณิชกุล)

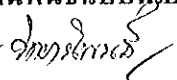
ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธนา ฐิระวณิชกุล)

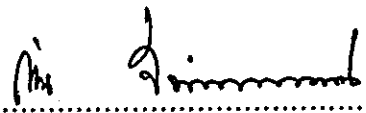
กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวัณนาไวย)

กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศิลาวัณนาไวย)

กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิฑูล วณิชากิชาติ)

กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคริต ทองอุไร)

๖๐
๖ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ X 


(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้าน จันทรพรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	เครื่องกำเนิดโอโซนโดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ
ผู้เขียน	นายวัฒน์ชัย เทพนวล
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2541

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ศึกษาออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีลักษณะแบบไซเรนที่ จัดเป็นพลาสมาแบบไม่สมดุล ถึงแม้ว่าจะมีวิธีอื่น ที่สามารถผลิตโอโซนได้เช่นกัน แต่วิธีการผลิตแบบนี้มีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการอื่นๆ ซึ่งสามารถผลิตโอโซนได้ในปริมาณที่มากกว่าในการใช้พลังงานที่เท่ากัน และวิธีการผลิตโอโซนแบบนี้ยังเป็นรูปแบบเบื้องต้นที่สามารถพัฒนาใช้ในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมได้อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้การผลิตแบบไซเรน เพื่อช่วยในการศึกษาปรากฏการณ์ทางกายภาพที่มีผลกระทบบต่อการผลิตโอโซนของเครื่องกำเนิดโอโซนแบบนี้ และสามารถนำผลผลิตที่ได้ไปประยุกต์ใช้ โดยทั่วไปในท้องตลาดเครื่องกำเนิดโอโซนไม่ว่าจะกำเนิดด้วยวิธีใดจะมีราคาสูง และเป็นความลับในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องทดลองออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนที่อาศัยเทคนิคการผลิตแบบไซเรนที่ขึ้นมา เนื่องจากเป็นเทคนิคนี้ทำงานที่ความดันบรรยากาศจึงทำให้มีความยุ่งยากน้อยกว่าวิธีอื่น และให้ผลผลิตที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าวิธีอื่น

จากการศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนที่อาศัยเทคนิคการผลิตแบบไซเรนที่ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ความถี่ 50 Hz 2) การเตรียมอากาศแห้งสำหรับการผลิตโอโซน และ 3) เซลล์โอโซนเซอร์ เมื่อทดสอบแล้ว พบว่าเครื่องกำเนิดโอโซนทำงานได้อย่างเหมาะสม ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m (ศักย์ไฟฟ้า 7.90 kV) อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min อัตราผลิตโอโซนที่ได้อยู่ระหว่าง 18 – 30 mgO₃/h ที่สถานะนี้เมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพแล้ว พบว่า ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของเอ็กซ์โปเนนเชียล อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง แล้วผลผลิตโอโซนที่ได้จะลดลง เมื่อใช้สารดูดความชื้นในการเตรียมอากาศจะได้ผลผลิตโอโซนมากกว่าไม่ใช้สารดูดความชื้น ตั้งแต่ 2 – 7 เท่า นอกจากนี้แล้ววัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโตรดภายในยังมีผลต่อการผลิตโอโซนด้วย พบว่า วัสดุทองแดงจะให้ผลผลิตโอโซนมากกว่าอลูมิเนียมบาง ประมาณ 11.5 % และจากการนำผลผลิตโอโซนที่

สภาวะที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำดิบผ่านการกรอง น้ำเสีย และน้ำนากุ้ง ปริมาตรของน้ำทั้งหมดที่ใช้ 250 มิลลิลิตร พบว่า ก๊าซโอโซนใช้เวลาในการผ่านน้ำ 0.5 นาที ก็สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่ปริมาณเชื้อ 10^3 CFU/ml ได้ 100 % ซึ่งเป็นไปตามที่บ่งชี้ในมาตรฐานของน้ำดื่ม สำหรับน้ำดิบผ่านการกรอง และใช้เวลา 3 นาที ในน้ำนากุ้งซึ่งทำให้ปราศจากเชื้อแบคทีเรียชนิด *Vibrio* sp. ที่ระดับ 500 CFU/ml ได้ 100 % ซึ่งเชื้อตัวนี้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดโรคในกุ้งกุลาดำ และยังปรับสภาพของน้ำนากุ้งให้ดีขึ้นด้วย สำหรับน้ำเสียจะต้องใช้เวลา 10 นาที ในการทำให้ปราศจากเชื้อแบคทีเรียได้ 100% ที่ระดับเชื้อ 2×10^4 CFU/ml

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นการสมเหตุสมผลที่จะนำก๊าซโอโซนที่ได้จากการผลิตด้วยเทคนิคคลิสอาร์แบบไซเลนท์ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในท้องถิ่น และอุตสาหกรรมต่าง แต่ทั้งนี้ต้องมีการออกแบบและพัฒนาต่อไปเนื่องจาก เครื่องกำเนิดโอโซนนี้เป็นเพียงการทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

Thesis Title	Atmospheric pressure plasma ozonizer
Author	Mr. Thawatchai Tepnuan
Major Program	Physics
Academic Year	1998

Abstract

Plasma ozonizer generated by silent discharge has been designed and constructed. The silent discharge is a form of non equilibrium plasma. This method is superior than the commercial technic in generation of ozone given equal energy input. Most commercial units have classified information and even more expensive in price.

The constructed plasma ozonizer comprises of three components, namely (1) 50 Hz AC powersupply (2) preparation of dry air (3) ozonizer cell. It is found that the optimum working condition are electric field 3.22×10^3 kV/m (at 7.90 kV) and flow rate 1.42 l/min. Ozone production rate is 18 – 30 mgO₃/h. By varying various parameter, the increase with gas flow rate and then drop away. The ozone production with dry air is 2- 7 fold higher than normal air. The ozone production of electrode with wire copper higher than thin aluminium is 11.50%. In applying ozone in filtered water ; wastewater and shrimp farm water; It is found that all bacteria and exterminated within 3 minutes. Vibrio. sp. bacteria in shrimp water farm can also be killed 3 minutes.

Further study is needed in apply the silent discharge ozoniser in industrial works.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากหลายบุคคล และหน่วยงาน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ ดังมีรายนามต่อไปนี้

- ผศ.ยุทธนา ภูริวณิชย์กุล รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาให้คำแนะนำในงานวิจัย ถ่ายทอดวิชาการ
- รศ.ดร. ชัยวิทย์ ศิลาวัณนาไนย ให้คำชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์
- ครูชำนาญการ ณรงค์ สุวรรณมณี ให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้เรื่องไฟฟ้า
- ครูวีระ ไทยสยาม และพี่ๆ ห้องปฏิบัติการ work shop ที่ให้การอบรมฝึกสอนในการทำงานที่เกี่ยวกับงานช่าง
- ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดไฟฟ้าแรงดันสูง และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าของวิศวกรรมไฟฟ้าให้ความสะดวกในการใช้งาน
- ภาควิชาจุลชีววิทยา ให้ความอนุเคราะห์ในการฝึกหัดเข้าประจำในการวิเคราะห์ตรวจเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในน้ำ และ รศ. วิลาวัลย์ เจริญจิระตระกูล ที่ให้คำแนะนำแนวทางในการบำบัดน้ำ และการตรวจวิเคราะห์เชื้อ
- ภาควิชาชีวเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ UV-spectrometer และ พี่ๆ ห้องปฏิบัติการชีวเคมีชั้น 5 NML ที่อำนวยความสะดวก
- โรงงานน้ำดื่มคลองเรียนธารทิพย์ ของ คุณล้อม สุขเอียด ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านแหล่งน้ำในการศึกษา และข้อมูลในการทำน้ำดื่มในทางพาณิชย์
- หน่วยการประปา ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านข้อมูลความรู้ในการทำน้ำประปา และน้ำที่นำมาทดลองวิจัย
- คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณบิดา-มารดา และญาติ พี่น้อง เพื่อนๆ ทั้งหลาย ที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจ เป็นห่วงเป็นใย มาตลอด

ธวัชชัย เทพนวล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำค้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	15
2 ทฤษฎี	16
- ทฤษฎีการคิซซาร์จแบบไซเลนท์	16
- การสร้างโอโซน	17
- การเกิดขึ้นของไมโครคิซซาร์จ และ การเบรคดาว์นทางไฟฟ้า.....	23
3 วัสดุและวิธีการวิจัย	25
- วัสดุ	25
- อุปกรณ์	26
- วิธีดำเนินการ	31
- หลักการออกแบบ และสร้างระบบการกำเนิด โอโซน	
ที่ความดันบรรยากาศซึ่งเซลล์โอโซนในเซอรัมีคิซซาร์จไซเรนท์	31
- พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนของ	
เซลล์โอโซนในเซอรั	41
- การประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้กับการฆ่าเชื้อแบคทีเรียใน	
น้ำดิบผ่านการกรอง น้ำทิ้ง และน้ำนากุ้ง	49
4 ผลและการอภิปรายผล	58

5	บทสรุป	86
	– วิเคราะห์	86
	– สรุป	92
	– ข้อเสนอแนะ	94
	บรรณานุกรม	96
	ภาคผนวก	104
	ประวัติผู้เขียน	124

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ภาคตัดขวางของหลอดไอโซไนเซอร์	12
2 ไอโซไนเซอร์ที่มีคิซาร์จแบบไซเรนท์	13
3 ไคอะแกรมของไอโซไนเซอร์ที่ขั้วอิเล็กโตรดต่างๆ กัน	13
4 ไอโซไนเซอร์ที่ไม่มีไคอิเล็กโตรดอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า	14
5 ภาคตัดขวางตามยาวของไอโซไนเซอร์แบบเซรามิกส์	14
6 แผนภูมิอธิบายความสัมพันธ์ของการคิซาร์จทางฟิสิกส์ และพลาสมาเคมี ในการคิซาร์จแบบไซเรนท์	18
7 ไคอะแกรมพลังงานศักย์ของออกซิเจน	21
8 กลุ่มอนุภาคทางเคมีที่เกิดขึ้น โดยไมโครคิซาร์จในอากาศ	21
9 ลักษณะ โครงสร้างของไมโครคิซาร์จภายในช่องว่างอากาศ	24
10 ลักษณะของไอโซไนเซอร์เซลล์ ที่อาศัยเทคนิคคิซาร์จแบบไซเรนท์	24
11 ตัวสุบอากาศแบบไม่ใช้น้ำมัน	27
12 ลักษณะของตัวต้านทานที่ใช้ในงานวิจัย	27
13 ชุดกระเปาะเป็ยกและแห้ง สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ สิ่งแวดล้อม ที่ใช้ในงานวิจัย	28
14 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ใช้ในงานวิจัย	29
15 ลักษณะของ Midget Impinger ขนาด 125 และ 250 ml ที่ใช้เป็น ส่วนสัมผัสระหว่างก๊าซ และสารละลาย ในการวิจัย	30
16 เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุ	30
17 ภาพถ่ายส่วนประกอบของเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย – แผ่นอะคลิลิก พลาสติกและน๊อต	32
– ท่อแก้วทนความร้อน (Pyrex tube)	33
– อิเล็กโตรดภายในและภายนอก	33
18 ภาพถ่ายเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว	34
19 วงจรจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสต่ำ ที่เชื่อมกรรกับเซลล์ไอโซไนเซอร์	36

20	แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ	37
21	แสดงภาพถ่ายแผงควบคุมด้านหน้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง	37
22	ไดอะแกรมของระบบการเตรียมอากาศ	38
23	ภาพถ่ายตัวกรองอากาศแห้งที่ใช้สาร Zeolite 5A สร้างขึ้นเองที่ใช้ในงานวิจัย	39
24	ภาพถ่ายโวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต ที่ใช้ในการปรับเทียบไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสลับของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย	40
25	ค่าการปรับเทียบโวลต์ก่อนเข้าห้อมีแปลงกับศักย์ไฟฟ้าแรงสูง	40
26	กราฟการปรับเทียบมาตรฐานของก๊าซไอโซนที่ใช้ในการวิจัย	42
27	ภาพถ่ายงานปรับเทียบสี	43
28	ภาพถ่ายเม็ดยาทดสอบวัดปริมาณ ไอโซนที่ละลายในน้ำ	43
29	ภาพถ่ายความเสียหายอันเนื่องมาจากอาร์คไฟฟ้าบนแก้วทนความร้อน	44
30	ขั้นตอนการกรองน้ำของโรงทำน้ำประปา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	56
31	ขั้นตอนการกรองน้ำ ของโรงงานทำน้ำดื่มคลองเรียนธารทิพย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	56
32	ขั้นตอนในการฆ่าเชื้อ โรคที่มีในน้ำด้วยก๊าซไอโซนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	57
33	กราฟแสดงผลผลิตไอโซนกับสนามไฟฟ้า ที่เวลาการดิสชาร์จ 1 นาที และความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแวดล้อม 60 % R.H.	59
34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นไอโซน กับ E/n_{air} ที่ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	60
35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตไอโซนกับอัตราการไหล ของอากาศที่ สนามไฟฟ้า $322 \times 10^3 \text{ kV/m}$ เวลาการดิสชาร์จ 1 นาที	61
36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนไปเป็นไอโซน กับอัตราการไหลของอากาศ ที่ สนามไฟฟ้า $322 \times 10^3 \text{ kV/m}$	62
37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นไอโซน กับ เวลาในการสัมผัสของอากาศภายในเซลล์ไอโซไนเซอร์ (min) ที่ สนามไฟฟ้า $3.22 \times 10^3 \text{ kV/m}$	63
38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นไอโซนกับอัตราการผลิต ไอโซน ที่ สนามไฟฟ้า $3.22 \times 10^3 \text{ kV/m}$	64

39	กราฟแสดงปริมาณ โอโซนกับการใช้สารซีโอไลต์ในระบบการกำเนิดโอโซน	65
40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโอโซนกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดภายในเซลล์โอโซนเซอร์	66
41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณ โอโซนกับพื้นที่ในการคิซาร์จไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	67
42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โอโซนกับเวลาการคิซาร์จที่อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	68
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายนอกขั้วอิเล็กโทรด กับเวลาการทำงานของเครื่องกำเนิด โอโซน ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min อุณหภูมิก่อนและหลังการทดลองเป็น 28.2 และ 28.2 องศาเซลเซียส	69
44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายนอกขั้วอิเล็กโทรด กับเวลาการทำงานของระบบการกำเนิดโอโซน ซึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างห้องปรับอากาศ กับ ห้องปกติที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m และอัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	70
45	ลักษณะของผิวอะลูมิเนียมบางที่ไม่ได้ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	72
46	ลักษณะของผิวอะลูมิเนียมบางที่ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	72
47	ลักษณะของผิวโคบอลต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	73
48	ลักษณะของผิวโคบอลต์ที่ผ่านการทำงานเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)	74
49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรีย กับเวลาการสัมผัสโอโซนที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	76
50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรียกับเวลาการสัมผัสโอโซน ที่สนามไฟฟ้า 32.24 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 lpm	77

51	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรีย กับ เวลาการสัมผัส ไอโซน ที่สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	78
52	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอโซน กับ เวลาการสัมผัสไอโซน ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	79
53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช กับ เวลาการสัมผัสไอโซน ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	80
54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อไวรัส โอ กับ เวลาการสัมผัส ไอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหล ของอากาศ 1.42 l/min	81
55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมด กับ เวลา การสัมผัสไอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการ ไหลของอากาศ 1.42 l/min	82
56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนีย กับ เวลาการสัมผัส ไอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของ อากาศ 1.42 l/min	83
57	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ พีเอช กับ เวลาการสัมผัสไอโซน ของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	84
58	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้าง กับ เวลาการสัมผัสไอโซน ของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min	85
59	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตไอโซนที่ได้จากการทดลอง กับที่ได้ในทางทฤษฎี	87
60	กราฟแสดงความสัมพันธ์ในทางทฤษฎี ระหว่างอัตราการผลิต ไอโซน กับ อัตราการไหลของอากาศ	88
61	ผลของสนาม E/n และพลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ยที่มีต่อผลคูณ nd	93

บทที่ 1

บทนำ

บทนำค้นเรื่อง

ก๊าซโอโซนเป็นอีกรูปหนึ่งของออกซิเจนซึ่งอยู่ในรูปโครงสร้าง O_3 เป็นก๊าซที่มีความเสถียรต่ำ พบมากในชั้นสตราโตสเฟียร์ ที่สูงจากพื้นโลก ประมาณ 20 – 30 กิโลเมตร ซึ่งมีประโยชน์ในการป้องกันรังสี UV จากดวงอาทิตย์ ส่วนที่ผิวโลกในธรรมชาติพบโอโซนน้อยมาก ยกเว้นในเขตชุมชนเมืองที่มีความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง (Eliasson et al., 1991) กระบวนการผลิตโอโซนมีได้หลากหลายรูปแบบ เช่น โอโซนที่ผลิตโดยใช้กระบวนการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเรนที่มีรายงานและศึกษากันมานานแล้ว โดยสมบัติเฉพาะของก๊าซโอโซน พบว่าก๊าซโอโซนเป็นก๊าซชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรค โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงที่สุดชนิดหนึ่ง (รองจากฟลูออรีน) การประยุกต์ใช้โอโซนในเชิงพาณิชย์ในยุโรปได้เริ่มประมาณปี ค.ศ. 1900 โดยใช้ในกระบวนการบำบัด และฆ่าเชื้อสำหรับน้ำดื่ม และได้เริ่มแพร่หลายไปยังอเมริกาโดยใช้ในการกำจัดกลิ่นและรสที่ไม่พึงประสงค์ของน้ำ ปัจจุบันทั้งภายในประเทศและภายนอกประเทศได้มีการนำเครื่องกำเนิดโอโซนมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างมากมาย อาทิ เช่น บริษัทหาดทิพย์ จำกัด (มหาชน) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา นำโอโซนที่ได้จากเครื่องผลิตโอโซนมาใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มบรรจุขวด และอีกหลายๆ แห่งได้นำโอโซนมาใช้ในฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม และในอากาศ เป็นต้น ในการผลิตโอโซนนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ส่วนใหญ่ที่นำไปประยุกต์ใช้งานในระดับมหภาค จะใช้กระบวนการทางกายภาพในการผลิตก๊าซโอโซน ซึ่งเรียกเทคนิคที่ใช้ว่า การดิสชาร์จไฟฟ้า (Electrical Discharge)

การดิสชาร์จไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์พลาสมาแบบไม่สมดุล (Non Equilibrium Plasma) (เป็นภาวะที่อุณหภูมิของก๊าซและไอออนของก๊าซ ขณะที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูงกว่า) อย่างไรก็ตามในการผลิตก๊าซโอโซนด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์มีหลายรูปแบบ ซึ่งมีจุดเด่นจุดด้อยแตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น การใช้หลอดรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet light source) ก๊าซออกซิเจนจะได้รับพลังงานในรูปโฟตอนของรังสีเหนือม่วง และกลายเป็นก๊าซโอโซน ดังนั้น การผลิตก๊าซโอโซนด้วยวิธีนี้จะพบปัญหาเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่ทำท่อก๊าซเพื่อที่จะให้รังสีเหนือม่วงผ่านนี้จำเป็นจะต้องเป็นแก้วควอตซ์ ส่วนการดิสชาร์จแบบอื่นๆ ก็ต้องอยู่ในภาวะที่ระบบต้องมีความดันต่ำกว่า

บรรยากาศซึ่งมีความยุ่งยากในการผลิตก๊าซโอโซนเป็นอย่างมาก ดังนั้น ผู้ทำการทดลองได้ใช้เทคนิคการจางไฟฟ้าแบบไซเรนซ์ซึ่งมีข้อได้เปรียบก็คือ (Eliasson et al., 1991) สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ พลาสมาการจางไฟฟ้าชนิดนี้มีลักษณะพิเศษ คือ ผิวคานหนึ่งของขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้าหรือทั้งสองด้านมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการจางอย่างสม่ำเสมอ สารไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้ก็คือ เซรามิกส์ และแก้ว การไอออนไนซ์เกิดขึ้นเมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนหรืออากาศแห้งเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดไฟฟ้า ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมและรวมตัวกันใหม่เป็นก๊าซโอโซน (พลังงานที่ใช้ในการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนจะอยู่ในช่วง 1-10 eV) สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีกลุ่มวิจัยในส่วนราชการและเอกชนที่สนใจและศึกษาอย่างจริงจังในกระบวนการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์พลาสมา ดังนั้น หน่วยสาขาวิชาฟิสิกส์พลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ได้เล็งเห็นความสำคัญในการประยุกต์ใช้งาน จึงได้เสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาวิจัยและเผยแพร่องค์ความรู้ในสาขาฟิสิกส์พลาสมาให้กว้างขวางต่อไป

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้มีความเหมาะสมในการกำเนิดโอโซน ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคการจางไฟฟ้าแบบไซเรนซ์นี้มาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนและศึกษาถึงพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตโอโซน พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบเบื้องต้นจากการนำโอโซนที่ภาวะเหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำตามมาตรฐานที่กำหนดในน้ำดื่ม, น้ำคั้น และน้ำนาุ้ง เพื่อการนำระบบไปประยุกต์ใช้จริงในอนาคตต่อไป

การตรวจเอกสาร

1. ประวัติการค้นพบโอโซน

ปี ค.ศ 1785 เป็นเวลา 11 ปีหลังจากมีการค้นพบออกซิเจนโดย J. Priestley, M. van Marum ได้สังเกตพบกลิ่นลักษณะพิเศษเมื่ออยู่ใกล้เครื่องย่นต์ทางไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่แต่ในขณะนั้นยังไม่ทราบว่าป็นโอโซน และไม่ทราบว่ากลิ่นนี้เกิดจากอะไร จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1840 C.F. Schobein ได้สังเกตพบกลิ่นเฉพาะนี้จากการทดลองแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า และการสปาร์คทางไฟฟ้าแล้วได้ตั้งชื่อว่า "Ozone" ซึ่งมาจากคำภาษากรีก "ozein" หมายถึง การได้กลิ่น โอโซนเป็นก๊าซที่สามารถแสดงได้ด้วยสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ O_3 (Soret, 1866)

ปี ค.ศ. 1857 Werner von Siemens ได้แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถผลิตได้โดยการใช้ออกซิเจนไหลผ่านช่องว่างในการคิซาร์ระหว่างแกว่ทรงกระบอก 2 ชั้น การปลดปล่อยไฟฟ้าศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับอย่างสม่ำเสมอผ่านผนังแกว่ซึ่งเขาได้อ้างว่าเป็น "การแยกก๊าซด้วยไฟฟ้า" อุปกรณ์นี้ได้เป็นที่เชื่อถือ และยอมรับในการผลิตโอโซนในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า "การคิซาร์จแบบไซเลนท์" สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Oudshoorn in the Netherlands.,1893.)

2. สมบัติทั่วไปของก๊าซโอโซน

โอโซนเป็นอีกรูปหนึ่งของออกซิเจน (Andrews,1856) มีความหนาแน่นเป็น 1-1.5 เท่าของความหนาแน่นออกซิเจน มีน้ำหนักโมเลกุล 48.00 กรัมต่อโมล เป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่ความดันบรรยากาศ อากาศที่มีโอโซนผสมอยู่ (Ozonized air) จะมีกลิ่นฉุนแสบจมูก ลักษณะกลิ่นที่ฉุนนี้สามารถรู้สึกได้ในบรรยากาศหลังจากมีฟ้าแลบ และรอบๆ การคิซาร์จไฟฟ้าอื่นๆ (Ozone in water and wastewater treatment, 1972.) ความเข้มข้นของโอโซนในอากาศประมาณ 0.01 – 0.05 ppm. มนุษย์สามารถที่จะรับรู้ได้ ที่ระดับความเข้มข้นนี้ถ้าสูดหายใจเข้าไประยะเวลาหนึ่งจะทำให้เวียนศีรษะและเกิดการระคายเคืองต่อเซลล์ของจมูกและคอ แต่ถ้าความเข้มข้นโอโซน น้อยกว่า 0.001 ppm. ทำให้สดชื่น ส่วนความเข้มข้นที่สูงกว่า 1 ppm. จะทำให้เป็นอันตรายถึงแก่ชีวิต และมีผลกระทบบ่อพิษอีกด้วย (Francis, 1972) ที่ระดับอุณหภูมิปกติโอโซนในปริมาณความเข้มข้นสูงๆ ในสถานะก๊าซจะมีสีน้ำเงินอ่อน และหากควบแน่นในรูปของเหลวจะมีสีน้ำเงินเข้มซึ่งไม่เสถียรอย่างมาก และจะทำให้ระเหิดได้ ก๊าซโอโซนละลายในน้ำได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจนประมาณ 30 เท่า ในช่วงอุณหภูมิ 0-30 องศาเซลเซียส (Venosa et al., 1979) ในสารละลายโอโซนจะมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 165 นาที ในน้ำกลั่น (Wynn et al., 1973) และภายใต้เงื่อนไขที่ความดันและอุณหภูมิปกติ

ก๊าซโอโซนยังสามารถละลายในกรดอะซิติก (acetic acid) อะซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) กรดโพรไพโอนิก (propionic acid) โพรไพโอนิกแอนไฮไดรด์ (propionic anhydride) ไดคลอโรฟอร์ม (dichloroform) และ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) ได้มากกว่าที่ละลายในน้ำ โอโซนออกซิไดส์โลหะทุกชนิด ยกเว้นทอง และโลหะในกลุ่มพลาคินัม นอกจากนี้ก๊าซโอโซนยังกัดกร่อนยาง และสารประกอบพวกยาง (Hoigne et al., 1975) ก๊าซโอโซนยังมีคุณสมบัติในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ให้เปลี่ยนรูปต่างๆ จากเฟอร์ริกไอออน (ferric ion) ไปเป็นเฟอร์ริก (ferric) แมกกาเนตไดออกไซด์ (manganese dioxide) ไปเป็นแมกกาเนต (manganese) หรือเปอร์แมกกาเนตซัลไฟด์ (permanganatesulphide) ไปเป็น ซัลเฟต (sulphate) และ ไนไตรท์ไปเป็น ไนเตรท (nitrate) เป็นต้น สำหรับการออกซิไดส์ไอโอไดด์ไปเป็นไอโอดีนด้วยก๊าซโอโซนได้ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับมาตรฐานการวิเคราะห์หาโอโซนในน้ำ และอากาศตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

โอโซนสลายตัวในน้ำได้รวดเร็วกว่าในอากาศ (Stumm, 1956;1958) สำหรับการสลายตัวของก๊าซโอโซนในสารละลายจะให้โมเลกุลออกซิเจน และตัวทำปฏิกิริยาทางเคมี พวกฟรีเรดิคัล, HO_2^- , ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) กลีโกลและไฮดรอกซิลที่เป็นกลางซึ่งเป็นตัวเร่งในการสลายตัวของโอโซนโดยต้องคำนึงถึงความชื้น, ซิลเวอร์, พลาคินัม, แมกกาเนตไดออกไซด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมคาร์บอเนต, โบรมีน, คลอรีน และ ไนโตรเจนเพนออกไซด์ ความร้อนจะช่วยเร่งการสลายตัวของโอโซนไปเป็นออกซิเจนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และก๊าซโอโซนจะสลายตัวทันทีที่ทันใดที่อุณหภูมิประมาณ 270°C (518°F) นอกจากนี้ก๊าซโอโซนยังสามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการทางเคมีที่อาศัยแสงเป็นตัวกระตุ้น (Diaper, E.W.J., 1969)

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของโอโซนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียยังไม่มีใครทราบแน่นอนจนกระทั่ง Fox, C.B. (1873) ได้มีการทำการทดลองศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่ทำให้เกิดมีการเน่าเสียขึ้นในของเหลว และได้พบว่า ก๊าซโอโซนจะทำลายสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่มีอยู่ในของเหลวเหล่านี้ได้ เช่น เชื้อรา ฟันใจ และแบคทีเรีย ต่อมา de Meritens (1886) และ Froelich (1890) ได้ทำการทดลอง และอธิบายถึงคุณสมบัติในการออกซิไดส์ของโอโซนที่เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในสมัยนั้น ในปี 1893 Ohlmuecller ได้ทำการทดลองใช้ก๊าซโอโซนกับแบคทีเรีย พบว่า การใช้ก๊าซโอโซนในการทำน้ำให้บริสุทธิ์นี้ไม่ใช่เป็นวิธีที่ประหยัด เนื่องจากต้องใช้ความพยายามอย่างสูงในการสร้างสารประกอบที่สามารถออกซิไดส์ได้ในเวลานั้นจึงทำให้วิธีนี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานน้อยมาก ในปี 1906 ได้มีการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้น้ำบาดาลเป็นครั้งแรกที่เมือง Nice ประเทศฝรั่งเศส (Kinman, 1971) ในระยะเวลาต่อมาประเทศฝรั่งเศสได้มีการประยุกต์ใช้โอโซนมากขึ้นอันเป็นผล

เนื่องจากการวิจัยพบว่า โรคไทฟอยด์ และน้ำที่เป็นแหล่งกำเนิดของโรคต่างๆ ได้ถูกทำลายโดย การใช้ก๊าซโอโซน (de Lipkowiaki, 1937) และได้มีการรวบรวมข้อมูลที่เกิดขึ้นของโรคไทฟอยด์ และพาราไทฟอยด์ ที่เมือง Nice ประเทศฝรั่งเศส พบว่า น้ำดื่มที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยก๊าซโอโซน ไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคต่างๆ (Lebout, 1950)

จากการศึกษาเครื่องกำเนิดโอโซนจากโรงงานต่างๆ หลายแห่งในสหรัฐอเมริกา (Consoer, 1941) พบว่า ค่าใช้จ่ายต่อปีสำหรับการใช้ก๊าซโอโซน เช่นที่ เมือง Whiting คิดเป็นเงิน 4.44 \$ ต่อล้านแกลลอน ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มที่ถูกทำลายโดยก๊าซโอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซน ในน้ำ นั่นคือ 90.5 % โดยประมาณ สำหรับโอโซนที่ตกค้าง 0.06 mg/liter 94.5 % สำหรับโอโซนตกค้าง 0.08 mg/liter และ 98.0 % สำหรับโอโซนตกค้าง 0.16 – 0.20 mg/liter ในขณะที่ต้นทุนบาทบาทของโอโซนในอเมริกาจะนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดกลิ่น รส และแมงกานีสจากแหล่งน้ำที่นำมาใช้ประ โยชน (Bean, 1959)

(Smith et al., 1944) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงการใช้โอโซน และคลอรีนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ที่ค่าพีเอช (pH) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส พบว่า พีเอช (pH) 5.0 และ 6.0 สำหรับน้ำ 1 ลิตร มีแบคทีเรียอยู่ 8×10^5 bacteria/ml โอโซนจะใช้เวลาในการฆ่าเชื้อเหล่านี้เพียง 5 นาที , ที่ พีเอช (pH) 7.0, 8.0 และ 9.0 โอโซนใช้เวลาในการฆ่าเชื้อ 7.5 นาที ความเข้มข้นโอโซนเปลี่ยนแปลงจาก 0.13-0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางกลับกัน พบว่า ต้องใช้ความเข้มข้นของคลอรีนในการฆ่าเชื้อเหล่านี้ด้วยเวลาที่รวดเร็วเท่ากับกับโอโซน เป็น 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ พีเอช (pH) 5.0 ถึง 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ พีเอช (pH) 8.0 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขเดียวกันใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันอย่างมากในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำ นอกจากนี้ (Howlett, 1947) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่าการใช้ก๊าซโอโซนในการทำน้ำให้บริสุทธิ์จะมีราคาแพงกว่าการใช้คลอรีน แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะลดราคาค่าต้นทุนในการใช้ก๊าซโอโซนในค่าลงได้ในอนาคต ส่วน (Whitson, 1948) ได้สังเกตการทำงานเครื่องกำเนิดโอโซนที่ติดตั้งในปี 1936 มีความจุของโอโซน 10 mgd พบว่า ถึงแม้การกำเนิดโอโซนจะมีราคาแพงกว่าการใช้คลอรีน แต่ก็มีข้อที่ดีกว่าคลอรีน นั่นคือ น้ำที่ผ่าน โอโซน จะไม่มีก๊าซ โอโซนตกค้างอยู่หรือเจือปนอยู่ และไม่ทำให้คุณสมบัติของแบคทีเรียเสียไปซึ่งสังเกตได้จากน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยโอโซนแล้วส่งผ่านเข้าไปในระบบการส่งจ่ายน้ำ

(Leiguarda et al., 1949) ได้ทำการทดลองศึกษา การใช้ก๊าซโอโซนฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งในน้ำบริสุทธิ์และน้ำจากแม่น้ำ พบว่า น้ำเริ่มต้นที่มีเชื้อ 10^6 E.coli/ml. กับโอโซน 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ พีเอช (pH) 6.0 ทำให้อยู่ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส หลังจาก 5 นาที จะไม่พบแบคทีเรียที่มีชีวิตอยู่เลย และโอโซนที่มีอยู่ถูกทำให้ลดลงเป็น 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ พีเอช (pH) 8.0 และ

อุณหภูมิสูงๆ ความเข้มข้นของโอโซนถูกทำให้ลดลงอย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพของก๊าซโอโซนที่ เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อแบคทีเรียไม่ได้เป็นผลมาจากอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะมีผลเล็กน้อย ที่เกี่ยวข้องกับ พีเอช (pH) สำหรับน้ำที่มี *C. perfringens* 2×10^3 spores/ml. กับโอโซน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 15 นาที จะไม่พบสปอร์อยู่เลย เมื่อโอโซน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 2 นาที จะไม่พบสปอร์อยู่เลย ที่ พีเอช (pH) 8.0 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียถูกทำให้ลดลง นั่นคือ ปริมาณ โอโซน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร แม้เวลาผ่านไป 120 นาทีก็ไม่มีผลต่อสปอร์ ในปีเดียวกันนี้ (Ingram et al., 1949) ได้ศึกษาสภาพความไวของฟังไจ และแบคทีเรียที่มีต่อ โอโซนในน้ำ พบ ว่า น้ำที่มีโอโซน 0.5 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 1-3 นาที ที่จะทำลายเกราะป้องกันเชื้อเหล่านี้ได้ 99 % ต่อมา Novel และคณะ (1949) ได้ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อด้วย คลอรีนและ โอโซนในน้ำที่มาจาก Lake Geneva ใน Petit-Lac. ได้ผล ดังนี้ โอโซน ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดจำนวนแบคทีเรียที่ติดอยู่ที่ตัวกรองน้ำจาก 190/ml. ให้น้อยกว่า 1/ml. ภายใน เวลา 1 นาที ส่วนคลอรีน ความเข้มข้นเดียวกัน ลดจำนวนแบคทีเรียเหลือ 40/ml. ใช้เวลา 5 นาที และ ลดจำนวนแบคทีเรียเหลือ 2/ml. ใช้เวลา 40 นาที จากผลการทดลองหาจำนวนของโอโซนที่ต้องการ เพื่อประกันความปลอดภัยของน้ำจากแบคทีเรีย ผลที่ได้มีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำ จำนวนโอโซน โดยเฉลี่ยที่ต้องการสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ผ่านการกรองแล้วอยู่ที่ 0.5-0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ Gubelmann และคณะ (1953) ยังพบว่าสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์ได้อย่างรวดเร็วโดยการ เพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ต้องการในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Rohrer, 1952) ได้มีการรายงานผลการศึกษายับยั้ง poliomyelitis virus โดยใช้คลอรีนไดออกไซด์และโอโซน พบว่า การ เจือปนที่เพียงพอสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะต้องใช้ โอโซน 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนได ออกไซด์ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และ คลอรีน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hettche et al., 1953;1954;1955)

Dickeman et. al., (1954) รายงานการศึกษาผลกระทบของโอโซนที่มีต่อแบคทีเรียใน น้ำก๊อก และน้ำดิบ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จุลชีพที่ใช้ทดสอบ คือ staphylococci, enterobacteria, bacilli และ pseudomonads. ความเข้มข้นของโอโซนสามารถหาได้โดยการไตเตรด โอโอคิน-แม็ง ถ้าตัวอย่างน้ำดิบมีสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้จะต้องสูงขึ้นด้วย สรุปได้ว่าการคิดค้นการบำบัดน้ำควรจะให้โอโซนอยู่ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ เวลาการสัมผัสอย่างน้อย 5 นาที ได้มีรายงานสนับสนุนผลการศึกษาในส่วนนี้ กล่าวว่า การรวมสาร ที่มีอยู่ในน้ำกับโอโซนต้องคำนึงถึงการหาจำนวนของโอโซนที่จะใช้ในการบำบัดด้วย น้ำที่ไม่มีมล พินใช้ความเข้มข้นของโอโซน 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 5 นาที รับประกันว่าสามารถฆ่าเชื้อ

โรคได้หมด ส่วนน้ำที่เป็นมลพิษหรือน้ำที่มีแบคทีเรียสูงผิดปกติ ต้องใช้ความเข้มข้น 0.4-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Holluta et al., 1954)

(Bringman, 1955) ได้สังเกตพบว่า คลอรีน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมง ในการฆ่าเชื้อ *E. coli* 6×10^4 เซลล์ที่มีอยู่ในน้ำ ในขณะที่ โอโซน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 5 วินาที เท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 22 ถึง 37 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการยับยั้งด้วยโอโซน จะลดลงจาก 5 วินาที เป็น 0.5 วินาที ผลการทดลองจะชี้ให้เห็นว่า การฆ่าเชื้อด้วยโอโซนต้องคำนึง ถึงองค์ประกอบหลัก เหล่านี้คือ เวลาการสัมผัส, ความเข้มข้น โอโซน และอุณหภูมิของน้ำ เวลาการสัมผัสของโอโซนมีความสำคัญมากในการทำลายเชื้อ *E. coli* 99% ที่ความเข้มข้นของกรด hypochlorous เดียวกัน อัตราการตายสำหรับสปอร์ของ *Bacillus species* โดยการใช้โอโซนมากกว่า คลอรีนประมาณ 300 เท่า ในทำนองเดียวกันนี้ (Kessel et al., 1955) พบว่า โอโซนใช้เวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าคลอรีนในการลด polio myelitis virus ในขณะเดียวกันการฆ่าเชื้อไวรัสในสระว่ายน้ำจะต้องใช้คลอรีน 0.5 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1.5 - 2.0 ชั่วโมง ในขณะที่ใช้โอโซน 0.05 - 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 นาที ในปีเดียวกันนี้ (Lagrange et al., 1952) ได้ทำการ ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซนและคลอรีนในการทำลาย parasite schistosoma mansoni ในน้ำ พบว่า คลอรีน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ ในเวลา 4 นาที และ โอโซน 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 3 นาที ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่าง ระหว่างการใช้โอโซน และคลอรีน (Hann, 1956) พบว่า กระบวนการที่ใช้โอโซนมีราคาค่อนข้าง แพงกว่ากระบวนการที่ใช้คลอรีน โดยคำนึงถึงการใช้กำลังไฟฟ้าและต้นทุนของกระบวนการผลิต โอโซน ซึ่งเขาได้ตั้งข้อสังเกตว่า เนื่องจากเครื่องกำเนิดโอโซนและการทำงานส่วนใหญ่ใช้พลังงาน ไฟฟ้าในการดำเนินการ เครื่องทำน้ำขนาดใหญ่ใช้กำลังไฟฟ้า 10 kwh. บางที่ใช้ 12 - 15 kwh. ใน เครื่องขนาดเล็ก สำหรับการเชื้อโอโซน 1 ppm. ราคาทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงจาก 75 เซนต์ ถึง 2 ดอลลาร์ต่อ 1 ล้านแกลลอน ของน้ำที่บำบัด ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องและอัตราพลังงานทางไฟฟ้า

(Fetner et al., 1956) รายงานผลการทดสอบการฆ่าเชื้อด้วยโอโซน และคลอรีนกับ *E. coli* ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ในน้ำกลั่น โดยใช้โอโซนความเข้มข้น 0.4 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลาในการสัมผัสมากกว่า 1 นาที ส่วนคลอรีนจะใช้ความเข้มข้น 0.25 - 0.30 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ใช้เวลา 1 - 10 นาที ซึ่งการกระทำของคลอรีนต่อแบคทีเรียจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากความเข้มข้น และเวลาในการสัมผัส สำหรับโอโซนจะไม่มีผลถ้าความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้น โอโซนวิกฤติ (0.4 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

(Miller et al., 1959) รายงานถึงความเป็นไปได้ของการทำให้ปราศจากเชื้อโรคของของ เสียได้ด้วยโอโซน ผลจากห้องปฏิบัติการ พบว่า โอโซนประสบความสำเร็จไม่เพียงการทำให้

ปราศจากเชื้อโรคแต่ยังฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ในของเสีย *Bacillus anthracis*, *influenza virus* และ *B. subtilis morph globigii* และการยับยั้งสารพิษ ของ *Clostridium botulinum*. แล้วยังสนใจทดลองใช้ โอโซน 100 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที ในการทำให้ปราศจากโรคด้วย

(Guinvarc 'h, P. 1958) ได้เสนอผลการศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน Saint Maur ozone plant ในเมืองปารีส ประเทศฝรั่งเศส เป็นเวลา 3 ปี ซึ่งประกอบไปด้วยระบบ การกรองทราย และการตกตะกอนด้วย เฟอริกคลอไรด์ น้ำที่ผ่านโอโซนจะมีความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส การเพิ่มโอโซนจะถูกควบคุมโดยอัตโนมัติโดยการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ให้โอโซน หลังการบำบัด น้ำจะปราศจาก เชื้อ *E. coli* และจำนวนของ *C. perfringens* ลดลง 50%

(Army investigators, 1958) ได้หากระบวนการที่จะใช้ประโยชน์จากก๊าซโอโซนสัมพันธ์ กับสิ่งสกปรกเพื่อให้สิ่งสกปรกปราศจากเชื้อโรคอย่างมีประสิทธิภาพ และพัฒนาวิธีให้มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ในทางเศรษฐกิจได้ สิ่งมีชีวิตที่จะถูกทำลาย (Hopt. 1958) กล่าวว่า น้ำ ที่บรรจุด้วยสิ่งเจือปนควรจะถูกทำให้สะอาด ด้วยโอโซนจำนวนเพียงเล็กน้อยแทนที่จะใช้คลอรีน จำนวนมาก

(Piskunov et al., 1963) พบว่า โอโซน 1.1 - 3.6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3) ลดการ ปนเปื้อนของแบคทีเรียได้ถึง 94 % ลดสิ่ง 2 - 2.5 เท่า และ บีโอดี 30 % โดยประมาณ การเจือ โอโซน 0.27 - 1.0 6 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3) ตามด้วยการเติมคลอรีน, การตกตะกอน และการ กรอง มีผลกระทบที่ดีกว่าการเติมคลอรีนในขั้นตอนที่สอง โดยเฉพาะมีผลต่อค่า BOD และกำจัดสี การทดสอบในห้องปฏิบัติการวัด โอโซนตกค้างหลังจาก 2 ชั่วโมง เป็น 0.55 ถึง 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Suckov, 1964) ได้ศึกษาผลของการใช้โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพ สำหรับน้ำดื่มซึ่งเต็มไปด้วยแบคทีเรียและไวรัส เขายังได้สรุปปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลายๆ ชั่วโมง หลังจากการใช้โอโซน น้ำถูกทำให้ปราศจากเชื้อโรคอย่างไม่สมบูรณ์ (99.95%) แต่จะไม่เกิดขึ้นเมื่อ น้ำถูกฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนที่เจือปน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 15 นาที เป็นผลทำให้มีการ ยับยั้ง เอนเทอริโอไวรัส (enteroviruses) ได้ถึง 99.7 - 99.9 % โอโซนที่ตกค้าง 0.1 - 0.2 มิลลิกรัม ต่อลิตร ก็เพียงพอสำหรับการฆ่าเชื้อโรค สำหรับการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนได้รับผลกระทบเพียง เล็กน้อยจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และฟิเอซ (O' Donovan, 1965) การบำบัดด้วยโอโซนทำ ให้น้ำสะอาดและไม่มีการตกค้างของโอโซน ส่วนน้ำที่ได้มาโดยการบำบัดด้วยคลอรีนจะมีการตก ค้างของคลอรีนเหลืออยู่

(Gabovich, 1966) รายงานถึงผลกระทบทางเคมี และทางกายภาพของน้ำที่มีต่อการ ใช้ โอโซนอย่างมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค ได้มีการทดลองที่จะเลือกผลกระทบที่มีต่อแบคทีเรีย

กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำ จาก 4 - 6 องศาเซลเซียส และ 18 - 21 องศาเซลเซียส ใช้โอโซนเพิ่มขึ้น 60 % และใช้โอโซนเพิ่มขึ้นสุทธิ 20% ประสิทธิภาพของโอโซนที่นำไปใช้ประโยชน์ลดลง โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอช แต่การกระทำต่อแบคทีเรียไม่ได้ลดน้อยลง

(Drimal et al., 1990) รายงานถึงประสิทธิภาพในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ซึ่งสามารถประสบความสำเร็จได้ด้วยโอโซนในเซอร์ที่ขั้วอิเล็กโทรดเป็นท่อสำหรับการคิซซาร์จ (Janca et al 1985) มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซึ่งผลิตได้ทั้งโอโซนและรังสียูวี ซึ่งอุปกรณ์ประกอบด้วยหลอดแก้วสำหรับการคิซซาร์จ, ช่องว่างคิซซาร์จ, ท่อแก้วซิลิกาและชั้นของระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ท่อแก้วสำหรับการคิซซาร์จมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-50 มิลลิเมตร และช่องว่างสำหรับเป็นขั้วอิเล็กโทรดความยาว 50 เซนติเมตร เติมด้วยโอโซน นีออน+อาร์กอน+ปรอท ความดันรวมประมาณ 500 Pa. ท่อแก้วภายนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรและยาว 43 เซนติเมตร. อุปกรณ์นี้จะทำให้มีการคิซซาร์จแบบไซเลนท์ที่บริเวณช่องว่างคิซซาร์จ ประมาณ 1.5-3.0 มิลลิเมตร พร้อมทั้งมีการกระตุ้นให้มีการผลิตรังสียูวีได้อีกด้วยที่ขั้วอิเล็กโทรดภายในที่มีโอโซนของก๊าซต่างๆ ผสมอยู่ (ภาพประกอบ 1) ออกซิเจนหรืออากาศที่ไหลผ่านระบบจะใช้ซีโอไลต์และ P_2O_5 เป็นตัวดักจับไอน้ำ สำหรับความเข้มข้นโอโซนแสดงโดยการใช้การดูดกลืนทางแสง กำลังที่ใช้ของระบบการกำเนิดโอโซนนี้ คือ 11.5 Wh/gO₃ และ 7.0 Wh/gO₃ สำหรับการผลิตโอโซนความเข้มข้น 1 % จากอากาศแห้งและออกซิเจน ตามลำดับ

(Eliasson et al., 1986) รายงานว่า ผลผลิตโอโซนเป็นค่าที่ดีถึงการสร้างออกซิเจนอะตอมในการคิซซาร์จ และได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการวัดโอโซนในไซเรนที่คิซซาร์จต่อหน่วยพลังงานที่แน่นอน โดยหาได้จากอัตราสัมประสิทธิ์สำหรับการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนเนื่องจากการชนของด้วยอิเล็กตรอน และประสิทธิภาพของกระบวนการแตกตัว เปรียบเทียบผลการวัดกับการคำนวณที่ได้จากสมการ Boltzmann ซึ่งพัฒนาโดย Luft (1975)

(Harano et al., 1991) ได้รายงานผลการศึกษากการเพิ่มออกซิเจนให้กับเขม่าในไซเลนท์คิซซาร์จ เพื่อพัฒนาเทคนิคการกำจัดเขม่าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากเดิมการกำจัดเขม่าที่สะสมอยู่บนตัวกรองถูกทำให้ลดลงในไซเลนท์คิซซาร์จโดยการเติมน้ำหรือออกซิเจนไปจนถึงก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซนำพา ในกรณีระบบมีการไหลด้วย ความเข้มข้นของเขม่าถูกทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มเวลาให้เขม่าอยู่ในเครื่องทำปฏิกิริยาที่มีการคิซซาร์จนานขึ้น อนุภาคเขม่าถูกออกซิไดส์ด้วย OH radicals ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศตรวจสอบได้โดยการใช้ระบบ ไซเลนท์คิซซาร์จ (ภาพประกอบ 2) อัตราปฏิกิริยาของเขม่ากับ OH radicals หาได้โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

(Nomoto et al., 1995) ได้รายงานถึงการออกแบบและสร้างไอโซไนเซอร์เซลล์ที่มีการดิสชาร์จแบบผิวและดิสชาร์จแบบไซเลนท์ควบคู่กันไป (ภาพประกอบ 3) พบว่า การดิสชาร์จแบบไซเลนท์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อการดิสชาร์จแบบผิวบนขั้วไฟฟ้าแบบคอยล์กระทำร่วมด้วยซึ่งทำให้ปริมาณไอโซไนท์เพิ่มมากขึ้นถึง 110 g/kWh. ในกรณีของ $N_2 + O_2$ ผสมกัน และ 274 g/kWh. ในกรณีของออกซิเจน

(Eliasson et al., 1984) ได้รายงานถึงผลผลิตไอโซไนท์ที่ได้มาอย่างไม่น่าคาดหวัง จากการดิสชาร์จก๊าซผสม N_2/O_2 นอกจากนี้ยังมีอิเล็กตรอนที่ชนโดยตรงทำให้มีการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจน ทำให้ได้จำนวนออกซิเจนอะตอมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับไนโตรเจนโมเลกุลและไนโตรเจนอะตอมที่ได้รับการกระตุ้น การคำนวณภาคตัดขวางเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน สามารถยอมรับได้เป็นอย่างดีโดยการวัดผลผลิตไอโซไนท์และเวลาคงที่ในการสร้างไอโซไนท์

(Yamabe et al., 1994) ได้ศึกษาถึงหลอดกำเนิดไอโซไนท์ชนิดใหม่ซึ่งไม่มีโคอิเล็กทริกอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า (ภาพประกอบ 4) จะได้นำซึ่งการดิสชาร์จแบบเรืองแสง และได้ศึกษาถึงลักษณะพื้นฐานของการกำเนิดไอโซไนท์และความสามารถที่เป็นไปได้ในการพัฒนาผลผลิตไอโซไนท์สำหรับการวัดไอโซไนท์ใช้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 253 นาโนเมตร จากหลอดปรอทซึ่งผสม He/O_2 ที่ความดันบรรยากาศ

(Pignolet et al., 1990) ได้เสนอแบบจำลองรวมถึงปรากฏการณ์ส่งผ่านเพื่อคำนวณผลผลิตไอโซไนท์ในการดิสชาร์จแบบโคโรนาซึ่งมีลักษณะ Positive point to plane และได้ศึกษาผลของความดัน, อุณหภูมิ, ความเร็วการไหลเฉลี่ย, กระบวนการจลน์ และการแพร่กระจาย ที่ความดันต่างๆ พบว่า ผลผลิตสูงสุดของไอโซไนท์สามารถที่จะถูกเปลี่ยนแปลงด้วยภาวะที่เหมาะสมของความเร็วการไหลเฉลี่ย และเวลาที่สัมผัสกันของอนุภาคเริ่มต้นภายในปริมาตรที่มีการดิสชาร์จ

(Loiseau et al., 1993) ได้ศึกษาถึงรูปแบบจำลองรวมไปถึงปรากฏการณ์จลน์, ปรากฏการณ์ส่งผ่าน และความลาดเอียงของอุณหภูมิได้อธิบายในเชิงการกระจายของไอโซไนท์ตามแนวแกนและตามแนวรัศมี ในการป้อนออกซิเจนเข้าไปในไอโซไนเซอร์ซึ่งเป็นท่อทรงกระบอกสมมาตรแบบจำลองได้ทำขึ้นในกรณีของอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมซึ่งเป็นแบบ cylinder-to-cylinder พบว่าความลาดเอียงของอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีของห้องปฏิบัติการที่ไอโซไนเซอร์จะเป็นแบบ wire-to-cylinder ซึ่งในที่นี้ความลาดเอียงของอุณหภูมิตามแนวรัศมีมีความสำคัญ ที่ความดันบรรยากาศพลังงานจลน์ทางเคมีมีผลกระทบต่อการแพร่กระจาย

(Tan et al., 1991) ได้รายงานการใช้โอโซนและเมมเบรนบำบัดแหล่งน้ำบนผิวพื้นโลก ซึ่งประกอบไปด้วยดี และ DBP (disinfection by-product) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการใช้เมมเบรนเป็นเทคโนโลยีการบำบัดที่น่าจะนำไปใช้ได้ดี ในอนาคตอันใกล้

(Hegeler et al., 1997) ได้รายงานการศึกษาการวัดความหนาแน่นโอโซนโดยการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตหลังการปลดปล่อยกระแสบวกและลบในช่องว่างที่มีรูปทรงแบบ wire-to-plate ความยาว 45 เซนติเมตร ระยะระหว่างขั้วอิเล็กโตรด 2.5 เซนติเมตร ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับการวัดผลผลิตโอโซนด้วยการปลดปล่อยกระแสบวกอธิบายโดย (F. Hegeler, and H. Akiyama, 1997) หลังจากการปลดปล่อยกระแสบวกหรือลบอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองชนิดความหนาแน่นโอโซนสูงสุดจะอยู่บริเวณพื้นที่ด้านล่างของขั้วไฟฟ้าที่เป็นลวดตรงไปยังแผ่นศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ความหนาแน่นโอโซนจะลดลงอย่างรวดเร็ว การปลดปล่อยกระแสบวกผลิตความหนาแน่นโอโซนได้มากกว่าการปลดปล่อยกระแสลบ เป็น 2 เท่า โดยใช้ช่วงเวลาพัลส์เดียวกัน

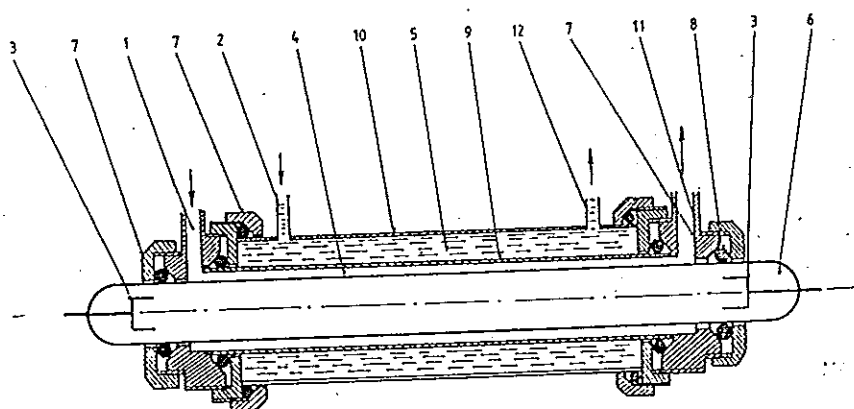
(Isobel et al., 1996) ได้รายงานว่า การแตกตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนเกาะตัวกันในโอโซนเกิดขึ้นเมื่อพลังงานอิเล็กตรอนตกกระทบอยู่ในช่วง 0-10 eV. พบว่า มีขอบเขตของการเรโซแนนซ์อยู่ 3 บริเวณ โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่ 1.4, 3.5 และ 7.5 eV. การแตกตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนเกาะตัวกันนี้ได้เคยรายงานมาแล้วโดย (Curran, 1961)

(Masuda et al., 1988) ได้พัฒนาโอโซนในเซอร์แบบใหม่ที่ใช้การคิซซาร์จตามผิวความถี่สูงเป็นแหล่งกำเนิด และเซรามิกอะลูมินาบริสุทธิ์มากเป็นส่วนประกอบโคอิเล็กทริก ชั้นเซรามิกจะบางมีรูปทรงทั้งแบบแผ่นและทรงกระบอก โอโซนเซอร์ (ภาพประกอบ 5) ที่เสนอนี้สามารถผลิตความเข้มข้นโอโซนได้สูงอย่างง่าย ๆ (5,000-15,000 volume PPM. สำหรับอากาศ; 50,000-100,000 volume PPM. สำหรับ ออกซิเจน) โดยไม่ได้มีอะไรพิเศษเพิ่มเติมขึ้นมาเลย และกำลังสามารถทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (ยกตัวอย่าง 170 gO₃/kWh. สำหรับอากาศ) โดยการเลือกพารามิเตอร์ที่ทำงานได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น โอโซนเซอร์นี้จะไม่ไวต่อความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม

(Roy et al., 1982) ได้รายงานถึงการศึกษาการยับยั้งเ็นเทอไวรัส (enteroviruses) ทั้ง 6 ชนิด ด้วยโอโซนหาได้โดยการให้การไหลอย่างต่อเนื่อง และตัวกระทำผสมอย่างสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขควบคุมในห้องปฏิบัติการ ความต้านทานสัมพัทธ์ของไวรัสต่อโอโซน พบว่า มีการลดต่ำลงเรียงตามลำดับ โปลิโอไวรัส 2 (poliovirus 2) , echovirus 1, โปลิโอไวรัส 1 (poliovirus 1) , coxsackievirus B5, echovirus 5, coxsackievirus A9 ความต้านทานของ โปลิโอไวรัส 2 (poliovirus 2) เป็น 40 เท่า ของ coxsackievirus A9 โดยประมาณ การยับยั้งเ็นเทอไวรัส (enteroviruses) ทั้ง 6 ชนิดนี้ ด้วยโอโซนพบว่า สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการยับยั้ง คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือพีเอช

ภาพประกอบ 1 ภาคตัดขวางของหลอดไอโซไนเซอร์

(ที่มา : Janca et al., 1985)

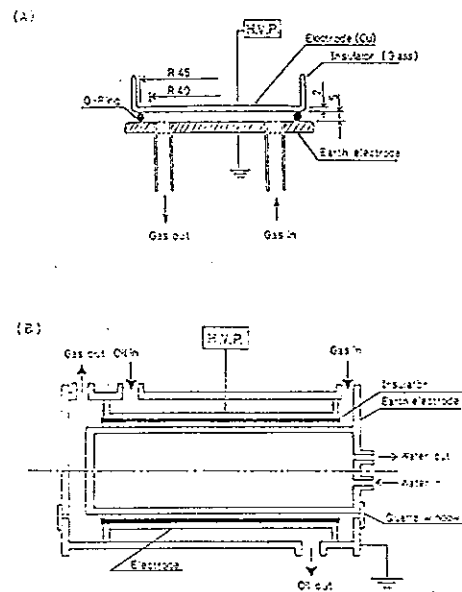


- 1: gas inlet; 2: cooling water inlet; 3 : hollow electrode;
- 4 : gas gap for formation the silent discharge;
- 5 : irradiated layer of colling water; 6 : inner discharge tube electrode;
- 7 : Teflon plug; 8 : silicon ring; 9 : silica tube; 10 : metal tube;
- 11 : gas outlet; 12 : cooling water outlet.

ภาพประกอบ 2 โอโซนไนเซอร์ที่มีอิเล็กโทรดแบบไซเรนซ์

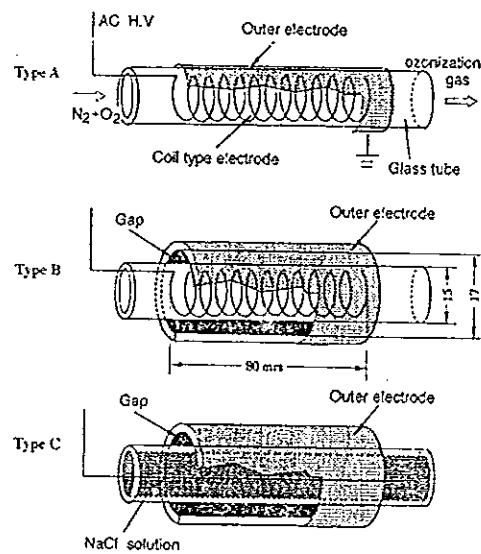
(a) รูปทรงแผ่นขนาน (b) รูปทรงกระบอก

(ที่มา : Harano A. et al., 1991)

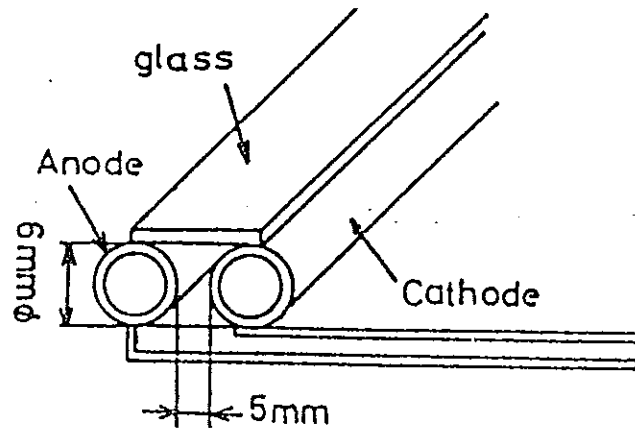


ภาพประกอบ 3 โคอะแกนของโอโซนไนเซอร์ที่ขั้วอิเล็กโทรดต่างๆ กัน

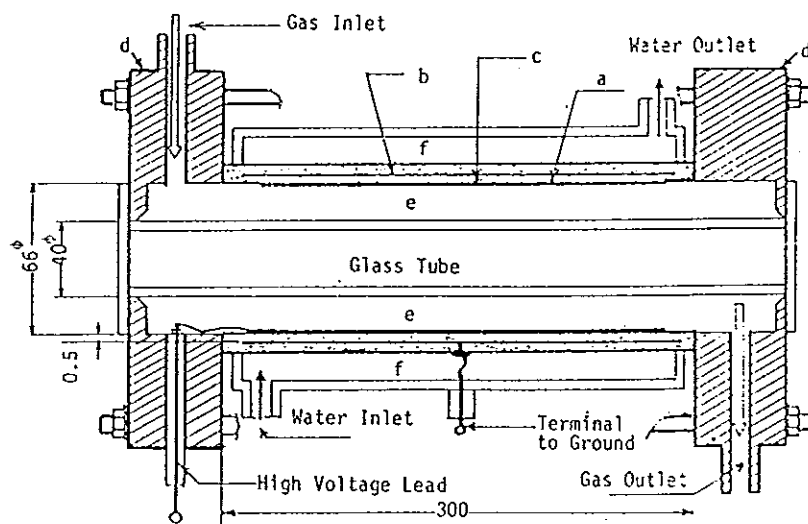
(ที่มา : Yukiharu N. et al., 1995)



ภาพประกอบ 4 ไอโซไนเซอร์ที่ไม่มีไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า
(ที่มา : Yamabe C. et al., 1994)



ภาพประกอบ 5 ภาคตัดขวางตามยาวของไอโซไนเซอร์แบบเซรามิกส์
(ที่มา : Masuda et al 1988)



- (a) Discharge electrode. (b) Induction electrode. (c) Inner ceramic layer
(d) Insulator Heads. (e) Gas passageway. (f) Cooling water jacket.

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการกำเนิด โอโซนที่ความดันบรรยากาศโดยเทคนิคการคายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge) แบบ ไชเลนท์
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบการกำเนิด โอโซนแบบท่อทรงกระบอก
3. เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการกำเนิด โอโซนของ อุปกรณ์
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำก๊าซ โอโซนไปใช้งานด้านการบำบัดและฆ่าเชื้อโรคของน้ำดื่ม, น้ำเสีย และน้ำในบ่อน้ำกึ่ง เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลองและวิจัยเป็นข้อๆ ไปตามลำดับ ดังนี้

2.1 ทฤษฎีการคายประจุแบบไซเลนท์

พลาสมาแบบสมดุลที่มีความดันต่ำหรือสนามไฟฟ้าแรงสูงมีอิเล็กตรอน และไอออนบางส่วนจะมีพลังงานจลน์โดยเฉลี่ยสูงกว่า พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่อย่างสุ่มของโมเลกุลพลาสมาแบบสมดุลที่มีความดันสูง อนุภาคที่ถูกเร่งจะไม่เคลื่อนที่ไปไกลมาก ก่อนที่จะมีการชนครั้งต่อไป หรือที่สนามไฟฟ้าต่ำมากๆ พลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเร่งอาจจะใกล้เคียงกับพลังงานจลน์ของนิวตรอน คือ สถานะที่เท่ากันของพลังงาน (Eliasson and Kogelschatz, 1991) การคายประจุแบบไซเลนท์ที่คายประจุเป็นการคายประจุก๊าซแบบไม่สมดุล สามารถทำงานที่ระดับความดันสูง (0.1 - 10 bar) (Eliasson and Kogelschatz, 1991) ซึ่งจะไม่เหมือนกับการคายประจุแบบไม่สมดุลอื่นๆ ความไม่สมดุลในที่นี้หมายถึง อิเล็กตรอนในพลาสมามีปริมาณพลังงาน หรืออุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคที่เป็นกลาง การคายประจุแบบไซเลนท์ซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิดขึ้นในก๊าซที่มีความดันสูงซึ่งประกอบด้วยปริมาณของกระแสฟิลาเมนต์ (current filament) ในช่วงสั้นๆ จำนวนมาก

การคายประจุแบบไซเลนท์จัดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีสถานะไม่คงตัว และไม่เป็นหนึ่งเดียว มันจะเป็นแหล่งกำเนิดของฟิลาเมนต์ที่ดีมาก และจะเกิดขึ้นเป็นช่วงๆ ซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานอิเล็กตรอนที่เพียงพอ กระแสไฟฟ้าจะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงจำนวนที่มากมายของสไปค์ (spikes) ระหว่างช่วงของความต่างศักย์ในขณะที่เกิดการคายประจุ

ข้อได้เปรียบของการคายประจุแบบไซเลนท์ (Eliasson and Kogelschatz, 1991) คือ 1) มีผลถึงพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงผลคูณของความหนาแน่นของก๊าซ (n) กับความกว้างของช่องว่าง (d) และ 2) สามารถทำให้เห็นขั้นตอนที่แตกต่างกัน 3 ขั้นตอนระหว่างช่วงวงจรชีวิตของฟิลาเมนต์แต่ละเส้น ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างการคายประจุ นั่นคือมีการเบรคความต่างไฟฟ้าเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาในการเกิดเสร็จสิ้นภายในนาโนวินาที (ns)

ขั้นตอนที่ 2 กระแสพัลส์ต่อมาหรือการถ่ายโอนประจุข้ามช่องว่างจะใช้เวลาในการถ่ายโอนกระแสภายใน 1-100 นาโนวินาที (ns) และ

ขั้นตอนที่ 3 ในเวลาเดียวกันจะมีการกระตุ้นของอะตอม และ โมเลกุลที่เกิดขึ้นด้วยเพื่อเป็นการเริ่มต้นของการเกิดพลังงานจลน์ ในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นและจะเสร็จสิ้นในช่วงเวลาดังแต่ ระดับนาโนวินาที (ns) ไปจนถึง วินาที (s)

ในการดิสชาร์จแบบไซเลนท์จะต้องมีเงื่อนไขพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

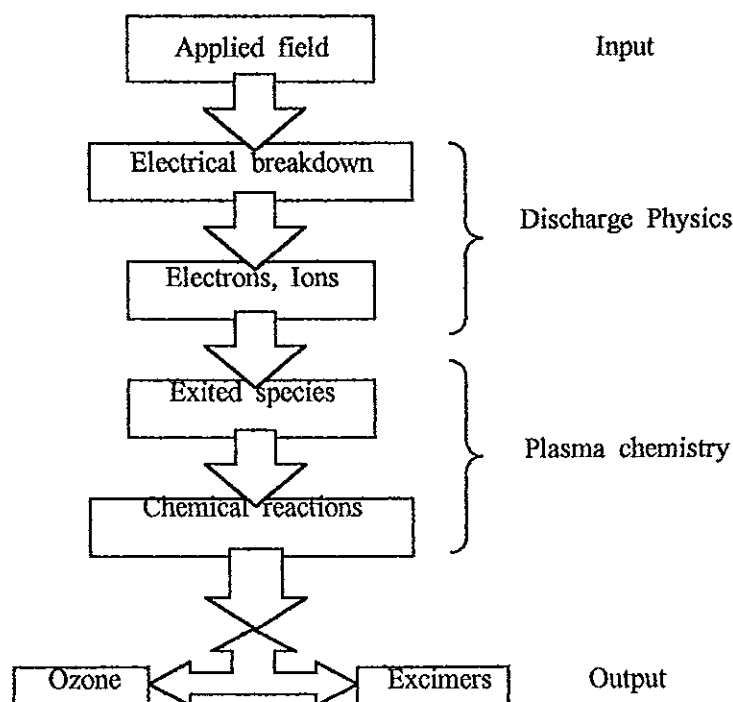
ลักษณะของพารามิเตอร์การดิสชาร์จแบบไซเลนท์ (Eliasson et al., 1991)

ความดัน (Pressure)	1	bar.
สนามไฟฟ้า (Electric field)	0.1-100	kV/cm.
สนามไฟฟ้าที่ถูกชักนำ (Reduced field)	1-500	Td.
พลังงานอิเล็กตรอน (Electron energy)	1-10	eV.
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density)	10^{14}	cm^{-3} .
ระดับขั้นของการ ไอออไนเซชัน (degree of ionization)	10^{-4}	ไร้หน่วย.

2.2 การสร้างไอออน

การสังเคราะห์ไอออนในการดิสชาร์จแบบไซเลนท์จัดเป็นการประยุกต์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในกระบวนการทางเคมี และกระบวนการดิสชาร์จแบบไม่สมดุล ในการดิสชาร์จปริมาตรทางเคมีจะเป็นการเร่งการเพิ่มขึ้นของอนุภาค (เช่น อนุภาค อิเล็กตรอน และไอออน) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคทางเคมี (เช่น อะตอม โมเลกุล และเรดิคัล) ปฏิกิริยาเหล่านี้ก่อให้เกิดการกระตุ้น และการแตกตัวของกลุ่มอนุภาคทางเคมีซึ่งหลังจากนั้นจะก่อให้เกิดการสังเคราะห์กลุ่มอนุภาคใหม่ทางเคมีขึ้น การเกิดขึ้นของไอออนจะแสดงได้ด้วยแผนภูมิความสัมพันธ์ของการดิสชาร์จทางฟิสิกส์และทางพลาสมาเคมีในการดิสชาร์จแบบไซเลนท์ ดังภาพประกอบ 6

ภาพประกอบ 6 แผนภูมิอธิบายความสัมพันธ์ของการดิสชาร์จทางฟิสิกส์ และพลาสมาเคมีในการ
ดิสชาร์จแบบไซเลนท์

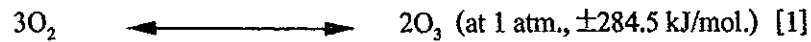


[ที่มา : Eliasson B. et al., 1991]

โอโซนถูกผลิตขึ้นในการดิสชาร์จแบบที่มีสารไดอิเล็กตริก (Dielectric) ขวางกั้น ลักษณะเด่นของการดิสชาร์จแบบนี้คือ แสดงให้เห็นถึงชั้นของไดอิเล็กตริกระหว่างช่องว่างของการดิสชาร์จ และที่ขั้วอิเล็กโทรดอย่างน้อย 1 ด้าน (Eliasson et al., 1987) จากเหตุผลนี้เองทำให้การดิสชาร์จแบบไซเลนท์ หมายถึง การดิสชาร์จแบบมีไดอิเล็กตริกขวางกั้น สารไดอิเล็กตริกมีหน้าที่สำคัญ 2 ประการ (Eliasson and Kogelschatz, 1991) คือประการแรกจะเป็นฉนวนป้องกันการอาร์คและสปาร์กของไฟฟ้าด้วยการจำกัดกระแสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดโดยการจำกัดปริมาณของประจุที่ถูกถ่ายโอนโดยไม่โครดิสชาร์จแบบเดี่ยว (Single microdischarge) และประการสุดท้ายสารไดอิเล็กตริกจะทำให้เกิดไมโครดิสชาร์จอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด โอโซนเซอร์ (Ozoniser) ที่เคยทำกันมานั้นใช้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 50 หรือ 60 Hz. ในขณะที่โอโซนเซอร์กำลังสูงในสมัยใหม่จะใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor) เป็นตัวป้อน ซึ่งจะควบคุมความถี่ให้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5-5 kHz. ทำให้ความหนาแน่นกำลัง (Power density) ในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น (Eliasson et al., 1987)

2.2.1 การสร้างโอโซนในอากาศ (Ozone generation in air)

โอโซน (O_3) มีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เสถียร เกิดจากการรวมกันของออกซิเจน 3 อะตอม ปฏิกิริยาทั้งหมดของการสร้างโอโซน อธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังสมการ (Bruno et al., 1991)

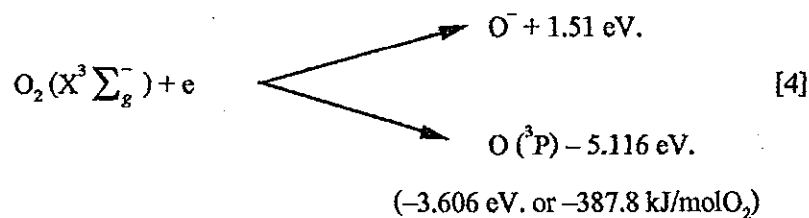


ในการผลิตโอโซนต้องเกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนซึ่งเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน สำหรับอะตอมออกซิเจนจะต้องใช้พลังงาน $493.3 \text{ kJ/mol } O_2$ และ $682.8 \text{ kJ/mol } O_2$ เปลี่ยนเป็นสถานะ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 7 (Francis, 1972)

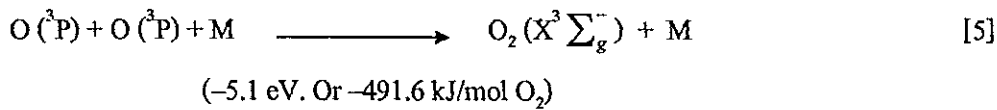


เมื่อ M หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ

การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนไปเป็นออกซิเจนในรูปของไอออนในปฏิกิริยาของโอโซน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกตัวได้จากอนุภาคอิเล็กตรอนหรือโฟตอน ที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำให้มีการดิสชาร์จไฟฟ้าภายในช่องดิสชาร์จ การกระทำของอิเล็กตรอนต่อออกซิเจนชักนำให้มีไอออนของออกซิเจนเกิดขึ้นหรือเกิดอะตอมของออกซิเจนระดับพลังงาน (3P)



ไอออนออกซิเจนสามารถที่จะกลับมารวมกันใหม่อยู่ในรูปโมเลกุลที่ระดับพลังงาน ($X^3\Sigma_g^-$) ของออกซิเจนได้โดยกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ออกมา ดังปฏิกิริยา

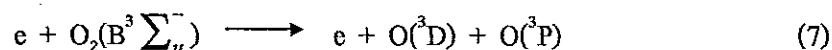
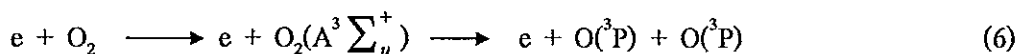


สำหรับการผลิตโอโซนจากอากาศให้มีประสิทธิภาพจำเป็นจะต้องทำให้อากาศมีค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ำๆ ไม่เพียงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่านั้นยังเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาจลน์ และสภาพการนำไฟฟ้าของผิวไดอิเล็กตริกซึ่งจะทำให้เกิดไมโครดิสชาร์จจำนวนมาก ในการดิสชาร์จจะให้นิโตรเจนไอออน N^+ , N_2^+ , อะตอมของไนโตรเจน และกลุ่มโมเลกุลและอะตอมในภาวะกระตุ้นซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนให้กับระบบปฏิกิริยา (Eliasson et al., 1991) ในอากาศจะประกอบไปด้วย ออกซิเจนประมาณ 20 % และไนโตรเจนประมาณ 80 % คำนวณการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในช่วงไมโครดิสชาร์จใช้โครงสร้างในการทำปฏิกิริยาถึง 143 ปฏิกิริยา (Eliasson et al., 1991) ดังแสดงในภาพประกอบ 8

ในการกำเนิดโอโซนในอากาศสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

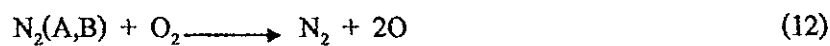
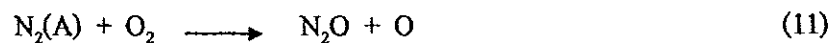
- 1.) ภายใต้เงื่อนไขปกติของโอโซนในซอร์นอกจากโอโซนแล้วยังตรวจพบออกไซด์ของ N_2O และ N_2O_2 อีกด้วย แต่ความเข้มข้นของออกไซด์มีขนาดต่ำกว่าความเข้มข้นของโอโซน
- 2.) ที่พลังงานจำเพาะสูงๆ การผลิตโอโซนจะล้มเหลวและไนโตรเจนออกไซด์จะถูกผลิตขึ้นเท่านั้น (ถ้าขีปนาวุธปลดปล่อยออกมา, ในส่วนของโอโซนจะน้อยลง) ในส่วนนี้พบว่าออกไซด์ของ NO และ NO_2 จะต่ำกว่า N_2O
- 3.) การผลิตโอโซนในอากาศ (ความเข้มข้นและประสิทธิภาพ) จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ควรจะเป็นถ้าประมาณว่าออกซิเจนในอากาศ 21%

ขั้นตอนปฏิกิริยาที่สำคัญส่วนใหญ่ที่นำไปสู่การสร้างโอโซนเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนโดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเหมาะสม (6-9 eV) ปฏิกิริยา three-body ในกลุ่ม O, O₂ และ M ซึ่งเป็นตัวร่วมในการชนอันดับสาม (O₂, O₃, ในอากาศจะมี N₂) ดังปฏิกิริยา ต่อไปนี้

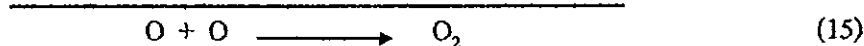
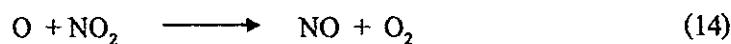
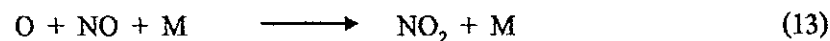


ในที่นี้ O_3^* เป็นกลุ่มโอโซนที่อยู่ในภาวะกระตุ้น

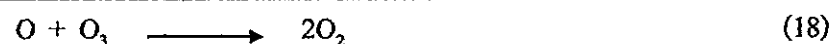
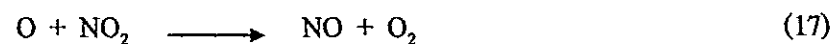
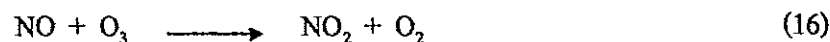
สำหรับการผลิตโอโซนในอากาศความเข้มข้นโอโซนไม่ผันตัวอย่างแน่นอน ความเข้มข้นโอโซนเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานจำเพาะที่ใช้เพิ่มขึ้น และอาจทำให้มีความเป็นพิษเกิดขึ้นซึ่งสัมพันธ์ต่อระดับของ NO_x (NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5) ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอะตอมไนโตรเจนหรือสถานะโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_g^-)$ และ $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$ มีปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (Eliasson et al., 1991)



ผลที่ได้เพิ่มขึ้นในปฏิกิริยาการรวมกันของอะตอมออกซิเจน เป็นดังปฏิกิริยา



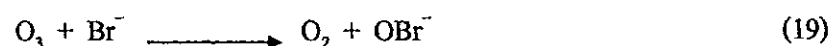
โอโซนจะถูกปฏิกิริยากระบวนการทำลายที่เกี่ยวข้องกับ NO และ NO_2 ปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

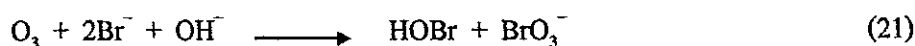
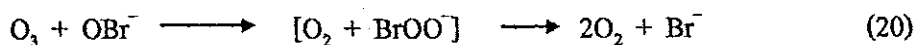


ปฏิกิริยาเหล่านี้มีความสำคัญในการสร้างโอโซนในอากาศและยังมีปฏิกิริยาที่ซับซ้อนอีกมากมายที่เกี่ยวข้องในการกำเนิดโอโซน ดูได้จากภาคผนวก (ง)

2.2.2 ปฏิกิริยาโอโซนกับน้ำทะเล

เมื่อนำน้ำทะเลผ่านโอโซนจะมีปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้น (Haag, et al., 1983)





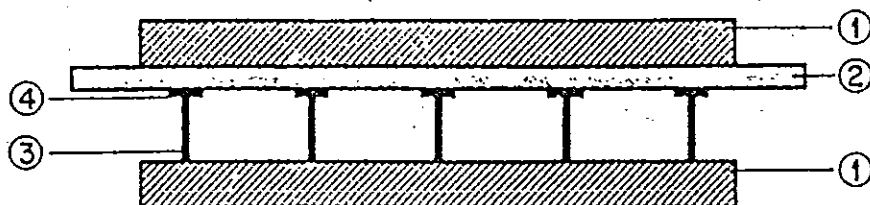
ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาถูกใช้ซึ่งทำลายโอโซนอย่างรวดเร็ว ความเข้มข้นของ Br^- น้ำทะเล เป็น 65-75 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ในปฏิกิริยากับโอโซนที่ความเข้มข้นสำหรับการฆ่าเชื้อโรคซึ่งเป็นปัจจัยหลักๆ ของการใช้โอโซนกับโบรมีนไฮดรอกไซด์ จากสมการที่ 21 พบว่าไม่มีข้อเสียอันเนื่องมาจากการสูญเสียโอโซน เพราะว่า HOBr ก็เป็นสารฆ่าเชื้อโรคที่ดีเยี่ยมเช่นกัน และปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้เพียงอย่างเดียว ถ้าส่วนสัมพันธ์ระหว่างก๊าซกับสารละลายที่ได้ออกแบบมีเงื่อนไขการไหลที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทระหว่างอากาศกับน้ำอย่างน้อย 80-85 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

2.3 การเกิดขึ้นของไมโครดิสชาร์จ และการเบรคดาวนทางไฟฟ้า

ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดการดิสชาร์จ ได้ถูกแสดงไว้ดังภาพประกอบที่ 9 โดยการประยุกต์ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในการดิสชาร์จแบบมีไดอิเล็กตริกขวางกันในออกซิเจนหรืออากาศที่ปริมาณ และระดับความดันบรรยากาศ การดิสชาร์จโดยการถ่ายโอนข้ามช่องว่างอากาศ (Space gap) ทำให้เกิดจำนวนของไมโครดิสชาร์จ (Microdischarge) ที่มีอายุช่วงสั้นๆ จำนวนมากมาย ไมโครดิสชาร์จเหล่านี้จะถูกแบ่งกันไปในที่ว่างและช่วงเวลาต่างๆ ที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดนั้นกระแสการขจัด (Displacement current) มีค่าเท่ากับศูนย์ ($du/dt = 0$; U : ศักย์ไฟฟ้า และ t : เวลา) และการทำงานของไมโครดิสชาร์จจะสิ้นสุดลง และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อมีการเบรคดาวนของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างครั้งคลื่นถัดไปเท่านั้น (Eliasson et al., 1991)

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการดิสชาร์จแบบไซเรนทในการสร้างเซลล์โอโซนเซอร์เพื่อผลิตก๊าซโอโซน ซึ่งมีลักษณะของโอโซนเซอร์ที่ใช้ในการผลิตโอโซนเป็นดังภาพประกอบที่ 10 ลักษณะของไซเรนทดิสชาร์จแบบไม่สมดุลเป็นปรากฏการณ์ที่อยู่ระหว่างการดิสชาร์จแบบโคโรนา และการดิสชาร์จแบบเรืองแสง เกิดขึ้นที่ความดันสูงๆ ประมาณ 1 บรรยากาศ (1 atm) หรือสูงกว่านี้ ทำให้เทคนิคนี้เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้อย่างมากมาย เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบสุญญากาศ ระบบการดิสชาร์จแบบนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ท่อแก้ว ช่องว่างดิสชาร์จ แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ แหล่งจ่ายความถี่วิทยุ (RF) หรืออาจใช้ควบคู่กันทั้งสองอย่าง

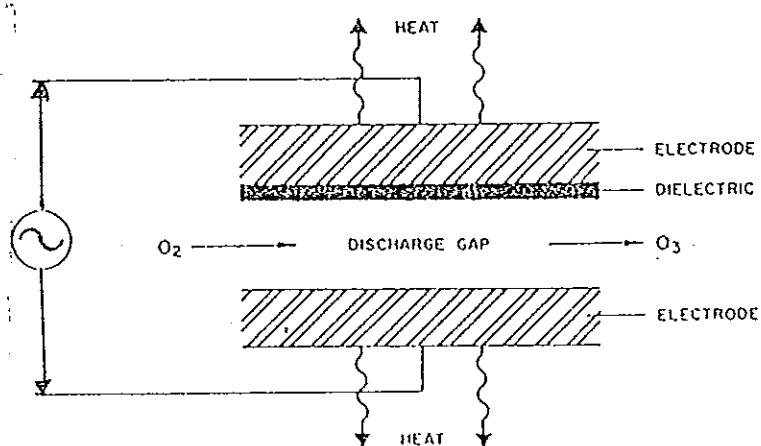
ภาพประกอบ 9 แสดงโครงสร้างของไมโครดิสชาร์จภายในช่องว่างอากาศ



1 : electrodes ; 2 : dielectric ; 3 : microdischarge channel and 4 : surface discharge

[ที่มา : Kogelschatz U. 1987]

ภาพประกอบ 10 แสดงลักษณะของโอโซนในเซอร์เชลล์ ที่อาศัยเทคนิคไซเลนทด์ิสชาร์จ



(ที่มา : หนังสือ Ozone in water and wastewater treatment, 1977, USA)

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงลักษณะพารามิเตอร์ต่างๆ ในทางฟิสิกส์มีผลต่อการกำเนิดไอโซน และผลการนำก๊าซไอโซนไปประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ในแหล่งน้ำต่างๆ ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยนี้ แสดงได้ดังรายการต่อไปนี้

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงได้ดังรายการต่อไปนี้ คือ

1.1 สารเคมีเกรดเชิงวิเคราะห์ ใช้ในการเตรียมสารละลาย สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ

ไอโซนที่ผลิตได้ในอากาศ

1.1.1 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)

1.1.2 ไอโอดีน (I)

1.1.3 โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

1.1.4 โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)

1.2 สารซีโอไลต์ (Zeolite) ชนิด 5A สำหรับดูดซับความชื้นอากาศ

1.3 แผ่นอะลูมิเนียมบาง (Aluminum foil)

1.4 ท่อ พีวีซี (PVC Tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว

1.5 ท่อโพลีโพล ขนาด 0.25 นิ้ว ของ Metalurgica Detroit

1.6 โลหะไร้สนิม (Stainless steel) เพื่อใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า

1.7 หลอดทดลอง (Test tube) ขนาด 10 มิลลิลิตร

1.8 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 200 มิลลิลิตร

1.9 Volume Flash ขนาด 25, 50, 100 และ 2,000 มิลลิลิตร

1.10 ไมโครปิเปต ขนาด 50 ถึง 1,000 ไมโครลิตร

1.11 กาวฮอตเมลท์ที่อบกึ่ง ของ บริษัท เพชรมาร์เก็ตติ้ง จำกัด ซึ่งต้องใช้คู่กับปืนกาว

1.12 แก้ว / O-ring / หัวบรรจุแก๊ส / ข้อต่อทองเหลือง , สเตนเลส

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งอุปกรณ์ออกเป็นประเภทของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถแยกเป็นตอนๆ ได้ดังนี้

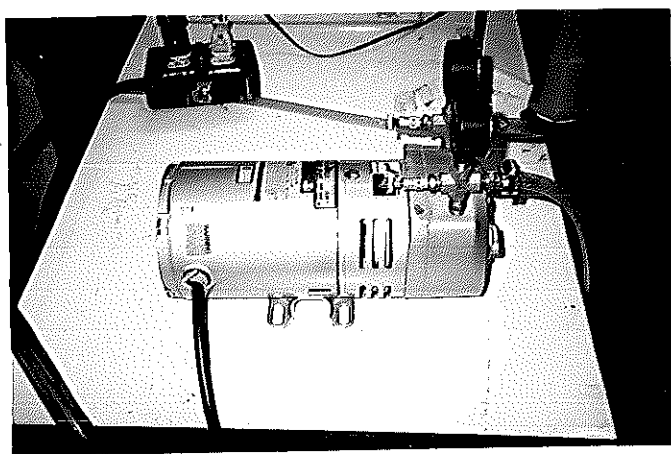
ตอนที่ 1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ และสร้างเครื่องกำเนิดไอโซนที่มีเซลล์ไอโซไนเซอร์
คิตชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์

ตอนที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโซน

ตอนที่ 1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดไอโซนที่มีเซลล์ไอโซไนเซอร์
คิตชาร์จแบบไซเลนท์

1. ตัวสูบลูกสูบแบบไม่ใช้น้ำมัน (Oil-less Pump) 220 โวลต์, 0.25 แรงม้า, 2.8 แอมแปร์, 50 เฮิร์ตซ์, single phase และโมเดล 0523-101Q-G21DX (บริษัท GAST)
2. ตัวต้านทาน (Resistor) ขนาด 300 กิโลโอห์ม ($k\Omega$), 200 วัตต์, Type J. (ยี่ห้อ IRH)
3. หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง (Transformer) กระแสสลับ (A.C.) ขนาด 15 กิโลโวลต์ 30 มิลลิแอมแปร์ (mA.) (บริษัท Thai Sanyo Denki)
4. เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนค่าได้ (Variac) ตั้งแต่ 0 ถึง 240 โวลต์ (บริษัท CHUAN HSIN) กระแสสลับ
5. มาตรฐานวัดศักย์ไฟฟ้า (Volt meter) กระแสสลับ ตั้งแต่ 0-300 โวลต์ (ยี่ห้อ TEE)
6. มาตรฐานวัดอัตราการไหลอากาศ (Flow rate meter) ตั้งแต่ 0-22 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (บริษัท MATHESON)
7. สายเคเบิล (Cable) ไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 40 กิโลโวลต์ และ 15 กิโลโวลต์ รหัส RS 388-142 (บริษัท RS)
8. มาตรฐานวัดกำลังไฟฟ้า (Watt hour meter) ขนาด 220 โวลต์ (V) 5 แอมแปร์ (A) 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) 1 เฟส และ Type DD28
9. ชุดกระเปาะเป็ยกและแห้ง สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
10. ปืนกาว (Glue gun) รุ่น TG-05 ของไดห์วัน

ภาพประกอบ 11 แสดงตัวสูบลมแบบไม่ใช้น้ำมัน



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะของตัวต้านทาน ที่ใช้ในงานวิจัย



30 กิโลโ

Japan

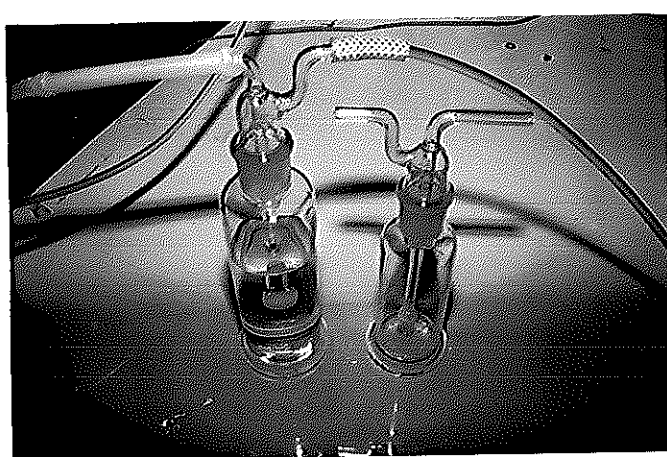
คิกพีวีซี

การได้ปริ

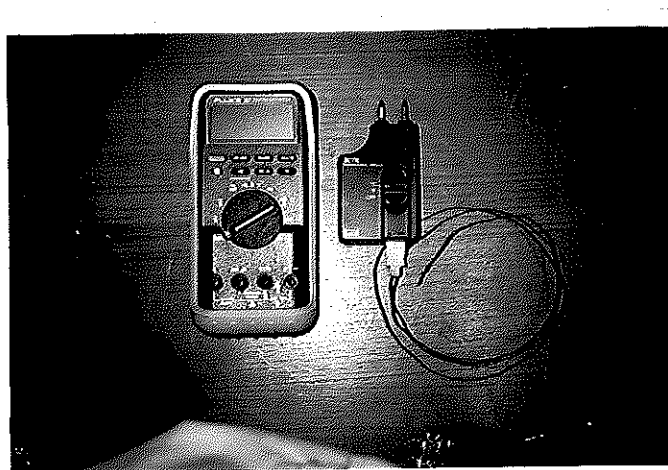
กเซกเซีย

ภายนอก

ภาพประกอบ 15 แสดงลักษณะของ Midget Impinger ขนาด 125 และ 250 ml. ที่ใช้เป็น
ส่วนสัมผัสระหว่างก๊าซและสารละลาย ในการวิจัย



ภาพประกอบ 16 เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุ



วิธีดำเนินการ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้คือ

- ตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างระบบการกำเนิดไอโซนที่ความดันบรรยากาศแบบต่างๆ และเปรียบเทียบผลผลิตไอโซนที่ได้จากหลอดไอโซไนเซอร์แบบต่างๆ
- ตอนที่ 2 ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไอโซนของเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่มีดิสชาร์จแบบไซเลนท์
- ตอนที่ 3 ศึกษาการประยุกต์ใช้ก๊าซไอโซนที่ผลิตได้กับการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำดื่ม ผ่านการกรอง, น้ำทิ้ง และน้ำนาเกลือ

ตอนที่ 1 ศึกษาหลักการ,ออกแบบและสร้างระบบการกำเนิดไอโซนที่ความดันบรรยากาศซึ่งเซลล์ไอโซไนเซอร์มีดิสชาร์จแบบไซเลนท์

ในตอนนี้จะได้ศึกษาหลักการของเซลล์ไอโซไนเซอร์ และระบบการกำเนิดไอโซนทั้งหมด รวมไปถึงการออกแบบและสร้างเซลล์ไอโซไนเซอร์ และระบบทั้งหมด ในการศึกษานี้ได้แบ่งระบบการกำเนิดไอโซนออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้ คือ (1) เซลล์ไอโซไนเซอร์; (2) ระบบการเตรียมอากาศ และ (3) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ เพื่อให้ง่ายในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำเนิดไอโซน ทั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาวิจัยออกเป็น ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการออกแบบเซลล์ไอโซไนเซอร์
2. ศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

1. ทฤษฎี และหลักการออกแบบ

ไอโซไนเซอร์เซลล์เป็นอุปกรณ์รูปแบบหนึ่งทางไฟฟ้าที่มีดิสชาร์จแบบไซเลนท์ (Silent discharge) ซึ่งใช้ในการกำเนิดก๊าซไอโซน โดยใช้ไฟฟ้าศักย์สูงกระแสสลับที่กำเนิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ โดยที่ต่ออนุกรมเซลล์ไอโซไนเซอร์ซึ่งมีช่องว่างดิสชาร์จ (Discharge gap) ให้อากาศไหลผ่าน ส่วนเซลล์ไอโซไนเซอร์เมื่อต่ออยู่ในวงจรจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง เมื่อให้ไฟฟ้าศักย์สูงกระแสสลับคร่อมช่องว่างจะทำให้เกิดดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ขึ้น ซึ่งเซลล์ไอโซไนเซอร์จะกำเนิดก๊าซไอโซนเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

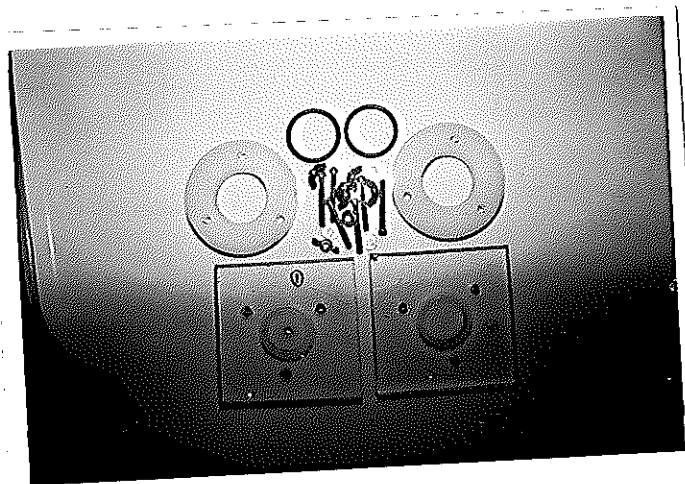
1.1 วัสดุและวิธีการ

1.1.1 เซลล์ไอโซไนเซอร์

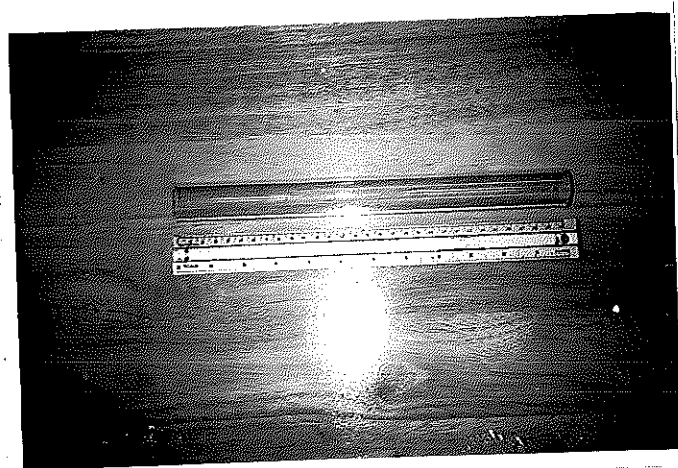
จากภาพประกอบ 17 จะพบว่าเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 อัน ที่ทำจากโลหะไร้สนิม มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกภายในกลวงวางซ้อนกัน โดยที่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีท่อแก้วทนความร้อนวางกั้นอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำให้มีช่องว่างการคายประจุ (Discharge gap) ระหว่างอิเล็กโทรดภายนอกกับผิวภายนอกของท่อแก้วทนความร้อน แต่เนื่องจากมีปัญหาเกี่ยวกับช่องว่างที่ไม่เหมาะสมที่พอดีระหว่างผิวภายนอกของอิเล็กโทรดภายในกับท่อแก้วทนความร้อนผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมบางพันรอบขั้วอิเล็กโทรดภายในเพื่อให้อิเล็กโทรดภายในแนบกับท่อแก้วทนความร้อน ซึ่งจะได้ช่องว่างการคายประจุ (Discharge gap) ประมาณ 2.45 มิลลิเมตร ด้านปลายทั้งสองของขั้วอิเล็กโทรดจะมีแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งเจาะรูเป็นวงกลมให้อิเล็กโทรดทั้งสองสามารถฝังเข้าไปอยู่ในเนื้อได้ และเทฟลอนที่จะเจาะรูสำหรับยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียม พร้อมทั้งป้องกันการรั่วของก๊าซระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมและเทฟลอนด้วยการใช้โอริงซิลิโคน ปลายด้านหนึ่งจะมีอิเล็กโทรดโผล่ออกมาจากภายในต่อกับสายไฟฟ้าแรงดันสูง ส่วนอีกด้านหนึ่งจะต่อกับอิเล็กโทรดภายนอก (ดูได้จากภาพประกอบ 16) สำหรับการทดลองนี้ได้เลือกเซลล์ไอโซไนเซอร์ขนาดความยาว 0.3 เมตร ในการทดลองศึกษาวิจัย

ภาพประกอบ 17 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบของเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

(ก) แผ่นอะลูมิเนียม พลาสติกและน็อต



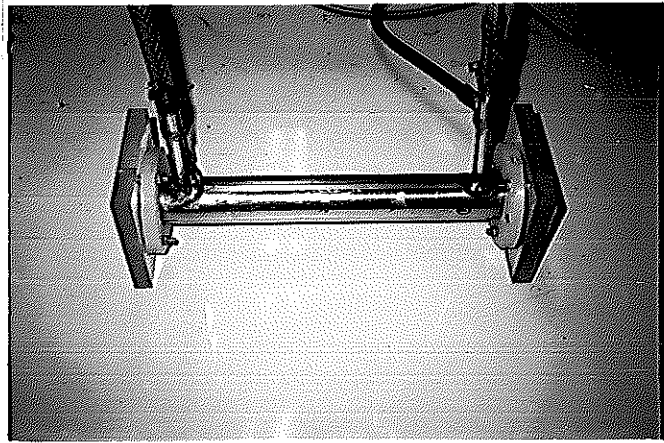
(จ) ท่อแก้วทนความร้อน (Pyrex tube)



(ค) อิเล็กโตรดภายใน และภายนอก



ภาพประกอบ 18 แสดงภาพถ่ายเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว



เนื่องจากเซลล์ไอโซไนเซอร์มีองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับลักษณะของตัวเก็บประจุ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าสำหรับเซลล์ไอโซไนเซอร์แบบท่อทรงกระบอก จำนวนได้จากสูตร (Francis, 1972)

$$C(f) = (2\pi\epsilon\epsilon_0 L)/(r_e/r_i) \quad [22]$$

เมื่อ : r_e, r_i = รัศมีภายนอกและภายในของขั้วไฟฟ้า, เมตร (m)

L = ความยาวของขั้วไฟฟ้า, เมตร (m)

ϵ = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดเมตร

ϵ_0 = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์, ไร้หน่วย

$C(f)$ = ค่าความจุไฟฟ้า, ฟารัด

สำหรับที่เงื่อนไขเหมาะสม การผลิตโอโซนขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้
(Rosen, 1973)

$$V \cong pg \quad [23]$$

และ

$$(Y/A) \cong \frac{f\varepsilon V^2}{d} \quad [24]$$

เมื่อ (Y/A) = ผลผลิตโอโซนต่อหน่วยพื้นที่ของผิวอิเล็กโทรดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม

V = ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดตกคร่อมช่องว่างคิซาร์จ , โวลต์ (V)

p = ความดันก๊าซในช่องว่างคิซาร์จ , ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psia)

g = ความกว้างของช่องว่างคิซาร์จ , นิ้ว (in)

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า , เฮิรตซ์ (Hz)

ε = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

d = ความหนาของไดอิเล็กตริก , นิ้ว (in)

เมื่อคำนวณจรรยาบรรณค่าของพลังงานไฟฟ้าของเซลล์โอโซนในเซอร์ ก็สามารถนำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณหาพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้เกิดโอโซนของระบบได้โดยสูตร ดังต่อไปนี้

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad [25]$$

ในที่นี้ E = พลังงานไฟฟ้า, จูล (J)

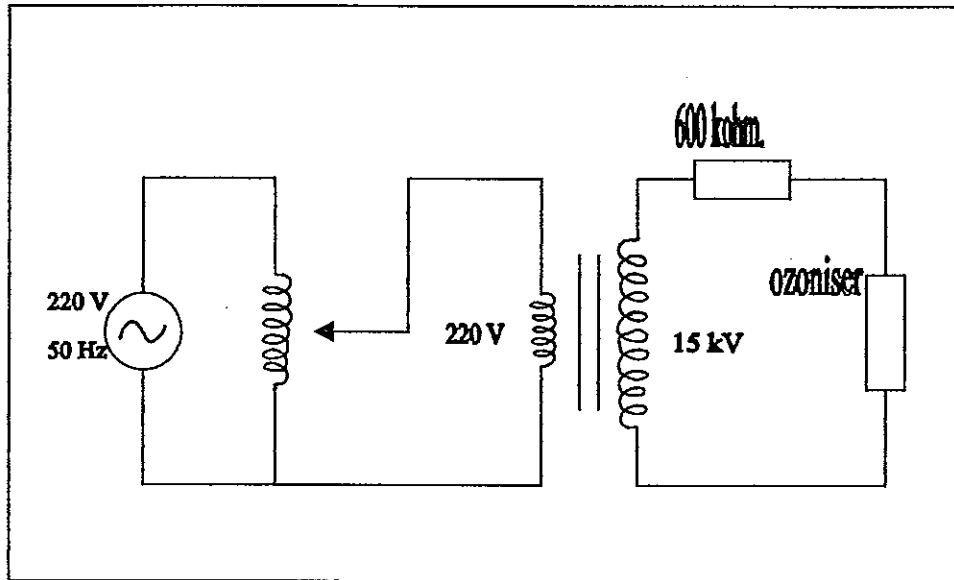
C = ความจุไฟฟ้า, ฟารัด (F)

V = ศักย์ไฟฟ้า, โวลต์ (V)

1.1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสลับ

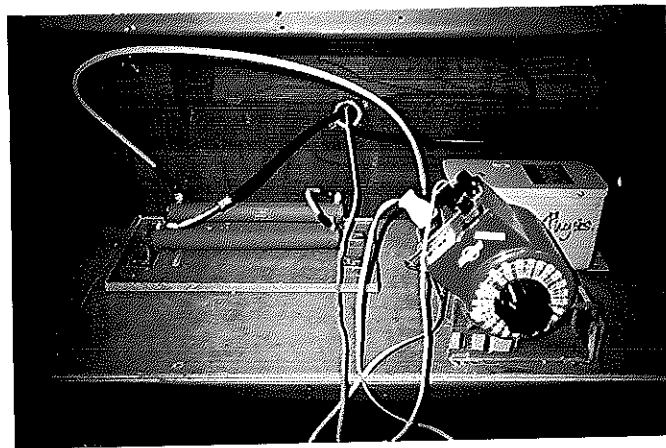
รายละเอียดของวงจรที่ใช้แสดงได้ดังภาพประกอบ 19

ภาพประกอบ 19 แสดงวงจรจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ที่ต่ออนุกรมกับเซลล์โอโซนไนเซอร์

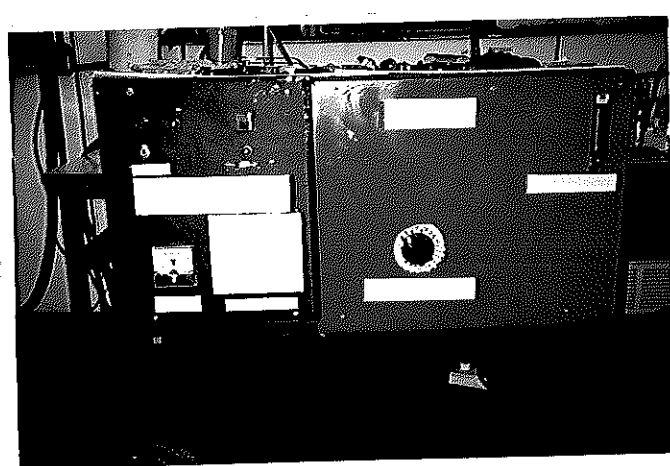


วงจรนี้ประกอบด้วย โวลต์มิเตอร์ที่ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 240 โวลต์ ซึ่งจะต่อเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ขนาด 0 ถึง 15 กิโลโวลต์ จากหม้อแปลงจะต่อเข้ากับตัวต้านทานขนาด 600 กิโลโอห์ม ($k\Omega$) ทนกำลังไฟฟ้าได้ 400 วัตต์ (W) เพื่อจำกัดกระแสที่จะเข้าไปยังโอโซนไนเซอร์เซลล์และใช้ป้องกันกระแสไหลกลับมายังหม้อแปลงไฟฟ้า ก่อนที่จะนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปใช้กับโอโซนไนเซอร์เซลล์จะต้องมีการปรับเทียบไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกมาที่ค่าโวลต์เทจที่ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเสียก่อน โดยใช้โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Voltmeter)

ภาพประกอบ 20 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ



ภาพประกอบ 21 แสดงภาพถ่ายแผงควบคุมด้านหน้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง

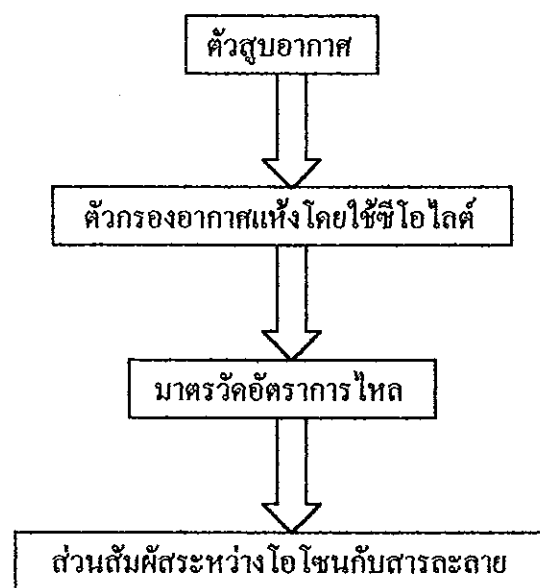


จากภาพประกอบ 19 จะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ป้อนให้กับเซลล์ไอโซไนเซออร์นี้ไม่มีความสลับซับซ้อน และง่ายในการนำไปปฏิบัติ

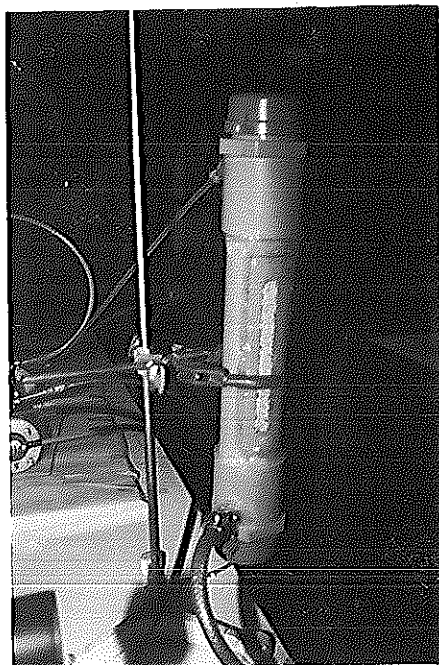
1.1.3 ระบบการเตรียมอากาศ (Air preparation of system)

ในการทดลองได้เลือกใช้อากาศความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้องปกติและห้องปรับอากาศ ในการผลิตก๊าซไอโซน ที่เลือกอากาศเนื่องจากคำนึงถึงความปลอดภัย และเป็นสิ่งที่มีอยู่แล้วในบรรยากาศพื้นผิวโลกซึ่งหาได้ง่ายอีกด้วย นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการนำประยุกต์ใช้งานจริง ในสถานที่จริงนอกห้องปฏิบัติการเมื่อมีการพัฒนาระบบต่อไปในอนาคต

ภาพประกอบ 22 ไคอะแกรมของระบบการเตรียมอากาศ



ภาพประกอบ 23 แสดงภาพถ่ายตัวกรองอากาศแห้งที่ใช้สาร Zeolite 5A สร้างขึ้นเองที่ใช้ในงานวิจัย

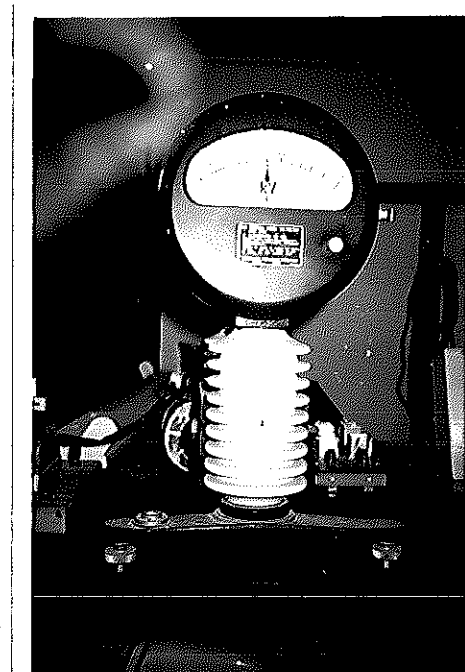


จากภาพประกอบ 23 พบว่าตัวกรองอากาศแห้งประกอบด้วยพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นส่วนห่อหุ้มเนื้อสารซีโอไลต์ทั้งหมด โดยที่ปลายทั้งสองด้านของพีวีซีนี้จะมีท่อให้ก๊าซผ่านเข้า-ออก และภายในจะกั้นด้วยแผ่นโลหะไร้สนิมเจาะรูอย่างสมมาตรกันด้านปลายทั้งสอง พร้อมทั้งมีฟองน้ำใยสังเคราะห์รองอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ซีโอไลต์แพร่กระจายเข้าไปในโอโซนเซอร์ การที่เลือกใช้ซีโอไลต์เนื่องจากเป็นสารที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่าย และซีโอไลต์ยังมีคุณสมบัติในการดูดซับไอน้ำ ซึ่งจะช่วยให้การผลิตก๊าซโอโซนมีปัญหาลดน้อยลง

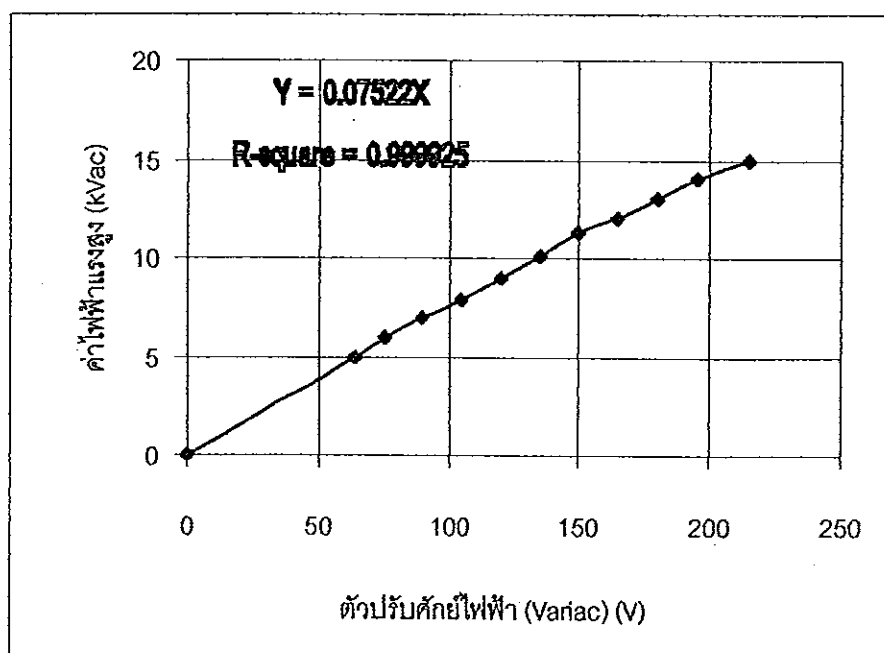
2. การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสกลับของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสกลับ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับโอโซนเซอร์จะให้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสกลับออกมาอยู่ในช่วง 0 ถึง 15 กิโลโวลต์ ซึ่งผู้วิจัยจะต้องทำการปรับเทียบให้ทราบตำแหน่งของตัวปรับศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนก่อนเข้าห้อมแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร โดยใช้อุปกรณ์ซึ่งเป็นมิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic meter) วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกจากห้อมแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

ภาพประกอบ 24 แสดงภาพถ่ายมิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต ที่ใช้ในการปรับเทียบไฟฟ้าแรงดันสูง
กระแสลับของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพประกอบ 25 แสดงค่าการปรับเทียบศักย์ไฟฟ้าก่อนเข้าห้อแปลงกับศักย์ไฟฟ้าแรงสูง



ตอนที่ 2 ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตโอโซนของเซลล์โอโซนไมเซอร์

ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนโดยการควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องให้คงที่ พร้อมทั้งจัดระบบการกำเนิดโอโซนและทดสอบการทำงานของระบบว่าสามารถที่จะทำงานได้จริงหรือไม่ ในตอนนี้จะแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็นลำดับดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการในการวัดโอโซนทางกายภาพและทางเคมี
2. ศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบการกำเนิดโอโซนทั้งหมด
3. ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการผลิตโอโซนของระบบ
4. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่อการผลิตก๊าซโอโซนที่ภาวะเหมาะสมของระบบ
5. ศึกษาผลการทดลองที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผลิตโอโซนของระบบ

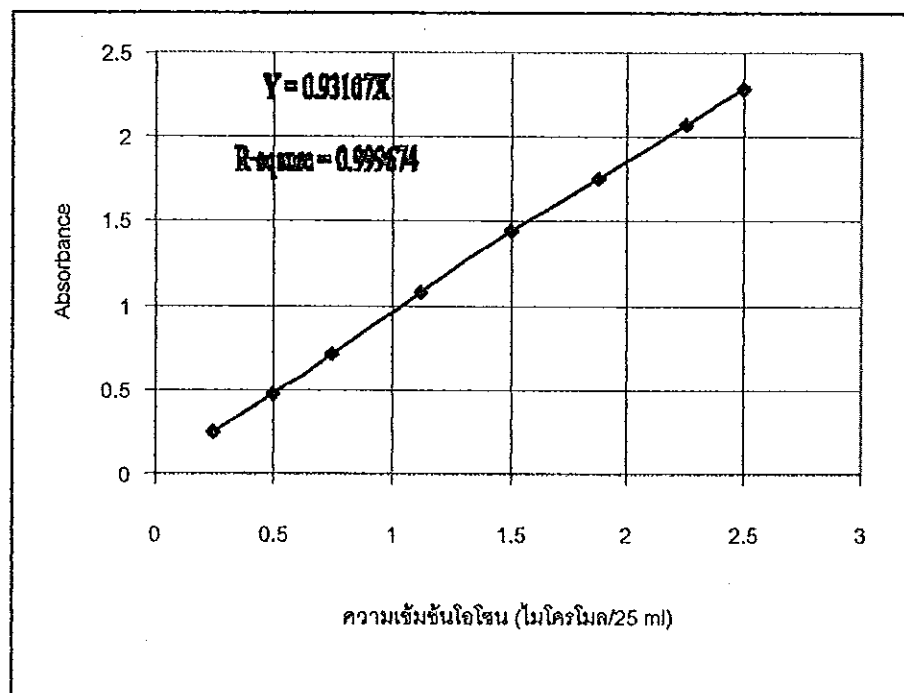
1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการในการวัดโอโซนทางกายภาพและทางเคมี

ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้นี้จะต้องมีวิธีการวัดที่แม่นยำและน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่ความดันบรรยากาศมีการสลายตัวไปเป็นออกซิเจนได้ในเวลารวดเร็ว ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกวิธีโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI Method) ซึ่งเป็นวิธีการวัดโอโซนในอากาศที่อยู่ในวิธีมาตรฐาน (Moris, 1977) วิธีนี้อาศัยหลักการที่ก๊าซโอโซนจะไปออกซิไดส์ (Oxidise) สารประกอบไอโอไดน์ (เตรียมจาก KI 1%) ซึ่งไม่มีสีให้เปลี่ยนเป็นสีของไอโอไดน์ แล้วนำไปอ่านค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร ปฏิกริยาที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซโอโซนที่ทำกับสารประกอบไอโอไดน์จะเป็นดังนี้ (Moris, 1977)



ค่าการดูดกลืนที่อ่านได้ต้องนำไปเทียบกับกราฟการปรับเทียบมาตรฐานที่ทำไว้ก่อนในขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ค่าที่อ่านได้จากกราฟจะเป็น ไมโครโมลโอโซนต่อปริมาณสารที่ใช้เตรียม ในการทดลองนี้จะเป็น $\mu\text{mol O}_3/25 \text{ ml}$. แล้วนำค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐานนี้ไปคำนวณเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นของโอโซนซึ่งดูได้จาก ภาคผนวก ก.

ภาพประกอบ 26 แสดงกราฟการปรับเทียบมาตรฐานของก๊าซไอโซนที่ใช้ในการวิจัย



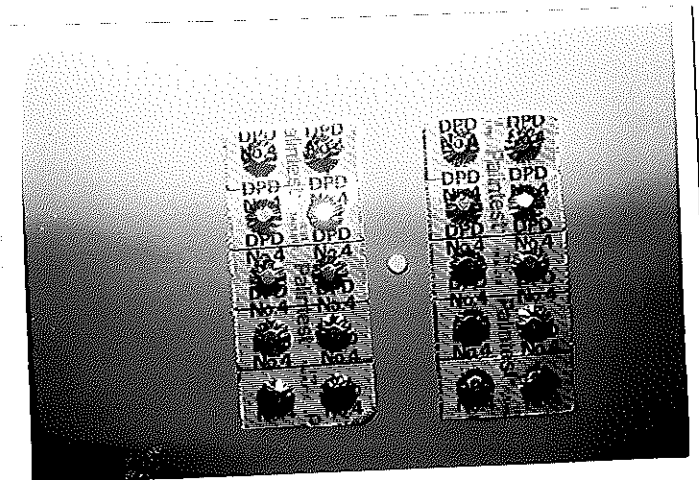
ดังนั้นค่าการดูดกลืน ที่ได้จากการทดลองจะต้องนำมาปรับเทียบกับค่าที่ได้ในกราฟนี้ เพื่อหาปริมาณไอโซน ตามสมการ $Y = 0.93107X$

สำหรับการหาค่าปริมาณก๊าซไอโซนที่ละลายในน้ำจะใช้ชุดในการทดสอบปริมาณไอโซน ซึ่งวัดปริมาณไอโซนในช่วง 0.1 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอาศัยเม็ดสารทดสอบ ซึ่งใช้ละลายในน้ำกลั่นที่ต้องการทดสอบก๊าซไอโซน ลักษณะของงานปรับเทียบสีและเม็ดสารทดสอบก๊าซไอโซนสามารถดูได้จากภาพประกอบ 27 และ 28

ภาพประกอบ 27 แสดงภาพถ่ายงานปรับเทียบสี



ภาพประกอบ 28 แสดงภาพถ่ายเม็คสารทดสอบวัดปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำ



2. ศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบการกำเนิดไอโซนทั้งหมด

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจำเป็นต้องมีการทดสอบและตรวจสอบการทำงานของระบบการกำเนิดก๊าซไอโซนเนื่องจากอุปกรณ์ส่วนใหญ่เป็นสิ่งที่ทำขึ้นเองจึงอาจจะมีผลผลิตที่จะต้องแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมนอกจากนี้ยังป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้อีกด้วย ดังนั้นได้ทำการทดสอบระบบแยกออกเป็นลำดับได้ดังนี้

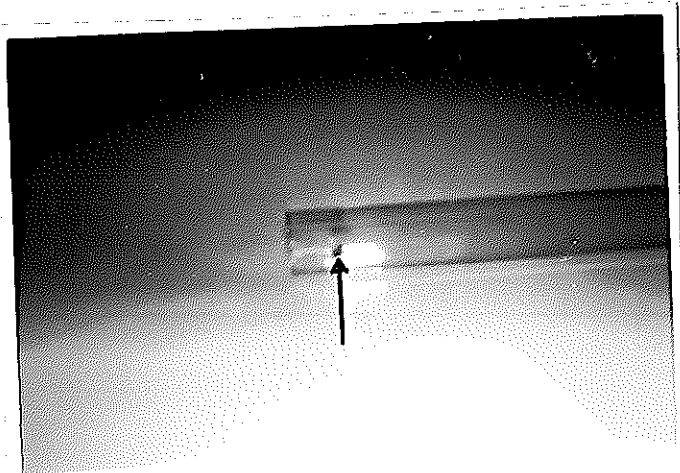
2.1 การตรวจสอบการรั่วไหลของอากาศในระบบ

2.1.1 ทำการตรวจสอบได้ด้วยวิธีง่ายๆ ทางกายภาพ คือ การใช้น้ำละลายด้วยน้ำยาล้างจานให้เป็นฟองแล้วฉีดลงบนบริเวณรอยต่อที่เป็นทางเดินของอากาศ ผู้วิจัยก็สามารถสังเกตการรั่วไหลของอากาศที่ออกจากระบบได้ ทำการแก้ไขโดยการใส่กาวทึบกลูอุดรอยรั่ว

2.2 การตรวจสอบอาร์คไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไอโซนในเซอร์จขณะที่ดิสชาร์จไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

2.2.1 การตรวจสอบนี้จำเป็นต้องมีความรอบคอบและระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นไฟฟ้าแรงสูง ทำได้โดยทดลองปรับค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ แล้วเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ (ในที่นี้อยู่ในช่วง 0 - 12 กิโลโวลต์) ถ้าเกิดมีการอาร์คไฟฟ้าจะสามารถได้ยินและสังเกตเห็นได้ และจะต้องหยุดการดิสชาร์จทันที เพราะจะทำให้วัสดุหรือชิ้นส่วนงานมีความเสียหาย และเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองอีกด้วย ต่อจากนั้นผู้วิจัยต้องทำการตรวจสอบ และแก้ไขอุปกรณ์ใหม่จนสามารถทดลองได้

ภาพประกอบ 29 แสดงภาพถ่ายความเสียหายอันเนื่องมาจากอาร์คไฟฟ้าซึ่งทำให้แก้วทนความร้อนไหม้



3. ศึกษาทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการผลิตโอโซนของระบบ

จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อระบบการกำเนิดโอโซนสามารถทำงานได้แล้ว ผู้วิจัยจำเป็นต้องหาถึงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซโอโซนของระบบเนื่องจาก ต้องเลือกภาวะที่เหมาะสมนี้ไปใช้ในการศึกษาในลำดับต่อไป สำหรับในส่วนนี้ได้จัดการศึกษาทดลองออกเป็นลำดับดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาโดยการวัดปริมาณผลผลิตโอโซนในอากาศที่ได้

ในขั้นนี้ผู้วิจัยจะจัดอุปกรณ์ในการทดลองโดยจะให้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า แบ่งเป็นระดับได้ 3 ระดับ ดังนี้ 1. ศักย์ไฟฟ้า 7.14 กิโลโวลต์ 2. ศักย์ไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์ และ 3. ศักย์ไฟฟ้า 8.65 กิโลโวลต์ ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ได้จากการทำ Calibration curve ระหว่าง Variac output กับ Neon-transformer output ในแต่ละระดับจะมีการวัดปริมาณโอโซนในอากาศ ที่อัตราการไหลของอากาศ แบ่งออกเป็นระดับได้ 3 ระดับ คือ 1. อัตราการไหลของอากาศ 0.94 ลิตรต่อนาที 2. อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที และ 3. อัตราการไหลของอากาศ 1.89 ลิตรต่อนาที จะต้องทำการทดลองในแต่ละระดับให้เสร็จสิ้นเป็นลำดับ ในที่นี้ควบคุมให้พารามิเตอร์เหล่านี้คงที่ คือ ระยะเวลาในการคิซาร์จ 1 นาที และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ประมาณ 60 %RH หรืออุณหภูมิในห้องปรับอากาศ ประมาณ 25 องศาเซลเซียส

4. ศึกษาทดลองเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่อการผลิตก๊าซโอโซนที่ภาวะเหมาะสมของระบบ

จากการทดลองที่ผ่านมาผู้วิจัยเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ศักย์ไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์และอัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที เป็นภาวะเหมาะสมของระบบการกำเนิดโอโซนแล้ว ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อปริมาณผลผลิตก๊าซโอโซนที่ได้จากเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งได้ทำการทดลองแบ่งออกที่เงื่อนไขภาวะต่างๆ ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า
2. การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ
3. วัดผลผลิตโอโซนกับการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้

ในทุกๆ การทดลองจะทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีรายละเอียดของหัวข้อต่างๆ เป็นดังนี้

4.1 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า

การทดลองนี้จะปรับค่าศักย์ไฟฟ้าก่อนเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้านี้จะปรับที่ตัวปรับค่าโวลต์ ดังแสดงมาแล้วในอุปกรณ์ ซึ่งจะปรับได้ตามต้องการโดยดูได้จากกราฟ

ที่ทำการปรับเทียบไว้แล้ว ภาพประกอบที่ โดยทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้า 6 ค่า คือ 1.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 95 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 7.14 กิโลโวลต์ 2.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 7.52 กิโลโวลต์ 3.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 105 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 7.90 กิโลโวลต์ 4.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 110 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 8.27 กิโลโวลต์ 5.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 115 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 8.65 กิโลโวลต์ และ 6.) ที่ศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ หรือ เทียบได้กับ 9.03 กิโลโวลต์

ในการทดลองนี้เมื่อปรับค่าศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งแล้วจะทำการวัดปริมาณโอโซนในอากาศที่ผลิตได้ทันที เมื่อเสร็จแล้วก็ทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าใหม่จนเสร็จสิ้นทั้ง 6 ค่า โดยการเรียงจากค่าต่ำสุดไปค่าสูงสุดผลของแต่ละค่านั้นก็จะได้จากกราฟ การทดลองนี้ให้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้คือ เวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลาย 1 นาที, อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที, อุณหภูมิห้องปรับอากาศ (ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์)

4.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งน่าจะมีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนของระบบ ในที่นี้ผู้วิจัยจะปรับค่าของอัตราการไหลได้จากลิ้น (Valve) ของมาตรวัดอัตราการไหล โดยได้ทำการปรับค่าของอัตราการไหล ที่ระดับต่างๆ กัน 5 ค่า คือ 1.) ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.94 ลิตรต่อนาที 2.) ที่อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที 3.) ที่อัตราการไหลของอากาศ 1.89 ลิตรต่อนาที 4.) ที่อัตราการไหลของอากาศ 2.36 ลิตรต่อนาที และ 5.) ที่อัตราการไหลของอากาศ 2.83 ลิตรต่อนาที

ในการทดลองนี้จะวัดปริมาณโอโซนในอากาศทุกครั้งที่มีการปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ จนเสร็จสิ้นทั้ง 5 ค่า การทดลองนี้จะกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้คงที่ คือ เวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลาย 1 นาที, ศักย์ไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์, อุณหภูมิห้องปรับอากาศ (ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์)

4.3 ศึกษาทดลองวัดปริมาณผลผลิตโอโซนกับการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้

4.3.1 ขณะที่ใช้และไม่ใช้ตัวกรองอากาศแห้งของระบบ

การทดลองในหัวข้อนี้จะทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองอากาศแห้งที่สร้างและออกแบบขึ้นมาในระบบการเตรียมอากาศ สิ่งที่จะยืนยันได้เป็นอย่างดีคือการวัดผลผลิตโอโซนของ

ระบบซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความจำเป็นในการใช้ตัวกรองอากาศแห้งในระบบการเตรียมอากาศ โดยการทดลองได้แบ่งระดับต่างๆ เป็น 2 ระดับ คือ

1. ไม่มีตัวกรองอากาศแห้ง
2. มีตัวกรองอากาศแห้ง

ทำการทดลองวัดผลผลิตโอโซนในแต่ละระดับให้เสร็จสิ้นถึงจะทำระดับต่อไปได้ ในการทดลองต้องควบคุมให้พารามิเตอร์คงที่ คือ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที, สักยภาพไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์ และความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อม ประมาณ 60 %RH สามารถผลได้จากภาพประกอบ

4.3.2 เปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าภายใน

ในการทดลองส่วนนี้จะวัดปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ

1. ใช้อะลูมิเนียมบางเป็นขั้วอิเล็กโทรดภายใน
2. ใช้สแตนเลสเป็นขั้วอิเล็กโทรดภายใน

โดยทำการวัดผลผลิตโอโซนให้เสร็จสิ้นในระดับแรกหรือหลังก่อนก็ได้ แต่ต้องทดลองทันทีหลังจากเสร็จสิ้นอีกระดับหนึ่ง โดยมีการควบคุมพารามิเตอร์เหมือนในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการทดลองได้จากภาพประกอบ

4.3.3 เปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด

ในขั้นตอนนี้ได้สร้างเซลล์โอโซนในเซอร์ที่มีขนาดพื้นที่ผิวอิเล็กโทรดเป็น 2 เท่า จากเซลล์เดิม แล้วทำการวัดผลผลิตโอโซนที่ได้ ที่พารามิเตอร์เดียวกันกับเซลล์โอโซนในเซอร์เดิม

5. ศึกษาผลการทดลองที่ได้จากการผลิตโอโซนของระบบ

1. วัดอุณหภูมิของหลอดโอโซนในเซอร์เซลล์ที่เวลาการทำงานต่างๆ
2. วัดผลผลิตโอโซนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาการดิสชาร์จ
3. ผลการทดลองใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ในการดูแผ่นอะลูมิเนียมบางที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดภายในที่ผ่านการทำงานเป็นระยะเวลาหนึ่ง

4. การทดลองใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ดูสารที่ตกค้างอยู่บนผิวแก้ว

5.1 การวัดอุณหภูมิของหลอดไอโซในเซอร์เซลล์ที่เวลาการทำงานต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะทำการบันทึกผลอุณหภูมิของไอโซในเซอร์เซลล์ที่ผิวค้ำนอกของหัวอิเล็กโตรดภายนอกโดยการแตะส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ที่ใช้วัดอุณหภูมิไว้ด้วยกาวซึ่งสายต่อไปยังมิเตอร์ฟลูค ในที่นี้จะทดลองวัดอุณหภูมิที่เวลาการทำงานของระบบ แบ่งเป็นระดับต่างๆ โดยทำการอ่านค่าอุณหภูมิทุกๆ 20 นาที จนกระทั่งถึงนาทีที่ 300 นาที หรือเทียบได้กับระบบทำงานเป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยการวัดนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองในห้องปรับอากาศ กับ ห้องที่ไม่มีมีการปรับอากาศ ซึ่งได้ให้พารามิเตอร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องควบคุมได้มีค่าคงที่ คือ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที และ ศักย์ไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์

5.2 วัดผลผลิตไอโซนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาการคิสร้าง

ในหัวข้อนี้จะวัดปริมาณ ไอโซนในอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซไอโซนกับสารละลายที่ระดับต่างๆ กัน โดยปรับค่าเวลา 5 ค่า คือ 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 วินาที

ในการทดลองนี้เมื่อปรับค่าเวลาค่าหนึ่งก็จะวัดปริมาณก๊าซไอโซนครั้งหนึ่ง (จากการเก็บข้อมูลมาเฉลี่ย 10 ค่า) แล้วจึงเริ่มการทดลองค่าใหม่และวัดปริมาณก๊าซไอโซนจนเสร็จสิ้นทั้ง 5 ค่า

5.3 การทดลองใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ดูแผ่นอลูมิเนียมบางที่ใช้พันหัวอิเล็กโตรดภายใน

ในขั้นตอนนี้แผ่นอลูมิเนียมบางที่ใช้ในในการพันหัวอิเล็กโตรดชุดการทดลอง เนื่องจากว่าระหว่างหัวอิเล็กโตรดภายในและท่อแก้วที่ใช้เป็นโคอีเล็กทริกมีช่องว่างอากาศผู้วิจัยจึงได้ใช้อลูมิเนียมบางพัน แต่เมื่อทำการทดลองและตรวจสอบจะเห็นลักษณะของผิวอลูมิเนียมบางเปลี่ยนไป จึงได้นำชิ้นส่วนนี้ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เพื่อดูลักษณะความเสียหายของอลูมิเนียมบาง ซึ่งจะได้นำผลนี้ไปพัฒนาและแก้ไขข้อบกพร่องครั้งนี้ต่อไปในอนาคต

5.4 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ในการตรวจดูสารที่ตกค้างอยู่บนผิวท่อแก้วที่ใช้ทำไดอิเล็กตริก

ในขั้นตอนนี้จะใช้แผ่นแก้วบางๆ นำไปติดไว้ที่ผิวท่อแก้วแล้วทำการทดลอง ที่ ศักย์ไฟฟ้า 7.90 กิโลโวลต์, อัตราการไหลอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที และความชื้นสัมพัทธ์อากาศสิ่งแวดล้อมประมาณ 60 %RH เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วนำแผ่นแก้วที่ติดไว้ไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

ตอนที่ 3 ศึกษาการประยุกต์ใช้ก๊าซไอโซนที่ผลิตได้กับการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่ผ่านการกรอง, น้ำทิ้ง และน้ำนากุ้ง

ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์เชื้อโรคต่างๆ ในน้ำที่นำมาวิเคราะห์ รวมไปถึงการนำก๊าซไอโซนมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริงเชิงปฏิบัติการ จากการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบการกำเนิดไอโซนในตอนที 2 มาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำจากแหล่งต่างๆ เนื่องจากแบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตที่สำคัญในการบ่งชี้คุณภาพของน้ำตามมาตรฐานคุณภาพน้ำจากกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็นลำดับดังนี้

1. ศึกษาวิธีปฏิบัติในการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย โคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และฟิคัลสเตรปโตคอคคัส
 2. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำเค็มผ่านการกรอง
 3. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำทิ้ง
 4. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำนากุ้ง
1. ศึกษาวิธีปฏิบัติในการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย โคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และฟิคัลสเตรปโตคอคคัส

ในการปฏิบัติเพื่อการวิเคราะห์หาเชื้อชนิดต่างๆ จะมีหลายวิธี ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวิธีในการวิเคราะห์เชื้อโดยแยกแต่ละชนิดได้ดังนี้

1.1 การวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำด้วยวิธี Spread plate method

1.1.1 อุปกรณ์

- | | |
|--------------------------|-------|
| 1. Plate count agar | 6 จาน |
| 2. Sterile pipette 1 ml. | 3 อัน |
| 3. Spreader | 1 อัน |

4. Alcohol 90 %

1 ปี กอรั

1.1.2 วิธีปฏิบัติ

1. ทำการเจือจางน้ำที่นำมาวิเคราะห์ (น้ำเสียจะเจือจางจนถึงระดับ 10^5 ส่วนน้ำดื่มนี้จะเจือจางจนถึงระดับ 10^2 ขึ้นอยู่กับการสังเกตด้วยว่าน้ำมีความสกปรกมากน้อยแค่ไหน) และทำเครื่องหมายไว้ที่จานเพาะเชื้อ น้ำที่จะทำการเจือจางนี้จะต้องเขย่าก่อนทุกครั้งเพื่อจะได้ผลการทดลองที่เที่ยงตรงขึ้น
2. เอาตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วมาใช้โดยใช้ปิเปตตุน้ำที่เจือจางในระดับต่างๆ 0.1 มล. ใส่ลงในจานที่ทำเครื่องหมายให้ตรงกับที่ระบุไว้ (เวลาปล่อยน้ำจะใส่ตรงกลางก่อน แล้วค่อยปิเปตไปด้านข้างทั้ง 2 ข้าง)
3. แล้วใช้ Spreader ที่ปราศจากเชื้อ กวาดน้ำให้ทั่วทั้งจานในขณะที่หมุนจานไปด้วย จนเห็นว่าน้ำแห้งจึงหยุด (การทำลายเชื้อบน Spreader ให้จุ่ม Spreader ลงในแอลกอฮอล์ 90 % แล้วผ่านเปลวไฟ เมื่อไฟเผาแอลกอฮอล์หมด ปล่อยให้เย็นสักครู่ นำไปใช้ได้)
4. ทำซ้ำข้อ 2 และ 3 แต่ใช้ตัวอย่างน้ำที่เจือจางในระดับต่างๆ ที่เตรียมไว้
5. เมื่อทำเสร็จแล้วเก็บจานอาหารทั้งหมดใน incubator โดยแบ่ง incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส 1 ชุด และ ที่ 20 องศาเซลเซียส 1 ชุด เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง
6. หลังจากครบ 48 ชั่วโมง นำจานเพาะเชื้อมานับโคโลนี แล้วคำนวณหาเชื้อในน้ำ 1 มิลลิลิตร แล้วบันทึกผลในตาราง

1.2 การวิเคราะห์เชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำด้วยวิธี Multiple tube technique หรือ Most probable number (MPN)

ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1 Presumptive test
- 2 Confirmed test
- 3 Completed test

1.2.1 อุปกรณ์

1. ตัวอย่างน้ำที่ตรวจวิเคราะห์ 100 มล.

1 ชุด

Presumptive test

- | | |
|---|---------|
| 1. Lactose broth พร้อมหลอดดักแก๊ส 10 มล.
(double strength) | 5 หลอด |
| 2. Lactose broth พร้อมหลอดดักก๊าซ 10 มล. | 10 หลอด |
| 3. Sterile pipette 10 มล. | 1 อัน |
| 4. Sterile pipette 1 มล. | 1 อัน |

Confirmed test

1. Brilliant green lactose bile broth 2%
พร้อมหลอดดักก๊าซ

Completed test

1. Eosin methylene blue agar
2. Nutrient agar slant

1.2.2 วิธีปฏิบัติ

Presumptive test

1. เขย่าขวดตัวอย่างน้ำขึ้นลงประมาณ 25 ครั้ง
2. ดูดน้ำที่จะตรวจใส่ใน lactose broth (double strength) หลอดละ 10 มล. ทั้ง 5 หลอด และดูดน้ำตัวอย่างหลอดละ 1 มล. ใส่ใน lactose broth 5 หลอด ส่วนอีก 5 หลอด ดูดน้ำในหลอดละ 0.1 มล. เสร็จแล้วเขียนสัญลักษณ์ปริมาณน้ำที่ใส่ในแต่ละหลอด (ถ้าใส่สกรปรกมากปริมาณตัวอย่างน้ำระดับแรกจะลดลง ดังในภาคผนวก ก)
3. เขย่าหลอดอาหารทั้งหมดเพื่อให้ส่วนผสมกับอาหารแล้วนำหลอดไป incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง
4. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ตรวจสอบความขุ่นและแก๊สในหลอดดักแก๊ส ถ้าหลอดใดมีแก๊สแสดงว่า Presumptive test ให้ผลบวก บันทึกผลและนำไปทำ confirmed test ต่อ ส่วนหลอดที่ยังไม่มีแก๊สให้บเพาะเชื้อต่อไปอีก 24 ชั่วโมง แล้วนำมาดูผล ถ้ามีแก๊สให้ทำ confirmed test ต่อ ถ้าไม่มีแก๊สแสดงว่า presumptive test . ให้ผลลบ บันทึกผล

Confirmed test

1. เขียนสัญลักษณ์ปริมาณน้ำบนหลอดอาหาร brilliant green lactose bile broth 2% (BGLB) ให้ได้จำนวนเท่ากับหลอด lactose broth ที่ให้ผลบวก

2. ใช้ loop ที่ฆ่าเชื้อแล้วถ่ายเชื้อจาก lactose broth ที่ให้ผลบวกแต่ละหลอดลงในอาหาร BGLB หลอดต่อหลอด
3. เขย่าหลอด BGLB แล้วนำไปอบเพาะเชื้อ 24-48 ชั่วโมง
4. หลังจากครบ 24 ชั่วโมง นำมาตรวจดูแก๊สในหลอดคักแก๊ส ถ้ายังไม่มีแก๊สให้อบเพาะต่อไปอีก 24 ชั่วโมง แล้วนำมาดูผลใหม่ ถ้ามีแก๊สให้บันทึกผลว่ามีแก๊สที่หลอด และเทียบหาจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียจากตาราง MPN ส่วนหลอด BGLB ที่ให้แก๊สให้เลือกมาทำ completed test ต่อไป (ตาราง MPN ดูได้จากภาคผนวก ข.)

Completed test

1. ใช้ loop ที่ลนไฟแล้วถ่ายเชื้อจาก BGLB ที่ให้แก๊สมา streak ลงบน Eosin methylene blue (EMB) แล้ว incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง นำ EMB มาตรวจดูลักษณะโคโลนีว่าเป็นโคลิฟอร์มหรือไม่ ถ้าเป็น typical coliform จะมีโคโลนีค่อนข้างแบนมีสีคล้ำ และมีเหือบเขียวคล้ายรอยคัลของโลหะ (metallic sheen) หรือ atypical coliform ซึ่งมีโคโลนีค่อนข้างนูนเป็นเมือกเยิ้มสีชมพูหรือม่วงอ่อนๆ ตรงกลางโคโลนีมีสีดำ
3. เลือกโคโลนีที่เป็น typical coliform ไปใส่ใน nutrient agar slant (NA) และ lactose broth อบไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ตรวจดูแก๊สใน lactose broth และเอาเชื้อจาก NA มาย้อมสีแกรม ถ้ามีแก๊สใน lactose broth และย้อมสีแกรมได้แกรมลบแต่ไม่ไฮไลซ์ แสดงว่าเป็นโคลิฟอร์มจริง บันทึกผล

1.3 การวิเคราะห์ฟิคัล โคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำด้วยวิธี Multiple tube technique หรือ Most probable number (MPN)

การตรวจหาฟิคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย จะมีการปฏิบัติเหมือนกับการตรวจหาโคลิฟอร์มทั้งหมดทุกอย่าง เว้นแต่ในขั้น confirmed test ใช้อาหาร EC medium แทน brilliant green lactose bile broth 2%

1.3.1 อุปกรณ์

ตัวอย่างน้ำที่จะตรวจ 100 มล.

1 ขวด

Water bath 44.5 องศาเซลเซียส

Presumptive test

Lactose broth (double strength)

(พร้อมหลอดจิบแก๊ส 10 มล.)

5 หลอด

Lactose broth พร้อมหลอดจิบแก๊ส 10 มล.

10 หลอด

Sterile pipette 10 มล.

1 อัน

Sterile pipette 1 มล.

1 อัน

Confirmed test

EC medium

1.3.2 วิธีปฏิบัติ

Presumptive test

1. เขียนปริมาณตัวอย่างน้ำที่จะใส่ในหลอดอาหาร lactose broth
2. เขย่าขวดตัวอย่างน้ำขึ้นลงประมาณ 25 ครั้ง
3. ดูดน้ำที่จะตรวจใส่ใน lactose broth (double strength) หลอดละ 10 มล. ทั้ง 5 หลอด และดูดตัวอย่างน้ำหลอดละ 1 มล. 5 หลอด และ หลอดละ 0.1 มล. 5 หลอด
4. เขย่าหลอดอาหารทั้งหมดที่ใส่น้ำแล้ว เพื่อให้ น้ำผสมกับอาหาร แล้วนำไปอบเพาะเชื้อที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง
5. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ตรวจสอบแก๊สในหลอดจิบแก๊ส ถ้ามีแก๊สทำ confirmed test ต่อไป ถ้าไม่มีอบเพาะเชื้อต่อไปอีก 24 ชั่วโมง ถ้าไม่มีแก๊สอีกแสดงว่า presumptive test ให้ผลลบ หลอดที่มีแก๊สให้ทำ confirmed test ต่อไป

Confirmed test

1. เขียนสัญลักษณ์บนหลอดอาหาร EC ให้ได้จำนวนเท่ากับหลอด lactose broth ที่ให้ผลบวก
2. ใช้ loop ที่ลนไฟฆ่าเชื้อแล้วถ่ายเชื้อจากหลอด lactose broth ที่ให้ผลบวกต่อหลอด
3. เขย่าหลอด EC medium แล้วนำไปอบเพาะเชื้อที่ 44.5 ± 0.2 องศาเซลเซียส ใน water bath เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. หลังจากครบ 24 ชั่วโมง มาตรวจดูแก๊สในหลอดจิบแก๊ส แล้วบันทึกผล และคำนวณหาปริมาณฟิวด์ โคลิฟอร์มในตาราง มีหน่วยเป็น MPN/100 มล. (ตาราง MPN ดูในภาคผนวก ข.)

1.4 การตรวจหาจำนวนฟิโคลสเตรปโตคอคคัสทั้งหมดในน้ำ ด้วยวิธี Multiple tube technique

1.4.1 อุปกรณ์

- | | |
|--|---------|
| 1. ตัวอย่างน้ำที่ตรวจ | 200 มล. |
| 2. Azide dextrose broth หลอดละ 10 มล.
(double strength) | 5 หลอด |
| 3. Azide dextrose broth หลอดละ 10 มล. | 10 หลอด |
| 4. Pfizer selective enterococcus agar | |
| 5. Sterile pipette 10 มล. | 1 อัน |
| 6. Sterile pipette 1 มล. | 1 อัน |

1.4.2 วิธีปฏิบัติ

Presumptive test

- เขียนสัญลักษณ์ปริมาณน้ำบนหลอดอาหารทั้ง 15 หลอด
- เขย่าขวดน้ำที่จะตรวจขึ้นลง 25 ครั้ง
- ดูดน้ำที่จะตรวจใส่ใน Azide dextrose broth double strength หลอดละ 10 มล. ทั้ง 5 หลอด และดูดน้ำใส่ใน Azide dextrose broth หลอดละ 1 มล. 5 หลอด และอีก 5 หลอด ดูดน้ำใส่หลอดละ 0.1 มล.
- เขย่าหลอดอาหารทั้งหมดเพื่อให้ส่วนผสมกับอาหาร แล้วนำไปบ่มเพาะเชื้อที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำมาตรวจดูความขุ่น หลอดที่ไม่ขุ่นให้บ่มเพาะเชื้อต่ออีก 24 ชั่วโมง แล้วดูความขุ่นอีกครั้ง ถ้าไม่ขุ่นถือว่า Presumptive test ให้ผลลบ ส่วนหลอดที่มีความขุ่นให้ทำ Confirmed test ต่อไป

Confirmed test

- ใช้ดินสอเขียนแก้ว แบ่งจาน Pfizer selective enterococcus agar ออกเป็น 8 ส่วน แล้วเขียนสัญลักษณ์ปริมาณน้ำไว้ได้จาน
- ถ่ายเชื้อจากหลอด Azide dextrose broth ที่ขุ่นลงในจานอาหารหลอดละส่วน โดยใช้ loop ชีคเป็นเส้น แล้วบ่มเพาะเชื้อที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยคว่ำจาน

3. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ตรวจดูผล ถ้ามีฟิลาเมนต์โปรโตคอคคัส จะเห็นโคโลนีเป็นสีน้ำตาลดำ และมีสีน้ำตาลล้อมรอบโคโลนี แสดงว่า confirmed test ให้ผลเป็นบวก
4. บันทึกผลที่ได้ แล้วไปเปิดตาราง MPN (ในภาคผนวก ข.)

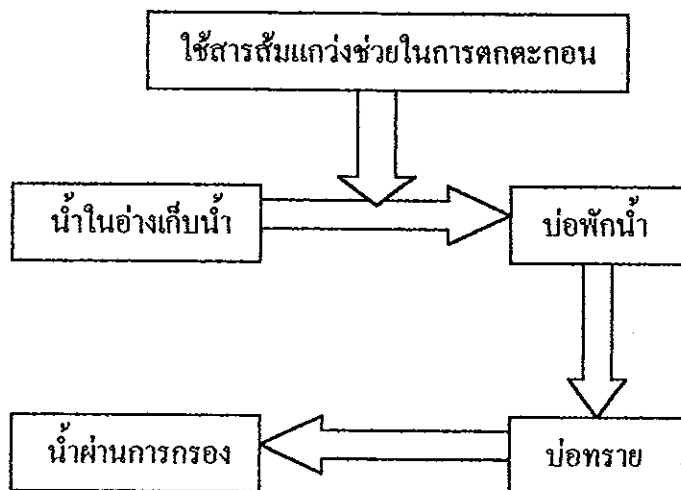
2. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำดิบผ่านการกรอง

ในขั้นตอนนี้จะเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 20 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการกรองมาจาก 2 แหล่ง คือ

1. น้ำดิบผ่านการกรองจากโรงทำน้ำประปา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
2. น้ำดิบ (แหล่งน้ำใต้ดิน) ผ่านการกรองจากโรงงานทำน้ำดื่มธารทิพย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

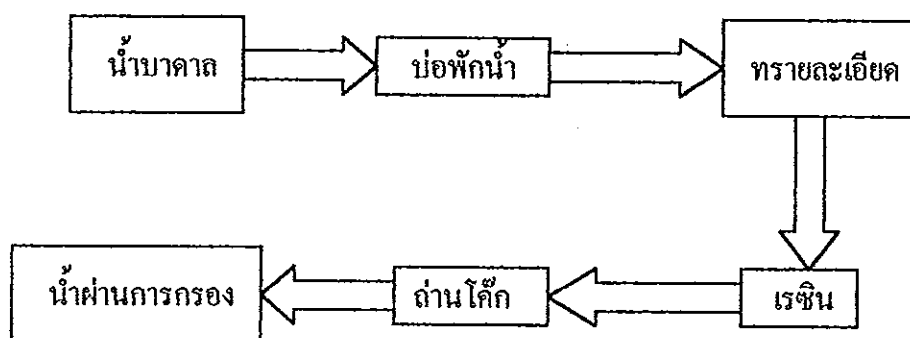
สามารถดูขั้นตอนการกรองน้ำทั้ง 2 แหล่งได้จากภาพประกอบ ที่ 30 และ 31 ในการทดลองจะนำน้ำที่ผ่านการกรองแล้วในแต่ละแห่งมาใช้ในการผ่านก๊าซโอโซนที่ระดับเวลาการสัมผัส 5 ระดับ ดังต่อไปนี้ 0.5 , 1.0 , 3.0 , 5.0 และ 10 นาที โดยจะต้องแบ่งน้ำมาจำนวน 250 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่ปราศจากเชื้อสำหรับไว้เป็นอ้างอิงในการวิเคราะห์เชื้อเริ่มแรกกับน้ำที่ผ่านก๊าซโอโซน แล้วนำน้ำจำนวน 250 มิลลิลิตร ใส่ในชุดผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ การจัดอุปกรณ์ได้จากภาพประกอบ ค่อยจากนั้นก็ทำการทดลองตามขั้นตอนเป็นลำดับ ซึ่งจะต้องทำให้เสร็จสิ้นในแต่ละระดับถึงจะทำระดับต่อไปได้ และต้องทำให้เสร็จสิ้นติดต่อกัน หลังจากนั้นนำน้ำอ้างอิงและน้ำที่ทดลองแล้วไปวิเคราะห์หาเชื้อแบคทีเรีย ดังต่อไปนี้ Total bacteria, Total coliforms, Fecal coliforms และ Fecal streptococci ก่อนที่จะทำการทดลองการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่เตรียมไว้ และน้ำที่นำมาทดลองจะต้องเก็บแล้วมาทดลองเลยไม่พยายามที่จะนำมาเก็บไว้ ซึ่งจะได้ผลที่เที่ยงตรงมากที่สุด สาเหตุที่เราทำการเลือกเพื่อวิเคราะห์เชื้อเหล่านี้เนื่องจากเป็นเชื้อที่ถูกระบุเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำบริโภคที่เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ที่กำหนดในน้ำบริโภค (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521)

ภาพประกอบ 30 ขั้นตอนการกรองน้ำของโรงทำน้ำประปา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา



หมายเหตุ : น้ำลำเลียงไปตามทิศทางของลูกศร

ภาพประกอบ 31 ขั้นตอนการกรองน้ำของโรงทำน้ำดื่มคลองเรียนธารทิพย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา



หมายเหตุ : น้ำลำเลียงไปตามทิศทางของลูกศร

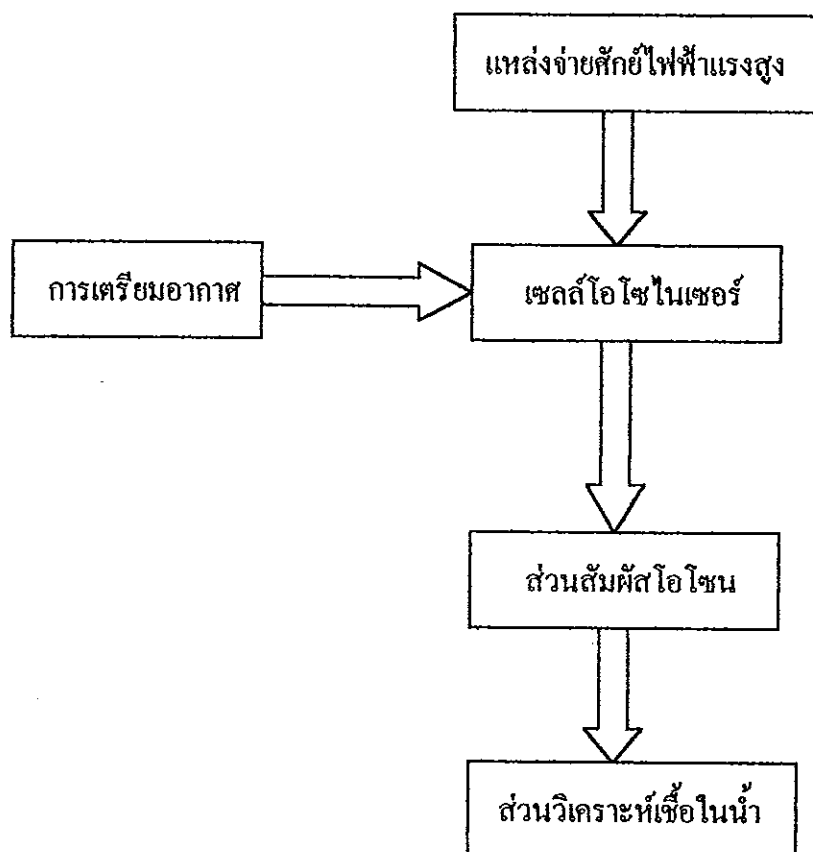
3. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำทิ้ง

ในขั้นตอนนี้มีลักษณะการทดลองเหมือนกันทุกอย่างกับหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมาเพียงแต่ค่าที่นำที่ได้มาจาก น้ำทิ้งที่อยู่ในบ่อน้ำบำบัดออกซิเจนของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

4. ศึกษาการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำนาุ้ง

ในขั้นตอนนี้การจับอุปกรณ์และเตรียมน้ำในการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 2 แต่ในตอนนี้จะใช้น้ำนาุ้งทำการทดลองผ่านโอโซน ที่เวลาการสัมผัสต่างๆ กัน 3 ระดับ คือ 0.5 , 1.0 และ 3.0 นาที ในขั้นตอนนี้จะวิเคราะห์เชื้อ Total bacteria และ Vibrio sp. และวิเคราะห์ผลทางกายภาพของน้ำ สาเหตุที่เราเลือกเชื้อ 2 ชนิดนี้ เนื่องจากเชื้อชนิดนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการระบาดของโรคในน้ำนาุ้ง และมีผลต่อกุ้งในระยะเวลาต่อมา

ภาพประกอบ 32 ขั้นตอนในการฆ่าเชื้อโรคที่มีในน้ำด้วยก๊าซโอโซนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย



บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

บทนี้แสดงผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย โดยเสนอผลการวิจัยตามลำดับที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เนื่องจากผลการวิจัยส่วนใหญ่จะเสนอเป็นกราฟจึงได้เสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลควบคู่กันไปด้วยเพื่อความต่อเนื่องส่วนการวิเคราะห์และวิจารณ์จะได้กล่าวไว้ในบทต่อไป

ผลและการอภิปรายผลแบ่งออกเป็นตอนๆ ได้ตามลำดับดังนี้

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซโอโซนของระบบกับพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์

ตอนที่ 2 ผลการศึกษาผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการผลิตก๊าซโอโซนของระบบ

ตอนที่ 3 ผลการใช้ก๊าซโอโซนในการฆ่าเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำต่างๆ ที่ได้เลือกมาใช้ในการวิจัย

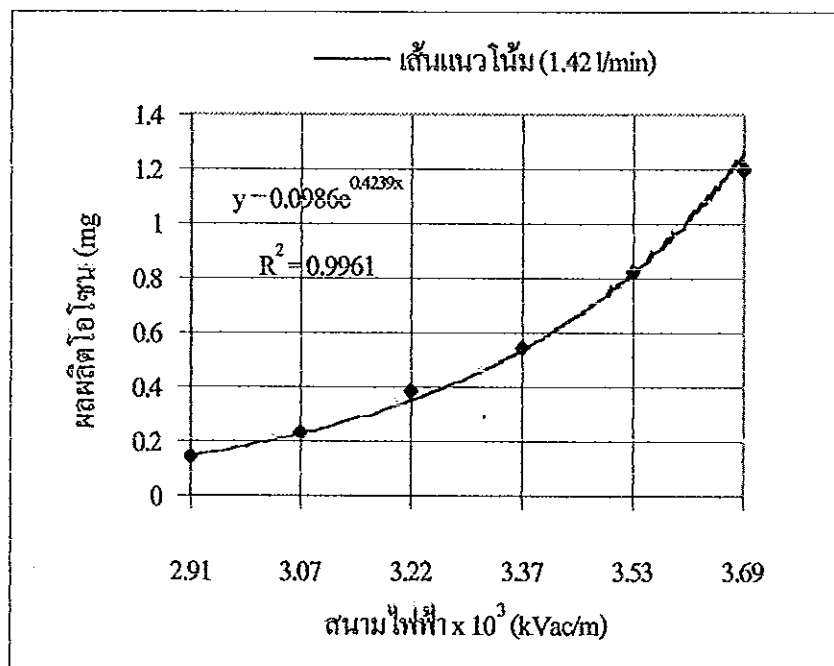
ตอนที่ 1 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซโอโซนของระบบกับพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์

ในตอนนี้จะได้แสดงผลการศึกษาผลผลิตก๊าซโอโซนของระบบกับพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์ โดยได้จากการทดลองกับพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมในการศึกษาไว้แล้ว ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 กิโลโวลต์ต่อเมตร (kV/m), อัตราการไหลของอากาศ 1.42 ลิตรต่อนาที (l/min) และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 60 %R.H. ด้วยเหตุนี้จะได้เลือกที่ภาวะนี้เป็นสภาวะอ้างอิงหลักในการทดลองกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางกายภาพต่างๆ ที่ต้องการศึกษาวิจัย และผลผลิตก๊าซโอโซนจากอุปกรณ์ถูกตรวจวัดปริมาณด้วยวิธีทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM (Moris Katz, 1977) ผลของการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดนี้แสดงผลการทดลองแบ่งได้ ดังต่อไปนี้

- 1.1 ผลของการทดลองกำเนิดก๊าซโอโซนกับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ที่มีต่อผลผลิตโอโซน ซึ่งในที่นี้จะใช้การปรับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการปรับเทียบ เพื่อวัดปริมาณผลผลิตของโอโซนที่เปลี่ยนแปลงตามศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 33 ระหว่างอัตราผลผลิตโอโซนที่ได้กับความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งจะเห็นว่าในการทดลองเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า แต่แสดงในรูปของความเข้มสนาม

ไฟฟ้าได้ เพราะ สนามไฟฟ้าแปร โดยตรงกับศักย์ไฟฟ้า ($V = \int \vec{E} d\vec{s}$) และกราฟลักษณะนี้เป็นที่นิยมแสดงกันในฟิสิกส์คิตซาร์จมากกว่ากราฟที่แสดงในรูปศักย์ไฟฟ้า

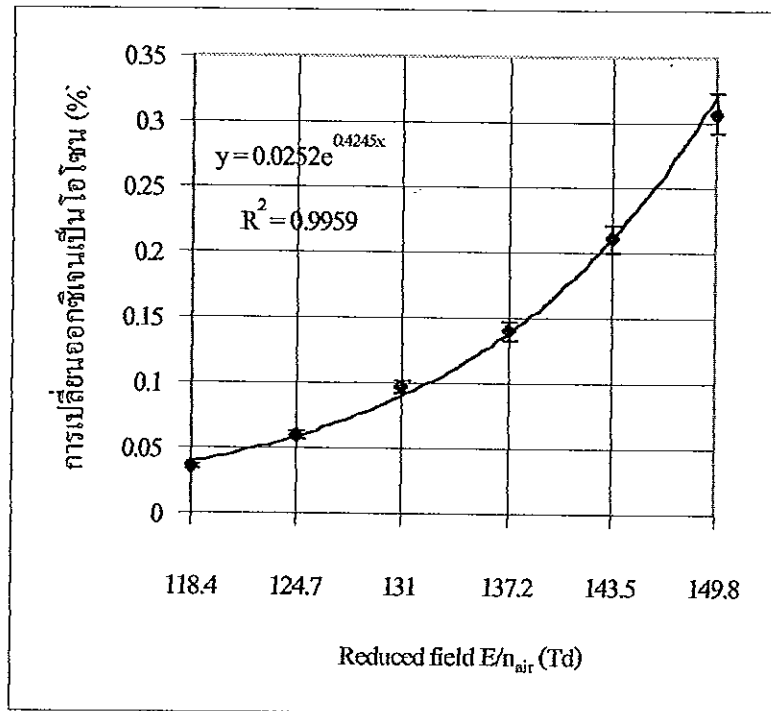
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงผลผลิตโอโซนกับสนามไฟฟ้าที่ เวลาการดิสชาร์จ 1 นาที อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 60%RH.



ผลจากการปรับให้ค่าของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พบว่า ที่เงื่อนไขนี้ ผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้า ในลักษณะของกราฟเป็นรูปเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งมีความสัมพันธ์ ตามสมการ

$y = 0.0986e^{0.4239x}$ เมื่อ y คือ อัตราการผลิตโอโซน และ x คือ ค่าสนามไฟฟ้า

ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนกับ E/n_{air} ที่ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min

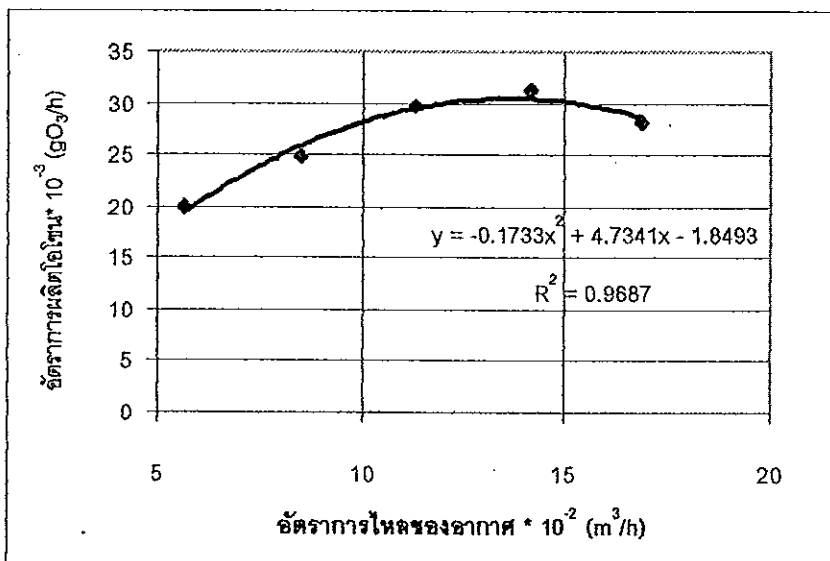


เปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของสนาม E/n_{air} (reduced field) ที่เพิ่มขึ้น โดยการพิจารณาจากปฏิกิริยาในสมการ [1] เท่านั้น สำหรับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนดูได้จาก (ภาคผนวก ค.) ผลที่ได้มีความสัมพันธ์ตามสมการ $y = 0.0252e^{0.4245x}$ เมื่อ y คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนไปเป็นโอโซน และ x คือ ค่า Reduced field E/n_{air}

1.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อผลผลิตโอโซน ในที่นี้ระบบ จะมีมอเตอร์วัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าเซลล์โอโซนในเซอร์จะอยู่ในช่วง 0-22 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (scfh) ซึ่งต้องปรับเทียบมาเป็นหน่วย ลิตรต่อนาที (l/min) และ ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/h) ดูได้จาก (ภาคผนวก จ) เพื่อให้สอดคล้องกับทฤษฎีที่จะใช้อ้างอิงถึง ในการทดลองนี้จะใช้ค่าอัตราการไหลของอากาศ ตั้งแต่ 2 – 6 scfh เนื่องจากค่าที่เกินจากนี้ไปจะทำให้ การผสมกันระหว่างก๊าซ

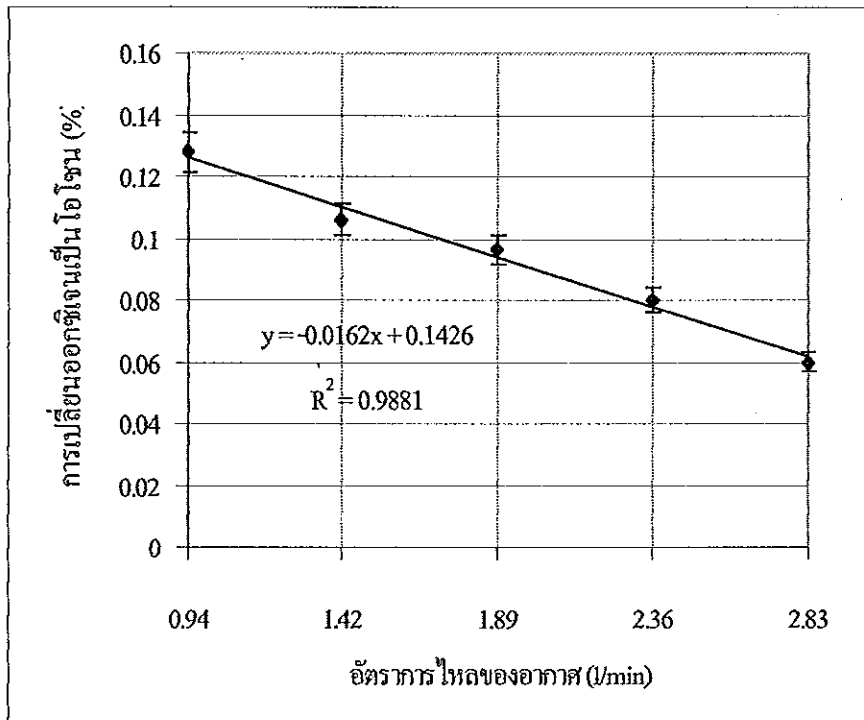
โอโซนและสารละลายที่ใช้วัดโอโซนที่กระจายออกนอกภาชนะ (midget impinger) ที่บรรจุทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้

ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตโอโซนกับอัตราการไหลของอากาศ ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 กิโลโวลต์ต่อเมตร เวลาการดิสชาร์จ 1 นาที



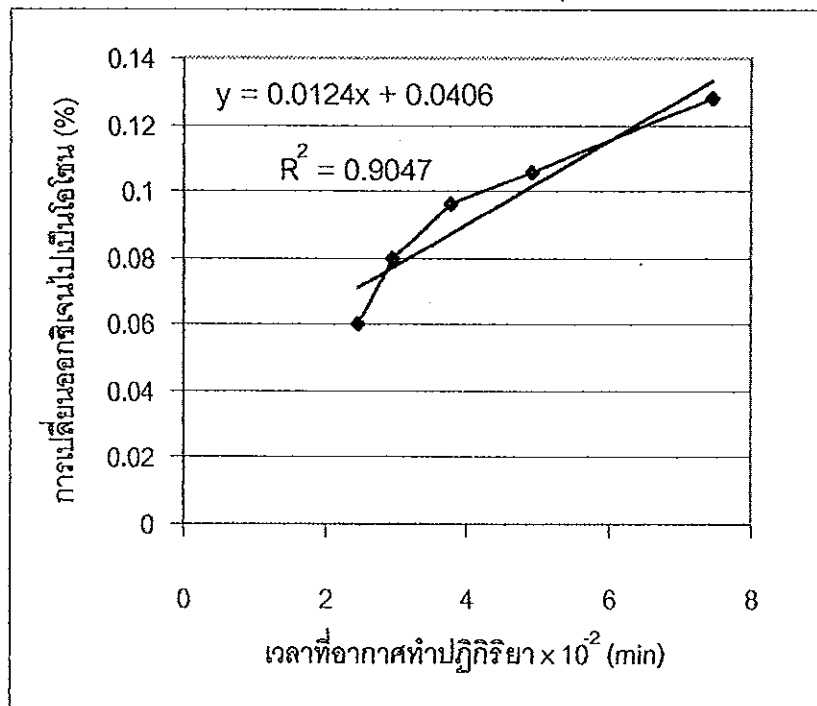
ค่าอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตโอโซนของระบบ แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกตั้งแต่ $6 \times 10^{-2} - 14 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$ อัตราการผลิตโอโซนจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และจะลดลงในช่วงตั้งแต่ 14×10^{-2} เป็นต้นไป เพราะฉะนั้นในการพิจารณาเลือกค่าอัตราการไหลของอากาศจำเป็นจะต้องเลือกค่าอัตราการไหลของอากาศในช่วงแรก ที่เงื่อนไขอย่างเดียวกันนี้ หลังจากพล็อตเส้นแนวโน้มแล้วพบว่า เป็นไปตามฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ดังสมการที่แสดงในกราฟ

ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนไปเป็นโอโซนกับ อัตราการไหลของอากาศ ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 กิโลโวลต์ต่อเมตร



ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน โดยการพิจารณาจากสมการ [1] (ดูวิธีการคำนวณได้จากภาคผนวก ค.) กับ อัตราการไหลของอากาศ พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนตามสมการ [1] มีค่าลดลงด้วย ตามความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการ $y = -0.0162x + 0.1426$ เมื่อ y คือ เปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน และ x คือ ปริมาณอัตราการไหลของอากาศ

ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน (%) กับเวลาในการสัมผัสของอากาศภายในเซลล์โอโซนไนเซอร์ (min) ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m



พิจารณานำเสนอในรูปของเวลาที่อากาศอยู่ทำปฏิกิริยาภายในเซลล์โอโซนไนเซอร์ จากความสัมพันธ์

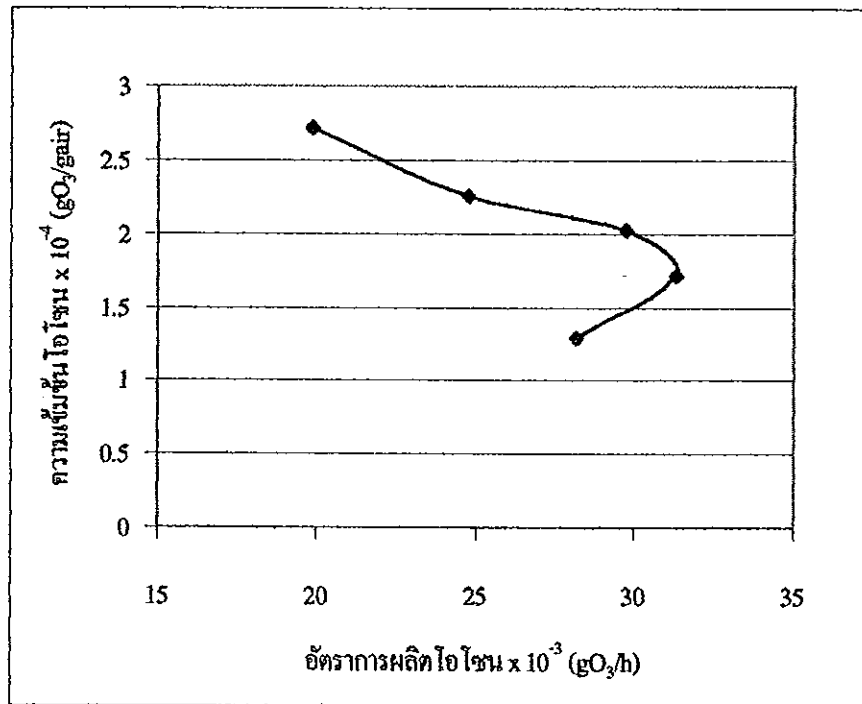
$t = V/Q$ เมื่อ t คือ เวลาในการสัมผัสของอากาศกับคิสราร์จไฟฟ้า (min)

V คือ ปริมาตรของอากาศภายในช่องว่างคิสราร์จ (l)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (l/min)

จากภาพประกอบด้านบน พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นเปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนไปเป็นโอโซนก็เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพล็อตเส้นแนวโน้มเชิงเส้น จะได้ความสัมพันธ์เส้นตรง ดังสมการ $y = 0.0124x + 0.0426$ เมื่อ y คือ เปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน และ x คือ เวลาในการทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างคิสราร์จ

ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นโอโซนกับอัตราการผลิตโอโซน ที่สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m

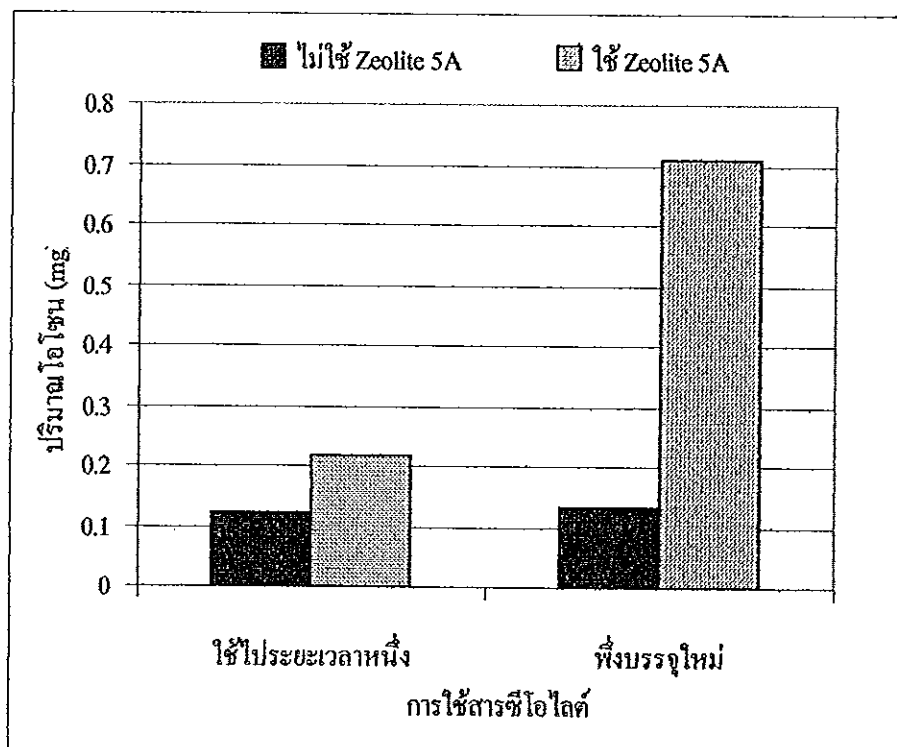


ผลการทดลองที่แสดงในภาพประกอบ 38 เป็นผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศด้วยเช่นกัน แล้วนำเสนอระหว่างความเข้มข้นของโอโซนกับอัตราการผลิตโอโซน พบว่าเมื่อปริมาณอัตราการผลิตโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากสัดส่วนของอากาศที่ป้อนเข้ามาก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟเปอร์เซ็นต์ในการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนในภาพประกอบที่ผ่านมาระหว่างอัตราการผลิตโอโซนกับอัตราการไหลของอากาศ

1.3 ผลการวัดผลผลิตโอโซนกับการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการกำเนิดโอโซน ในขั้นตอนนี้ จะทดลองเปรียบเทียบการใช้วัสดุที่นำมาสร้างระบบในการกำเนิดโอโซนกับวัสดุอื่น นอกจากนี้ยัง พยายามที่จะแก้ปัญหา และพัฒนาเซลล์โอโซนในเซอร์พิมขึ้นด้วย โดยแยกการทดลองออกเป็นดังนี้

1.3.1 ผลผลิตโอโซนกับการใช้และไม่ใช้ตัวกรองอากาศแห้งของระบบการกำเนิดโอโซน ผลการทดลองหาผลผลิตโอโซนที่ติดตั้งตัวกรองอากาศแห้งกับที่ไม่ได้มีการติดตั้งตัวกรองอากาศ แห้ง เพื่อดูถึงผลผลิตโอโซนที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างไร โดยจัดอุปกรณ์สำหรับการกำเนิดก๊าซ โอโซนโดยมีตัวกรองอากาศแห้งกับไม่ได้ตัวกรองอากาศแห้งในระบบ แล้วทำการเก็บผลการ ทดลองที่เงื่อนไขความชื้นสัมพัทธ์สิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน 2 ระดับ โดยเก็บผลเป็นจำนวน 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งเก็บผลข้อมูล 10 ข้อมูล แล้วนำมาเฉลี่ยจะได้ผลผลิตโอโซนออกมาในแต่ละครั้ง จากการทดลองทั้งสองเงื่อนไขโดยการควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ ได้ผลดังภาพประกอบ 34

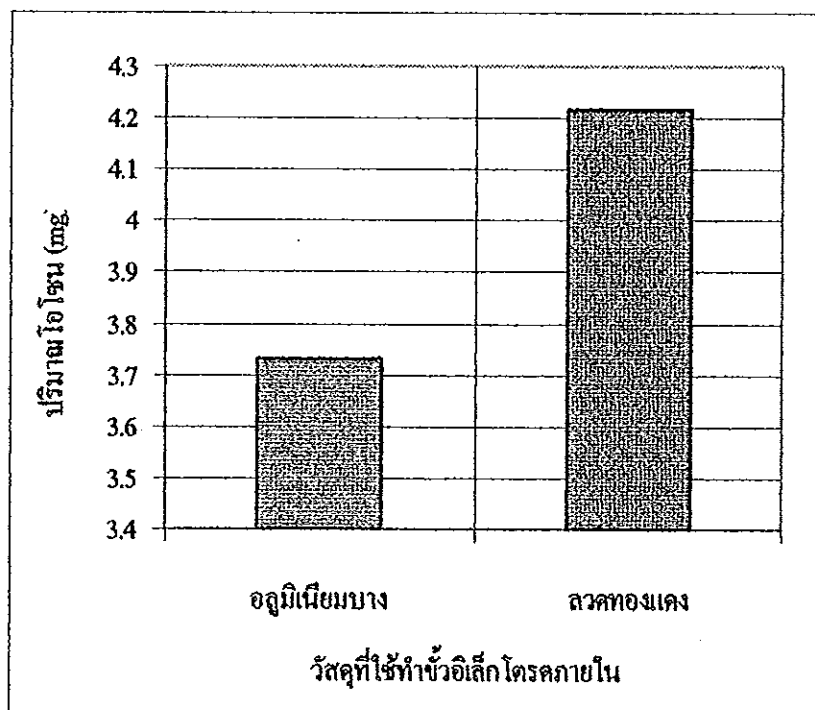
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงปริมาณโอโซนกับการใช้สารซีโอโลด ในระบบการกำเนิดโอโซน



จากภาพประกอบ พบว่า เมื่อมีการใช้สารซีโอไลต์ไประยะเวลาหนึ่งแล้วผลผลิตโอโซนที่ได้จะมีค่าลดต่ำลงถึงแม้ว่าจะมากกว่าที่ไม่ได้ใช้สารซีโอไลต์ก็ตาม ดังนั้น จำเป็นจะต้องมีการฟื้นฟูสภาพสารซีโอไลต์เมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้ทำให้ผลผลิตโอโซนที่ได้เพิ่มมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากผลผลิตโอโซนที่ได้จากสารซีโอไลต์ที่เพิ่งบรรจุ จะให้ผลผลิตโอโซน มากกว่าที่ไม่ได้ใช้สารซีโอไลต์ ประมาณ 7 เท่า

1.3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงข้ออิเล็กทรอนิกส์ภายในของเซลล์โอโซนในเซอรกับผลผลิตโอโซนที่ได้ในการกำเนิดโอโซนของระบบ การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่เราพบปัญหาข้อไฟฟ้าที่ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ภายในหลังจากถอดประกอบออกมาแล้วพบความเสียหายจึงได้คิดหาวัสดุตัวใหม่เข้ามาแทน และได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลผลิตโอโซนที่ได้

ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์ภายในเซลล์โอโซนในเซอร ที่สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



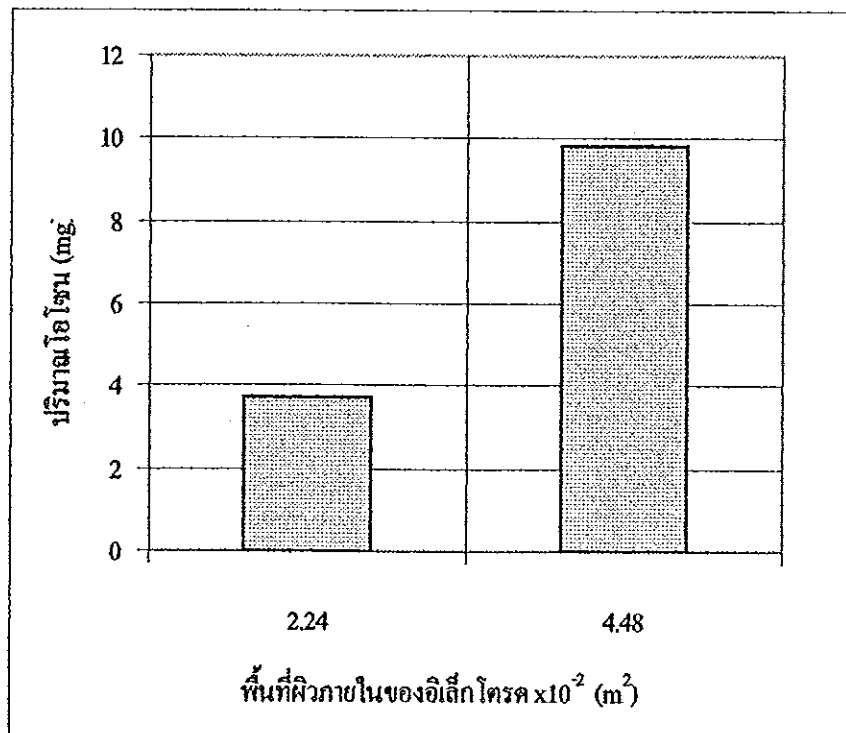
จากภาพประกอบ พบว่า ปริมาณโอโซนที่ได้มาจากวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์ภายในด้วยลวดทองแดงจะให้ปริมาณ โอโซนมากกว่าที่ทำจากอลูมิเนียมบาง ประมาณ 2.69 เท่า ทั้งนี้จะ

มีสาเหตุจากหลายประการ อันดับแรก คือ การใช้หลอดทองแดงไม่มีปัญหาในเรื่องการอาร์ดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานไปในการนี้ ต่อมา ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุพบว่า หลอดทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอลูมิเนียมบาง

1.3.3 ผลการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวภายในหัวอิเล็กโทรดของเซลล์ไอโซไนเซอร์กับผลผลิตไอโซนที่ได้ในการกำเนิดไอโซนของระบบ

ในการทดลองครั้งนี้ได้เพิ่มพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดในการดิสชาร์จไฟฟ้าขึ้น นั่นคือการสร้างเซลล์ไอโซไนเซอร์ขึ้นมาอีก 1 เซลล์ที่มีขนาดอย่างอื่นเหมือนเดิมทุกประการ ยกเว้นการเพิ่มความยาวของเซลล์ให้มีขนาดเป็นสองเท่าของเซลล์เดิม ซึ่งก็จะได้พื้นที่ผิวในการดิสชาร์จเพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่าจากเซลล์ไอโซไนเซอร์เดิมแล้วทำการทดลองเพื่อที่จะเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตไอโซนในแต่ละเซลล์ไอโซไนเซอร์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณ ไอโซนกับพื้นที่ผิวอิเล็กโทรดภายในที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min

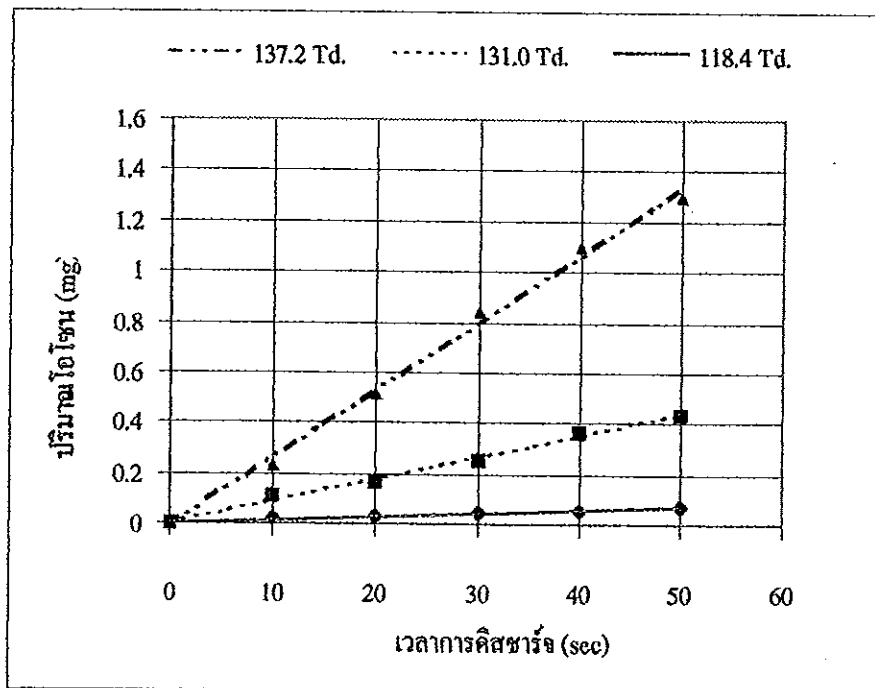


ตอนที่ 2 ผลการศึกษาผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการผลิตก๊าซโอโซนของระบบ

การศึกษาในตอนนี้จะเป็นผลของการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมหลังจากทำการทดลองเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เสร็จแล้วเพื่อที่จะศึกษาผลที่เกิดขึ้นตามมาหลังจากมีการผลิตโอโซนของระบบไปเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว จะพบการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เป็นไปอย่างไรบ้าง

2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาการคิสร่างที่มีต่อผลผลิตโอโซน ในที่นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเวลาการคิสร่างต่างๆ เพื่อวัดปริมาณผลผลิตของโอโซนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการคิสร่าง ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 42 ระหว่างผลผลิตโอโซนที่ได้กับเวลาการคิสร่างจะดับวินาที ที่ค่าสนาม E/n_{tr} (reduced field) ระดับต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าในการทดลองเป็นการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้า แต่แสดงในรูปของสนาม E/n_{tr} ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง สนามไฟฟ้าต่อจำนวนโมเลกุลของอากาศ พารามิเตอร์นี้มีความสำคัญที่มักแสดงในฟิสิกส์คิสร่างด้วยเช่นกัน และผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 41 ระหว่างผลผลิตโอโซนกับเวลาการคิสร่างจะดับวินาที

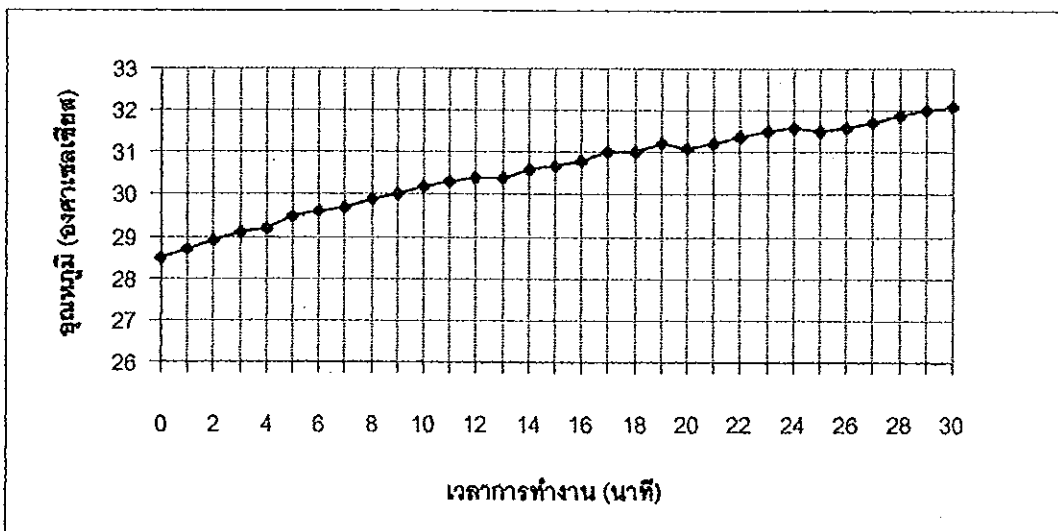
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับเวลาการคิสร่าง ที่อัตราการใช้ 1.42 ลิตรต่อนาที



จากกราฟเมื่อเพิ่มเวลาในการละลายไอโซนในแต่ละค่าของสนาม E/n_{tr} (reduced field) ปริมาณผลผลิตไอโซนจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่ปริมาณผลผลิตไอโซนที่ 137.2 Td. จะเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณผลผลิตไอโซน ที่ 131.0 Td. ประมาณ 2 เท่า ที่เวลาการคิสซาร์จเดียวกัน และ ที่ 131.0 Td. จะมีปริมาณผลผลิตไอโซนมากกว่าปริมาณไอโซน ที่ 118.4 Td. ประมาณ 2 เท่า ที่เวลาการคิสซาร์จเดียวกัน

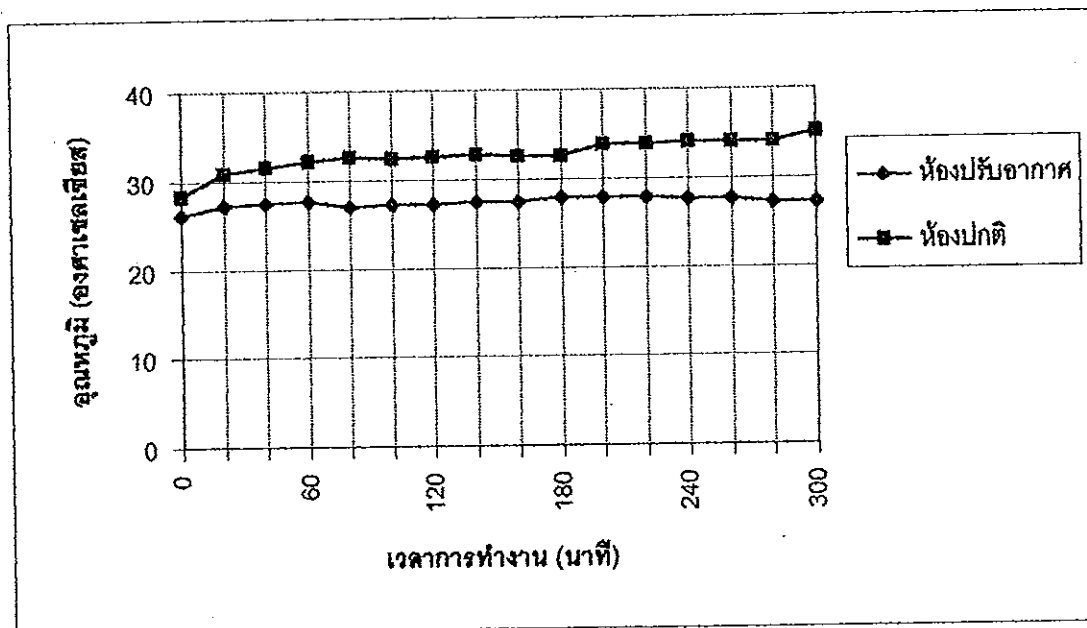
2.2 ผลการทำงานของเครื่องกำเนิดไอโซนกับอุณหภูมิที่ผิวของหลอดไอโซนในเซอร์ที่เวลาการทำงานต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ติดที่ผิวภายนอกของเซลล์ไอโซนในเซอร์เชื่อมติดด้วยการซีลโคน โดยที่สายเทอร์โมคัปเปิลจะไปเสียบกับ มัลติมิเตอร์ของบริษัทฟลุค รุ่น 87 เพื่อวัดอุณหภูมิภายนอกของเซลล์ไอโซนในเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการทำงานของระบบ ผลการทดลองแสดงในกราฟรูป 42 และกราฟรูป 43 ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายนอกของเซลล์ไอโซนในเซอร์กับเวลาการทำงานของระบบ

ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายนอกชั่ววี่เล็กโครคกับเวลาการทำงานของเครื่องกำเนิดไอโซน ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min อุณหภูมิของห้องก่อน และหลังการทดลองเป็น 28.2 และ 28.2 องศาเซลเซียส



จากกราฟวัดอุณหภูมิที่ผิวข้อเล็กโครคภายนอกเพื่อดูว่าในการทำงานของหลอดไอโซไนเซอร์มีความร้อนเกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศในหลอดไอโซไนเซอร์อย่างไร โดยในที่นี้ได้ อนุมาณว่าอุณหภูมิที่ผิวภายนอกมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในช่องว่างอากาศ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนทั้งแบบแผ่รังสี การพาความร้อน และการนำความร้อนออกสู่ระบบด้วยข้อเล็กโครคซึ่งทำจากโลหะไร้สนิมสเตนเลส พบว่า เมื่อทำงานเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิมีความแตกต่างกันประมาณ 3 - 4 องศาเซลเซียส เท่านั้นถือว่าอุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้งในการวัดจะใช้เวลาในการทำงานไม่เกิน 20 นาที จึงอนุมานได้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น $\pm 3-4^{\circ}\text{C}$ ที่เกิดขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตไอโซนของระบบ เนื่องจากระบบที่ใช้จะทำงานในช่วงเวลาสั้นๆ และเมื่อดูผลของปริมาณไอโซนจากภาพประกอบ 40 ประกอบกันแล้วปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ต่อเวลาออกมาคงที่

ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวภายนอกข้อเล็กโครคกับเวลาการทำงานของระบบการกำเนิดไอโซน ซึ่งเปรียบเทียบกับระหว่างห้องปรับอากาศกับห้องปกติ ที่ สนามไฟฟ้า $3.22 \times 10^3 \text{ kV/m}$ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min

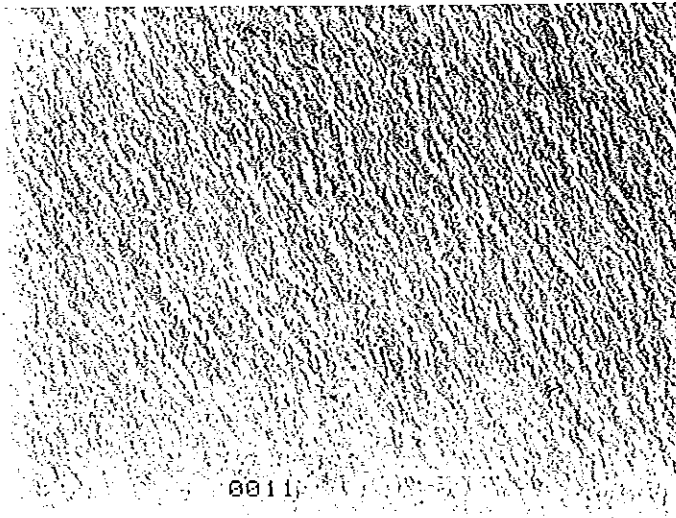


อุณหภูมิที่ห้องปกติ ก่อน และหลังการทดลองเป็น 27.9 และ 30.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่ห้องปรับอากาศ เป็น 25 องศาเซลเซียส คงที่ โดยประมาณ เมื่อมีการทำงาน เป็นระยะเวลาประมาณ 300 นาที จากการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด ภายนอกหลอดไอโซไนเซอร์ ที่ห้องปกติกับห้องปรับอากาศ ที่อุณหภูมิห้องปรับอากาศมีความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ 1-3 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ห้องปกติมีความแตกต่างของ อุณหภูมิตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดประมาณ 7 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยมาก และค่อนข้างจะคงที่แม้ว่าเวลาการทำงานของระบบจะมากขึ้นก็ตาม

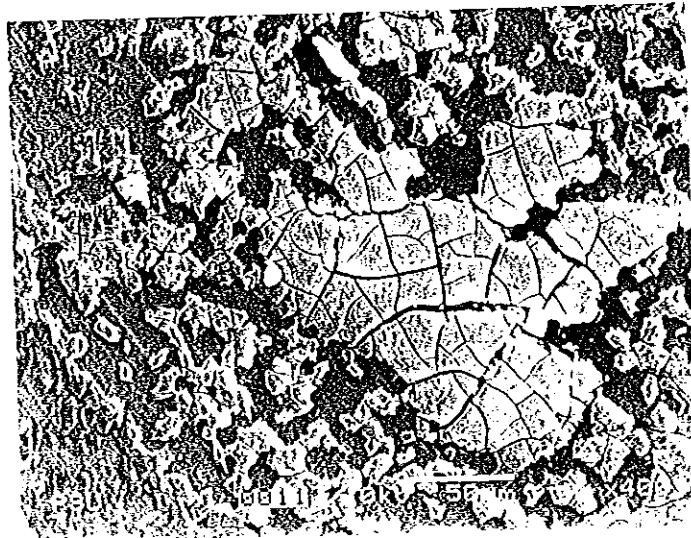
2.3 ผลการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสนาม (SEM) เพื่อดูแผ่นอะลูมิเนียมบางที่ใช้ เป็นขั้วอิเล็กโทรดภายในของเซลล์ไอโซไนเซอร์ที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลองเสร็จสิ้น

เนื่องจากผู้วิจัยได้ตรวจพบว่าการลอกของผิวแผ่นอะลูมิเนียมบางเมื่อถอดประกอบเซลล์ ไอโซไนเซอร์ออกมาดูจึงได้นำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อดูลักษณะของ อะลูมิเนียมบางว่ามีความเสียหายหรือไม่อย่างไรเมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าสูงๆ เป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมี ประโยชน์ในการทำนายผลของความเสียหายว่ามีสาเหตุจากอะไร นอกจากนี้ยังเป็นแนวความคิด ค่บการสร้างและออกแบบ เพื่อพัฒนาระบบของเซลล์ไอโซไนเซอร์ต่อไปในอนาคต จากภาพถ่ายที่ ดูจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสนาม (SEM) เปรียบเทียบก่อน และหลังการทำงาน พบว่า แผ่นอะลูมิเนียมบางมีความเสียหายอันเนื่องมาจากการอาร์คไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้มีการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ และอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณผลผลิตไอโซนที่ได้ลดน้อยลงจาก ความเป็นจริงด้วย

ภาพประกอบ 45 ลักษณะของผิวอคูมิเนียบบางที่ไม่ได้ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



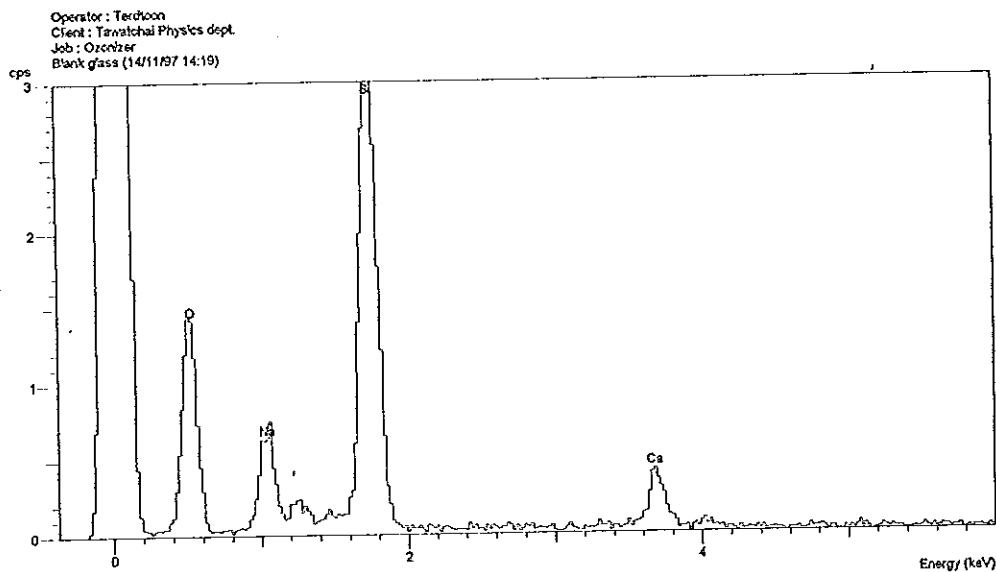
ภาพประกอบ 46 ลักษณะของผิวอคูมิเนียบบางที่ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



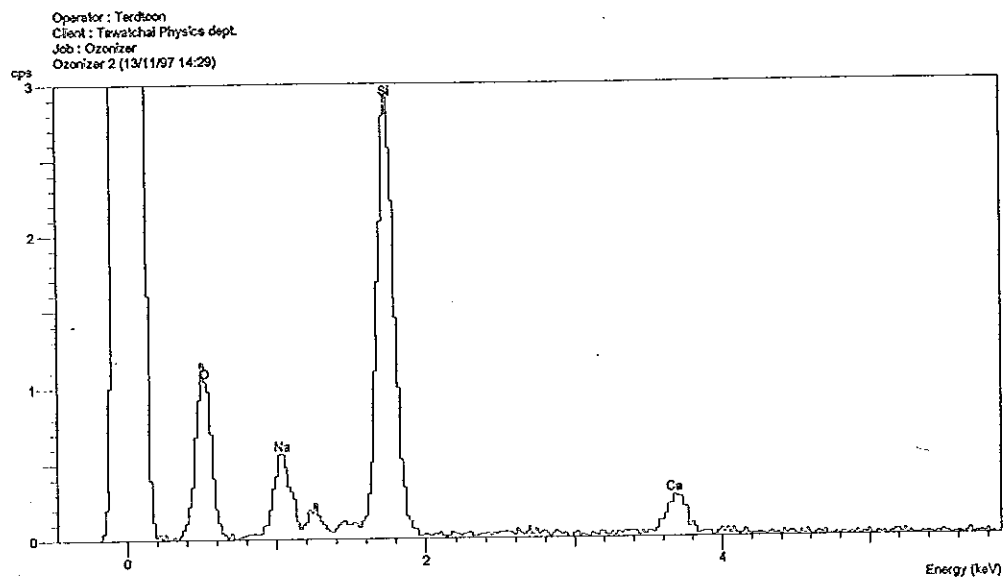
2.4 ผลการตรวจดูผิวของแก้วทนความร้อนที่ใช้เป็นไดอิเล็กตริกในเซลล์ไอโซโทปไนเซอร์ เพื่อสังเกตดูว่ามีสารอะไรตกค้างอยู่ภายในบ้าง หลังจากผ่านการคิสซาร์จมาเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง

จากทฤษฎีทราบว่าเมื่อใช้อากาศป้อนเข้าไปในระบบการกำเนิดไอโซโทปจะทำให้เกิดมีคราบของสารประกอบพวกไนโตรเจนขึ้นที่ผิวของแก้วที่ใช้ทำไดอิเล็กตริก จึงทำให้ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยนำชิ้นส่วนของแก้วเล็กขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร ไปติดไว้ที่ผิวแก้วภายในช่องว่างคิสซาร์จ จากผลการตรวจก่อน และหลัง การทำงานของเซลล์ไอโซโทปไนเซอร์ ให้ผลการวิเคราะห์ที่เหมือนกัน จึงกล่าวได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในช่องว่างคิสซาร์จ

ภาพประกอบ 47 ลักษณะของผิวไดอิเล็กตริกที่ยังไม่ได้ผ่านการทำงาน เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)



ภาพประกอบ 48 ลักษณะของผิวไดอิเล็กตริกที่ผ่านการทำงานเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อ
ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)



ตอนที่ 3 ผลการใช้ก๊าซโอโซนในการฆ่าเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำต่างๆ ที่ได้เลือกมาใช้ในการวิจัย

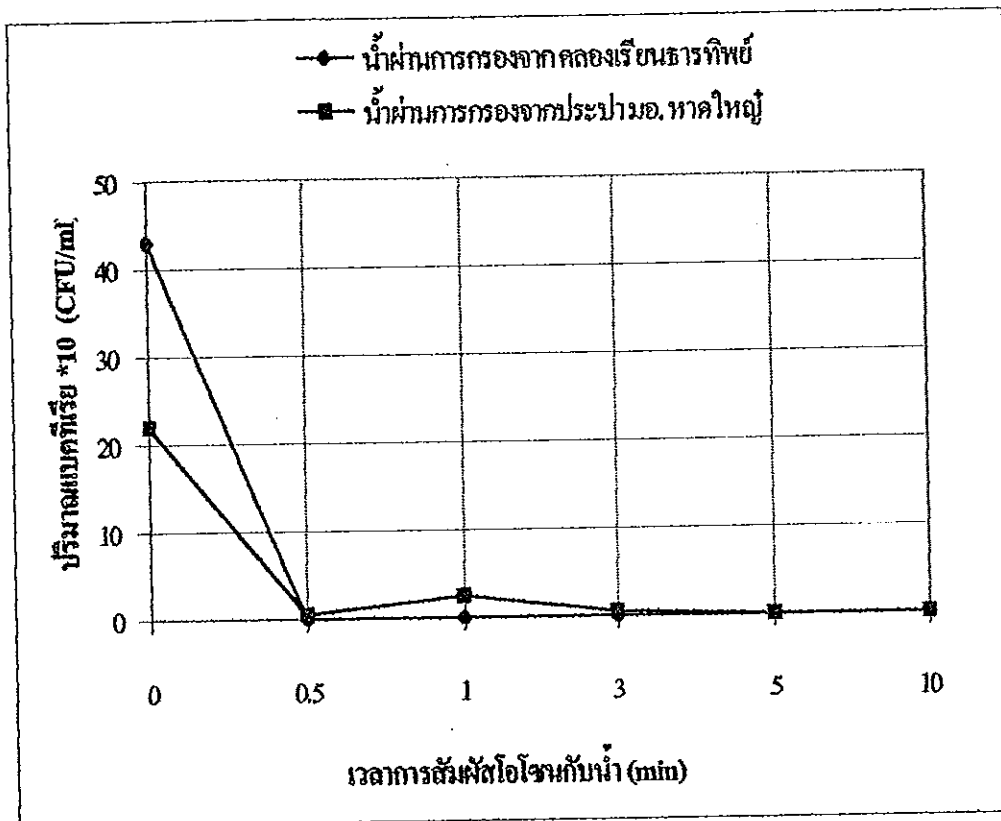
ในตอนนี้จะ ได้แสดงผลของการทดลอง และทดสอบถึงการนำก๊าซโอโซนที่ภาวะเหมาะสมของระบบที่ผู้วิจัยได้เลือกไว้ไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำจากแหล่งต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัดเชื้อโรคที่มีในน้ำของระบบและประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านโอโซน และนำไปสู่การพัฒนากระบวนการกำเนิดโอโซนในระดับมหภาคต่อไป ซึ่งผลของการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นข้อๆ ดังนี้

1. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำดิบผ่านการกรอง (น้ำดื่มและน้ำประปา)
2. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรอง (น้ำทิ้งในบ่อบำบัด
ออกซิเจนของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์)
3. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำทะเล (น้ำนางุ้ง)

1. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำดิบผ่านการกรอง (น้ำดื่มและน้ำประปา)

ในหัวข้อนี้ผลการวิจัยแสดงเป็นกราฟ พิจารณาคามเชื้อแบคทีเรียที่วิเคราะห์ในการวิจัยนี้ได้วิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำผ่านการกรองแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้ 1. Total bacteria, 2. Total coliform, 3. Fecal coliform และ 4. Fecal streptococci ในแต่ละชนิดจะใช้เทคนิคที่แตกต่างกันออกไปในการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อที่มีอยู่ในน้ำ เชื้อที่เลือกนี้เป็นเชื้อที่บ่งชี้คุณลักษณะของน้ำทางชีววิทยาที่เป็นไปตามมาตรฐานของน้ำดื่ม และน้ำเสีย ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 49 ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรียกับเวลาการสัมผัสโอโซน ในน้ำผ่านการกรอง

ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรียกับเวลาการสัมผัสโอโซน
ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



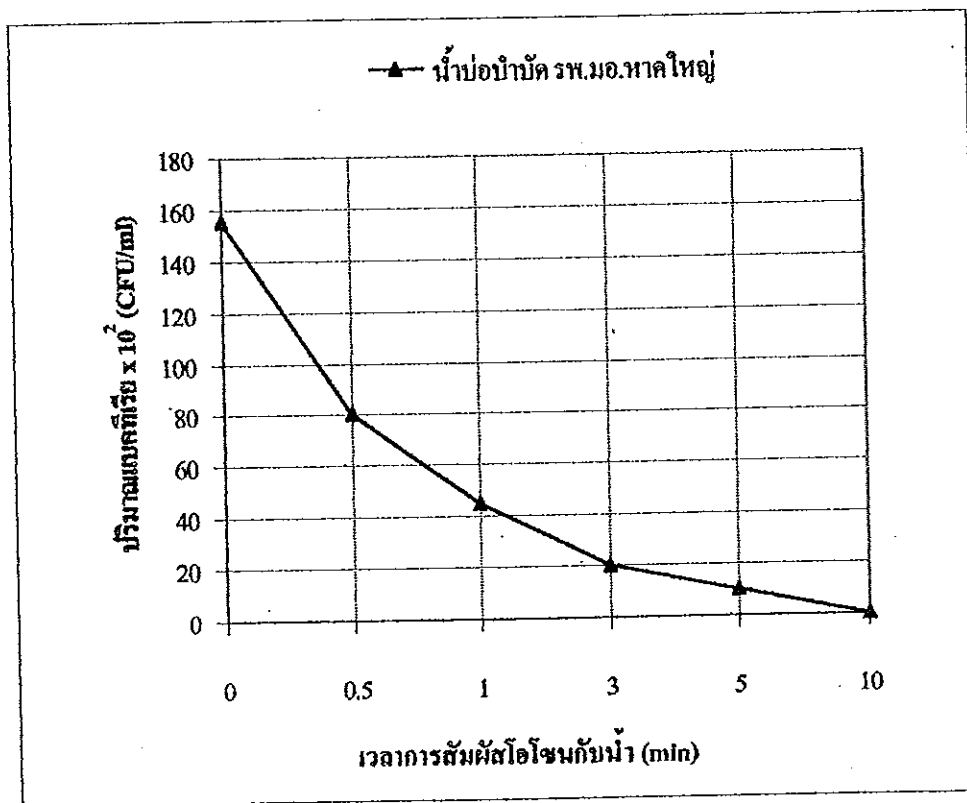
ผลการนำปริมาณน้ำดิบผ่านการกรองจากทั้งสองแหล่งมาผ่านก๊าซโอโซนแล้ว วิเคราะห์ผลของเชื้อแบคทีเรียชนิด total bacteria พบว่า ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำดิบผ่านการกรองจากทั้ง 2 แหล่ง ที่ระดับเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่แตกต่างกันเกือบจะ 2 เท่า แต่เมื่อนำมาผ่านก๊าซโอโซน อัตราการผลิตในอากาศ $0.4 \text{ mgO}_3/\text{min}$ จะใช้เวลาในการสัมผัสโอโซน 0.5 นาที ในการทำให้น้ำปราศจากเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผ่านการกรองที่เป็นตัวก่อโรคแก่ผู้บริโภค และเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำบริโภค (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2535) สำหรับการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ที่เหลืออีก 3 ชนิด ที่กล่าวมา ในน้ำทั้งสองแหล่งนี้ พบว่า มีค่าประมาณ 5 MPN/100 ml หลังจากผ่านโอโซนที่เวลา 0.5 นาที ปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำบริโภค จากภาพประกอบด้านบนมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เวลาในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียภายใน 0.5 นาที เช่นกัน แม้จะมีการเพิ่มระดับของเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นขึ้นอีก

และมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มอัตราการผลิตโอโซนให้มีสูงขึ้น ก็สามารถที่จะลดเวลาในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้เช่นกัน แต่ก็จะมีปัญหาเรื่องของการใช้จ่ายที่เพิ่มตามมาด้วย

2. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่ไม่ได้ผ่านการกรองซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากบ่อน้ำบาดาลออกซิเจนของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

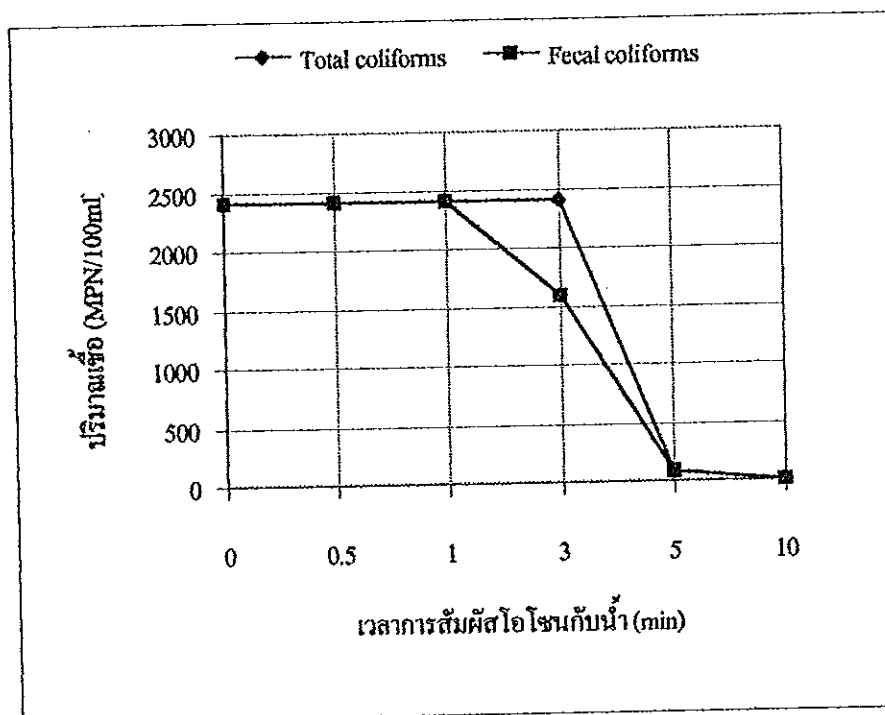
ในหัวข้อนี้ผลการวิจัยจะวิเคราะห์หาเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดเหมือนหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อน้ำทิ้งผ่านระบบโอโซน ตามภาพประกอบ 33 ซึ่งน้ำที่นำมาผ่านการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยก๊าซโอโซนจะเป็นน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ เลย เนื่องจากผู้วิจัยต้องการดูว่าที่ปริมาณเชื้อมากๆ และมีลักษณะของสารอินทรีย์อื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่จะมีผลอย่างไรต่อการบำบัดน้ำด้วยโอโซน

ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรียกับเวลาการสัมผัสโอโซน ที่สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



น้ำทิ้งจากบ่อบำบัดโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์นี้มีปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น 14,800 CFU/ml ใช้ก๊าซโอโซนอัตราการผลิต 0.42 mgO₃/min ในการทำให้กำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ 100 % จะต้องใช้เวลาในการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำทิ้ง เป็นเวลา 10 นาที เวลาในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเป็นเฉพาะเงื่อนไขนี้เท่านั้น ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขตัวใดตัวหนึ่งจากนี้ไปก็จะทำให้ผลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้วย จากการสังเกตเพิ่มเติมเปรียบเทียบน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนจะมีการตกตะกอนอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับน้ำที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาเดียวกัน ดังนั้นน้ำที่จะมาผ่านการบำบัดด้วยโอโซนน่าจะผ่านกระบวนการบำบัดทางกายภาพมาก่อน ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเพิ่มกำลังผลิตโอโซน และจะใช้เวลาในการบำบัดได้รวดเร็วยิ่งขึ้นด้วย

ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบคทีเรียกับเวลาการสัมผัสโอโซน ที่สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min

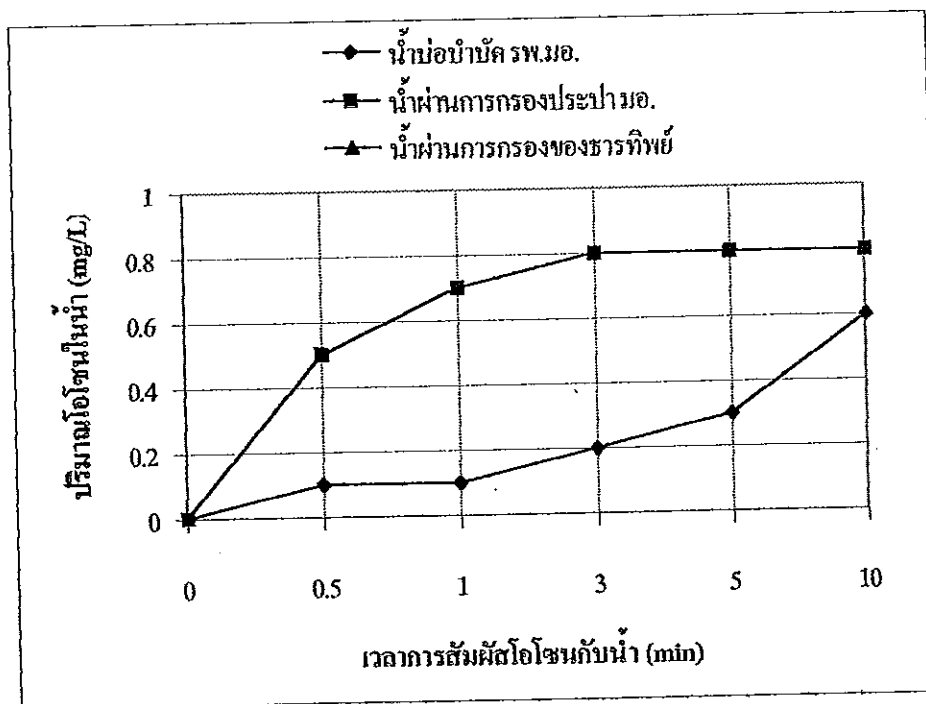


ผลจากกราฟ พบว่า จำนวนเชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม ที่อยู่ในน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ เมื่อนำมาผ่านการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน พบว่า ในช่วงเวลาการ

สัมผัสโอโซนช่วงแรกคือ 0 - 1 นาที ผลจากกราฟจะแสดงไม่เห็นถึงการลดลงของแบคทีเรีย แต่จริงๆ แล้วน่าจะมีการลดลงของจำนวนแบคทีเรียในช่วงนี้ แต่ผลวิเคราะห์แสดงได้ไม่เกินค่านี้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาการสัมผัสโอโซนต่อมาปริมาณของแบคทีเรียจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และใช้เวลาในการสัมผัสกับก๊าซโอโซน 10 นาที ในการกำจัดเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำทิ้งได้ 100 %

ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในน้ำกับเวลาการสัมผัส

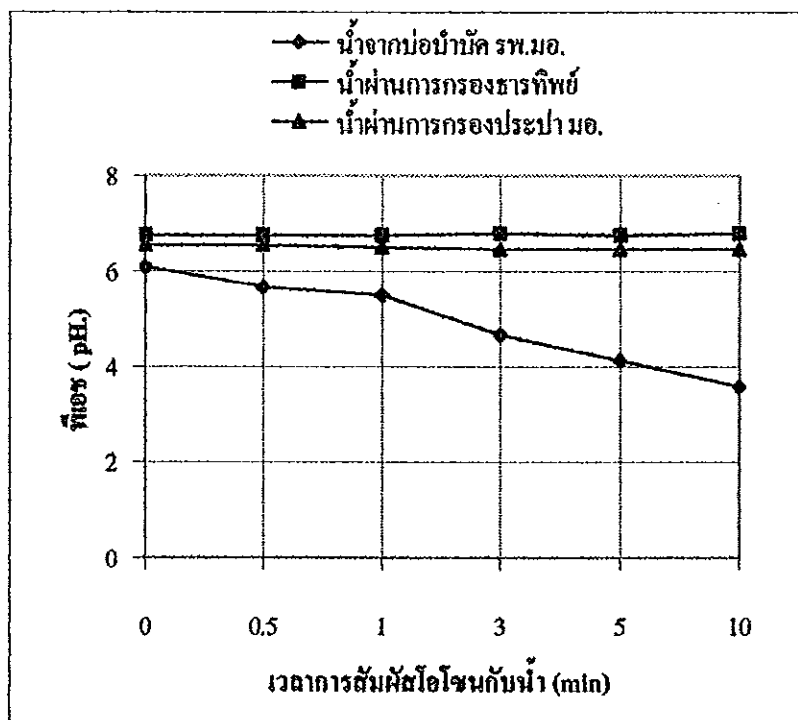
โอโซน ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



ผลการทดลองที่ได้นี้จะทำการวัดปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำโดยใช้ชุดทดสอบวัดการละลายของโอโซนในน้ำ (Parin test) จากกราฟ พบว่า น้ำดิบผ่านการกรองทั้งสองแหล่งได้ผลการความเข้มข้นโอโซนในระดับที่เท่ากันในทุกๆ ช่วงเวลาในการบำบัดด้วยโอโซน และมีค่าความเข้มข้นของโอโซนสูงกว่า น้ำทิ้งภายในบ่อน้ำบักออกซิเจน อันเนื่องมาจากน้ำที่ผ่านการกรองนี้มีสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ในน้ำน้อยกว่าทำให้ก๊าซโอโซนที่จะไปทำ

ปฏิกิริยากับสิ่งเหล่านี้ก็น้อยด้วยเช่นกันทำให้วัดการละลายของโอโซนออกมาได้มากกว่า ซึ่งจะสังเกตว่าที่เวลาติสซารังเพิ่มมากขึ้นปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจะเพิ่มขึ้นด้วย และที่เวลาที่เพิ่มขึ้นนี้จากผลที่ผ่านมาสังเกตพบว่าปริมาณเชื้อจะลดลงซึ่งก็แสดงว่าปริมาณของก๊าซโอโซนที่จะไปทำปฏิกิริยากับเชื้อและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ก็น้อยลงด้วยจึงทำให้ค่าปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่วัดได้เพิ่มขึ้นด้วยในน้ำทั้ง 2 ชนิด เมื่อเวลาการบำบัดด้วยก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาการสัมผัสโอโซน ที่ สนามไฟ
ฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



หลังจากทำการวัดค่าพีเอชของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซน พบว่า น้ำดิบผ่านการกรองจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชน้อยมากซึ่งถือได้ว่าอยู่ในระดับที่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชของน้ำที่ขังแล้ว พบว่า ค่าพีเอชของน้ำที่ขังจะลดต่ำลงมีสภาพเป็นกรดเมื่อสิ้นสุดเวลาการบำบัด ที่ 10 นาที ค่าความเป็นกรดนี้ น่าจะมีผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียจำพวกที่ไม่ใช้ออกซิเจนทำงานให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก่อนที่จะถูกกำจัดด้วยโอโซน หรือไม่ก็เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำที่ขังนั้นซึ่งเป็นสารอนินทรีย์อื่นๆ ที่ไม่ได้ทำการ

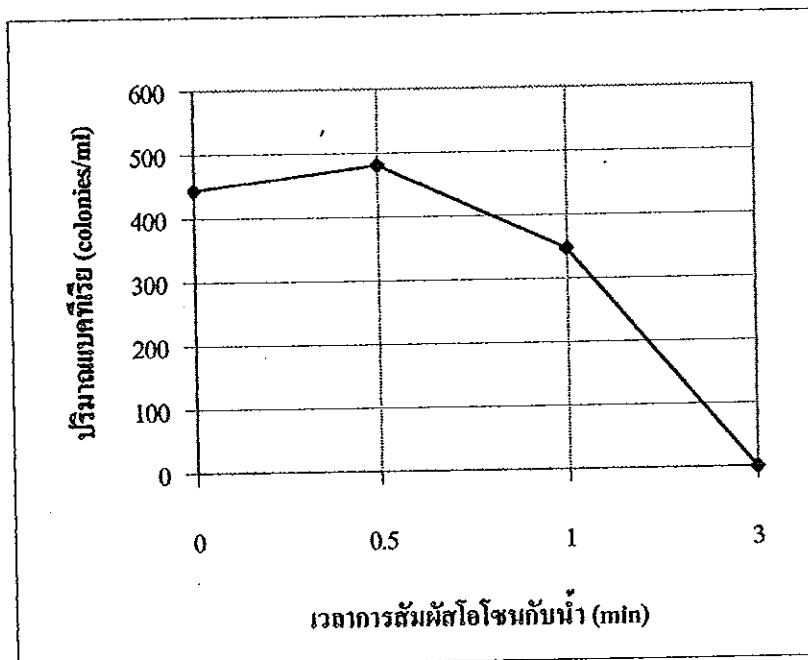
วิเคราะห์ จากผลครั้งนี้ทำให้การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดทางกายภาพก่อนข้างจะยุ่งยากและมีปัญหาที่จะต้องแก้ไขตามมาด้วย

3. ผลของการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำนาุ้ง

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลการวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาเชื้อแบคทีเรีย ชนิด Total bacteria และ *Vibrio* sp. ที่มีอยู่ในน้ำนาุ้งซึ่งเชื้อเหล่านี้เป็นสาเหตุของเชื้อเรืองแสงที่มีในน้ำและทำให้กุ้งเป็นโรคตายในที่สุด และเป็นปัญหาแก่เกษตรกรในการเลี้ยงกุ้งนอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลการวิจัยของคุณภาพของน้ำนาุ้งที่ผ่านก๊าซโอโซนควบคู่ไปอีกด้วยซึ่งมีปัจจัยในการสนับสนุนที่สำคัญเกี่ยวข้องกับอัตราการตายของกุ้งด้วย ผลการวิจัยได้แบ่งออกเป็น ดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย ชนิด *Vibrio* sp. ที่เวลาการสัมผัสก๊าซโอโซนต่างๆ กัน

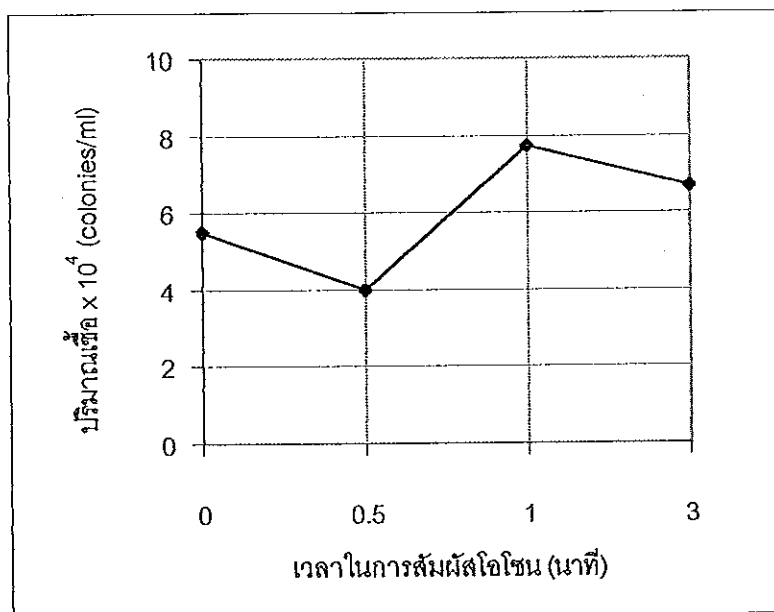
ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อไวบริโอกับเวลาการสัมผัสก๊าซโอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



ผลจากกราฟ พบว่า ปริมาณเชื้อแบคทีเรียชนิด *Vibrio* sp. ที่มีอยู่ในน้ำนาุ้งถูกกำจัดได้ 100 % ด้วยก๊าซโอโซนใช้เวลาการสัมผัสเพียง 3 นาที ที่ระดับปริมาณเชื้อ *Vibrio* sp. ที่แสดงนี้

เท่านั้นที่ใช้เวลาในการบำบัด 3 นาที ถ้าเกิดมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อเวลาที่ใช้ก็อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้เช่นกันที่อัตราการผลิตโอโซนนี้ แต่ผลที่ได้นี้ก็สามารนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยจะต้องออกแบบและสร้างตัวสัมผัส (Contactor) โดยใช้เวลา 3 นาที ให้น้ำอยู่ในตัวสัมผัส โดยที่ภายในนี้จะมีหัวทรายช่วยในการกระจายก๊าซให้สัมผัสกับน้ำได้เป็นอย่างดี

ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดกับเวลาการสัมผัสโอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



ผลจากกราฟ พบว่า ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณโอโซนที่เจือลงไปใต้น้ำนาุ้งที่เวลาต่างๆ ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้จะมีประโยชน์ในระบบนิเวศของน้ำนาุ้งด้วย แต่ยุ่งยากมากที่จะอธิบายว่าทำไมเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ทำไมยังคงอยู่ได้ น่าจะเป็นที่ปริมาณโอโซนที่ใช้ยังมีความเข้มข้นน้อย หรือเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้มีการแฝงตัวอยู่ในสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดี สิ่งเหล่านี้จะต้องทำการศึกษาระดับต่อไปอีก

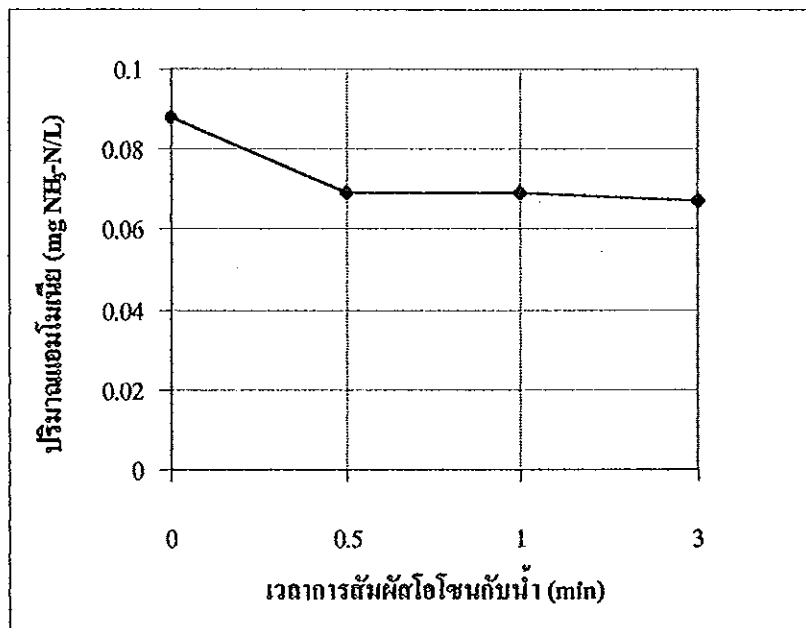
3.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำนาุ้งก่อนและหลังการผ่านก๊าซโอโซน ที่เวลาการสัมผัสก๊าซโอโซนต่างๆ กัน ซึ่งในส่วนนี้สามารถแบ่งออกได้ตามลำดับดังนี้

3.2.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟิออซ

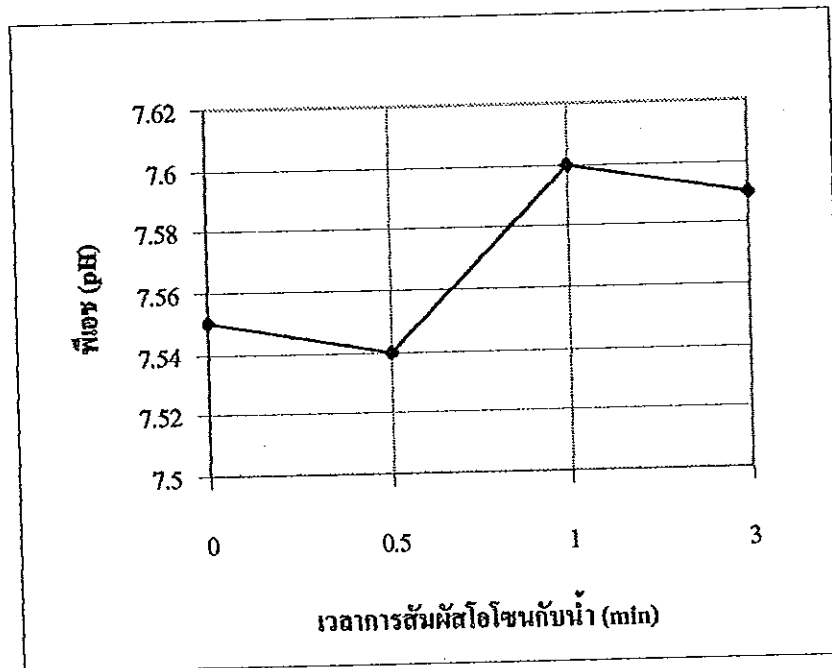
3.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความกระด้าง

ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียกับเวลาการสัมผัสโอโซนของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min

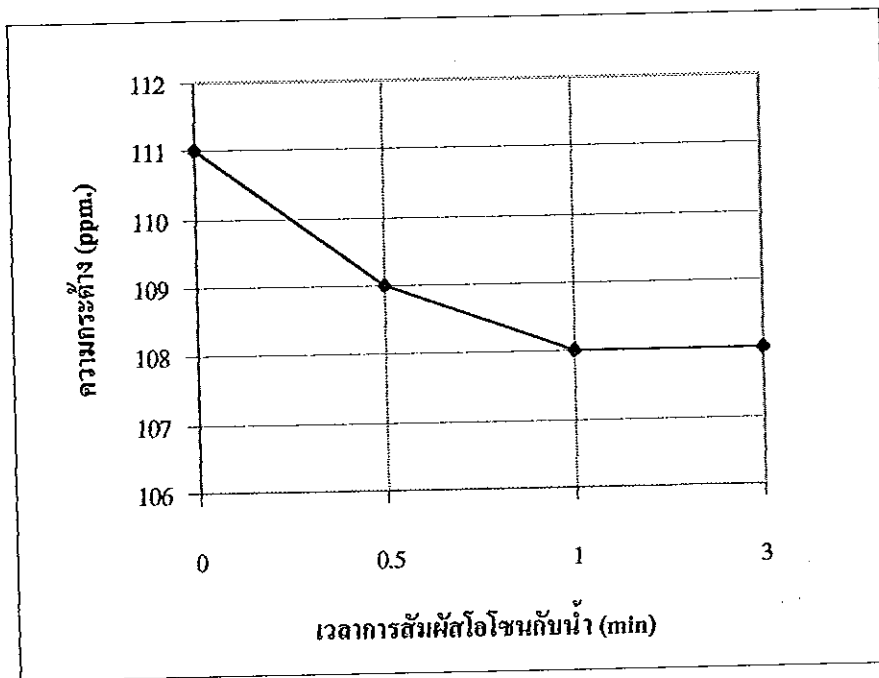


ผลจากกราฟ พบว่า ปริมาณโอโซนที่เจือลงไปใ้ในน้ำที่เวลาต่างๆ มีผลกระทบต่อปริมาณของแอมโมเนียที่มีอยู่ในน้ำนาุ้ง นั่นคือ ปริมาณแอมโมเนียจะลดลงจนถึงระดับคงที่ระดับหนึ่งเท่านั้นเมื่อเจือโอโซนลงในน้ำนาุ้ง ซึ่ง เป็นประโยชน์ต่อคุณภาพของน้ำนาุ้ง เนื่องจากแอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีนของจุลินทรีย์ในน้ำ และเมื่อปริมาณแอมโมเนียในน้ำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กุ้งป่วย และไม่กินอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กุ้งตาย

ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟิโชนกับเวลาการสัมผัสโอโซนของน้ำ
 นาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้างกับเวลาการสัมผัสก๊าซโอโซน
ของน้ำนาุ้ง ที่ สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min



ผลจากกราฟ พบว่า ปริมาณโอโซนที่เจือลงไปใต้น้ำนาุ้งที่เวลาต่างๆ มีผลในทางที่ดี นั่นคือ เวลาการเจือโอโซนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความกระด้างของน้ำลดต่ำลง และคาดว่าเมื่อใช้เวลาการเจือต่อไปอีก จะทำให้ค่าความกระด้างอยู่ในระดับคงที่ ซึ่งง่ายในการจัดการในเรื่องของน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้ง

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย ซึ่งได้แสดงผลไว้ในบทที่ 4 รวมไปถึงข้อเสนอแนะในการวิจัยและปัญหา ทั้งนี้เพื่อแสดงเหตุผล และวิเคราะห์ผลการวิจัยให้ชัดเจนขึ้นว่าเหตุใดผลการวิจัยจึงเป็นเช่นนั้น โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นข้อๆ ตามลักษณะผลการทดลองที่ได้จากการวิจัย ดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์ผลผลิตโอโซนที่ได้ของระบบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์
- การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบ
- การวิเคราะห์ผลของการนำก๊าซโอโซนไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำจากแหล่งต่างๆ
- การสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะในการวิจัย

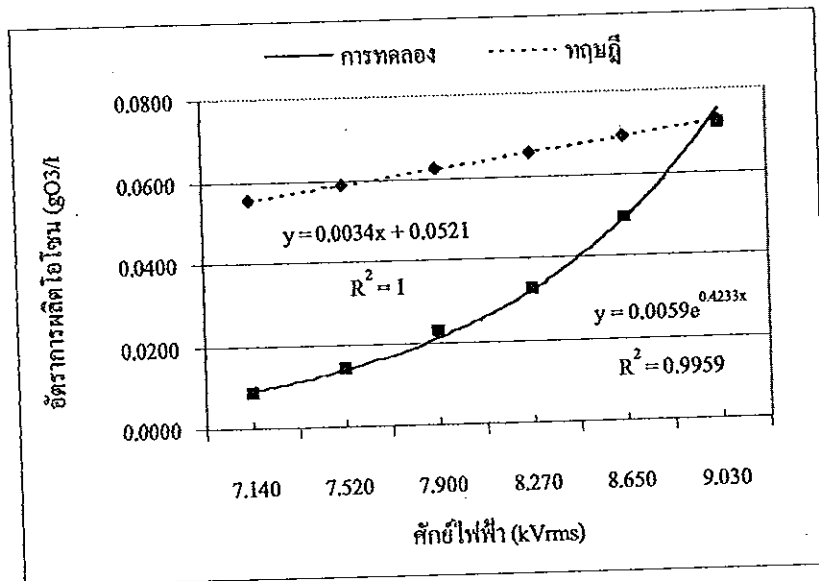
การวิเคราะห์ผลผลิตโอโซนที่ได้ของระบบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์

ในหัวข้อนี้จะได้วิเคราะห์ตามลำดับผลการวิจัยตามบทที่ 4 เป็นข้อๆ ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้น เพราะว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะไปกระตุ้นให้มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออน ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาที่จะได้มาซึ่งผลผลิตโอโซนที่มากขึ้นตามความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะยืนยันได้จากกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์ของโอโซนเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน เมื่อนำค่าอัตราการผลิตโอโซน (gO_3/h) ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณ ตามสูตร (Masuda et al., 1988) จะได้ดังภาพประกอบ 59 พบว่าอัตราการผลิตโอโซนมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบกำเนิดโอโซนโดยมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าที่ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราการผลิตโอโซนระหว่างผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีได้ 83.78 % , 71.19% , 63.20%

,49.92% ,29.29% และ 1.1 % ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดไปจนสูงสุด ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการผลิตโอโซน

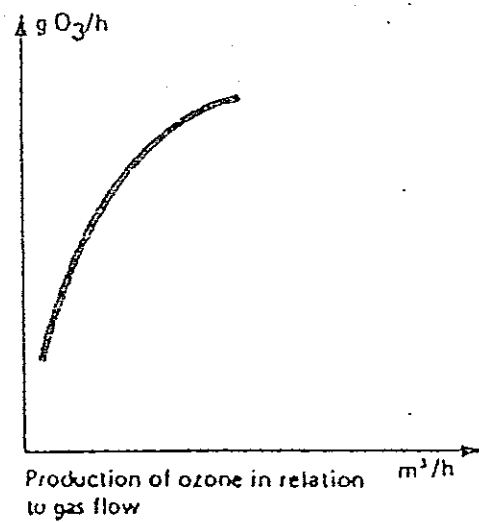
ภาพประกอบ 59 ค่าอัตราการผลิตโอโซน ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากสูตรการคำนวณ เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศ และความดันคงที่



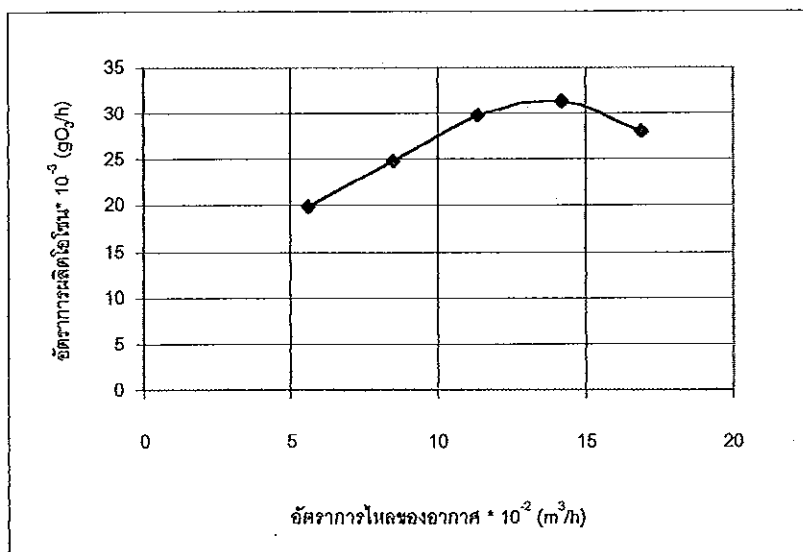
- การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อการผลิตโอโซนของระบบ นั้นคือ ที่เงื่อนไข สนามไฟฟ้า และพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่นั้น พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้ได้ผลผลิตของก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น และหลังจากอัตราการไหลของอากาศช่วงนี้แล้วปริมาณผลผลิตก๊าซโอโซนจะลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ใช้ป้อนกระตุ้นให้มีการแตกตัวระดับหนึ่งที่ทำให้สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้สูงสุด น่าจะมีสาเหตุมาจาก ณ ปริมาณความเข้มข้นสนามไฟฟ้าคงที่นั้น พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (หลอดโอโซนเซอร์) คงที่ ซึ่งเพียงพอต่อจำนวนโมเลกุลของออกซิเจนขนาดหนึ่ง ดังนั้นหากเพิ่มปริมาณโมเลกุลของออกซิเจนให้เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ จึงเป็นผลให้ปริมาณโมเลกุลบางส่วนไม่สามารถถูกดัดแปรและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซโอโซนได้ อีกเหตุผลหนึ่งน่าจะมาจากการที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ จะทำให้โมเลกุลของอากาศหรือก๊าซออกซิเจนไหลผ่านเร็วมากในบริเวณช่องว่างดัดแปร

ทำให้โมเลกุลของก๊าซส่วนมากไม่ได้ถูกทำให้แตกตัว (dissociate) ในเวลาที่เหมาะสม จึงทำให้ผลผลิตโอโซนต่ำกว่าที่อัตราการไหลต่ำๆ

ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ในทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดลอง ระหว่างอัตราการผลิตโอโซนกับอัตราการไหลของอากาศ



(ที่มา : หนังสือ Wastewater Engineering , McGraw-Hill, Inc.)



3. ระบบที่มีการใช้ตัวกรองความถี่ขึ้นจะมีผลต่อการผลิตโอโซนอย่างมาก ระบบที่ใช้ตัวกรองอากาศจะได้ผลผลิตโอโซนมากกว่าระบบที่ไม่ใช้ประมาณ 7 เท่า สำหรับสารซีโอไลต์ที่เพิ่งบรรจุ และ ประมาณ 2 เท่า สำหรับสารซีโอไลต์ที่ใช้ไประยะเวลาหนึ่ง ในส่วนนี้ทำให้เราสามารถบ่งบอกให้ทราบถึงความสามารถในการดูดไอน้ำของสารที่ใช้ทำตัวดูดความชื้นด้วย นั่นคือ จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นลดลงด้วยเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่งซึ่งจำเป็นที่จะต้องนำสารไปดูดอบแห้งเพื่อฟื้นฟูสภาพสารเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดภายในมีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนอย่างไร นั่นคือ อิเล็กโทรดที่ทำด้วยลวดทองแดงจะให้ผลผลิตก๊าซโอโซนมากกว่าอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมบางประมาณ 11.5 % และการเพิ่มพื้นที่ผิวอิเล็กโทรดสำหรับการดิสชาร์จไฟฟ้าภายในช่องว่างดิสชาร์จเป็น 2 เท่า จะได้ผลผลิตก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น ประมาณ 2.5 เท่า แต่ถึงอย่างไรตรงนี้ก็จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงภาวะที่เหมาะสมสำหรับหลอดโอโซนในเซอร์ที่เพิ่มขึ้นนี้ด้วย

การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบ

1. การเปลี่ยนแปลงเวลาการดิสชาร์จทำให้ผลผลิตก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเวลาในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือเวลาในการทำให้ก๊าซแตกตัวแล้วรวมกันเป็นโอโซนมีมากขึ้นก็ย่อมได้ก๊าซโอโซนมากเช่นกัน ผลที่ได้ก็ออกมายังพบว่าระบบที่สร้างนี้สามารถผลิตโอโซนได้อย่างคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่ต้องไม่ใช่ระยะเวลาในการทำงานนานเนื่องจากจะมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลทำให้ผลผลิตโอโซนที่ได้มีความแตกต่างกันออกไปที่เวลาต่างๆ นอกจากนี้ค่าของความเข้มสนาม (E/n_{air}) ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ผลผลิตก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก ความเข้มสนาม (E/n_{air}) เพิ่มขึ้นพลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ยก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันดัง แสดงในภาพประกอบ 61 ซึ่งจะทำให้ภายในช่องว่างดิสชาร์จมีการแตกตัวของก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นก็ย่อมทำให้ได้ผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง
2. อุณหภูมิที่วัดภายนอกของผิวอิเล็กโทรดมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาทำงานนานๆ โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลาแรกๆ ประมาณ 30 นาทีแรกของการทำงาน หลังจากเวลานี้แล้วอุณหภูมิที่วัดมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

และเมื่อวัดผลผลิตโอโซน ณ เวลาต่างๆ เปรียบเทียบผลกระทบที่มาจากอุณหภูมิที่ผิวของเซลล์โอโซนในเซอร์แล้ว พบว่าผลผลิตโอโซนที่มีการเปลี่ยนแปลงน่าจะมาจากพารามิเตอร์อื่นๆ มากกว่าผลของอุณหภูมิที่ผิวของเซลล์โอโซนในเซอร์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่เงื่อนไขของระบบนี้ อุณหภูมิที่ผิวของเซลล์โอโซนในเซอร์ที่เกิดขึ้นนี้ยังไม่เพียงพอที่มีผลต่อการผลิตโอโซนของระบบ เนื่องจากประการแรกเมื่ออุณหภูมิโอโซนที่ได้ในช่วงเวลา 30 นาที ผลผลิตโอโซนที่ได้มีระดับคงที่ระดับหนึ่ง ประการต่อมา เซลล์โอโซนในเซอร์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนมีขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการ และพลังงานที่ใช้ในการผลิตโอโซนน้อยเมื่อเทียบสัดส่วนในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความร้อนแล้วทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่มากนัก และการวิจัยส่วนใหญ่ที่ทำในห้องปฏิบัติการซึ่งอยู่ในห้องปรับอากาศอุณหภูมิจึงไม่มีผลกระทบต่อระบบมากนัก

3. ผลการตรวจสอบสารที่ตกค้างภายในช่องว่างคิซาร์จโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ได้ผลของการสแกนที่เหมือนกันทั้งก่อนการทดลอง และหลังการทดลอง นอกจากพบว่าปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในแก้วมีค่าลดลงหลังการทดลอง แต่ไม่ได้มีการศึกษาต่อไปตรงนี้ แต่อาจจะเกิดจากการคิซาร์จของไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้ปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในเนื้อสารมีค่าลดลง และจากการตรวจสอบสภาพผิวของอะลูมิเนียมบางที่ใช้ในการทำอิเล็กโตรดภายในของเซลล์โอโซนในเซอร์หลังการทดลองเสร็จสิ้น มีความเสียหาย เนื่องจากภายในอิเล็กโตรดตรงส่วนนี้น่าจะมีการอาร์คไฟฟ้าขนาดเล็กๆ จำนวนมากมายทำให้แผ่นอะลูมิเนียมบางได้รับความเสียหายจากปรากฏการณ์นี้

การวิเคราะห์ผลของการนำก๊าซโอโซนไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำจากแหล่งต่างๆ

ในหัวข้อนี้ก็ได้วิเคราะห์ผลการวิจัยเรียงตามลำดับซึ่งแสดงผลในบทที่ 4 เป็นข้อๆ ดังนี้

1. การบำบัดน้ำดิบผ่านการกรองด้วยก๊าซโอโซนสามารถทำได้จริง นั่นคือ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ที่เงื่อนไข สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m และ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min จะใช้เวลาในการบำบัดน้ำเพื่อทำให้น้ำดิบผ่านการกรองปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ระบุตามมาตรฐานน้ำดื่ม ประมาณ 0.5 นาที สำหรับระดับปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ทดลองนี้เท่านั้น

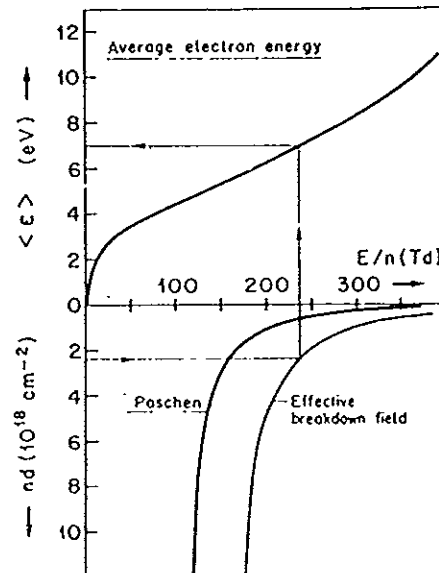
2. การบำบัดน้ำทิ้งด้วยก๊าซโอโซนสามารถทำได้ผลจริง นั่นคือ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ที่เงื่อนไข สนามไฟฟ้า 3.22×10^3 kV/m และ อัตราการไหลของอากาศ 1.42 l/min จะใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรคได้ 100% ที่เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสะอาดของน้ำเสีย ประมาณ 10 นาที นี่เป็นน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ คาดว่า ถ้าน้ำทิ้งนี้ได้ผ่านกระบวนการอื่นๆ มาก่อน เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง จะทำให้ใช้เวลาในการบำบัดด้วยโอโซนน้อยลงอย่างมาก หรือถ้าเพิ่มปริมาณความเข้มข้นโอโซนเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เวลาในการบำบัดลดน้อยลงด้วย และกระบวนการบำบัดด้วยโอโซนของน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอื่นนี้จะต้องมีการปรับสภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว เนื่องจาก น้ำมีสภาพเป็นกรดซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนมีการทำงานผลิตสารจำพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นมาทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดหลังจากการบำบัดด้วยโอโซน หรือไม่ก็ด้วยสาเหตุอื่นซึ่งเป็นตรงส่วนนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจและน่าจะต้องมีการศึกษากันต่อไป
3. ผลการใช้ก๊าซโอโซนในการบำบัดน้ำนากุ้งที่มีปัญหาเรื่องเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio* sp. ซึ่งเป็นเชื้อที่บ่งบอกให้ทราบถึงน้ำนากุ้งที่ทำให้เกิดโรคในกุ้งกุลาดำหรือเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งจะเรียกเชื้อมันว่า "เชื้อเรืองแสง" เนื่องจากในตอนกลางคืนจะเชื้อมันจะเรืองแสงให้เห็นด้วยตาเปล่า ก๊าซโอโซนจะใช้เวลาในการบำบัดประมาณ 3 นาที ในการกำจัดเชื้อได้ 100 % สำหรับที่ระดับปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ทดลองนี้เท่านั้น นอกจากนี้ก๊าซโอโซนยังปรับสภาพของน้ำให้ดีขึ้น นั่นคือปริมาณแอมโมเนียในน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 0.5 นาที และจะคงที่หลังจากเวลานี้ ค่าพีเอชอยู่ในระดับเป็นกลางอย่างคงที่ และค่าความกระด้างของน้ำจะลดลงจนถึงระดับคงที่ภายในระยะเวลา 1 นาที คุณภาพของน้ำนากุ้งที่กล่าวมาเป็นผลที่ค่อนข้างมากในการเลี้ยงกุ้ง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากนี้อีก

สรุป

ในการสรุปนี้จะกล่าวเป็นข้อๆ ตามผลและการวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบถึงข้อดี-ข้อด้อย และข้อจำกัดในการผลิตก๊าซโอโซนสำหรับการวิจัยครั้งนี้

1. เครื่องกำเนิดโอโซนที่ได้สร้างขึ้นนี้มีขนาดเล็กเหมาะสมกับการเคลื่อนย้ายและนำไปใช้งานในที่ต่างๆ ที่มีพื้นที่จำกัดได้สะดวก ผลผลิตที่ได้ของเครื่องกำเนิดโอโซนที่ทดลองนี้จะมีอัตราการผลิตโอโซนต่อชั่วโมงคิดเทียบกับพลังงานไฟฟ้าเป็น $58.0 \text{ mgO}_3/\text{kWh}$ ที่ได้เลือกถ้าต้องการให้ปริมาณโอโซนมากขึ้นจะต้องเพิ่มเซลล์โอโซนเซอร์จีน หรือเพิ่มพื้นที่ผิวของเซลล์โอโซนเซอร์จีน แต่ต้องคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ป้อนให้ระบบต้องเพียงพอด้วย การดูแลรักษา และการใช้งานง่ายแก่ผู้ปฏิบัติงาน และมีการสิ้นเปลืองน้อย
2. ผลผลิตโอโซนที่ได้จากระบบ ที่พารามิเตอร์ได้เลือกนี้ อยู่ในสถานะที่เป็นกรด สารจางไฟฟ้าแบบไฮเดรต พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกใช้เมื่อดูผลเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 61 แล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อยู่ในช่วงการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไฮเดรต นั่นคือ สนาม $E/n_{\text{air}} = 131 \text{ Td}$ พลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ย $= 5$ และผลคูณของ $nd = 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่โอโซนเซอร์จะทำงานได้ในช่วง $(1-10) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (Blair and whittington, 1975) และเป็นไปตามลักษณะของการดิสชาร์จแบบไฮเดรตที่อ้างอิงในส่วนของทฤษฎี โดยที่ระบบในการกำเนิดโอโซนที่ได้ออกแบบ และสร้างนี้ มีค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์โอโซนเซอร์ (C) 23.2 nF พื้นที่ผิวอิเล็กโตรด 2.24×10^{-2} ความหนาแน่นอากาศ (n_{air}) ที่ 25°C $2.46 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ศักย์การสปาร์คไฟฟ้า (V_s) $8.61 \text{ kV}_{\text{rms}}$ พลังงานที่ใช้ป้อนให้กับระบบหาได้จาก $E = (1/2)CV^2$ เมื่อ $C = 23.2 \text{ nF}$, $V = 7.90 \text{ kV}$ จะได้ $E = 91.64 \text{ MJ}$ และอัตราส่วน $E/p = 4.24 \times 10^3 \text{ V/m-torr}$ ที่ความดันบรรยากาศ

ภาพประกอบ 61 ผลของสนาม E/n และพลังงานอิเล็กตรอนเฉลี่ย $\langle E \rangle$ ที่มีต่อผลคูณ nd



[ที่มา : Eliasson et al., 1991]

3. สรุปปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตโอโซนของระบบ
 - 3.1 ศักย์ไฟฟ้า (Voltage) มีความสัมพันธ์กับอัตราการผลิตโอโซนเป็นแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล
 - 3.2 อัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการผลิตโอโซนที่ได้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก จะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของอากาศ และส่วนที่สอง จะให้อัตราการผลิตโอโซนคงที่ แล้วค่อยๆ ลดลง เมื่อเทียบเป็นอัตราการไหลเป็นเวลา ที่อากาศคงอยู่ในช่องว่างคิซาร์จแล้ว พบว่า เวลาที่อากาศอยู่ในช่องว่างคิซาร์จที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซนเพิ่มขึ้นด้วย

- 3.3 สำหรับที่เงื่อนไขการทดลองนี้ พบว่า พื้นที่ผิวของเซลล์ไอโซไนเออร์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จะได้อัตราการผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นเป็น 2.69 เท่า ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดก็มีส่วนที่สำคัญทำให้ผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นหรือลดลงในที่นี้ พบว่า ถวาทองแดงจะให้อัตราผลผลิตโอโซนมากกว่าแผ่นอลูมิเนียม บางถึง 11.5 %
4. การประยุกต์ใช้โอโซนของระบบที่เงื่อนไข 3.22×10^3 kV/m และ 1.42 l/min สำหรับน้ำดิบผ่านการกรองจะใช้เวลา 0.5 นาที ในการทำน้ำที่มีเชื้อระดับ 10^3 CFU/ml ให้ปราศจากเชื้อได้ 100% และ ใช้เวลา 10 นาที ในการทำให้น้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอื่นๆ มีระดับเชื้อ 2×10^4 CFU/ml ให้ปราศจากเชื้อได้ 100% เป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่ม และน้ำเสีย ในทางจุลชีววิทยา ส่วนน้ำนาุ้ง ใช้เวลา 3 นาที ในการทำให้น้ำที่มีเชื้อ 400 CFU/ml ปราศจากเชื้อ *Vibrio* sp. ได้ 100% ซึ่งเชื้อตัวนี้พบว่าเป็นคันเห็ดของโรคในกุ้ง และยังปรับสภาพน้ำให้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะนำโอโซนไปใช้ในเกษตรกรรมด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้วิจัยและคนอื่นที่สนใจที่จะยึดเอาแนวทางการวิจัยนี้นำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริงต่อไป ซึ่งจะกล่าวเป็นข้อๆ ดังนี้

1. ถ้าต้องการผลิตโอโซนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์จำเป็นจะต้องผลิตโอโซนให้ได้จำนวนมากขึ้นตามความต้องการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ดังนั้นจำเป็นจะต้องหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่เพียงพอ และถ้าต้องการให้มีการผลิตโอโซนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นไปอีกจำเป็นจะต้องมีความถี่เพิ่มเข้ามาในการที่จะใช้ป้อนให้กับเซลล์ไอโซไนเออร์ นอกจากนี้จะต้องเตรียมอากาศให้แห้ง และบริสุทธิ์อย่างมาก โดยจะต้องทำให้อากาศมีค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียส จึงจะทำให้ผลิตโอโซนได้เพิ่มขึ้นมากกว่านี้
2. การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำนี้ผู้ที่นำก๊าซโอโซนไปใช้จะต้องออกแบบห้องสำหรับให้น้ำกับก๊าซโอโซนสัมผัสกันตามเวลาการสัมผัสที่ได้ทดลองไว้แล้ว ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากในการวิจัยนี้เราไม่ได้ใช้น้ำไหลเวียนเข้า

ระบบ แต่ในการปฏิบัติเพื่อนำไปใช้นี้จำเป็นจะต้องให้น้ำไหลเวียนเข้าระบบของห้องสำหรับให้น้ำกับก๊าซโอโซนสัมผัสกันในการฆ่าเชื้อโรค และในการบำบัดน้ำดื่มหรือน้ำเสียนี้อาจต้องการที่จะให้ก๊าซโอโซนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้วจำเป็นที่จะต้องใช้ก๊าซโอโซนร่วมกับกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการกรองทรายหรือตะกอนมาก่อน และใช้ก๊าซโอโซนเป็นกระบวนการสุดท้ายก่อนที่จะนำไปใช้หรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้รวดเร็วมากขึ้น

3. การประยุกต์ใช้งานจริงเซลล์โอโซนในเซอร่าจะต้องมีขนาดใหญ่ หรือมีหลายๆ เซลล์ประกอบกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบในการนำไปประยุกต์ใช้ ดังนั้น เซลล์โอโซนในเซอร่าจำเป็นจะต้องมีการหล่อเย็นด้วยอากาศ หรือน้ำ ซึ่งจะช่วยในเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตโอโซนได้มากขึ้นด้วย

บรรณานุกรม

- ชัยวิทย์ ศิลาวัณานไพบ. 2529. ฟิสิกส์ของคิสซาร์จไฟฟ้า. โครงการส่งเสริมตำราของมหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์ สงขลา.
- นภาพรรณ นพรัตนภรณ์. 2525. จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. เอกสารประกอบการสอน วิชา
จุลชีว.481 ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วิลาวัณย์ เจริญจิระตระกูล. 2533. คู่มือปฏิบัติการจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. ภาควิชาจุลชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2521. น้ำบริโภคน้ำดื่ม เล่ม ๑ ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ
และเล่ม 2 การวิเคราะห์และทดสอบ. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม ๕๕ ตอนที่ ๖๕.
- Bean, E.L., 1959. "Ozone Production and Costs", Adv. In Chem. Ser. 21, 430(1959).
- Blair, D.T.A. and Whittington, H.W., 1975. "Ionization and breakdown in oxygen", J. Phys. D :
Appl. Phys. 8(1975).
- Bringman, G., 1955. "Determination of the Lethal Activity of Chlorine and Ozone on E.coli.",
Z. Hyg. Infektionskrankh. 139, 130 and 333(1954) ; Wat. Poll. Abs., 28, 12(1955).
- Chandrakanth, M.S., Krishnan, S. and Amy, G.L. 1996. "Interactions between Ozone, AOM,
and Particles in Water Treatment", J. of Enviromental Engineering. June(1996).
pp. 459-467.
- Consoer, A.W., 1941. "Use of Ozone for Water Puritication", Civil Eng., 11,12,701(1941).
- de Lipkowski, H., 1937. "Electrical Purification of Drinking Water", Tech. Sanit. Munic., 32,
54(1937)

Diaper, E.W.J., 1969. "Tertiary treatment by Microstraining", Water and Sewage Works. 116, 6, 202(1969).

Dickerman, J.M., et al., 1954. "Action of Ozone on Water-Borne Bacteria", J. New Engl. Wat. Wks. Assoc., 68, 11(1954).

Drimal, J. and Janca, J. 1990. "Biological purification of water by an ozoniser with a discharge tube electrode", J. Phys. D : Appl. Phys. 23(1990). p.7-11.

Eliasson, B. and Kogelschatz, U. and Baessler, P., 1984. "Dissociation of O_2 in N_2/O_2 mixtures", J. Phys. B : At. Mol. Phys. 17(1984) , L797-L801.

Eliasson, B. and Kogelschatz, U., 1986. "Electron impact dissociation in oxygen", J. Phys. B : At. Mol. Phys. 19(1986) , 1241-1247.

Eliasson, B., Hirth, M. and Kogelschatz, U., 1987. "Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharge", J. Phys D : Appl. Phys. 20(1987) , 1421-1437.

Eliasson, B. and Kogelschatz, U., 1991. "Modeling and applications of silent discharge plasmas", IEEE. Transaction on plasma science. 2(1991), 309-323.

Eliasson, B. and Kogelschatz, U., 1991. "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing", IEEE. Transaction on plasma science . 6(1991) , 1063-1077.

Fetner, R.H., and Ingols, R.S., 1956. "A Comparison of the Bactericidal Activity of Ozone and Chlorine against Esch.coli at 1 °", J. Gen. Microbiol., 15, 381(1956).

Fox, C.B., 1873. "Ozone and Antozone", J. and A. Churchill, London, 1873.

Francis, L.Evans III., 1972. "Ozone in Water and Wastewater Treatment", Ann arbor

Science Pub. Inc., Michigan., 185 page.

Gabovich, R.D. 1966. "Experimental Studies to Determine a Hygienic Standard for Ozonation of Drinking Water", Chem. Abs. , 65, 5219H(1966).

George, T. and Franklin, L. B. "Wastewater Engineering", METCALF & EDDY, INC. , Third Edition., McGraw-Hill, Inc., 1334 page.

Gubelmann, H., and Scheller, H., 1953. "Disinfection of water by Ozone", Monatsbull. Schweiz. Ver. Gas. Wasserfachm., 33, 53 and 99(1953) ; Wat. Poll. Abs., 26, 314(1953).

Guinvarc'h, P. 1957. ,1958. "Three Years Operation of the Plant Using Ozone for Disinfection of the Water Supply of Paris" L'Eau, 44, 91 and 113(1957) ; Wat. Poll. Abs., 31, 368(1958).

Gutierrez-Tapia, C., Camps, E. and Olea-Cardoso, O. , 1994. "Perturbative Method for Ozone Syntesis From oxygen in a Single Discharge" , IEEE. Transaction on plasma science. , 5(1994) , 979-985.

Haag, W.R., and Hoigne, J., 1983. "Kinetics and Products of the reactions od ozone with various forms of chlorine and bromine in water" , paper presented at Ann. Conf. AWWA St., Louis, MO, June. (1983)

Hadj-Ziane, S., Held, B., Pignolet, P., Peyrous, R., Benas, J.M. and Coste, C., 1990. "Ozone production in and oxygen-fed wire to cylinder ozonizer" , J. Phys D : Appl. Phys. , 23(1990) , 1390-1395.

Hadj-Ziane, S., Held, B., Pignolet, P., Peyrous, R. and Coste, C., 1992. "Ozone production in and oxygen-fed wire to cylinder ozonizer at atmospheric pressure" , J. Phys D : Appl. Phys. , 25(1992) , 677-685.

Hann, V.A., 1956. "Disinfection of Drinking Water with Ozone", J. Amer. Wat. Wks. Assoc., 48, 1316(1956).

Harano, A., Sadakata, M. and Sato, M. 1991. "Soot oxidation in a silent discharge", J. of Chem. Eng. Japan., V.2, No.1 1991.

Hetteje, O., and Ehlbeck, H.W., "Epidemiology and Prophylaxis of Poliomyelitis with Reference to the Role of Water in its Transmission", Arch. Hyg., Berl., 137, 440 (1953); Zbl. Bakt., I. Ref., 153, 194(1954); wat. Poll. Abs., 28, 145(1955).

Hoigne, J., and Bader, M., 1975. "Identification and Kinetic Properties of the Oxidizing Decomposition Products of Ozone in Water and its Impact on Water Purification", Proc. 2nd. Int'l Symposium on Ozone Technology, Montreal, PQ, Canada, May 11-14, 1975.

Holluta, J., and Unger, U., 1954. "The Destruction of Bact.Coli Esch. By ClO_2 and O_3 ", Vom Wasser, 21, 129(1954).

Hopf, W. 1958. "Problems of Water Treatment with Ozone", Kommunalwirtschaft, 5, 233(1958).

Howlett, E., 1947. "The Ozone Method of Water Purification", Wtr. And Wtr. Eng. (G.B.), 50, 25(1947); J. Amer. Wat. Wks. Assoc., 39, 1047(Oct. 1947).

Ingram, M., and Haines, R.B., 1949. "Inhibition of Bacterial Growth by Pure Ozone in the Presence of Nutrients" J. Hyg., 47, 146(1949).

Isobel C. Walker., John M. Gingell., Nigel J. Mason. And George. Marston., 1996. "Dissociative electron attachment (DEA) in ozone 0-10 eV", J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys. 29(1996) , 4749-4759.

Janca, J., Drimal, J. and Trejtnar, J. 1985. Czechoslovak Patent A.O. 256446.

Kessel, J.F., et al., 1944. "Comparison of Chlorine and Ozone as Virucidal Agents of Poliomyelitis Virus", Proc. Soc. Exptl. Biol. Med., 53, 71(1943). ; Wat. Poll. Abs., 17, 239(1944).

Kinman, R.N., 1971. "The Use of Ozone in Water Disinfection", Presented at the Sanitary Engineering Institute, Univ. of Wisconsin, Milwaukee, Mar. 9(1971).

Lagrange, E., and Rayat, R., 1952. "One Aspect of the Battle Against Bilharzia", Societe d'Epuraton et d'Entreprises, Brussels, Belgium (1952).

Lebout, M., 1950. "The Control of Water Purification at the City of Nice", Tech. Sanit. Munic., 45, 86(1950)

Leiguarda, R.H., et al., 1949. "Bactericidal Action of Ozone", An. Asoc. Quim. Argent., 37, 165(1949) ; Wat. Poll. Abs., 22, 268(1949).

Loiseau, J.F., Lacassie, F., Monge, C, Peyrous, R., Held, B. and Coste, C., 1994. "Numerical simulation of ozone axial and radial distribution in a cylindrical oxygen-fed ozonizer", J. Phys D : Appl. Phys. 27(1994) , 63-73.

Luft, P.E. 1975. JILA Information Centre Report No. 14 (Boulder : University of Colorado).

Masuda, S., Akutsu, K., Kuroda, M., Awatsu, Y. and Shibuya, Y. 1988. "A Ceramic-Based Ozonizer Using High-Frequency Discharge", IEEE Transactions on Industry Applications. No. 2, 24(1988). March/April.

Messaoudi, R., Younsi, A., Massines, F., Bepax, B. and Mayoux, C., 1996. "Influence of Humidity on Current Waveform and Light Emission of a Low-frequency

Discharge Controlled by a Dielectric Barrier" , IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 4(1996) , 537-543.

Miller, S. et al., 1959. "Disinfection and Sterilization of Sewage by Ozone" , Advances in Chemistry Series, 21, 381(1959).

Morris Katz, 1977. Methods of Sampling and Analysis. 2nd ed. APHA Intersociety Committee.

Nomoto, Y., Ohkubo, T., Kanazawa, S. and Adachi, T. 1995. "Improvement of Ozone Yield by a Silent-Surface Hybrid Discharge Ozonizer" , IEEE Transaction of Industry Applications., Vol. 31, No. 6, Nov/Dec 1995.

Novel, E., and Buffle, J.P., 1949. "Comparative Study on the Sterilizing Action of Chlorine and of Ozone on the Water of Lake Geneva Taken in the Petit-Lac" , Schweiz Zeitschr. Path. In Bact., 12, 5, 544(1949) ; wat. Poll. Abs., 22, 218(1949).

O'donovan, D.C. 1965. "Treatment with Ozone" , J. Amer. Wat. Wks. Assoc., 57, 1167 (1965).

Pignolet, P., Hadj-Ziane, S., Held, B., Peyrous, R., Benas, J.M. and Coste, C., 1990. "Ozone generation by point to plane corona discharge" , J. Phys D : Appl. Phys. 23(1990) , 1069-1072.

Piskunov, P.I. and Sokolova, N.V. 1963. "Study on Ozonation of Water at the Gorki Water System" Izv. Vysshikh Uchebn. Zavendenii, Stroit I Arkhitekt., 67, 71(1963); Chem. Abs., 60, 1449f(1963).

Rice, R.G., Robson, M.C., Miller, W.G. and Hill, A.G. 1981. "Uses of ozone in drinking water treatment" , J. AWWA. Research and Technology. Jan(1981). pp. 44-57.

Rohrer, E., 1952. "Ozone and Its Application in Treatment of H₂O", Rev. Suisse Brass., 63, 155 (1952).

Rosen, H.M. 1973. "Use of Ozone and Oxygen in Advanced Wastewater Treatment", J. WPCF 45 : 521(Dec. 1973).

Roy, D., Englebrecht, R.S. and Chian, 1982. "Comparative inactivation of six enteroviruses by ozone", Journal AWWA. Dec. (1982), 660-664.

Smith, W.W., and Bodkin, R.E., 1944. "The Influence of Hydrogen Ion Concentration on the Bactericidal Action of Ozone and Chlorine", J. Bacteriol., 47, 445(1944).

Suchkov, B.P. 1964. "Studies of the Ozonation of drinking Water Containing Pathogenic Bacteria and Viruses", Hyg. And Sanit., 6, 24(1964).

Tan, L. and Amy, G.L. 1991. "Comparing Ozonation and Membrane Separation for Color Removal and Disinfection By-Product Control", J. AWWA. Research and Technology. May (1991).

Tirawanichakul, Y., Silawatchananai, C. and Tepnuan, T. 1998. "Design and construction of Ozone generation system at atmospheric pressure", Songklanakarin J. Sci. Technol. 20(1998), 355-366

Venosa, R.G. and Opatken, E.J., 1979. "Ozone Disinfection-State of the Art.", Presented At Preconf. Workshop on Wastewater Disinfection, 52nd Annual WPCF Conf., Houston, Tex. (1979)

Walker, I.C., Gingell J.M., Mason, N.J. and Marston G. 1996. "Dissociative electron attachment (DEA) in ozone 0-10 eV", J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys. 29 (1996) pp. 4749-4759.

Whitson, M.T.B., 1949. "The Use of Ozone in the Purification of water" , J. Roy. Sanit. Inst., 68, 448(1948); Wat. Poll. Abs. , 22, 99(1949).

Wilczak, A., Knocke, W.R., Hubel, R. E. and Marco aieta, E. 1991. "Manganese Control During Ozonation of Water Containing Organic Compounds" , J. AWWA. Research and Technology. May (1991). pp.75-79.

Wynn, C.S. ; Kirk, B.S.; and McNabney, R., 1973. "Pilot Plant For Tertiary Treatment of Wastewater With Ozone", EPA Report No. EPA-R2-73-146, US EPA. Municipal Environ. Res. Lab., Cincinnati, Ohio (1973)

Yamabe, C., Ihara, S. and Ishimine, M. 1994. "Fundamental Studies of Ozone Generation and Its Characteristics Using New Type of Ozonizer" , Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) pp. 4361-4364.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. วิธีการเตรียมอาหารสำหรับการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

1. วิธีการเตรียมอาหารสำหรับหาจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ ด้วยวิธี Spread plate method

1.1 Plate count agar (Tryptone glucose yeast extract)

- Tryptone	5.0	กรัม
- Yeast extract	2.5	กรัม
- Glucose	1.0	กรัม
- Agar	15.0	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

พีเอช ควรจะเป็น 7.0 ± 0.2 หลังจาก Sterilization ที่ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที

2. วิธีการเตรียมอาหารสำหรับหาจำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำ ด้วยวิธี Multiple tube technique

2.1 Lactose broth

- Beef extract	3.0	กรัม
- Peptone	5.0	กรัม
- Lactose	5.0	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

พีเอชควรจะได้ 6.9 ± 0.2 หลังจาก Sterilization ถ้าใส่ตัวอย่างน้ำ 10 มล. ต้องเตรียม broth เป็น double strength ฉะนั้นส่วนประกอบของอาหารต้องเป็น 2 เท่า คือน้ำ 1 ลิตร ให้นำเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที

2.2 Brilliant green lactose bile broth

- Peptone	10.0	กรัม
- Lactose	10.0	กรัม
- Oxgall	20.0	กรัม
- Brilliant green	0.0133	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

ที่เอชควรจะเป็น 7.2 ± 0.2 นึ่งน้ำเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ ในเวลา 15 นาที

2.3 EMB Agar

- Peptone	10.0	กรัม
- Lactose	5.0	กรัม
- Saccharose	5.0	กรัม
- K_2HPO_4	2.0	กรัม
- Agar	13.5	กรัม
- Eosin Y	0.4	กรัม
- Methylene blue	0.065	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

ที่เอชควรจะเป็น 7.1 นึ่งน้ำเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ ในเวลา 15 นาที

3. วิธีการเตรียมอาหารสำหรับหาจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำ ด้วยวิธี Multiple tube technique

3.1 EC medium

- Tryptose หรือ typticase	20.0	กรัม
- Lactose	5.0	กรัม
- Bile salt mixture หรือ bile salt No.3	1.5	กรัม
- Dipotassium hydrogen phosphate	4.0	กรัม
- Sodium chloride	1.5	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

ที่เอชควรจะเป็น 6.9 ± 0.2 หลังจาก Sterilization ที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที อาหารนี้จะอยู่ในหลอดพร้อมหลอดดักแก๊ส

4. วิธีการเตรียมอาหารสำหรับหาจำนวนฟีคัลสเตรปโตคอคคัสทั้งหมดในน้ำ ด้วยวิธี Multiple tube technique

4.1 Azide dextrose broth

- Beef extract	4.5	กรัม
----------------	-----	------

- Tryptone or polypeptone	15.0	กรัม
- Glucose	7.5	กรัม
- Sodium chloride	7.5	กรัม
- Sodium azide	7.5	กรัม
- Distilled water	0.2	ลิตร

เพื่อจะให้เป็น 7.2 หลังจาก Sterilization

4.2 Pfizer selective enterococcus (PSE) agar

- Peptone C	17.0	กรัม
- Peptone B	3.0	กรัม
- Yeast extract	5.0	กรัม
- Bacteriological bile	10.0	กรัม
- Sodium chloride	5.0	กรัม
- Sodium citrate	1.0	กรัม
- Esculin	1.0	กรัม
- Ferric ammonium citrate	0.5	กรัม
- Sodium azide	0.25	กรัม
- agar	15.0	กรัม
- Distilled water	1.0	ลิตร

เพื่อจะให้เป็น 7.1 หลังจาก Sterilization

2. วิธีการตรวจหาปริมาณเชื้อชนิดต่าง ๆ ที่ไม่ได้ใช้ในการวิจัย

1. การตรวจหาปริมาณแบคทีเรีย ตามวิธี Standard Method for the Examination of Water and Waste water ของ American public health association นั้นมี 3 วิธี คือ

1.1 Pour plate method หรือ Standard plate method

1.2 Spread plate method เป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวิจัย จะไม่กล่าวถึงในที่นี้

1.3 Membrane filter method

1.1 Pour plate method หรือ Standard plate method

อุปกรณ์

1. Melted plate count agar 15 ml	6 หลอด
2. Sterile phosphate buffered solution 90 ml	1 ขวด
3. Sterile phosphate buffered solution 9 ml	4 หลอด
4. Sterile pipette 10 ml	1 อัน
5. Sterile pipette 1 ml	7 อัน
6. Sterile petri dish	6 จาน
7. ตัวอย่างน้ำที่ตรวจ	100 มล.
8. Water bath	

วิธีปฏิบัติ

ถ้าเป็นน้ำสกปรกหรือน้ำทิ้ง ทำดังนี้

1. เขย่าตัวอย่างน้ำขึ้นลงประมาณ 25 ครั้ง แล้วใช้ปิเปตดูดตัวอย่างน้ำ 10 มล. ใส่ลงใน phosphate buffered solution 90 มล. เขย่าให้เข้ากันหลายครั้งขณะนี้น้ำจะถูกเจือจางลง 10 เท่า เป็น 10^{-1} เท่า
2. ใช้ปิเปตอันใหม่ดูดน้ำจากข้อ 1 มา 1 มล. ใส่ในหลอด phosphate buffered solution 9 มล. แล้วเขย่าให้เข้ากันหลาย ๆ ครั้ง ตอนนี้อย่างน้ำจะถูกเจือจางเป็น 10^{-2} เท่า
3. ใช้ปิเปตอันใหม่ทำการเจือจางน้ำให้ได้เป็น 10^{-3} , 10^{-4} และ 10^{-5} ตามลำดับ (การเจือจางแต่ละครั้งจะต้องเปลี่ยนปิเปต)
4. เขียนสัญลักษณ์ 10^{-5} , 10^{-4} และ 10^{-3} บนฝาจานแก้ว ที่ระดับความเจือจางละ 2 จาน
5. เขย่าตัวอย่างน้ำ 10^{-5} หลาย ๆ ครั้ง แล้วใช้ปิเปตอันใหม่ดูดน้ำมาใส่ในจานแก้วที่เขียน 10^{-5} จานละ 1 มล. 2 จาน
6. เท Melted plate count agar ลงในจาน แล้วหมุนจานไปในทิศทางที่ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา เพื่อให้ตัวอย่างน้ำผสมกับอาหารกระจายไปทั่วจานเพาะเชื้อ
7. ทำซ้ำข้อ 5 และ 6 แต่ใช้ตัวอย่างน้ำที่เจือจาง 10^{-4} และ 10^{-3}

8. เมื่ออุ่นแข็งตัวแล้วแบ่งจานเป็น 2 ชุด เอาเข้า Incubator ที่ 35 องศาเซลเซียส 1 ชุด และ Incubator ที่ 20 องศาเซลเซียส 1 ชุด อบเพาะเชื้อเป็นเวลา 24–48 ชั่วโมง
9. หลังจากครบกำหนด นำจานอาหารมานับโคโลนี โดยเลือกนับจานเพาะเชื้อที่มีโคโลนีอยู่ระหว่าง 30–300 โคโลนี แล้วคำนวณหาจำนวนแบคทีเรียต่อตัวอย่างน้ำ 1 มล. โดยมีหน่วยเป็น CFU/ml. (CFU = colony forming unit) และบันทึกผลในตาราง

ถ้าตรวจน้ำคั้นให้ทำดังนี้

1. เขย่าตัวอย่างน้ำแล้วทำการเจือจางน้ำคั้นให้เป็น 10^{-1} , 10^{-2} ตามลำดับ
2. เขียนสัญลักษณ์บนฝาจานเพาะเลี้ยงเป็น undilute, 10^{-1} และ 10^{-2} ทุกความเจือจางเขียน 2 จาน
3. ใช้ปิเปตอันใหม่ดูดน้ำที่เจือจาง 10^{-2} , 10^{-1} และ undilute มาใส่จานเพาะเชื้อจานละ 1 มล. ทุกความเจือจาง ทำ 2 จาน
4. เท melted plate count agar ใส่ในจานเพาะเชื้อ แล้วหมุนจานเพื่อให้เชื้อกระจายไปทั่วพื้น เมื่ออุ่นแข็งตัวแล้ว Incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24–48 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นนำจานมานับโคโลนี โดยเลือกนับจานที่มีโคโลนีขึ้นระหว่าง 30–300 โคโลนี แล้วคำนวณหาจำนวนแบคทีเรียต่อมิลลิลิตร และบันทึกผล

1.4 การตรวจหาจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดด้วยวิธี membrane filter การตรวจหาจำนวนแบคทีเรียด้วยวิธีนี้ จะต้องกรองน้ำที่จะตรวจผ่านแผ่นกรองที่มีรูขนาด 0.45 ไมโครมิเตอร์ เชื้อแบคทีเรียมีขนาดใหญ่กว่าจะติดอยู่ที่แผ่นกรองแล้วนำแผ่นกรองไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ แบคทีเรียจะแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเป็นโคโลนีให้เห็นบนแผ่นกรองแล้วนับจำนวนโคโลนีนั่น ๆ สำหรับวิธีนี้ไม่ควรใช้กับน้ำขุ่นมากหรือมีตะกอนมาก เพราะตะกอนจะอุดตันรูแผ่นกรอง ทำให้การกรองลำบาก และอาจทำให้จำนวนโคโลนีผิดพลาดไปได้ นอกจากนี้จำนวนแบคทีเรียในน้ำไม่ควรเกิน 200 โคโลนีต่อแผ่นกรอง (ปกติมักให้อยู่ระหว่าง 20–200 โคโลนี) ถ้าเชื้อมากกว่านี้จะต้องเจือจางน้ำที่กรอง

อุปกรณ์

- | | |
|---|--------|
| 1. เครื่องกรองน้ำพร้อมแผ่นกรองที่ปราศจากเชื้อ | 1 ชุด |
| 2. m-HPC agar | 1 จาน |
| 3. Forceps | 1 อัน |
| 4. Sterile distilled water 30 ml. | 2 หลอด |
| 5. น้ำที่จะตรวจ 100 ml. | 1 ขวด |

วิธีปฏิบัติ

1. จัดชุดเครื่องกรองให้เรียบร้อยแล้วเปิดเครื่องดูดอากาศ เพื่อดึงน้ำที่จะตรวจลงไป (ปริมาณที่ใช้จะต้องมีจำนวนแบคทีเรียไม่เกิน 200 โคโลนีต่อแผ่นกรอง)
2. เมื่อกรองน้ำเสร็จแล้ว เทน้ำกลั่นล้างกรวยเพื่อชะแบคทีเรียที่ติดที่กรวยให้ลงไปอยู่บนแผ่นกรอง ทำซ้ำ 2 ครั้ง
3. ปิดเครื่องดูดอากาศ เปิดกรวยแล้วใช้ forceps ที่ฆ่าเชื้อแล้วหยิบแผ่นกรองไปวางบนอาหาร m-HPC แล้ว Incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. ทำซ้ำข้อ 1-3 แต่ละครั้งนี้จะ incubate ที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. เมื่อครบ 48 ชั่วโมง เอาจานเพาะเชื้อมานับโคโลนีบนแผ่นกรองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ Stereo ที่มีกำลังขยาย 10-15 เท่า แล้วคำนวณจำนวนเชื้อต่อน้ำ 1 มล. แล้วบันทึกผล

หมายเหตุ : ถ้าน้ำสกปรกจะต้องทำการเจือจางน้ำก่อนจะกรอง ในที่นี้ควรใช้ dilution เช่นเดียวกับวิธีที่ผ่านมา

2. วิธีการตรวจหาจำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำ

การตรวจหาโคลิฟอร์มในน้ำมีด้วยกัน 2 วิธีด้วยกัน คือ

2.1 Multiple tube technique ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

2.1.1 Presumptive test

2.1.2 Confirmed test

2.1.3 Completed test

ผู้วิจัยได้เลือกวิธีนี้ในการวิเคราะห์ จึงไม่ได้กล่าวรายละเอียดในที่นี้

2.2 Membrane filter technique

การตรวจหาโคลิฟอร์มในน้ำที่ใส และมีจำนวนแบคทีเรียอยู่น้อย อาจใช้วิธี membrane filter technique ได้ เพราะสามารถใช้ตัวอย่างน้ำมาก ๆ ได้ และสามารถรู้ผลเร็วกว่าวิธี MPN สำหรับวิธีนี้จะเอาตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาณแน่นอนไปกรองผ่านแผ่นกรองที่มีรูขนาด 0.45 ไมโครมิเตอร์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแบคทีเรีย แบคทีเรียจะติดอยู่บนแผ่นกรอง หลังจากนั้นนำแผ่นกรองไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ และนับโคโลนีที่ขึ้นบนแผ่นกรอง แล้วคำนวณหาเชื้อใน 100 มล. อย่างไรก็ตามการใช้วิธีนี้จำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดจะต้องอยู่ระหว่าง 20-80 โคโลนีต่อแผ่น ถ้ามีเชื้อมากกว่านี้จะต้องเจือจางน้ำก่อน

อุปกรณ์

- | | |
|---|--------|
| 1. เครื่องกรองน้ำพร้อมแผ่นกรองที่ปราศจากเชื้อ | 1 ชุด |
| 2. Endo-media | 1 จาน |
| 3. น้ำที่จะตรวจ 100 มล. | 1 ขวด |
| 4. น้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อ 30 มล. | 1 หลอด |
| 5. Forceps | 1 อัน |
| 6. ปีกอร์บบรรจุแอลกอฮอล์ 90 % | 1 ใบ |

วิธีปฏิบัติ

1. จัดชุดเครื่องกรองให้เรียบร้อย พร้อมทั้งเปิดเครื่องดูดอากาศ
2. เหน้าที่จะตรวจลงไปในกรวย ถ้าเป็นน้ำดื่มให้ใช้ตัวอย่างน้ำ 100 มล. ถ้าเป็นน้ำในแม่น้ำหรือน้ำสกปรกให้ใช้ปริมาณตามตาราง (วิลาวัณย์ และคณะ 2533)
3. เมื่อเครื่องกรองเสร็จแล้วให้ใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อเทล้างกรวย เพื่อให้เชื้อที่ติดอยู่ข้างกรวยลงไปติดแผ่นกรอง เมื่อเสร็จแล้วจึงปิดเครื่องดูดอากาศ และเปิดเครื่องกรอง
4. ใช้ Forceps ที่ฆ่าเชื้อแล้วจับแผ่นกรองไปวางบนอาหาร Endo แล้ว Incubate ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เมื่อครบกำหนด นำมาดูผล ตรวจดูโคโลนีที่มีลักษณะเป็นโคโลฟอร์มแล้วนับโคโลนี จำนวนเป็นโคโลนีต่อ 100 มล. แล้วบันทึกผล

3. การตรวจหาจำนวนฟิคัลโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำ

การตรวจหาฟิคัลโคลิฟอร์ม ทำได้ 2 วิธี เหมือนการตรวจโคลิฟอร์ม คือ

3.1 วิธี Multiple tube technique ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้

3.2 วิธี Membrane filter technique

การตรวจหาเชื้อ fecal coliform โดยวิธี membrane filter นั้น จะกรองน้ำผ่านแผ่นกรองแบคทีเรียที่มีรูขนาด 0.45 ไมโครมิเตอร์ แล้วจึงนำไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส แต่วิธีนี้จะต้องมีจำนวนเชื้อที่คัดโคลิฟอร์มไม่ควรเกิน 20-60 โคโลนีต่อแผ่นกรอง ถ้าจำนวนเชื้อมากกว่านี้จำเป็นจะต้องทำให้น้ำเจือจาง หรือจะใช้ปริมาณน้ำที่จะกรองตามแหล่งน้ำ จากตัวอย่างตามตารางที่ 6-1 ใน (วิลาวัณย์ และคณะ 2533)

อุปกรณ์

1. เครื่องกรองน้ำพร้อมแผ่นกรองที่ปราศจากเชื้อ	1 ชุด
2. MFC agar	1 จาน
3. forceps	1 อัน
4. แอลกอฮอล์ 90%	1 ขวด
5. น้ำที่จะตรวจ 100 มล.	1 ขวด
6. น้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อ 30 มล.	1 หลอด

วิธีปฏิบัติ

1. จัดชุดเครื่องกรองให้เรียบร้อย และเปิดเครื่องดูดอากาศ
2. เทน้ำที่จะตรวจ 100 มล. ลงไปในกรวย
3. เมื่อกรองเสร็จแล้ว เทน้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อล้างกรวย แล้วจึงปิดเครื่องดูดอากาศ
4. ใช้ปากคีบที่ฆ่าเชื้อแล้วจับแผ่นกรองวางบนอาหาร MFC agar ปิดฝาจานให้สนิท และใส่ในถุงพลาสติกเพื่อกันไม่ให้มีน้ำเข้า (หรือใส่ในกระป๋องสำหรับใส่จานเลี้ยงเชื้อ) แล้ว incubate ใน water bath ที่ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เอาจานแก้วออกจาก water bath แล้วนำมานับโคโลนีของฟีคัล โคลิฟอร์มซึ่งจะมีสีน้ำเงินและบันทึกผลการทดลอง

4. การตรวจหาฟีคัลสเตรปโตคอคคัสทั้งหมดในน้ำ

การตรวจหาจำนวนฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำ มี 2 วิธี คือ

4.1 Multiple tube technique ซึ่งเป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้

4.2 Membrane filter technique

การตรวจหาฟีคัลสเตรปโตคอคคัสด้วยวิธีการกรองนั้น จำนวนเชื้อฟีคัลสเตรปโตคอคคัสไม่ควรเกิน 20-100 โคโลนีต่อแผ่น ถ้าจำนวนเชื้อมากกว่านี้ควรจะต้องเจือจาง

น้ำลง ปกติปริมาณน้ำที่ใช้กรองตั้งแต่ 100 – 10 , 1 , 0.1 หรือ 0.01 มล. แล้วแต่ความสกปรกของน้ำ

อุปกรณ์

- | | |
|---|-----------|
| 1. เครื่องกรองน้ำพร้อมแผ่นกรองที่ปราศจากเชื้อ | 1 ชุด |
| 2. KF streptococcus agar | 1 จาน |
| 3. forceps | 1 อัน |
| 4. แอลกอฮอล์ 90% | 1 ปีเตอร์ |
| 5. น้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อ 20 มล. | 1 หลอด |
| 6. ตัวอย่างน้ำที่จะตรวจ | |

วิธีปฏิบัติ

1. จัดชุดเครื่องกรองให้เรียบร้อย และเปิดเครื่องดูดอากาศ
2. เทน้ำที่จะตรวจลงไปในกรวย เมื่อกรองเสร็จแล้ว เทน้ำกลั่นที่ปราศจากเชื้อ ล้างกรวย จนกรองเสร็จเรียบร้อย แล้วจึงปิดเครื่องดูดอากาศ
3. ใช้ปากคีบที่ฆ่าเชื้อแล้วจับแผ่นกรองวางบนอาหาร KF streptococcus ปิดฝาแล้วอบเพาะเชื้อที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. เมื่อครบ 48 ชั่วโมง ตรวจดูผล ถ้ามี พิคัลสเตรปโตคอคคัสจะเห็นโคโลนีเป็นสีแดงเข้ม (dark red) หรือชมพู นับโคโลนีและบันทึกผล

ภาคผนวก ข.

การบันทึกและแปลผลเอ็มพีเอ็น

บันทึกผลจำนวนหลอดที่ให้ผลบวกในการตรวจวิเคราะห์ขั้นต้น ขึ้นยืนยันหรือขึ้นสมบูรณ์ แล้วนำมาเทียบกับตารางเอ็มพีเอ็น ก็จะได้อ่านค่าเอ็มพีเอ็นต่อ 100 มล. ของตัวอย่างน้ำที่ตรวจวิเคราะห์ ตารางที่ 1 ใช้เทียบค่าเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ตรวจวิเคราะห์เป็น 10, 1 และ 0.1 มล. ในระบบ 5 หลอด ถ้าหากปริมาณน้ำที่ใช้ตรวจเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากที่ตารางได้กำหนดไว้ก็ให้คูณด้วยค่าสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เช่น ถ้าปริมาณน้ำที่ตรวจเป็น 100 , 10 และ 1 มล. แล้วค่าเอ็มพีเอ็นที่ได้จากตารางจะต้องคูณด้วย 0.1 หรือ ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากปริมาณน้ำที่ตรวจเป็น 1, 0.1 และ 0.01 มล. แล้ว ค่าเอ็มพีเอ็นที่ได้จากตารางจะต้องคูณด้วย 10 จึงจะเป็นค่าเอ็มพีเอ็นที่แท้จริงของตัวอย่างน้ำที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 แสดงค่าดัชนีเอ็มพีเอ็น และความเชื่อมั่น 95 % ของหลอดที่ให้ผลบวก เมื่อใช้ระบบ 5 หลอด ของน้ำตรวจวิเคราะห์ 10 มล., 1.0 มล. และ 0.1 มล.

จำนวน หลอดที่ให้ ผลบวก	ดัชนี MPN/100 ml.	ระดับความเชื่อมั่น 95 %		จำนวน หลอดที่ให้ ผลบวก	ดัชนี MPN/100 ml.	ระดับความเชื่อมั่น 95 %	
		ต่ำกว่า	สูงกว่า			ต่ำกว่า	สูงกว่า
0-0-0	<2	-	-	4-3-1	27	12	67
0-0-1	2	1.0	10	4-3-1	33	15	77
0-1-0	2	1.0	10	4-4-0	34	16	80
0-2-0	4	1.0	13	5-0-0	23	9.0	86
1-0-0	2	1.0	11	5-0-1	30	10	110
1-0-1	4	1.0	15	5-0-2	40	20	140
1-1-0	4	1.0	15	5-1-0	30	10	120
1-1-1	6	2.0	18	5-1-1	50	20	150
1-2-0	6	2.0	18	5-1-2	60	30	180
2-0-0	4	1.0	17	5-2-0	50	20	170
2-0-1	7	2.0	20	5-2-1	70	30	210
2-1-0	7	2.0	20	5-2-2	90	30	250
2-1-1	9	3.0	24	5-3-0	80	30	250
2-2-0	9	3.0	25	5-3-1	110	40	300
2-3-0	12	5.0	29	5-3-2	140	60	360
3-0-0	8	3.0	24	5-3-3	170	80	410
3-0-1	11	4.0	29	5-4-0	130	50	390
3-1-0	11	4.0	29	5-4-1	170	70	480
3-1-1	14	6.0	35	5-4-2	220	100	580
3-2-0	14	6.0	35	5-4-3	280	120	690
3-2-1	17	7.0	40	5-4-4	350	160	820
4-0-0	13	5.0	38	5-5-0	240	100	940
4-0-1	17	7.0	45	5-5-1	300	100	1300
4-1-0	17	7.0	46	5-5-2	500	200	2000
4-1-1	21	9.0	55	5-5-3	900	300	2900
4-1-2	26	12	63	5-5-4	1600	600	5300
4-2-0	22	9.0	56	5-5-5	≥ 1600	-	-
4-2-1	26	12	65				

ภาคผนวก ก.

1. วิธีการคำนวณสำหรับการหาค่าปริมาณความเข้มข้นโอโซน

ในการหาค่าความเข้มข้นโอโซนสำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีมาตรฐาน (Moris, 1977) การคำนวณหาค่าความเข้มข้นโอโซน จะมีขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจดังนี้

โดยเริ่มจากการที่ผู้วิจัยได้ใช้สารละลายที่เตรียมได้นี้จะมีสีใส จำนวน 50 มิลลิลิตร ในการให้ก๊าซโอโซนผ่านลงไปสัมผัส ซึ่งจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แล้วผู้วิจัยจะนำสารละลายที่ได้นี้ไปวัดค่า Absorbance ด้วยเครื่อง UV spectrometer ที่ความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร เมื่อได้ค่า Absorbance มาแล้วจะนำไปแทนในกราฟมาตรฐานที่ได้ทำไว้ก่อนที่จะทำการทดลอง จากกราฟมาตรฐานจะได้ค่าความเข้มข้นของโอโซน ในหน่วย จากนั้นผู้วิจัยจะทำการคำนวณต่อไป ดังนี้

$$\frac{\mu\text{mole } O_3}{25\text{ml.}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} \Rightarrow \frac{\mu\text{mole } O_3}{l}$$

ทำให้เป็น ไมโครกรัม ต่อ ลิตร

$$\frac{\mu\text{mole } O_3}{l} \times \frac{48\text{g}}{\text{mole}} \Rightarrow \frac{\mu\text{g } O_3}{l}$$

ทำให้เป็น ไมโครกรัม ต่อ ลิตร

$$\frac{\mu\text{g } O_3}{l} \times \frac{50}{1000} l \Rightarrow \text{g } O_3$$

ทำให้เป็น มิลลิกรัม โอโซน

$$\mu\text{g } O_3 \div 1000 \Rightarrow \text{mg } O_3$$

ค่าที่ได้นี้จะเป็นส่วนสัดส่วนกับเวลาการสัมผัสกันระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลายด้วย

2. วิธีการคำนวณหาอัตราเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน

ภาวะมาตรฐานของแก๊ส ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP, 0 C และ 1 atm) จะมีความสัมพันธ์ คือ 1 โมล ของแก๊สใดๆ จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร หรือ 0.0224 ลูกบาศก์เมตร (m^3) จากความสัมพันธ์ของ Ideal gas

$$PV = nRT \quad (1)$$

จะได้ว่า

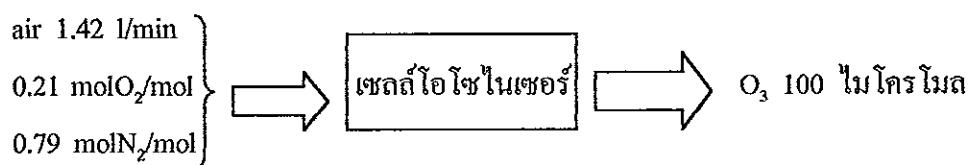
$$PV/P_s V_s = nT/n_s T_s \quad (2)$$

ตัวห้อย s หมายถึง ภาวะมาตรฐาน

อัตราร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%conversion)

$$\% \text{ conversion} = (\text{จำนวนโมลที่ทำปฏิกิริยา} / \text{จำนวนโมลที่ป้อนเข้า}) * 100$$

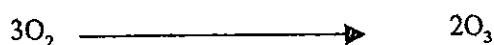
ตัวอย่าง ถ้าอัตราการไหลของอากาศ = 1.42 ลิตรต่อนาที (lpm), $T = 29^\circ \text{C}$, 1 atm ถูกป้อนเข้าเครื่องผลิตโอโซน จงหา อัตราการไหลเชิงโมลของอากาศ และ อัตราการเปลี่ยนออกซิเจนไปเป็นโอโซน หากผลิตโอโซนได้ 100 ไมโครโมล



จากสมการ (2) จะได้

$$\begin{aligned}
 n_{\text{air}} &= PV n_s T_s / P_s V_s T \\
 &= (1 \text{ atm})(1.42 \text{ l/min})(1 \text{ mol})(273 \text{ K}) / (1 \text{ atm})(22.4 \text{ l})(302 \text{ K}) \\
 &= 0.0573 \text{ mol/min}
 \end{aligned}$$

พิจารณาปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดโอโซน ดังนี้



จากปฏิกิริยานี้แสดงว่า ออกซิเจน 1.5 โมล สามารถผลิตโอโซนได้ 1 โมล

ดังนั้น หากต้องการผลิตโอโซนให้ได้ 100 ไมโครโมล ออกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา = $1.5 \times 100 \times 10^{-6}$ และเนื่องจากกระแสที่ใช้ป้อนเป็นอากาศ ซึ่งมีออกซิเจน 21 % และไนโตรเจน 79 % แต่ออกซิเจนเท่านั้นที่จะเป็นตัวทำให้เกิดโอโซน ดังนั้นจำนวนโมลของออกซิเจนที่ป้อนเข้าไป = 0.21×0.0573

$$\begin{aligned} \% \text{ conversion} &= (1.5 \times 100 \times 10^{-6} / 0.21 \times 0.0573) \times 100 \\ &= 1.246 \% \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาค่าสนามลดลง E/n_{air}

พิจารณาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นอากาศ เท่ากับ 1.1864 kg/m^3
ทำการเปลี่ยนหน่วยให้เป็นหน่วย g/cm^3 เพื่อให้ง่ายในการคำนวณต่อไป

จากตารางมาตรฐานทราบว่า น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ เท่ากับ 29 g/mole
คำนวณต่อไปจะได้

$$\frac{1.186 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3}{29 \text{ g/mole}} = 0.0409 \times 10^{-3} \frac{\text{mole}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{ความหนาแน่นอากาศ} = 4.09 \times 10^{-5} \text{ mole/cm}^3$$

$$\text{อากาศ } 1 \text{ mole} = 6.02 \times 10^{23} \text{ อนุภาค}$$

$$\text{จะได้ความหนาแน่นของอากาศ} = 4.09 \times 10^{-5} \times 6.02 \times 10^{23} (\text{mole/cm}^3)(\text{อนุภาค/โมล})$$

$$= 24.62 \times 10^{18} \text{ อนุภาค - cm}^{-3}$$

$$= 2.46 \times 10^{19} \text{ อนุภาค - cm}^{-3}$$

$$\text{ดังนั้น ความหนาแน่นของอากาศ } (n_{\text{air}}) = 2.46 \times 10^{19} \text{ อนุภาค - cm}^{-3}$$

ในระบบการกำเนิดโอโซนเลือกใช้สนามไฟฟ้า (E) เท่ากับ $32.24 \times 10^3 \text{ V/cm}$

เราจะหาค่าสนามลดลง (reduced field) E/n_{air} ได้จาก

$$E/n_{\text{air}} = \frac{32.24 \times 10^3}{2.46 \times 10^{19}} \frac{V}{\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}}$$

$$= 13.10 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$$

สามารถเปลี่ยนหน่วย E/n_{air} ให้ไปเป็น Td จาก

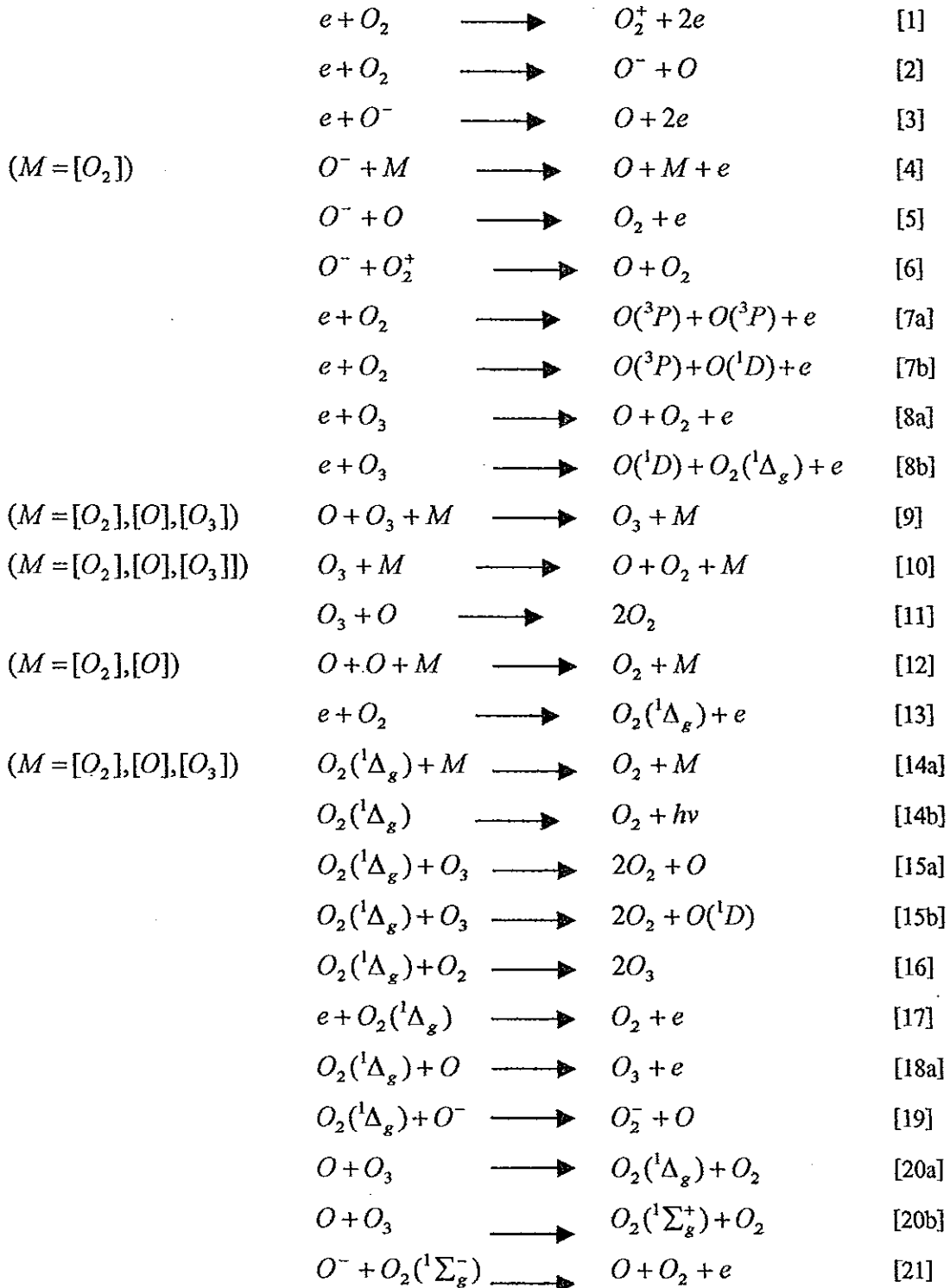
$$10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 = 1 \text{ Td.}$$

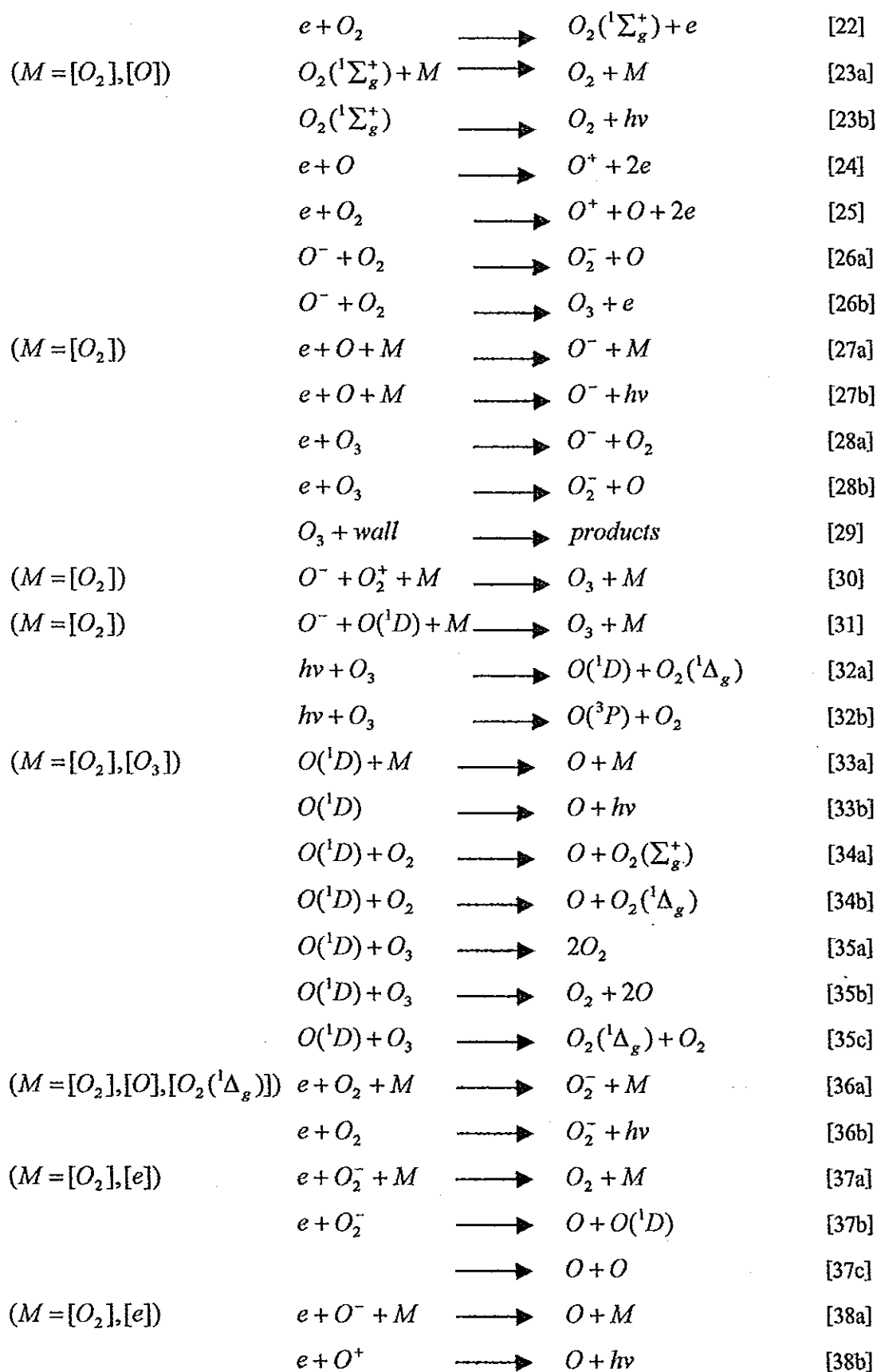
$$13.10 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 = \frac{13.10 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 \times 1 \text{ Td.}}{10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2}$$

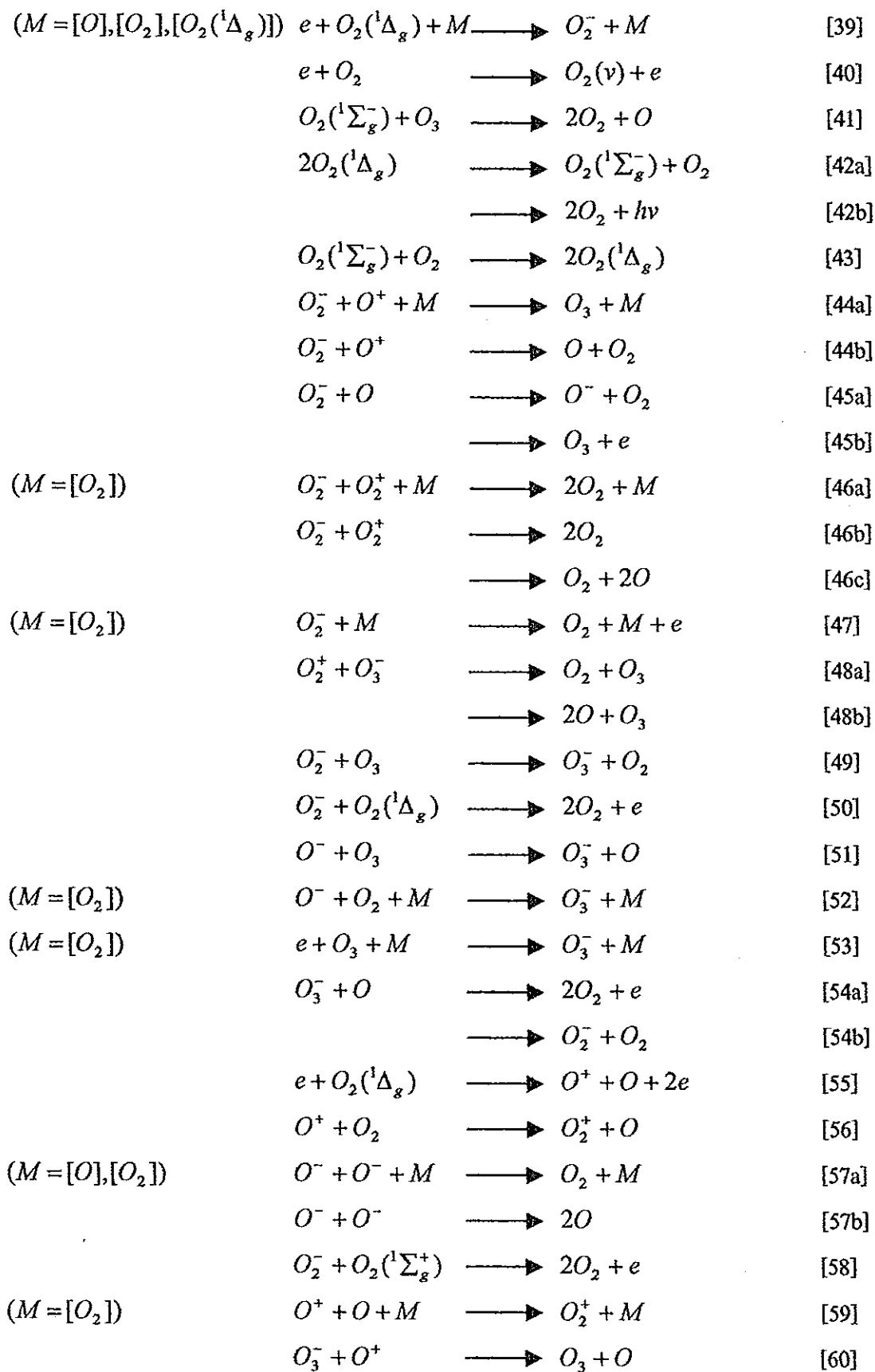
$$\text{ดังนั้น } E/n_{\text{air}} = 131.0 \text{ Td.}$$

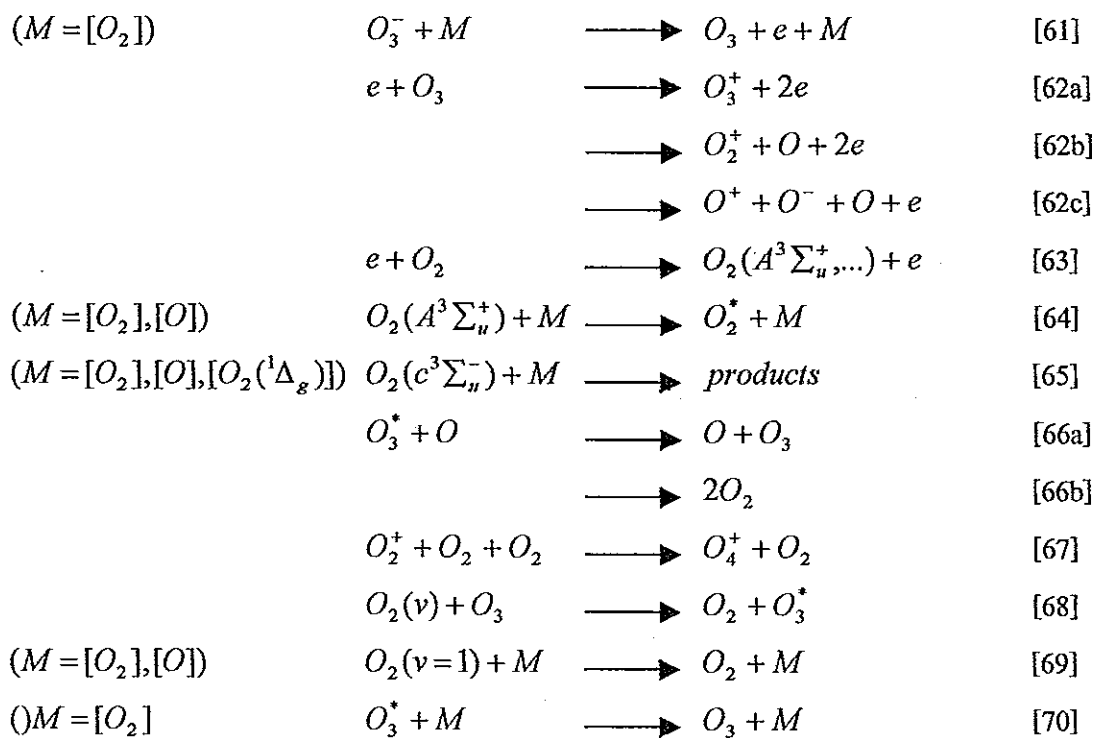
ภาคผนวก ง.

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดไอโซน (Eliasson et al., 1987)









ภาคผนวก จ.

แฟกเตอร์การเปลี่ยนหน่วย (Converation factor)

$$1 \text{ scfh} = 0.45 \text{ l/min}$$

$$1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ scfh} = \frac{1}{0.02832} \text{ m}^3/\text{h}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายธวัชชัย เทพนวล

วัน-เดือน-ปีเกิด 21 มีนาคม 2515

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
การศึกษบัณฑิต (วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ(ภาคใต้)	2536

ผลงานวิจัยและบทความ

- บทความ เรื่อง “การศึกษาระบบพลasmaแบบไม่สมดุลสำหรับการนำคลื่น”
การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 บทคัด
ย่อ F-03, ปี 2539.
- บทความ เรื่อง “การออกแบบและสร้างระบบพลasmaไอโซไนเซอ์ที่ความดัน
บรรยากาศ” วารสารสงขลานครินทร์ ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 ก.ค. – ก.ย. 2541