

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการบำบัดน้ำเสีย
APPLICATION OF HIGH VOLTAGE FOR WASTE WATER TREATMENT



ปริิถยานี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารศึกษาคตามหลักสูตรปริิถยานิวศวรรรมศาสตร์บัณฑิต
ภาควิศววิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033237

ปริญาปีแผนปีการศึกษา 2536

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการบำบัดน้ำเสีย

ผู้จัดทำ

1. นายนพพร ศรีภา 33100154
2. นายนพพร สอนมั่น 33100158
3. นายวันชัย แสงอมรสกุล 33100336

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูง	2
	2.1 การไอออไนเซชันของก๊าซ	2
	2.2 การเกิดไอออนลบ	6
	2.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวของโลหะ	6
	2.4 กลไกการเกิดเบรคดาวน์	10
	2.5 การเกิดเบรคดาวน์ของก๊าซ	12
	2.6 สนามไฟฟ้าและลักษณะของอิเล็กโตรด	13
	2.7 ผลของประจุค้างต่อแรงดันเบรคดาวน์ต่างขั้ว	20
บทที่ 3	น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย	22
	3.1 ระบบบำบัดทางฟิสิกเคมี	22
	3.2 ระบบบำบัดทางเคมี	29
	3.3 ระบบบำบัดทางชีววิทยา	31
บทที่ 4	การกำเนิดโอโซน	34
	4.1 การกำเนิดโอโซน	34
	4.2 อุตุนิยมกับการเกิดโอโซน	37
	4.3 วิธีตรวจหาปริมาณโอโซน	38
บทที่ 5	การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย	40
	5.1 คุณสมบัติของโอโซน	40
	5.2 ข้อดีของการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย	40
	แทนคลอรีน	
	5.3 ระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้อุณหภูมิโอโซน	43
บทที่ 6	เครื่องกำเนิดโอโซนต้นแบบและกระบวนการทดลอง	46
	6.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดโอโซนเพื่อการบำบัดน้ำเสีย	46
	6.2 ขบวนการทดลอง	48
	6.3 ผลการทดลอง	51
	6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	63
บทที่ 7	สรุปและวิจารณ์	83

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บรรณาธิการ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 1	อนุภาคชนกัน	2
รูปที่ 2	กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก	8
รูปที่ 3	ทบทวนการเกิดอะวาลานซ์	11
รูปที่ 4	ลักษณะอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ	13
รูปที่ 5	ระยะอะวาลานซ์วิกฤติในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	14
รูปที่ 6	ลักษณะสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดต่าง ๆ	15
รูปที่ 7	แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กโตรดชนิดต่าง ๆ	16
รูปที่ 8	การหักเหของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวน	16
รูปที่ 9	ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	17
รูปที่ 10	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย	18
รูปที่ 11	แรงดันโคโนเนอรัมัมเกิดและแรงดันเบรคดาวน์	19
รูปที่ 12	ผลของประจุค้างของอิเล็กโตรดปลายแหลมหัวบวก	21
รูปที่ 13	ผลของประจุค้างของอิเล็กโตรดปลายแหลมหัวลบ	21
รูปที่ 14	แรงดันเบรคดาวน์ของอิเล็กโตรดทั้งกับระนาบที่แรงดันรูปแบบต่าง ๆ กัน	21
รูปที่ 15	แผนภาพแสดงอิเล็กโตรโอะโลซิส	25
รูปที่ 16	ทบทวนการในการทำให้ตกตะกอน	26
รูปที่ 17	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน	34
รูปที่ 18	เครื่องกำเนิดโอโซนชนิด Otto plate-type	35
รูปที่ 19	เครื่องกำเนิดโอโซนชนิด Tube-type และ Lowther plate	36
รูปที่ 20	รูปแบบของเครื่องกำเนิดโอโซนชนิด tube-type	36
รูปที่ 21	Flow diagram แสดงการสร้างโอโซนโดยใช้ออกซิเจน	37
รูปที่ 22	เครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้ออกซิเจนชนิด Tube-type	37
รูปที่ 23	แสดง Corona discharge ozone generation	43
รูปที่ 24	Ozone contact ชนิด Diffusers	44
รูปที่ 25	Ozone contact ชนิด Turbine	45
รูปที่ 26	แสดงแผนภาพของเครื่องกำเนิดโอโซน	46
รูปที่ 27	แสดงแผงอิเล็กโตรดชนิดกลุ่มเส้นลวด	47
รูปที่ 28	แสดงแผงอิเล็กโตรดชนิดแท่งปลายแหลม	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 29	แสดงผลการทดลอง	48
รูปที่ 30	โครงสร้างชุดต้นแบบของเครื่องกำเนิดไอโซน	48
รูปที่ 31	แสดงอิเล็กโตรดแบบกลุ่มเข็มเล็ก ๆ	49
รูปที่ 32	แสดงอิเล็กโตรดแบบแท่งปลายแหลม	49
รูปที่ 33	แสดงการเกิดโคโรน่า ของชุดอิเล็กโตรดแบบแท่งเข็ม ที่ระยะแกป 1 cm. แรงดัน 14.5 kV กระแสโคโรน่า 9 mA	61
รูปที่ 34	แสดงการเกิดโคโรน่า ของชุดอิเล็กโตรดแบบกลุ่มเข็ม เล็ก ๆ ที่ระยะแกป 1.5 cm. แรงดัน 20.3 kV กระ แสโคโรน่า 10 mA	61
รูปที่ 35	แสดงการเปรียบเทียบน้ำเสีย 3 ตัวอย่าง	61
รูปที่ 36	แสดงสีของสารละลายไอโอดีนไอโอดีนที่ใช้ในการวัด ไอโอดีน	62
รูปที่ 37	แสดงร่องรอยการเกิดออกซิไดซ์ของอิเล็กโตรดระนาบ แบบไม่เคลื่อนงาน หลังผ่านการใช้งาน	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	แสดงค่า P_u ของธาตุต่าง ๆ เป็น eV เมื่อใช้พลังงานแสง เทียบกับพลังงานความร้อน	7
ตารางที่ 2	แสดงถึงผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในการบำบัดน้ำของตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ	27
ตารางที่ 3	ข้อดีข้อเสียของตัวออกซิไดซ์ต่างๆ ในการบำบัดน้ำ	28
ตารางที่ 4	แสดงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต่าง ๆ	41
ตารางที่ 5	แสดงผลการทดลอง	51



การประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการบำบัดน้ำเสีย

นพทร ศรีภา
 นพพร สอนมัน
 วันชัย แสงอมรสกุล

อ.ศิริวัฒน์ โทษิเวทกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2536

บทคัดย่อ

โอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น
 แมงกานีส เหล็ก รวมทั้งสารประกอบจำพวกซิลิเฟต นอกจากนี้ยังสามรถ บำบัดสี, กลิ่น
 ของน้ำเสียได้ โอโซนสามารถผลิตขึ้นได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วไฟฟ้า
 ที่สามารถไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เพื่อให้ปล่อยซิเจนในอากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าแตกตัว และ
 รวมตัวกันใหม่เป็นโอโซน

ในปริศณานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอข้อมูล การทดลอง ผลการทดลอง และ
 วิเคราะห์ผล เพื่อหาแนวทางในการผลิตโอโซน โดยใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงให้ได้ค่าที่
 เหมาะสม รวมทั้งศึกษาการนำโอโซนไปบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูล
 ในการศึกษาและการทำวิจัยในอนาคต

APPLICATION OF HIGH VOLTAGE THEORY FOR WASTE WATER TREATMENT

Nopphakorn Sripba

Nopporn Sornmun

Wanchai Sangamornskul

Siriwat Pothivechakul Advisor

1993

Abstract

Ozone is able to treat waste water which has metal ion, Manganese, Iron, and compound of sulfite. On the other hand, ozone is effective for decolorizing color and removal smell bad of waste water.

Ozone was generated by applied high voltage across the non uniform field discharge gap and oxygen between the discharge gap transfer by reaction to the form of ozone.

In this thesis ; is present data , experiment , result and analysis of experiment ; to looking for method to generate ozone by using high voltage technology , in order to determine data to reserch and development in future.

สัญลักษณ์

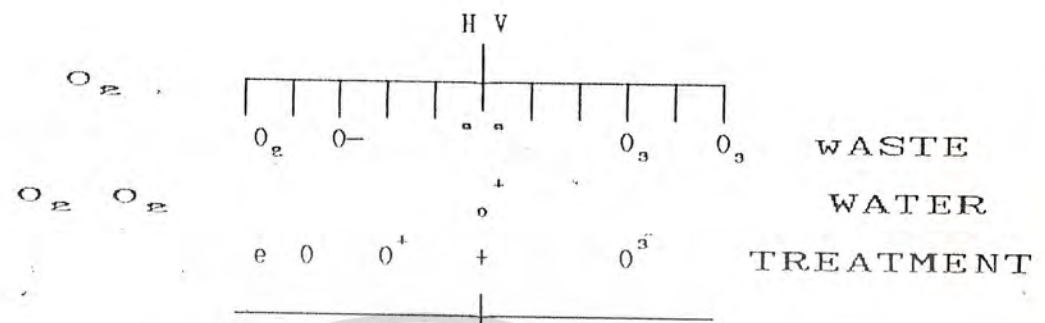
- E : ความเครียดสนามไฟฟ้า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
 E_b : ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
 E_{nv} : ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
 E_1 : ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรน่า หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
 E_{max} : ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด หน่วย โวลต์/เซนติเมตร
 I : กระแส หน่วยแอมแปร์
 N_0 : จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น
 N_d : จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอานอด
 N_x : จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะทางใด ๆ
 V : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน หน่วย โวลต์
 V_b : แรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ หน่วย โวลต์
 V_1 : แรงดันไฟฟ้าที่โคโรน่าเริ่มเกิด หน่วยโวลต์
 d : ระยะห่างระหว่างลิเลคโตรด หน่วย เซนติเมตร
 e : ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คุลอมป์
 m : มวลของอิเล็กตรอน = 9.1×10^{-31} กิโลกรัม
 v : ความเร็วของอิเล็กตรอน หน่วย เมตร/นาที
 p : ความดัน หน่วย ทอร์
 λ : ระยะอิสระ (free path) ของอนุภาค
 ρ : ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ
 X : ระยะทางใด ๆ จากอานอด
 X_c : ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน
 ψ : แพลเตอร์สนามไฟฟ้า
 α : สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่หนึ่งของทาว์เนนด์
 β : สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่สองของทาว์เนนด์ โดยไอออนบวกชนอะตอมหรือโมเลกุลก๊าซ
 γ : สัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันที่สองของทาว์เนนด์ โดยไอออนบวกชนคาโธด

- T : อุณหภูมิขณะทำการทดลอง
- H : ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะทำการทดลอง
- 754 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 754 กลุ่ม
- 1508 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 1508 กลุ่ม
- 3016 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 3016 กลุ่ม
- 210 point : อิเลคโตรดปลายแหลมจำนวน 210 แห่ง
- gap : ระยะก้นระหว่างอิเลคโตรด
- No Dielectric : แผ่นฉนวนทองแดงที่ไม่ได้เคลือบสารฉนวนใด ๆ
- Dielectric : แผ่นระนาบทองแดงที่เคลือบฉนวนแลคเกอร์ไว้
- DC⁻ : แรงดันไฟลบที่ใช้ป้อนระหว่างแผ่นอิเลคโตรด
- DC⁺ : แรงดันไฟบวกที่ใช้ป้อนระหว่างแผ่นอิเลคโตรด
- KV : แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ป้อนระหว่างอิเลคโตรด
- mA : กระแสโคโรนาที่เกิดขึ้นระหว่างอิเลคโตรด
- Watt : กำลังไฟฟ้าโคโรนาที่เกิดขึ้นระหว่างอิเลคโตรด
- current/point : ค่า leakage current ที่เกิดขึ้นต่ออิเลคโตรดแห่งหนึ่ง ๆ
(micro amp/point)
- ozone production : อัตราการเกิดโอโซน คือ ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นต่อช่วงเวลาหนึ่ง ๆ
- rate : มีหน่วยเป็น น้ำหนักโอโซนต่อเวลา (mgO₃/hr, microgO₃/min, microgO₃/sec)
- ozone production : อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานที่ใช้ หรือ ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น
- rate/power : ต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ไป (mgO₃/KWhr)
- ozone production : อัตราการเกิดโอโซนต่ออิเลคโตรดแห่งหนึ่ง ๆ
- rate/point : (microgO₃/sec/point x 10⁻³)

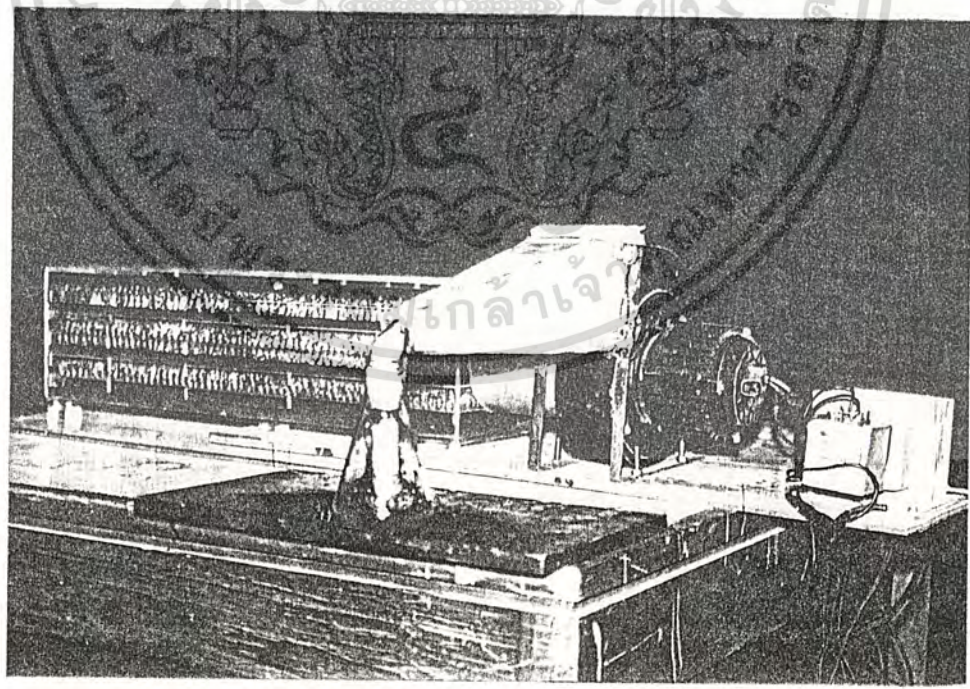
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2536

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการบำบัดน้ำเสีย



โดย
 นายพนกร ศรีภา 33100154
 นายพนพร สอนมัน 33100158
 นายวันชัย แสงอมรสกุล 33100336



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

โอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำหรือน้ำเสียที่มีโลหะหนัก เจือปนอยู่ เช่น แมงกานีส เหล็ก รวมทั้งสารประกอบจำพวกซิลิเฟต นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดสี, กลิ่น, ฟอสเฟต, ไนโตรเจนในน้ำเสียได้ และยังไม่ก่อให้เกิดสารประกอบอันตรายอื่นคล้ายคลึงเหมือนคลอรีน

โอโซนสามารถผลิตขึ้นได้ โดยการป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วไฟฟ้าที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เพื่อให้ออกซิเจนในอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเกิดการไอออไนเซชันแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยว และรวมตัวกันใหม่เป็นโอโซน (O_3)

ในปฏิญานิพนธ์นี้เป็นโครงการการวิจัย เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาแนวทางในการผลิตโอโซนเพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วยชุดอิเล็กโตรด และพัฒนาใช้ในการลดอากาศให้เคลื่อนผ่านชุดอิเล็กโตรด เพื่อนำโอโซนที่เกิดขึ้นไปทำการวัดหาปริมาณและเพื่อนำไปบำบัดน้ำ

สำหรับแนวทางที่สามารถนำโอโซนไปทำการบำบัดน้ำนั้น มี 2 แนวทาง คือ

1. บำบัดน้ำเสียที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากในน้ำเสียนี้จะมีสารมลทินต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์, แมงกานีส, เหล็ก, สังกะสี, กลิ่นที่ไม่พึงปรารถนา สารมลทินเหล่านี้จะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นควรทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง โอโซนสามารถนำมาใช้ในการบำบัดได้

2. บำบัดน้ำทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น ผลิตยาง, น้ำอัดลม หรือน้ำที่ใช้หล่อเย็น ซึ่งจะต้องมีสารมลทิน เช่น เหล็ก, แมงกานีส, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ต่ำกว่าค่าที่กำหนด (แล้วแต่ชนิดของอุตสาหกรรม) มิฉะนั้นจะทำให้มีปัญหาต่อระบบการผลิต ลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้น ทางอุตสาหกรรมจึงต้องทำการบำบัดน้ำให้ได้คุณภาพตามต้องการก่อนใช้งาน โอโซนเป็นสารตัวหนึ่งที่สามารถกำจัดสารมลทินเหล่านี้ได้

การวัดหาปริมาณโอโซนจะใช้วิธีการทางเคมี คือ ใช้สารละลายที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนและให้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นได้

จุดประสงค์ของปฏิญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีทางไฟฟ้าแรงสูงเพื่อนำมาประยุกต์ในการกำเนิดโอโซน
2. ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสีย
3. ศึกษาหาแนวทางในการนำโอโซนไปบำบัดน้ำเสียหรือน้ำทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูง

2.1 การเกิดไอออนในเซินของก๊าซ

อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุบวก เช่นนี้ เรียกว่าเกิดไอออนในกระบวนการแยกอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซและมีไอออนบวกเพิ่มขึ้นเรียกว่า Ionization ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็งเรียกว่า Electron Emission ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิเล็กโตรดซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าได้ กล่าวได้ว่าก๊าซจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีอนุภาคอิสระจำนวนมาก ๆ โดยกระบวนการทวีคูณเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนและไอออนระหว่างแก๊สที่แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซ อันเกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะอิเล็กโตรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงหรือได้รับพลังงานความร้อน รั้งสี หรือไอออนวิ่งมากระทบผิวอิเล็กโตรด

2.1.1 ไอออนในเซินโดยการชน

เมื่ออนุภาคมีมวล m (electron, ion, อะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และชนกับอะตอมมวล M จะมีการถ่ายเทพลังงานจลน์ ถ้าไม่ส่งผลให้เกิด Excitation หรือ Ionization เรียกว่า ชนแบบยืดหยุ่น แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชน เกิด Excitation หรือ Ionization ขึ้น เรียกการชนแบบนี้ว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น นั้นหมายความว่าพลังงานจลน์ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์

ก่อนชน

$m(v)$

$M(V=0)$



$m(v_1)$

$M(V_1)$

หลังชน

รูปที่ 1 อนุภาคชนกัน

ในรูปแสดงถึงสองอนุภาคมีมวล m และ M ชนกันในแนวมุมใด ๆ และเวกเตอร์ความเร็วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของอนุภาคก่อนชนเป็น v และ V ความล้าดับ ความเร็วแตกออกในแนว x, y คือ V_1 และไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{∞} จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการชน และนี่จึงให้ v_1 เป็นความเร็วสุดท้ายของมวล m_1 (แนวแกน x) เมื่อชนมวล M อยู่นิ่ง ($V=0$)

$$v_1 = (m-M)/(m+M) \cdot V$$

ไอออไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซโดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า E ในขณะวิ่งเข้าหาอะโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้า W มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลของก๊าซ (W_i) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซก็จะเกิดไอออไนเซชันขึ้น

สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วศูนย์ในทิศทางของสนามไฟฟ้า $E(x)$ เป็นระยะทางเท่ากับระยะทางอิสระ (λ) จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

$$W = e \int_0^{\lambda} E(x) dx = eU$$

นั่นคือ

$$\lambda = \lambda_i$$

ถ้าความเค้นสนามไฟฟ้า E คงที่

$$e \cdot E \cdot \lambda_i = W_i = eU$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันไอออไนเซชัน (V)

eU_i คือ พลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนเซชัน (eV)

ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันได้ก็อาจจะทำให้โมเลกุลที่ถูกชน (แบบไม่ยึดหยุ่น) นั้นอยู่ในสภาวะ Excitation ได้ พลังงานที่ทำให้โมเลกุล Excitation ได้พอดี เรียกว่า Excitation Energy (W_e)

ถ้าชนแบบไม่ยึดหยุ่น พลังงานสูงสุดที่อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซซึ่งอยู่นิ่งขณะก่อนถูกชนได้รับ หาได้จากกฎของโมเมนตัมและอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$mv + MV = mv_1 + MV_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ด้วย และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา mv ต่อ $+MV_1$ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1/2mv^2 = 1/2mv_1^2 + 1/2MV_1^2 + W_p \text{ (พลังงานรวมก่อนและหลังชนเท่ากัน)}$$

เมื่อ W_p คือพลังงานที่มวล M (อยู่นิ่ง) ได้รับ

จาก $mv = mv_1 + MV_1$ จะจัด V_1 ได้

$$1/2mv^2 = 1/2mv_1^2 + 1/2 m/M (v - v_1)^2 + W_p$$

พลังงานที่ W_p จะมีค่าสูงสุด ถ้าสมมติว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่วิ่งเข้ามาชนค่าที่
ดังนั้น $dW_p/dv_1 = m/M [mv - (m+M)v_1] = 0$

$$mv = (m+M)v_1$$

$$v_1/v = m/(m+M)$$

$$v_1/v = m/(m+M)$$

แต่ $m \ll M$ ดังนั้นจะได้

$$v_1 = (m/M) \cdot v$$

นั่นคือความเร็ว v_1 มีค่าน้อยเป็นเพียงส่วนหนึ่งของความเร็วต้นของอนุภาควิ่งมาชน แสดง
ว่าอนุภาควิ่งมาชน (อิเล็กตรอน) จะให้พลังงานจลน์เกือบทั้งหมดให้กับไอออน

การเกิดไอออไนเซชันโดยอิเล็กตรอนวิ่งชนอิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของไอออน นั่นคือ

$$1/2 mv^2 \geq W_i$$

สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ

ในระหว่างที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรด อาจชนและเกิดไอออไนเซชันได้
หลายครั้งก่อนที่จะถึงอิเล็กโตรด

Townsend ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาค

เอกสารประจุเคลื่อนที่ไปนั้นกำหนดด้วยแฟคเตอร์ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทอว์สัน
ไม่ว่าโดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในแก๊สเป็นสัมประสิทธิ์ α และ β โดย α เป็นสัมประสิทธิ์การ

ชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล ส่วน β เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน นิยามดังนี้

α : เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออนในเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแถบเป็นระยะ 1 cm (หน่วยเป็น cm^{-1})

β : คือจำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลเป็นกลางทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแถบตามแนวสนามไฟฟ้า

เนื่องจากไอออนมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อยและการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนกันน้อยด้วย นั่นคือ $\alpha \ll \beta$ ฉะนั้นการชนแตกตัวในก๊าซจึงมักเนื่องจากการชนของ α ซึ่งค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของก๊าซซึ่งมีความสัมพันธ์

$$\alpha/P = f(E/P)$$

อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า E จะถูกเร่งให้วิ่งไปหาแอโนด พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออนในเซชันเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซ นั่นคือทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลาง ที่เหลือก็เป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนตัวใหม่ก็จะวิ่งไปชนโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อไป จนกระทั่งเป็นอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนขึ้น

2.1.2 โฟโตออไอออไนเซชัน เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานรังสีโฟตอน พลังงานสูงทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดไอออนในเซชันได้คือ

$$h\nu < W_0 \text{ หรือ } W_1$$

เมื่อ h : Plank constant มีค่าเท่ากับ 6.6257×10^{-34} J.sec

ν : ความถี่ของแสง w : พลังงานไอออนไนเซชันของก๊าซ

2.1.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลได้รับพลังงานความร้อนในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ไอออนไนเซชันจะเกิดขึ้นจาก

1. เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้ความเร็วสูงจึงทำให้พลังงานจลน์สูงทำให้เกิดไอออนไนเซชันได้
2. ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมาและเกิดโฟตอนไอออนไนเซชันขึ้นได้

ไอออนไนเซชันเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดมาจากโมเลกุลของก๊าซ และที่เหลือเป็นไอออนบวก ในโอกาสเดียวกัน ไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนโมเลกุล

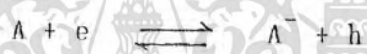
(electron attachment) ทำให้กลายเป็นคนภาคประจุที่มีมวลเพิ่มขึ้นมีค่าเท่า ๆ กับไอออนบวก ปรากฏการณ์นี้คือสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์สนใจศึกษา และต้องอ้างอิงถึงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เป็นผลให้เคลือบแก้วได้

2.2 การเกิดไอออนลบ

ที่กล่าวมาแล้วไอออนในเซชันเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลของก๊าซ และที่เหลือเป็นไอออนบวก ในขณะที่ตัวกันไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนไปเกาะบนโมเลกุล (electron attachment) ทำให้กลายเป็นอนุภาคประจุที่มีมวลมากขึ้นมีค่าเท่ากับไอออนบวก เป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อย (น้อยกว่า W_p) โอกาสจะเกิดไอออนในเซชันจากการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อย เท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออนในเซชัน การหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นในบริเวณใกล้คาโทดอันเป็นที่เริ่มต้นของอิเล็กตรอน

2.2.1 รูปแบบการเกิดไอออนลบ

1. radiative attachment เกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนไปเกาะบนอะตอม อนุภาคใหม่จะอยู่ในสภาวะดังกล่าวชั่วขณะ พลังงานของไอออนลบจะต้องมีค่าน้อยกว่าของอนุภาคกลาง ดังนั้นไอออนลบเสถียรได้จะต้องปล่อยพลังงานออกมาเป็นควอนตัมในขณะที่จะรวมตัวกัน กระบวนการนี้ย้อนกลับได้ เขียนได้เป็น



2. dissociative attachment เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล พลังงานส่วนที่เกินในขั้นจะไม่ปล่อยออกมา แต่จะทำให้เกิดแยกออกเป็น 2 อะตอม คืออนุภาคเป็นกลางหนึ่งและไอออนลบ เขียนได้ว่า



3. ไอออนลบเกิดจากผลของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุล โดยที่โมเลกุลแยกออกเป็นไอออนบวกและไอออนลบโดยไม่มีอิเล็กตรอนวิ่งไปเกาะบนอะตอม เขียนได้ว่า



4. ไอออนลบเกิดจากการที่อนุภาคหนึ่ง ๆ วิ่งชนกันเองโดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ จะมีการถ่ายเทพะจุเกิดขึ้นและแยกเป็นไอออนคู่คือ



2.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ (electron emission)

การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเบรคดาวนี้ได้ กลไกการเกิดมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

2.3.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวของคาโทดโดยการชนของไอออนบวก

อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากคาโทดได้จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ $W_w = eU_w$ (work function) ของโลหะที่ใช้ทำคาโทดนั้น พลังงานดังกล่าวได้จาก

1. ไอออนบวกอันเกิดจากกระบวนการเบ่งตันที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาเหลือไอออนบวกวิ่งเข้าหาแอโนด เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมาก (1836 เท่าของมวลอิเล็กตรอน) จึงเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานจลน์ที่ไอออนบวกได้จากสนามจึงมีน้อย ไม่พอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในทางใดก็ได้โดยไม่ผ่านการอนุญาต
ไม่ว่าการคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต และสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะทำให้เกิดไอออนเซชัน แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาจากผิวคาโทดได้เมื่อไอออนบวกวิ่งกระทบ

2. โหมดูกที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (metastable) อาจแพร่กระจายกลับไปหาคาโทดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้เมื่อโหมดูกนั้นวิ่งไปกระทบคาโทด

2.3.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยพลังงานแสง

อิเล็กตรอนอาจหลุดหรือกระจายออกมาจากผิวโลหะได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงมากพอ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวคาโทดเมื่อได้รับโฟตอนอาจมีพลังงานเหลือเพื่อและเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์วิ่งเข้าหาคาโนดได้ถึงแม้จะไม่มีสนามไฟฟ้า ความเร็วมีค่า

$$1/2 mv^2 = h\nu - W_0$$

เมื่อ W_0 คือ work function หรืองานที่ใช้แยกอิเล็กตรอนหนึ่งตัวโดยใช้พลังงานโฟตอน
 $= h\nu$

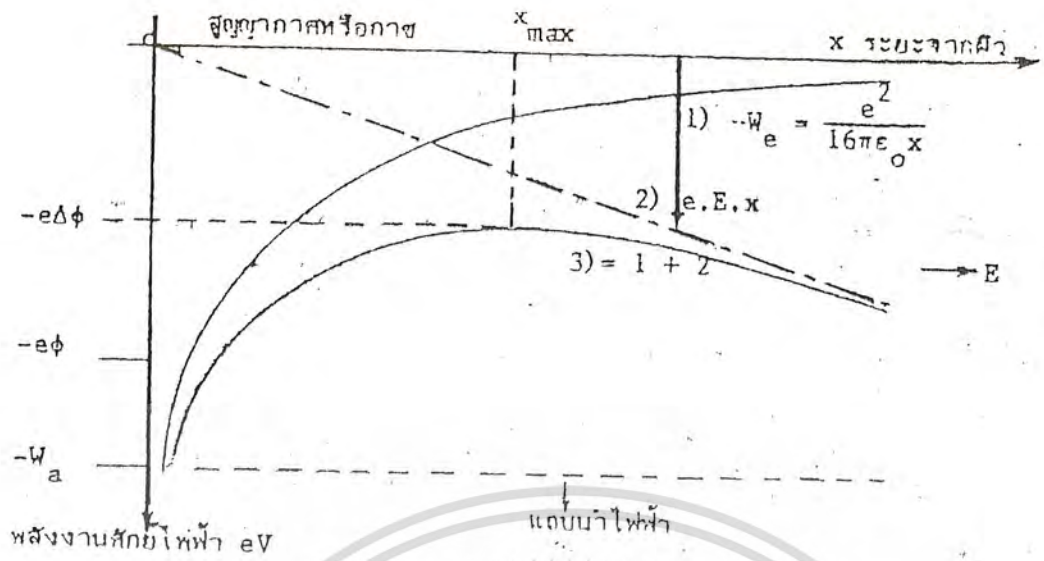
ตารางแสดงค่า W_0 ของธาตุต่าง ๆ เป็น eV เมื่อใช้พลังงานแสงเทียบกับพลังงานความร้อน

ธาตุ	Work function	
	ใช้พลังงานแสง	ใช้พลังงานความร้อน
Al	2.38 - 4.43	-
Cu	4.07 - 4.80	3.85 - 4.38
Fe	3.91 - 4.70	4.04 - 4.77
Ni	4.06 - 5.20	4.61 - 5.24

2.3.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยสนามไฟฟ้า

ผลจากสนามไฟฟ้าที่โอบนจากภายนอกเข้าไปจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดหรือปล่อยออกมาจากผิวโลหะได้ นั่นคือต้องมีพลังงานมากพอ นั่นคือสนามไฟฟ้าจะต้องมากกว่าค่าที่ต้องใช้สำหรับรวบรวมหรือดึงอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาด้วยพลังความร้อน (thermionic emission)

เมื่อพิจารณากำแพงศักย์ที่แนวต่อระหว่างโลหะกับสุญญากาศที่ปราศจากสนามไฟฟ้าภายนอก E ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่ระยะห่างจากผิวโลหะมาเรื่อยๆ ดังในรูปที่ 2 ลักษณะของเส้นกราฟศักย์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 กำแพงศักย์ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

- 1) พลังงานเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก
- 2) พลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน
- 3) พลังงานที่ป้อน

ถ้าค่าแรงสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีประจุ $-e$ ที่หลุดออกมาจากผิวโลหะกับประจุ $+e$ ที่อยู่ลึกลงในเนื้อโลหะที่อยู่ห่างจากผิวโลหะ $-x$ นั่นคือผิวโลหะเป็นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยกฎของคูลอมป์จะได้แรงระหว่างอิเล็กตรอนเป็น

$$F(x) = -e^2 / [4\pi\epsilon_0 (2x)^2] = -e^2 / [16\pi\epsilon_0 \cdot x^2]$$

เมื่อ $x \rightarrow \infty$ จะได้ $F = 0$ หมายความว่าอิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งที่มีพลังงานศักย์เป็นศูนย์ $W_\infty = 0$ ที่ระยะ x จะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้า

$$W_\infty = \int_x^\infty F(x) dx = -e^2 / (16\pi\epsilon_0 \cdot x^2)$$

ซึ่งจะได้เส้นกราฟเป็นรูปไฮเพอร์โบลิก

ผลของสนามไฟฟ้าคงตัว E ที่มีแนวตั้งฉากกับผิวโลหะ จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้าใน คือ

จะมีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง
จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดจากสองแรงนี้ เป็น

$$W_{\phi} = W_{\phi} + W_E$$

นั่นคือ

$$W_{\phi} = [-e^2 / (16\pi\epsilon_0 x)] - eE_x \quad \text{---- (a)}$$

ค่า W_{ϕ} แสดงในกราฟเส้นที่ 3 ในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นผลบวกของ $W_{\phi} + W_E$
จะเห็นได้ว่าถ้าค่าแรงผลัก $-e\phi$ ลดลงเท่ากับ $-e\phi$ จะได้ค่า W_{ϕ} จะมีค่าสูงสุดเป็น $e\phi - \Delta(e\phi)$ ที่ระยะ $x = x_{max}$ และ $\Delta(e\phi)$ คือ

$$dW_{\phi}/dx = [e^2 / (16\pi\epsilon_0 x^2 m)] - eE = 0$$

จะได้

$$x_{max} = \sqrt{e / (16\pi\epsilon_0 E)}$$

และพลังงานศักย์สูงสุดได้จากการแทนค่า x_{max} ลงในสมการ (a) เป็น

$$W_{\phi(max)} = -e\sqrt{eE/4\pi\epsilon_0}$$

$$W_{\phi(max)} = -(e/2)\sqrt{eE/\pi\epsilon_0}$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Delta(e\phi)$ ตามนิยาม ดังนั้นค่าของแวลูฟังก์ชันยังผลเมื่อมีสนามไฟฟ้า E จะได้

$$J = AT^2 e^{-\phi/kT} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{eE/4\pi\epsilon_0}{\phi}} \right] \quad \text{---- (b)}$$

ซึ่งเร็วกว่าสมการของช็อตทก (Schottky equation)

ถ้าให้กระแสที่ J_0 ที่ $E = 0$ กระแสในสมการ (b) จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่และนำออกจากรั้วของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้ได้กระแส J มีค่ามากกว่า J_0 ที่อุณหภูมิห้องได้ สนามไฟฟ้า E จะต้องมีค่าสูงถึง 10 ถึง 100 MV/cm ซึ่งในทางปฏิบัติลักษณะของอิเล็กโตรดใช้งานที่จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงขนาดนั้นหายาก อย่างไรก็ตามในเรื่องของความเป็นจริง การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้านั้นอาจเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่าที่แสดงไว้ข้างต้นได้ Fowler และ Nordheim ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นผลของลักษณะสมบัติเวฟเมคานิกส์ของอิเล็กตรอน ที่สามารถวิ่งทะลุกำแพงศักย์ออกมาได้เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่า Φ_0 หรือมากกว่าระดับเฟอร์มี (Fermi level) ในสุญญากาศความเครียดสนามไฟฟ้าเพียง 1 MV/cm ก็สามารรถทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาได้ เบรคดาวน์ในก๊าซอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเฉพาะแห่งเนื่องมาจากไอออนก่อตัวเป็นสตรีมเมอร์ที่กวาด

การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิใด ๆ บางอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้าของโลหะจะมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะหรือข้ามกำแพงศักย์ที่ผิวของโลหะไปได้ อุณหภูมิสูงที่พลังงานของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น

2.4 กลไกการเกิดเบรคดาวน์

2.4.1 Townsend breakdown mechanism เกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรด และเชื่อว่ากระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดจากไอออนในเซชันกระบวนการข้างต้น (α -process) ขบวนการชั้นสองที่มีความสำคัญต่อกลไกเบรคดาวน์ คือกระบวนการ γ (γ -process) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากคาโทด

α -process

จำนวนอิเล็กตรอนอะเวลา x ในแก๊สที่ระยะ x จากคาโทด คือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x}$$

เมื่อ N_0 : จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคาโทดต่อวินาที

N_x : จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากคาโทด

α : Townsend first ionization coefficient

d : ระยะแก๊ป

จำนวนอิเล็กตรอนวิ่งไปถึงแอโนด ($x = d$) ต่อวินาที เป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่หลุดจากคาโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงคาโทด และจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจาก

คาโทดจำนวน N_0 ต่อวินาที ถ้าปัจจัยกระบวนการนี้ยังไม่สามารถทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ หากจะต้องมีกระบวนการที่สร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α-process

ion⁺ ว่างชนคาโทดทำให้เกิด free electron emission

$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \alpha(e^{\alpha d} - 1)}, \quad I_d = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \alpha(e^{\alpha d} - 1)}$$

เมื่อ α : Townsend second ionization coefficient

เงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ เมื่อ $I_d \propto$ หรือส่วนเป็นศูนย์

The Townsend criterion for a spark $\alpha(e^{\alpha d} - 1) = 1$

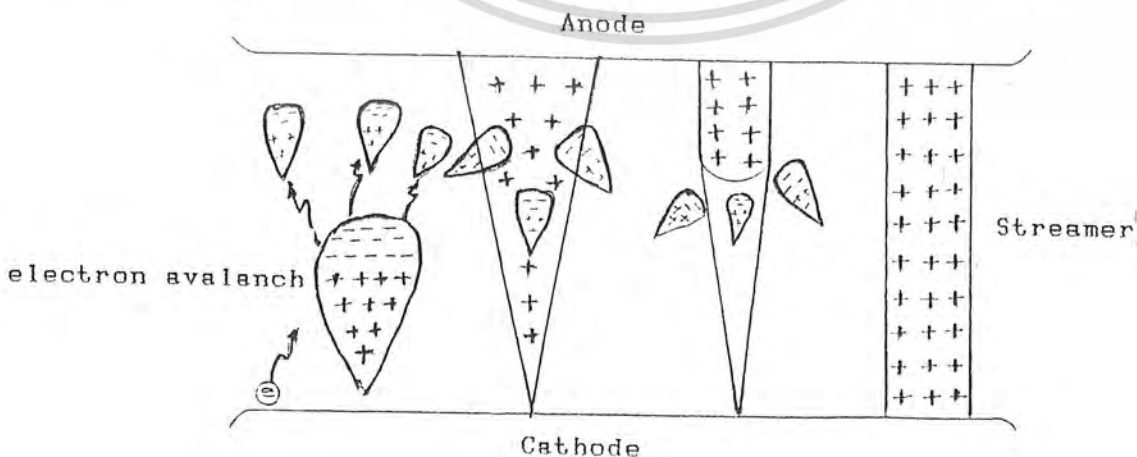
และ $e^{\alpha d} \gg 1$ เมื่อใกล้เบรคดาวน์ $\alpha e^{\alpha d} = 1$

หมายเหตุ α : ขึ้นกับชนิดก๊าซ

α : ขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโตรด

2.4.2 Streamer mechanism

ได้ศึกษาการ spark discharge จากอะวาลานซ์เดี่ยวซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานซ์เองเปลี่ยนจากอะวาลานซ์เป็นพลาสมาสตรีม ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรคดาวน์ในแนวนี้ ทบวนการจะมีการไอออไนซ์เป็นจำนวนมากจากพลังงานไอออนของก๊าซ โมเลกุลที่ส่วนหน้าของสตรีมเมอร์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดไอออไนซ์ชั้นเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่เมื่อเทียบกับความเร็วเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ข้ามกันไปตั้งฉากกับเกิดหมอกอิเล็กตรอนเป็นลำระหว่างอิเล็กโตรดปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอก ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กโตรดกับหมอกไอออนความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆทำให้เกิดโฟโตไอออไนซ์ชั้นขยายตัวสูงขึ้นเกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังในรูปที่ 3 หมอกประจุเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็น streamer และเกิดเบรคดาวน์ตามแนวนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3 ทบวนการเกิดอะวาลานซ์

2.5 การเกิดเบรคความแรงของก๊าซ

ลึซซาร์จเบรคความแรงในแก๊ปแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.5.1 Complete breakdown คือการเกิดเบรคความแรงตลอดระยะแก๊ปเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออากาศหมดสภาพเป็นฉนวน

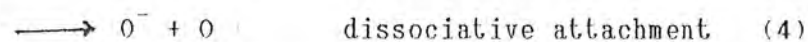
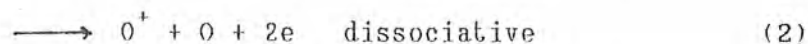
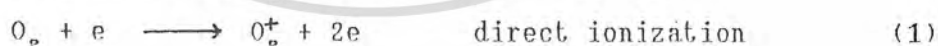
2.5.2 partial breakdown คือ เบรคความแรงเพียงบางส่วน เกิดขึ้นในระบบการฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (E มีค่าต่ำมาก) เบรคความแรงเพียงบางส่วนอาจเกิดก่อนเบรคความแรงสมบูรณ์ได้ เป็นการเกิดไอออนในแก๊ปเพียงบางส่วน บางทีเรียกว่า partial discharge เช่น corona discharge, surface discharge, internal discharge

-Surface discharge เกิดเมื่อแรงดันแก๊ปเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และ C ตามผิวมีค่าสูง เป็นการเบรคความแรงของอากาศตามผิว

-Internal discharge เป็นการเบรคความแรงบางส่วนในฉนวน

-Corona discharge เมื่อโมเลกุลของอากาศที่อยู่ใกล้ ๆ รอบ ๆ บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูง (ส่วนที่ติดกับ discharge electrode) มีการสูญเสียอิเล็กตรอนและกลายสภาพเป็นประจุที่ตามาตั้งรูปที่ 4 อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกจับโดยสนามไฟฟ้าที่แรงป้อนให้ ทำให้มีความเร่งอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมันวิ่งเข้าชนโมเลกุลของอากาศที่อยู่รอบ ๆ หากสนามไฟฟ้ามีความแรงพออิเล็กตรอนบางตัวจะทำการสะสมพลังงานที่มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการ Ionization ของโมเลกุลของอากาศของตัวต่อไปที่มันวิ่งเข้าชน ดังนั้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Avalance อิเล็กตรอน และจะทำให้เกิดไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้การ discharge ขยายวงกว้างออกไปจนกระทั่ง ถึงจุดที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ เพื่อที่จะไปทำการ ionize โมเลกุลของอากาศโดยการวิ่งชน (ขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงแปรผกผันกับระยะทางกำลังสองจากผิว discharge electrode) โดยปกติโคโรนาลึซซาร์จะก่อให้เกิดไอออนซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้ (2 ขั้นตอนบนการ)

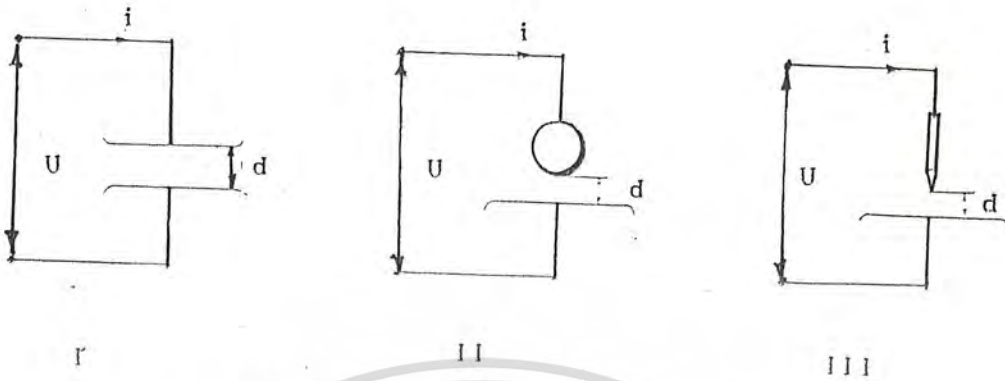
1. Oxygen-free radicals ถูกกำเนิดขึ้นโดยกระบวนการไอออไนซ์



2. ไอออนถูกกำเนิดโดย free radical reactions



2.6 สนามไฟฟ้าและลักษณะของอิเล็กโตรด



รูปที่ 4 ลักษณะอิเล็กโตรดแบบต่าง ๆ

2.6.1 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากันคำนวณได้จาก

$$E_{max} = E = U/d$$

- เมื่อ U : แรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโตรด
- d : ระยะห่างของอิเล็กโตรด (gap)
- E : ความเครียดสนามไฟฟ้า

นั่นคือ เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดการเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมากกว่าความทนได้ของอากาศ (หรือฉนวน) ต่อความเครียดดังกล่าว

2.6.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ อิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่าง ๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีความไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย อาจคำนวณได้จาก

$$E_{max} = U/d$$

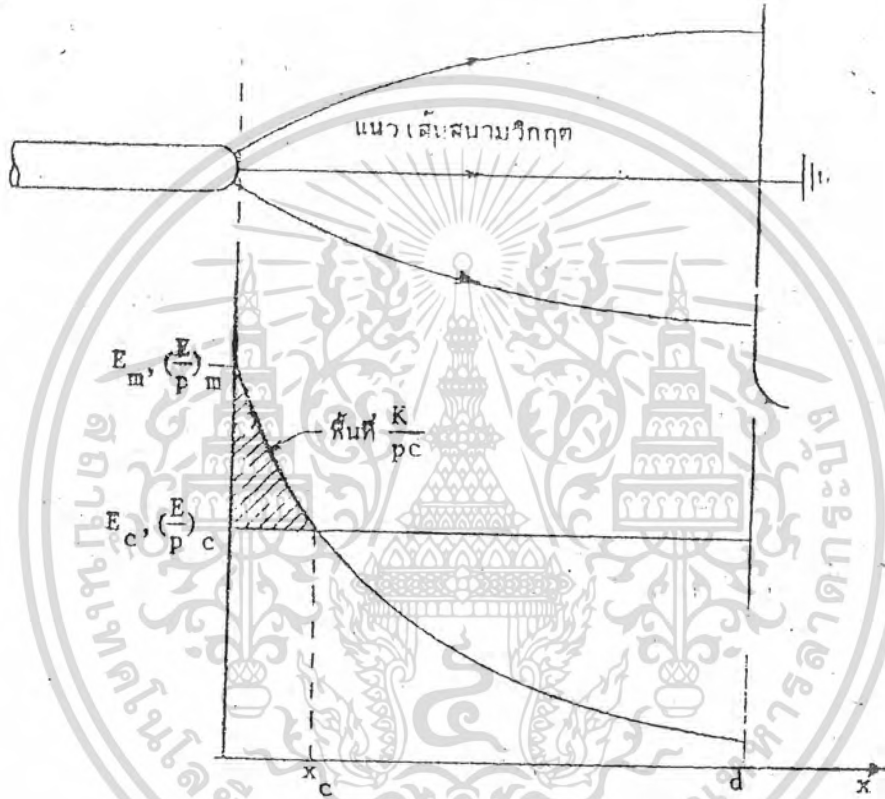
เมื่อ : field utilization factor = $E_{nv} / E_{max} < 1$

สมการนี้ใช้ในกรณีสนามไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่มีการเกิดโคโรนา ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่นที่ปลายแหลมดังรูป 5 เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่า

ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว, อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะไม่เกิดเบรคดาวน์ แต่จะเกิดโคโรน่าในบริเวณใกล้เคียงผิวอิเล็กโตรด ส่วนบริเวณอื่น ๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรน่า ฉะนั้นจึงหมายถึงการเบรคดาวน์ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า Partial discharge เราสามารถหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรน่าเริ่มเกิด (E_c) ได้จาก

$$E_c = U_c / d \quad (\text{กรณีไม่มีประจุค้าง})$$

เมื่อ U_c : แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด



รูปที่ 5 ระยะเวลาเวลาวิกฤติในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง แรงดันเริ่มเกิดก็คือ แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นที่वलบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าแบบที่वल เพราะในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นที่वल อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายอิเล็กโตรดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีโอกาสเกิดไอออนในเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างระยะเวลาวิกฤติของอิเล็กตรอนได้ง่าย

2.6.3 เบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Breakdown in nonuniform field)

ในกรณีที่ $\eta > 20\%$ ขึ้นไป การเกิดเบรคดาวน์ในอากาศจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่ถ้ามีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากกว่านี้ ($\eta < 20\%$)

จะมีความแตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ จะมีโคโรน่าเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรคดาวน์ในอากาศธรรมดาที่ความดันหนึ่ง

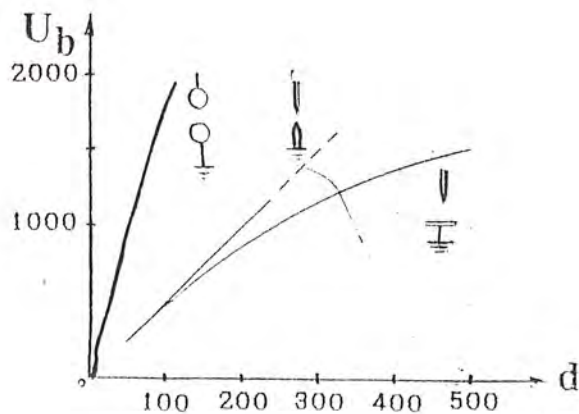
บางจุดโดยไม่มีเบรคดาว์น จากรูป 7 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มี n^+ ยิ่งต่ำ ความ-
 เครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ผิวอิเล็กโตรดรัศมีน้อยจะยิ่งมีค่ามาก และความ
 เครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นไอออกไปเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวของ
 อิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกิน
 ไปที่จะเกิดไอออไนเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรคดาว์นได้ ฉะนั้นจะมีโคโรน่าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของ
 อิเล็กโตรดที่มีรัศมีเล็กก่อนที่จะเกิดเบรคดาว์น

เมื่อมีโคโรน่าเกิดขึ้นสนามไฟฟ้าในแก๊ส จะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบอิเล็กโตร-
 สแตติกส์ หรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากเรขาคณิตของแก๊ส แรงดันเบรคดาว์นแบบโคโรน่าจะยุ่งยาก
 ต่อการคำนวณ อย่างไรก็ตามแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปลักษณะของสนาม
 ไฟฟ้าในแก๊ส



รูปที่ 6 ลักษณะสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดต่าง ๆ

รูปลักษณะอิเล็กโตรด ที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาว์นมากหรือน้อยพิจารณาได้จากความไม่สม่ำเสมอ
 เสมอของความเครียดสนามไฟฟ้าว่ามากหรือน้อยถ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นจะเท่ากับแรงดัน
 เบรคดาว์น ถ้าไม่สม่ำเสมอมากแรงดันเริ่มต้นน้อยกว่าแรงดันเบรคดาว์นและมีโคโรน่าเกิดขึ้นด้วย
 รูปที่ 7 แสดงแรงดันเบรคดาว์นในอากาศของอิเล็กโตรดต่าง ๆ

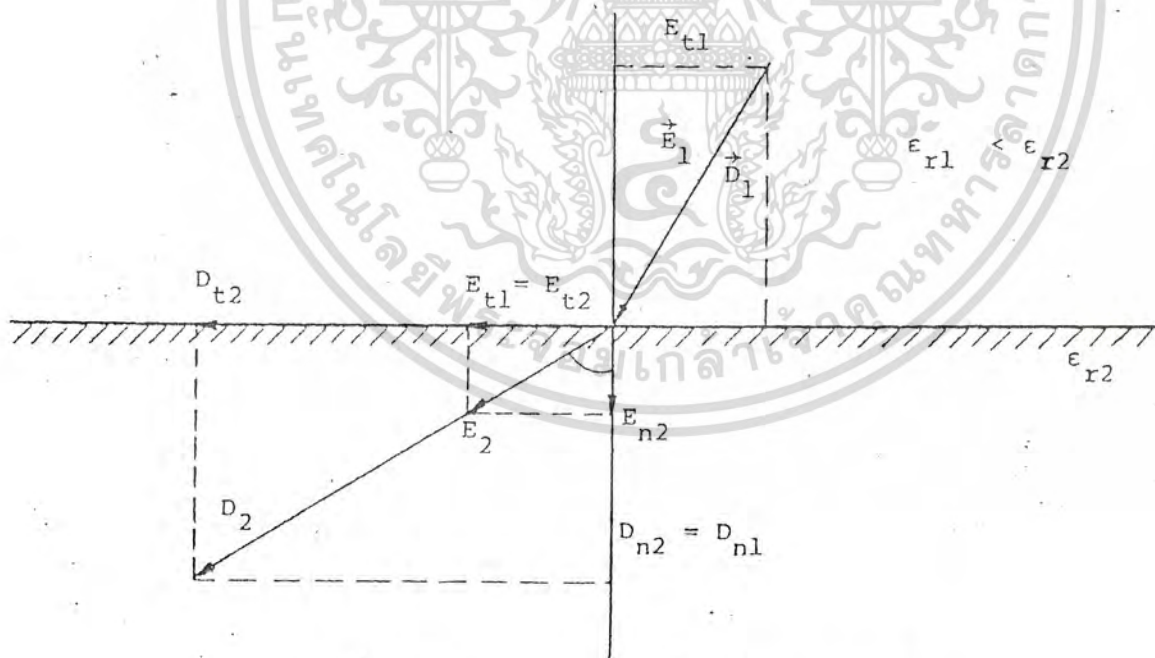


รูปที่ 7 แรงดันเบรคตาวนของอิเล็กโทรดชนิดต่าง

2.6.4 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวน

โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเค้นสนามไฟฟ้าในแนวแกนเจตต์ E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัวและความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ

$$E_{t1} = E_{t2} \text{ และ } D_{n1} = D_{n2} \text{ ดังในรูปที่ 8}$$



รูปที่ 8 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ และจากรูปที่ 9 จึงวิเคราะห์และเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

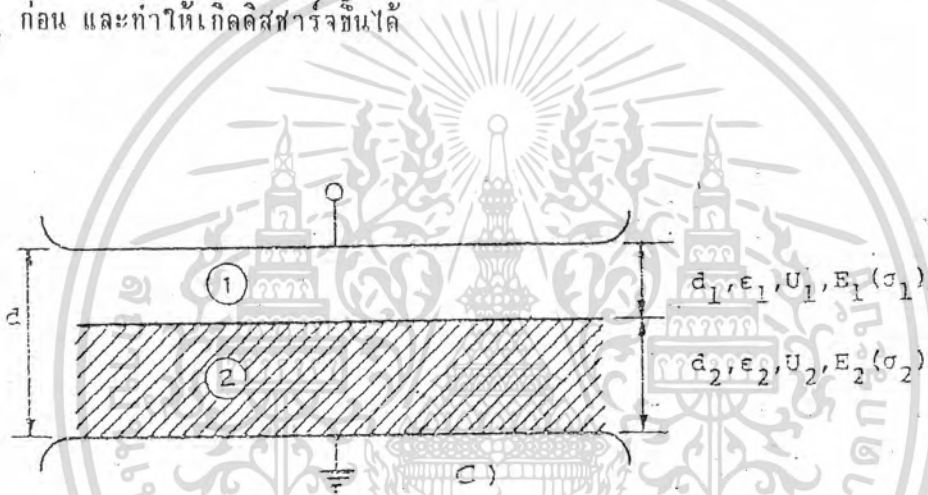
$$\frac{t_{\alpha 1}}{\epsilon_1} = E_{n2} = D_{t1} = \epsilon_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{t_{\alpha 2}}{\epsilon_2} = E_{n1} = D_{t2} = \epsilon_2$$

ซึ่งสรุปได้ว่าสนามไฟฟ้า D และ E ในเนื้อสารที่มี ϵ_r ที่มีค่ามากกว่า จะหักเหต่างออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อแน่นอน แต่เส้นสัจย์เท่าในส่วนที่มี ϵ_r สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

ตัวอย่างแสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนาน ซึ่งมีจำนวนที่ค่าเปอร์มิติวิตี (ϵ) ต่างกัน ดังในรูปที่ 8 รูป a แสดงถึงรอยต่อของฉนวนตั้งฉากกับระนาบของอิเล็กโตรด ส่วนในรูป b แสดงถึงรอยต่อของฉนวนทำมุมเฉียงกับผิวระนาบของอิเล็กโตรด และจะเห็นว่าที่ปากกลามของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิติวิตีต่ำ จะมีเส้นสัจย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งหมายถึงว่าบริเวณนั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงโดยเฉพาะจุดที่ระหว่างผิวระนาบของอิเล็กโตรดกับแนวรอยต่อของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า E_b ก่อน และทำให้เกิดลัดวงจรขึ้นได้



รูปที่ 9 พื้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 9 สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ ซึ่งในที่สุดจะได้สมการหาความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองก็คือ

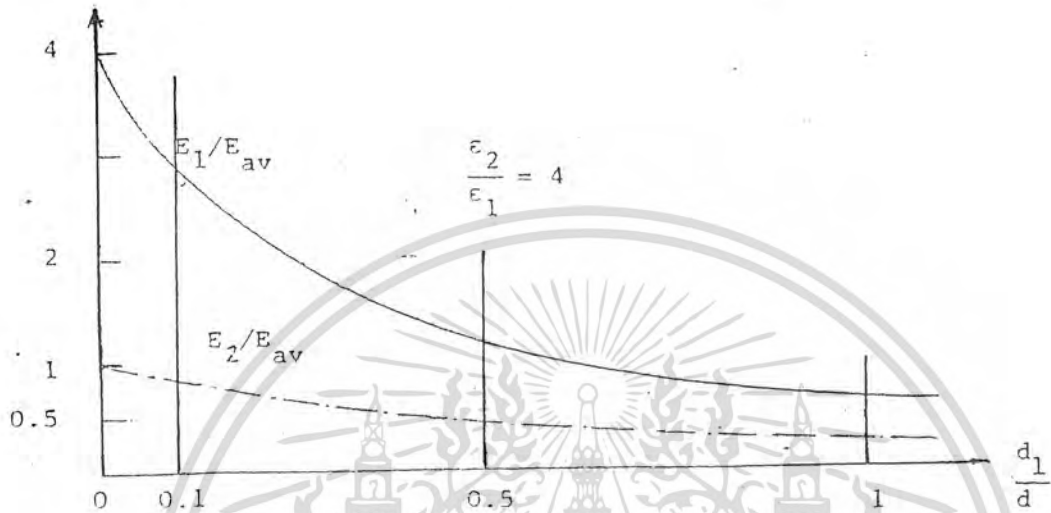
$$E_1 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\epsilon_2/\epsilon_1}{d_1/d (\epsilon_2/\epsilon_1 - 1) + 1}$$

และ

$$E_2 = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{d_1/d (\epsilon_2/\epsilon_1 - 1) + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า $E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1$ ซึ่งจะพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2/ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าส่วนฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่าถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่า ϵ ต่ำ ยิ่งบาง สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

2.6.5 แรงดันเริ่มต้นชั่วพลต่ำกว่าชั่วคราว

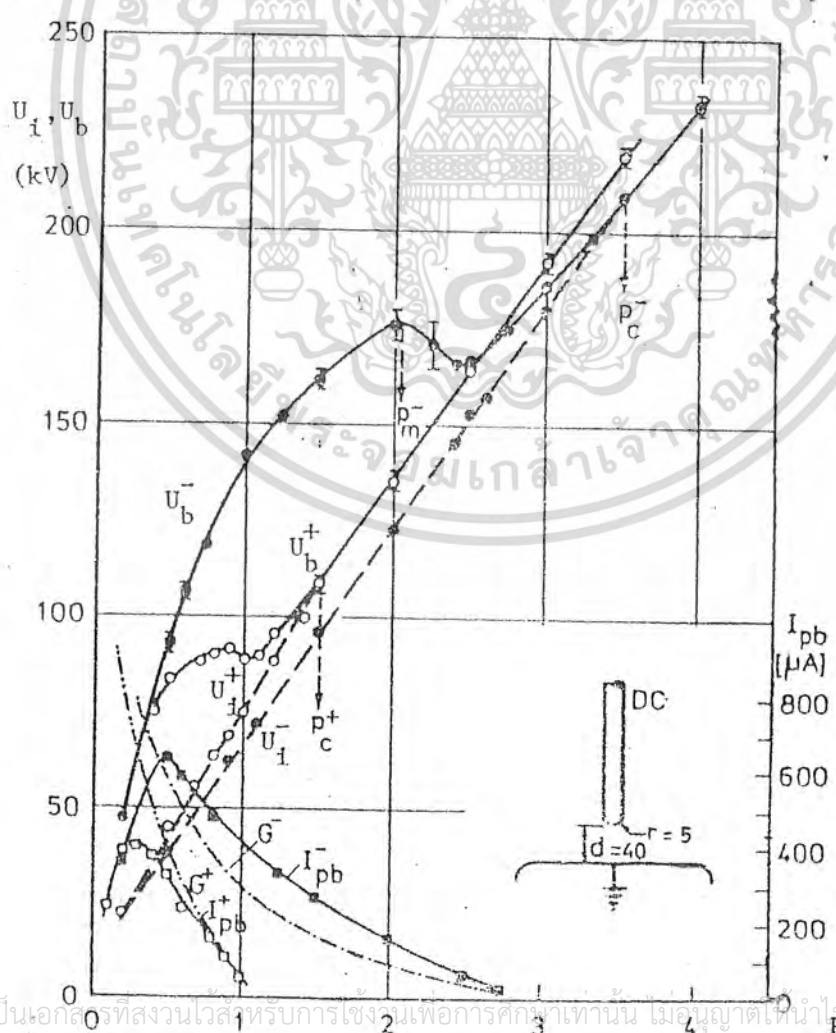
แรงดันเริ่มต้น (Threshold Voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแก๊ส ถ้าอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (direct breakdown) กล่าวคือเมื่อในแก๊สได้แรงดันเบรคดาวน์ก็จะเป็นเบรคดาวน์ทันที ในกรณีของแก๊สสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรคดาวน์แบบโคโรน่า ความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤติ (คือความดันก๊าซที่แรงดันเบรคดาวน์ U_b และแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด U_i เริ่มต้องเท่ากัน ถ้าความดันก๊าซต่ำกว่า P_c ค่า $U_i < U_b$) แรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด (corona inception voltage) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นชั่วพลบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะต่ำกว่าแบบชั่วคราว ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการเกิดเบรคดาวน์ได้นี้จะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวแล้ว สมมติว่าเป็นแก๊สของอิเล็กโตรดหรือคัทกับแผ่นระนาบถ้าที่หัวรีดเป็นลบ อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลาสีรูดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีโอกาสเกิดไอออนในพ่นจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานซ์วิกฤติของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงต่ำ แต่ถ้ารีดเป็นหัวบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแก๊สที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดรีดไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามก็ยังมีอีกทั้งงานให้ตัดปลายที่ช้า และต้องวางอิงถึงน้ำหนักของสารที่รีดซึ่งถูกนำไปใช้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีอีกทั้งงานให้ตัดปลายที่ช้า และต้องวางอิงถึงน้ำหนักของสารที่รีดซึ่งถูกนำไปใช้

ถึงจำนวนวิกฤติ ($N_c = 10^8$) ได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤติอย่างน้อยต้องเท่ากับ X_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ X_c จากปลายรีอดเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออนในเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยาก ถ้าจะให้เกิดไอออนในเซชันที่ระยะ X_c ได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเริ่มเกิดเบรคดาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของหัวลบจึงต่ำกว่าของหัวบวก คือ $U_i^- < U_i^+$

ถ้าเป็นแบบเบรคดาวน์โดยตรง ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ค่าความดัน $P > P_c$ จะได้ $U_b^- = U_b^+$

จะเห็น $U_b^- < U_b^+$ (เบรคดาวน์โดยตรง)

แต่ถ้าเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และ $P < P_c$ จะมีโคโรน่าเกิดขึ้น เกิดเบรคดาวน์ ผลของโคโรน่าทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่เวลาจะสูงกว่าหัวบวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

2.7 ผลของประจุค้าง(space charge) ต่อแรงดันเบรคความต่างขั้ว

ผลของ space charge ที่เกิดขึ้น high nonuniform field

ประจุค้าง (space charge) เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้แรงดันเบรคความต่าง V_b มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (V_i) และผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคความต่างของขั้วบวกและขั้วลบแตกต่างกัน

ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรคความต่างโดยตรงกล่าวคือแรงดันเบรคความต่างโดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้น (Thershold voltage) ของขั้วลบจะต่ำกว่าขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคความต่างขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC, AC, Impulse) และในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอของอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่สมมาตร ดังตัวอย่างเช่น ปลายแหลมกับแผ่นระนาบ การอ้างอิงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบหมายถึงขั้วแรงดันบนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

1. ปลายแหลมขั้วบวก

ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปข้างล่าง เมื่อแรงดันสูงถึงค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดภายในปริมาตรของแก๊สจะเกิดไอออนในเซชันรวม ๆ ปลายแหลมมีอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาคาโทดคือปลายแหลมและรวมตัวเป็นกลาง ปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาแอโนดคือปลายแหลมและรวมตัวเป็นกลางปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าค้างลอคกันอยู่ที่หน้าปลายแหลมทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าทิศทางเข้าหาคาโทด คือ แผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น (รูปข้างล่างประกอบ) ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนหนึ่งว่าทำให้โอเลคโตรดขยายขึ้น เมื่อระยะแก๊สสั้นลงและเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดเบรคความต่างได้ง่ายขึ้น นั่นคือประจุค้างทำให้แรงดันเบรคความต่างขั้วบวกต่ำลง

2. ปลายแหลมขั้วลบ

ปลายแหลมเป็นขั้วลบตามรูปข้างล่าง อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนในเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบแอโนดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะตัวโมเลกุลได้และรวมตัวเป็นกลางที่แอโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาคาโทดปลายแหลมจะค้างอยู่ที่บริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดสูงขึ้น แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้างกับแอโนด (ระนาบ) จะกลับสม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากประจุค้างทำให้เบรคความต่างได้ยากขึ้นฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรคความต่างขั้วลบมีค่าสูงขึ้น

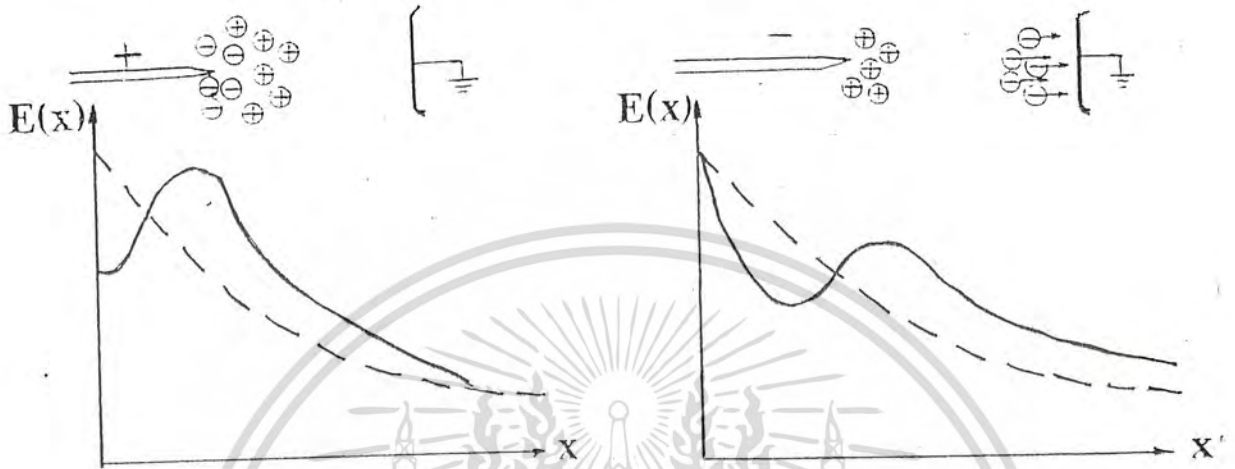
$$V_b > V_i$$

-แรงดันเริ่มต้น (starting voltage, ; corona voltage)

$V_1^- < V_1^+$ ทิวบวกต้องที่ระยะวิกฤติ x_c , โครโน่าทิวลบเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่า

-แรงดันเบรคความ

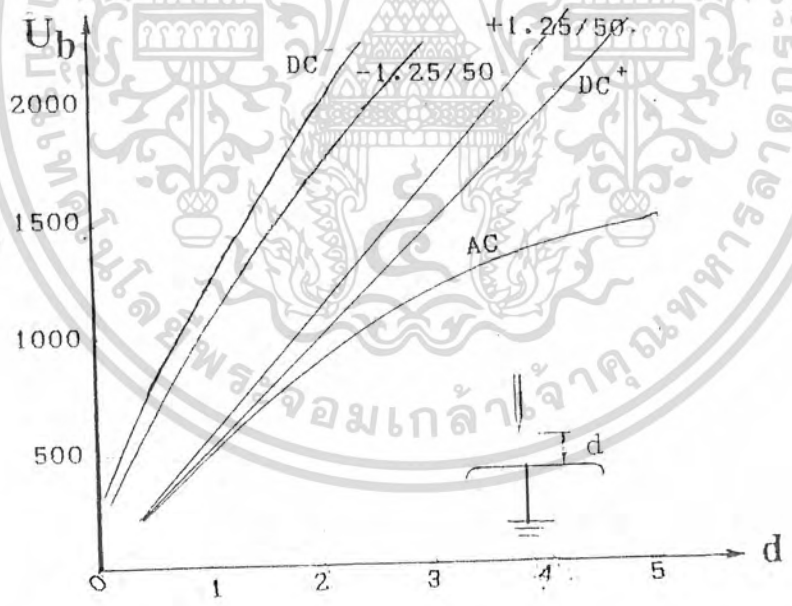
$V_b^- > V_b^+$ ทิวลบเบรคความสูงกว่าทิวบวก



รูปที่ 12

รูปที่ 13

ผลของประจุค้างของอิเล็กโตรดปลายแหลมทิวบวกและทิวลบ



รูปที่ 14 แรงดันเบรคความของอิเล็กโตรดแท่งกับระยะที่แรงดันรูปแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสีย คือ น้ำที่ถูกใช้แล้วโดยหมั่มชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในน้ำเสียนั้นไม่เพียงแต่มีพวกแร่ธาตุ เช่น สารตะกั่ว, แมงกานีส หรือโลหะหนักอื่น ๆ และสารอินทรีย์ เช่น พวกสารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ในน้ำทั้งเท่านั้น ยังมีสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ อีก เช่น เศษอาหาร, กระดาษ, สบู่ ฯลฯ สารเหล่านี้อาจแขวนลอยอยู่ในน้ำทั้งหรือบางพวกอาจสามารถละลายอยู่ในน้ำทั้งได้ สารเหล่านี้มักจะมีพิษและไม่พึงประสงค์ให้มันในน้ำ เพราะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้สภาพแวดล้อมไม่ดี โดยปกติน้ำเสียจะมีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่น้อยกว่า 1 mg/l ซึ่งปริมาณออกซิเจนขนาดนี้ไม่เพียงพอต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ รวมทั้งไม่เพียงพอต่อการที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การปรับสภาพให้น้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น (treatment) ระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ

1. ระบบบำบัดทางฟิสิกเคมี (Physicochemical)
2. ระบบบำบัดทางเคมี
3. ระบบบำบัดทางชีววิทยา

3.1 ระบบบำบัดทางฟิสิกเคมี ใช้ในการกำจัดสารมลพิษทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย มีหลายกระบวนการ เช่น การดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon absorption), การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange), แก๊สstripping (Gas stripping) ฯลฯ แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การดูดซับด้วยคาร์บอนและการแลกเปลี่ยนไอออน แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำทั้งด้วยวิธีฟิสิกเคมีโดยทั่วไปแล้วจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีอื่น จึงมักจะใช้ในการบำบัดขั้นสูง (Advanced treatment) เพื่อกำจัดสารมลพิษบางชนิดที่มีความเข้มข้นต่ำมาก และไม่เหมาะสมที่จะกำจัดด้วยวิธีอื่นเท่านั้น ต่อไปนี้จะเป็นการอภิปรายถึงบางกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางดังนี้

- การดูดซับด้วยคาร์บอน สามารถใช้แยกสิ่งสกปรกทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น COD, BOD, สี, กลิ่น, รส, ยาฆ่าแมลง ฯลฯ

- การแลกเปลี่ยนไอออนใช้มากที่สุดในการแก้ความกระด้างของน้ำและในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (demineralization)

3.1.1 แอร์stripping (Air Stripping)

ปกติแล้ว air stripping จะถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดก๊าซในโตรเจนออกจากน้ำเสีย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแล้วปลดปล่อยก๊าซดังกล่าวกลับสู่อากาศ วิธีการเช่นนี้ทำได้โดยการทำให้น้ำเสียได้สัมผัสกับบรรยากาศไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้ภายนอกโดยอาศัยหอแพค (Packed towers) หรือปลั๊กน้ำเสียที่มีการทวนหรือพันเป็นฟองพบว่า

การใช้หอแพคที่มีใบพัดขนาดใหญ่เป่าอากาศเข้าสู่หอแพคทางด้านล่างส่วนกับการไหลลงสู่ด้านล่างของน้ำเสียเป็นระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการบำบัด

กระบวนการดังกล่าวนี้ใช้ได้กับสารละลายแอมโมเนียเจือจาง เนื่องจากระดับของการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียจากสารละลายเข้มข้นจะมีค่าสูงมาก ตัวอย่างเช่น ในการกลั่นแยกน้ำมันที่นำเอาระบบควบคุมการปลดปล่อยอากาศ มาใช้ในกระบวนการกำจัดแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูง (2,000 - 10,000 ppm) ที่มีปะปนอยู่จะไม่ก่อให้เกิดทางเลือกที่คุ้มค่าในแง่ของเศรษฐศาสตร์ ขนาดของการนำเอากระบวนการ Air stripping มาใช้จึงอาจจำกัดอยู่กับการใช้ในการกำจัดพวกสารระเหยได้ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อการปลดปล่อยอากาศต่อไป

ประสิทธิภาพของกระบวนการ Air stripping ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเสีย โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำเสีย ความดันไอของก๊าซแอมโมเนีย ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ก๊าซแอมโมเนียถูกปลดปล่อยออกมาสู่อากาศได้มากขึ้น และประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซแอมโมเนียยังเพิ่มขึ้นอีกเมื่อค่า pH ของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น การบำบัดน้ำเสียตติยภูมิอาจเกี่ยวข้องกับ การเติมปูนขาวเพื่อช่วยในการกำจัดพวกฟอสเฟต ทั้งเป็นผลให้ค่า pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น บางส่วนระบบการบำบัดน้ำเสียตติยภูมิจึงนิยมใช้ Air stripping โดยที่น้ำเสียจะถูกบำบัดได้ดีเพราะมีค่า pH สูง

3.1.2 การกรอง (Filtration)

การกรองเป็นกระบวนการทางกายภาพที่เป็นการแยกอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในของไหลออกจากของไหล โดยที่แรงกระทำกับของไหลผ่านตัวกลางรูพรุน ในแง่ของเทคโนโลยีการแยกที่ได้รับการพัฒนาที่ชัดเจน นิยมใช้กระบวนการกรองในการบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรมซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำหน้าที่ 2 อย่างที่แตกต่างกัน คือ อย่างแรก สามารถใช้เพื่อการผลิตของเหลวบริสุทธิ์ โดยการกำจัดพวกของแข็งแขวนลอย หน้าที่อย่างที่สอง สามารถนำมาใช้เพื่อกำจัดน้ำออกจากโคลนที่เป็นของเสียซึ่งจะทำให้โคลนนั้นเข้มข้น จนเกือบจะเป็นของแข็งและมีปริมาตรเล็กลง

ในแง่ของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การกรองมักจะกระทำภายหลังจากการตกตะกอนหรือการทำให้สารแขวนลอยจับตัวกันเป็นก้อนเสียก่อนในกระบวนการกำจัดน้ำออกจากโคลน โดยทั่วไปแล้วถ้ากระทำโดยการกรองจะทำให้กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพดี

3.1.3 การจับตัวเป็นก้อน (Flocculation /Coagulation)

การจับตัวเป็นก้อนได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายกระบวนการที่อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งแขวนลอยในของเหลวถูกทำให้รวมตัวจับกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และเหมาะสมกว่าเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในภายหลังการจับตัวเป็นก้อนนี้เป็นกระบวนการทางเคมีกายภาพ ที่มีส่วนช่วยส่งเสริมให้เกิดการแยกของแข็งออกจากเหลวโดยการเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็ง ในทางปฏิบัติกระบวนการจับตัวเป็นก้อนนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนต่าง ๆ ต่อไปนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารเดิมตัวกระทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
1. การเติมตัวกระทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน
2. การปรับ pH อย่างเร็วเพื่อกระจายตัวกระทำดังกล่าวไปที่ทั่วของเหลว

3. การกวนอย่างช้า ๆ เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคขนาดเล็ก เพื่อรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

ขั้นตอนที่ 3 มีความสำคัญมากที่จะต้องมีการกวนอย่างช้าเพียงพอที่จะไม่ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นแตกสลายไปด้วยแรงเฉือนในขณะกวน ตัวกระทำหรือสารช่วยทำให้เกิดการจับกันเป็นก้อนได้แก่ สารลัมพูขาว และเกลือของธาตุเหล็กต่าง ๆ เป็นต้น

การใช้สารช่วยที่เหมาะสมย่อมก่อให้เกิดความรุนแรงของการจับกันเป็นก้อนได้ดีขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามกระบวนการจับกันเป็นก้อนมักจะไม่เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ และมักจะพบว่ามือนุภาคบางส่วนที่ไม่สามารถจับตัวเป็นก้อนได้ มักพบอยู่เสมอว่าจะต้องให้สารช่วยจับตัวในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่จะมีผลในทางลบต่อการเพิ่มปริมาตรทั้งหมดของโคลนของเสีย

3.1.4 กระบวนการแผ่นเยื่อ (Membrane Processes)

กระบวนการทางกายภาพบางกระบวนการที่ Metry (1980) ได้กล่าวถึงนั้นรวมถึงกระบวนการ Ultrafiltration reverse osmosis และ Electrodialysis เหล่านี้ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับการใช้แผ่นเยื่อ กระบวนการใช้แผ่นเยื่อในการจัดการของเสียบางกระบวนการอย่างย่อมีดังนี้ คือ

1. Microfiltration และ Ultrafiltration

ในกระบวนการที่เรียกว่า microfiltration แผ่นเยื่อที่มีขนาดของรู อยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 10 ไมครอน จะยอมให้ตัวทำละลายอิสระบางชนิดไหลผ่านได้ (ซึ่งปกติจะเป็นน้ำ) ของแข็งที่ละลายได้และตัวทำละลายที่แขวนลอยอยู่ซึ่งรวมถึงพวกโพลีเมอร์ต่าง ๆ ส่วนตัวบักเตรีชิ้นส่วนของเซลล์ที่วาทและวัตถุแขวนลอยจะถูกกักไว้ด้วยลักษณะแผ่นเยื่อ ในบางครั้งจึงเรียกกระบวนการนี้ว่า Biofiltration การประยุกต์ใช้กระบวนการ microfiltration ในทางอุตสาหกรรมจะถูกนำมาใช้ในการบำบัดของเสียที่ปลดปล่อยออกจากโรงงานฟอกขนสัตว์ และในการกำจัดไฮโดรคาร์บอนออกจากโรงงานฟอกขนสัตว์ และในการกำจัดไฮโดรคาร์บอนออกจากของเสียที่ได้จากการกลั่นน้ำมัน

ในกระบวนการที่เรียกว่า Ultrafiltration จะใช้ประโยชน์จากแผ่นเยื่อที่มีขนาดของรู เล็กมาก ๆ หรืออยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.002 ไมครอน และสามารถใช้ในการแยกวัตถุออกจากกันตามขนาดของน้ำหนัโมเลกุลที่อาจต่ำมากถึง 500 หรือสูงมากถึง 30,000 ได้อย่างเฉพาะเจาะจง

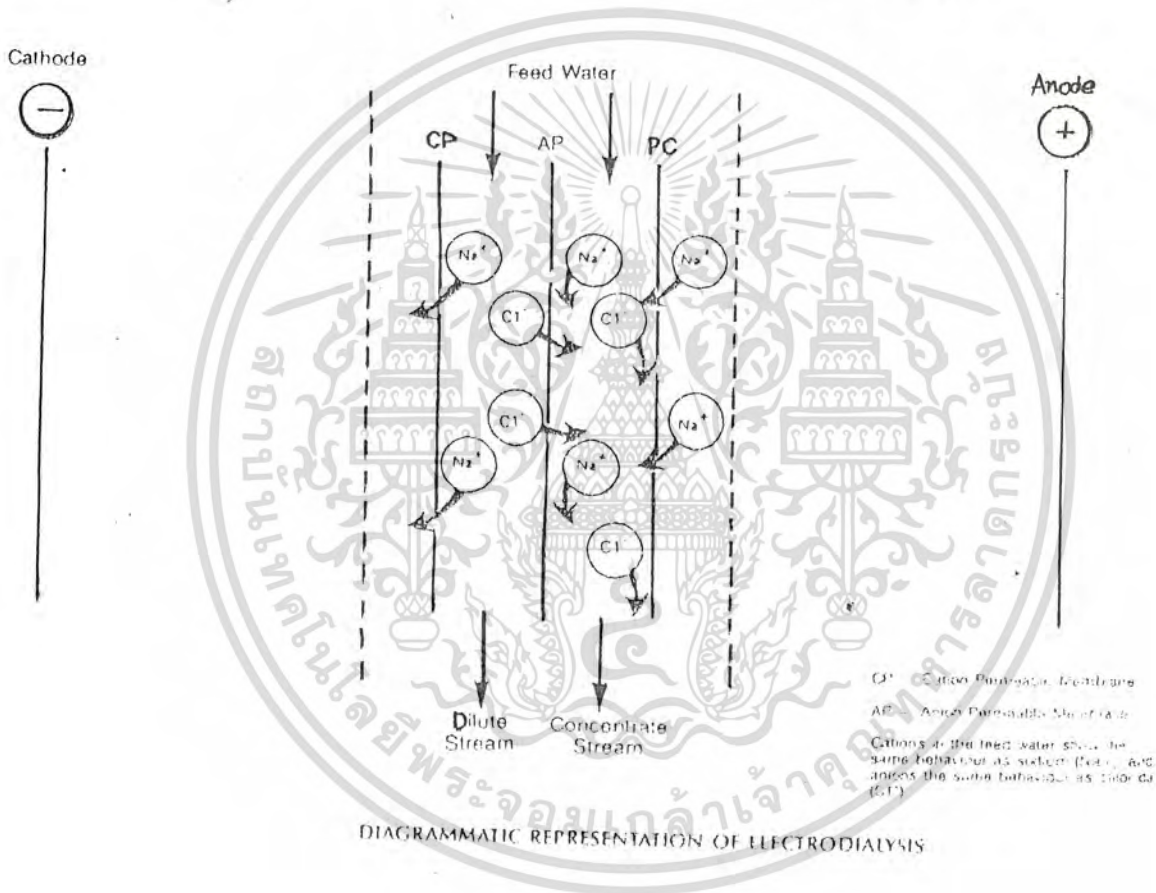
2. Reverse Osmosis

กระบวนการออสโมซิสผันกลับ ประสบความสำเร็จในการนำมาใช้บำบัดน้ำล้างที่ได้จากการเคลือบแผ่นโลหะด้วยไฟฟ้า ไม่เพียงแต่จะทำให้เสียที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวที่ปลดปล่อยออกมาตามมาตรฐานแล้วยังมีส่วนช่วยให้มีการนำสารละลายโลหะเข้มข้นกลับมาใช้อีก นอกจากนี้แล้วยังมีการนำกระบวนการนี้มาใช้ในการบำบัดสารซีลไฟท์ ซึ่งปะปนอยู่ในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานผลิตเครื่องกระดาษ

และจากโรงงานแปรรูปอาหารบางประเภท ในแง่เทคโนโลยีการบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ในการค้าแล้ว กระบวนการออสโมซิสผันกลับยังเหมาะสมกับความเข้มข้นของของเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์และไมวากรณีต่างๆสูง อีกทั้งยังมีเทคนิคเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องใช้งบประมาณสูงของเอกสารที่ควรนำมาใช้ประโยชน์ที่ทะเลาะกันได้จึงจะมีส่วนช่วยในการกำจัดสารเหล่านี้ถึงขั้น

3. Electrodialysis and Reverse Electrodialysis

ในกระบวนการ Electrodialysis กระแสไฟฟ้าที่สททางเดียวจะเป็นตัวขับไอออนต่างๆ ผ่านไปยังแผ่นเยื่อเฉพาะแคตไอออนและแอนไอออน ซึ่งถูกจัดเรียงให้เกิดการกำจัดพวกเกลือและแร่ธาตุต่าง ๆ ได้อย่างต่อเนื่องจากกระแสน้ำเสียนขณะที่ทำให้เกิดเกลือเหล่านี้เพิ่มขึ้นในกระแสน้ำที่ถูกแยกออกในกระบวนการ Reverse electrodialysis กระแสน้ำเสียนที่ผ่านเข้าสู่แผ่นเยื่อ จะมีการทำให้ไหลกลับทิศทางเป็นช่วง ๆ เพื่อเป็นการรักษาให้ระบบแผ่นเยื่อสะอาดอยู่เสมอ ซึ่งเป็นที่ยืดอายุการใช้งานของแผ่นเยื่อ และการทำให้แตกสลายทางเคมีมีค่าต่ำที่สุด (Jones, 1987) แผนภาพแสดงถึงกระบวนการทำงานของ Electrodialysis แสดงได้ด้วยรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภาพแสดงกลไกเลคโตรไดอะไลซิส

กระบวนการ Electrodialysis ยังสามารถนำมาใช้ในการกำจัดพวกของแข็งที่ละลายได้จากของเสียที่เป็นของเหลว และมักนิยมใช้ในรูปของการบำบัดตติยภูมิควบคู่ไปกับกระบวนการกรองและการดูดซับคาร์บอน

4. การประยุกต์ใช้กระบวนการแผ่นเยื่อ

ในอุตสาหกรรมรวมส่วนใหญ่นิยมนำกระบวนการแผ่นเยื่อมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางการเจริญเติบโตอย่างหนึ่งของตลาดเทคโนโลยีแผ่นเยื่อคืออยู่ในการจัดการของเสียที่เป็นของเหลวจากการค้า การวางที่ 5 แสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้แผ่นเยื่อที่นิยมใช้กันมากในการจัดการของเสียทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

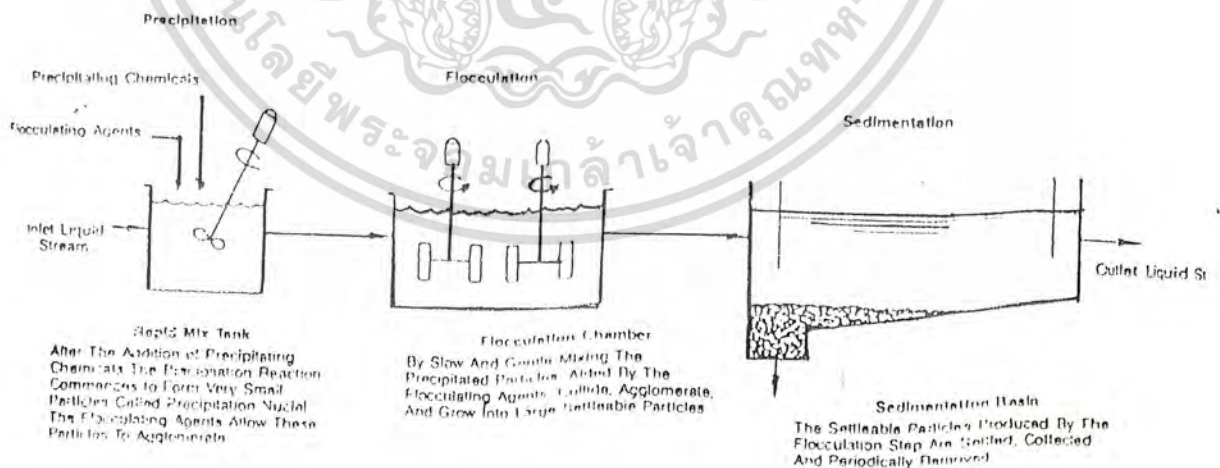
3.1.5 การตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการทางเคมีที่สารบางชนิดหรือทั้งหมดในสารละลายถูกเปลี่ยนรูปไปอยู่ในวัฏภาคของแข็งแล้วจึงถูกกำจัดออกจากสารละลายภายหลังในแง่ของวัตถุประสงค์ในการจัดการของเสีย กระบวนการตกตะกอนมักถูกนำมาใช้ในการกำจัดพวกโลหะต่าง ๆ จากของเสียที่เป็นของเหลวในรูปของไฮดรอกไซด์ หรือ ซัลไฟด์ ตัวอย่าง เช่น การกำจัด สังกะสี ในรูปของซิงค์ซัลไฟด์จากสารละลายซิงค์คลอไรด์ ด้วยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ กระบวนการตกตะกอนนิยมใช้ควบคู่กับกระบวนการทางกายภาพอื่น ๆ เช่นกระบวนการจับตัวเป็นก้อน (Flocculation) และกระบวนการจับตัวเป็นตะกอน (Sedimentation)

3.1.6 การจับตัวเป็นตะกอน (Sedimentation)

อนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว อาจจะรวมตัวกันได้โดยแรงโน้มถ่วงหรือแรงเฉื่อยซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพที่เรารู้จักกันว่า การจับตัวเป็นตะกอนในการบำบัดน้ำเสียทางอุตสาหกรรมซึ่งติดตั้งอยู่ภายในโซนของการจับตัวเป็นก้อน (Flocculation zones) หรือในเครื่องที่มีรูปทรงกระบอกเพื่อว่าผลระยะสั้นให้การตกตะกอนดีขึ้น

การตกตะกอน (Precipitation) การจับตัวเป็นก้อน (Flocculation) และการจับตัวเป็นก้อน (Sedimentation) เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาแล้วเป็นอย่างดี และมักจะใช้กระบวนการเหล่านี้ควบคู่กันในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่ประกอบด้วย พวกโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ และพวกฟอสเฟตโลหะ เป็นต้น รูปที่ 16 แสดงให้เห็นถึงการนำเอากระบวนการเหล่านี้มาไว้ที่ควบคู่กันในการบำบัดน้ำเสีย



SCHEMATIC DIAGRAM OF A TREATMENT SYSTEM WHICH EMPLOYS PRECIPITATION, FLOCCULATION AND SEDIMENTATION

รูปที่ 16 ขบวนการในการทำให้ตกตะกอน

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดตกตะกอนได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ โซเดียมคลอไรต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมฟอสเฟต และไนเตรท ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนได้แก่ ไอออน (II) ซัลเฟต โซเดียมไบซัลเฟต ซัลเฟตไดออกไซด์ ฯลฯ

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันได้แก่การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียของโรงงาน
ชุบโลหะ สสารเคมีที่ใช้คือ คลอรีนหรือ ไฮโปคลอไรต์

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนคือการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบโคโรเมตหรือกรด
โคโรมิกละลายปนอยู่โดยใช้ไฮดรอกไซด์ (II) ที่ละลายไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโคโรเมต

นอกจากนี้ยังนิยมใช้การออกซิเดชันทางเคมีในการบำบัดพวกฟีนอลในน้ำเสียที่ไม่รุนแรงมาก
ในการควบคุมสารอินทรีย์ตกค้างในน้ำเสียในการบำบัดน้ำเพื่อใช้บริโภค ในการควบคุมปัญหาเรื่อง
กลิ่น ในการควบคุมปัญหาเรื่องกลิ่น ในการกำจัดสาข่าแมลงที่ตกค้างอยู่ในน้ำ

ตารางที่ 2 แสดงถึงผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในการบำบัดน้ำของตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ

ปัญหา	คลอรีน	คลอราไมต์	ไฮโปโซ	คลอไรด์	โพตัสเซียม ออกไซด์	เปอร์มังกาเนต	ออกซิเจน
เหล็ก	E	N	E	E	E	E	E
แมงกานีส	S	N	E	E	E	E	N
ซิลิไซด์	E	N	S	S	S	S	E ^b
รสและกลิ่น	S	N	E	E	S	S	S ^c
สี	E	N	E	E	S	S	N
ช่วยในการ ตกตะกอน	E	N	E	U	S ^d	S ^d	N
THMFP	N	N	E ^e	E	S	S	N
สารประกอบ	S ^f	N	S ^f	S ^f	S ^f	S ^f	N
การเจริญ เติบโตของสิ่ง เอนไซม์ที่เป็น อันตรายที่ มีขนาดเล็ก ๆ	E	S	N ^h	E	S	S	N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ E: Effective,
 S: Somewhat effective
 N: Not effective
 U: Unknown
 a: Above pH 7
 b: By stripping
 c: Except earthy-musty odor-causing compounds
 d: May involve adsorption on MnO_2
 e: May increase at low doses
 f: Dependion on compound
 g: May form chlorinated by-products
 h: Except with dual-stage ozonation

ตารางที่ 3 ข้อดีข้อเสียของตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำ

ตัวออกซิไดซ์	ข้อดี	ข้อเสีย
โอโซน (O_3)	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิไดซ์อย่างรุนแรง - ไม่เกิดรูป THM or TOX - ไม่มีปัญหาเรื่องรส, กลิ่น - มีผลต่อ pH เล็กน้อย - ช่วยในการตกตะกอน 	<ul style="list-style-type: none"> - ครึ่งชีวิตสั้น - ต้องสร้าง ณ ที่ใช้งาน - ใช้พลังงานมากกว่า - บางส่วนมีผลต่อสิ่งมีชีวิต - การกำเนิดก๊าซพิษและท่อส่งก๊าซมักเกิดสนิม
ออกซิเจน (O_2)	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการส่งผ่าน - ไม่มีผลภายหลัง - ไม่เป็นพิษ 	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิไดซ์ไม่ได้ - ทำให้เกิดสนิมได้
คลอรีน (Cl_2)	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิไดซ์รุนแรง - ง่ายต่อการใช้ - คั้นแคชกันดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้เกิดผลกระทบตามมา คือ สารประกอบคลอรีน - มีผลต่อรสและกลิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - ต้องคำนึงถึง pH ด้วยเมื่อใช้งาน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO ₂)	-ง่ายต่อการใช้ -ไม่ก่อให้เกิด THM	-การออกซิไดซ์ต่ำ -ทำให้น้ำมีสีชมพู
คลอรีนไดออกไซด์ (ClO ₂)	-ออกซิไดซ์อย่างรุนแรง -ไม่ก่อให้เกิด THM -ไม่มีผลต่อ pH	-ก่อให้เกิด TOX -ก่อให้เกิด ClO ₃ และ ClO ₂ -ต้องสร้างขึ้น ณ ที่ใช้งาน -ก่อให้เกิดกลิ่นไฮโดรคาร์บอน

3.2 ระบบบำบัดทางเคมี ส่วนใหญ่จะใช้กำจัดสารที่เป็นสารอนินทรีย์ กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดประเภทนี้หลายวิธี เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) และการคลอรีเนชัน (Chlorination) ฯลฯ

3.2.1 การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis)

การแยกสลายด้วยน้ำ หมายถึง การย่อยสลายหรือทำให้สารสลายตัวด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ ถึงแม้ว่าน้ำจะเป็นตัวกระทำหลักในการก่อให้เกิดการแยกสลาย แต่กระบวนการในเชิงการค้า มักนิยมนำเอาการเพิ่มพื้นที่ของอนุภาคและความดันมาใช้ควบคู่กันเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างขึ้น และยังมีการใช้คังเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น พวกกรด ด่าง และ เอนไซม์ เข้ามาใช้ด้วย ยกตัวอย่างเช่น การเติมด่างในการแยกสลายไขมันที่ถูกทำให้ร้อนระหว่างกระบวนการผลิตสบู่ เป็นต้น ในกระบวนการบำบัดของเสีย เราสามารถคิดแปลงกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำมาใช้เพื่อบำบัดวัสดุที่เป็นพวกของเหลว ก๊าซ และของแข็งต่าง ๆ ได้ ยกเว้นการนำมาบำบัดพวกวัสดุอนินทรีย์ซึ่งได้ผลไม่ดีเช่น พวกเคสเตรอ ลีเชอร์ คาร์โบไฮเดรต ซัลไฟนิค แอซิด สารประกอบฮาโลเจน ฟอสเฟต และไนตริล เป็นต้น ข้อเสียของกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำก็คือ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่ไม่เป็นที่ต้องการ

-การทำให้เป็นกลาง โดยการปรับค่า pH ด้วยกรดหรือด่างแล้วแต่กรณีโดยให้ pH มีค่าอยู่ระหว่าง 5-9 ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง กรดที่ใช้ลดค่า pH เช่น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น, กรดซัลฟิวริกเข้มข้น, ส่วนด่างที่ใช้เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนไลม์

-วิธีออกซิเดชัน-รีดักชัน ใช้เมื่อในน้ำนั้นประกอบด้วยสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อใช้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัดทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นรูปอื่นที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนไป

เอกสารนี้เป็นสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรท ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชันได้แก่ ไฮออน (II) ซัลเฟต โซเดียมไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฯลฯ

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันได้แก่การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ สารเคมีที่ใช้คือ คลอรีนหรือ ไฮโปคลอไรต์

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีคลอรีนคือการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่โดยใช้โอโซน(O₃)ที่ละลายไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต

3.2.2 การเติมโอโซน (Ozonation)

กระบวนการเติมโอโซนอาศัยหลักการของการออกซิไดซ์ จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน (O₃) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้สูง ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายหรือเก็บรักษาได้เพราะมันจะแตกตัวไปเป็นก๊าซออกซิเจนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผลิตแล้วใช้ทันที ใกล้กับบริเวณที่ต้องการใช้ ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องมีเครื่องผลิตก๊าซโอโซนราคาสูง ซึ่งมักจะทำงานโดยการผ่านหลอดไฟฟ้าที่เป็นตัวปลดปล่อยไปยังก๊าซออกซิเจน นอกจากนี้เพื่อที่จะให้กำลังการออกซิไดซ์สูงมาก ก๊าซโอโซนจึงมีคุณสมบัติในการต่อต้านไวรัสและแบคทีเรีย ด้วยเหตุนี้ก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติในการทำลายเชื้อและกำลังในการออกซิไดซ์อยู่ในตัว จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน

เป็นเวลาหลายปีมาแล้วได้มีการใช้ก๊าซโอโซนในประเทศแถบยุโรปและที่อื่น ๆ ในการทำลายเชื้อในน้ำใช้ นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการจัดการของเสียอื่น ๆ เช่น

- ก. ใช้ในการกำจัดสีไฟและกลิ่นเหม็นต่าง ๆ จากของเสียที่ปลดปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม
- ข. ใช้กับการบำบัดของเสียที่ปล่อยออกมาซึ่งมีไซยาไนด์ ซัลไฟด์และซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ
- ค. ใช้กับการบำบัดพวกสารฟีนอล
- จ. ใช้บำบัดของเสียจากโรงงานกำจัดของเสียเทศบาล

3.2.3 โฟโตไลซิส (Photolysis)

โฟโตไลซิส คือ กระบวนการแยกสลายพันธะทางเคมีด้วยแสง ถึงแม้ว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อวัตถุประสงค์ในการทำลายสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งของแปลกใหม่ แสงอาทิตย์ได้กลายเป็นแสงที่ใช้ฆ่าเชื้อโดยธรรมชาติที่กลมจับกันมาเป็นเวลานานแล้ว และได้มีเครื่องมือผลิตแสงอัลตราไวโอเล็ตใช้กันในราวต้นศตวรรษ 1900 เทคโนโลยีอัลตราไวโอเล็ตได้ถูกนำมาใช้ควบคู่กับกระบวนการเติมคลอรีน(Chlorination) เพื่อใช้ในการกำจัดกรดน้ำส้มจากน้ำเกลือ นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการออกซิเดชันของพวกวัตถุทนไฟ เช่น ไซยาไนด์ สารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนและกรดน้ำส้ม โดยผ่านทางระบบบำบัดที่เรียกว่า Ultraviolet-Ozonolysis treatment system

-คลอรีเนชัน คือ การเติมก๊าซคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนลงไปในน้ำเสียโดยเฉพาะน้ำเสียจากแหล่งชุมชน เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่เป็นแบคทีเรียและไวรัสบางชนิด นอกจากนี้ยังเป็นการกำจัด

ตะกอน สี เป็นต้น สารประกอบคลอรีนที่ใช้กันมากได้แก่ แคลอรีนและโซเดียมคลอไรด์ ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูช่างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการควบคุมระบบที่สำคัญคือควบคุมปริมาณคลอรีนให้เหมาะสมกับความต้องการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ควรระลึกถึง

ท้อเสียเปรียบอย่างหนึ่งที่แอบแฝงอยู่ในกระบวนการบำบัดของเสียทางเคมีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางกายภาพ ก็คือ เป็นกระบวนการที่ต้องมีการเติมจะเห็นได้ว่ามีหลายกรณีที่จะต้องมีการเติมบางสิ่งบางอย่างเข้าไปในน้ำเสียเพื่อช่วยในการกำจัดของอีกบางอย่างดีขึ้น ผลที่ตามมาก็คือมักจะมองค้ประกอบที่ละลายได้ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ใดก็ตามที่มีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้มีการตกตะกอนดีขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็มีของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นด้วย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากต้องการนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนแล้วนั้นกลับมาใช้อีก ปัจจัยดังกล่าวก็ยังมีนัยสำคัญมากขึ้น

3.3 ระบบบำบัดทางชีววิทยา การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์ นอกจากน้ำเสีย จุลินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียจะทำลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเคมีแบบใช้ออกซิเจนอิสระและแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีววิทยาจึงแบ่งตามปฏิกิริยาชีวเคมีออกได้เป็น

3.1ระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic treatment)

การทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอิสระนั้นกล่าวได้ง่าย ๆ ว่ามีปฏิกิริยาชีวเคมีเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวมักจะมีกลิ่นเหม็น (H₂S) และตะกอนดำ (FeS) ในขั้นแรกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำทิ้ง เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะถูกแบคทีเรียประเภทที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ และประเภทที่ดำรงอยู่ได้เฉพาะในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนอิสระกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่ากลุ่มผลิตกรด ปล่อยเอนไซม์ออกมาเพื่อไฮโดรไลซ์ และทำการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นให้เป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก ๆ หลายชนิด ที่สำคัญได้แก่กรดแอสिटิกและกรดโพรพิอิก ในขั้นนี้สารอินทรีย์เพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ปริมาณที่โอดักจะยังไม่เปลี่ยนแปลง เพราะกรดอินทรีย์ต่าง ๆ นี้ เป็นสารอินทรีย์ซึ่งแบคทีเรียย่อยสลายได้และวัดเป็น COD ได้เช่นกัน การบำบัดในขั้นนี้จึงเป็นการเตรียมการเพื่อการบำบัดในขั้นต่อไป

ในขั้นที่สอง กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ผลิตได้ จะถูกแบคทีเรียประเภทที่ดำรงชีพไม่ได้ในสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามการใชงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ในอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ที่มออกซิเจนอิสระโดยกลุ่มที่เรียกว่ากลุ่มผลิตกรด เช่นทำลายกลายเป็นก๊าซต่าง ๆ ที่สำคัญได้แก่ มีเทน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถูกห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
และ CO₂ จึงทำให้ COD และ BOD ลดลง ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะแสดงถึง

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัด ในการเดินระบบบำบัดแบบน้ำจืดจำเป็นต้องควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ให้เหมาะสมเพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองประเภททำงานได้ต่อเนื่องและสมดุลกัน สภาพแวดล้อมที่สำคัญ ได้แก่ สภาพไร้ออกซิเจนอิสระ ค่า pH, อุณหภูมิ, ปริมาณ CO_2 , สภาพค่า่าง, กรดอินทรีย์ระเหย, สภาพค่า่างไบคาร์บอเนต, โลหะเป็นพิษ, อัตราการเติมสารอินทรีย์ต่อวัน, เวลาในการบำบัด และอายุของสลัดจ์

3.3.2 ระบบบำบัดแบบแอโรบิก (Aerobic treatment)

การบำบัดวิธีนี้มีหลายวิธี เช่น ระบบบ่อเขียว (Oxidation Treatment) ที่ต้องอาศัยธรรมชาติมากที่สุด จนถึงระบบ Activated Sludge ที่ยุ่งยากและใช้เครื่องจักรมาก อย่างไรก็ตามระบบบำบัดต่าง ๆ นี้อาศัยหลักการเดียวกัน คือ ใช้แบคทีเรียเป็นตัวกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยปฏิกิริยาที่ใช้ออกซิเจนอิสระ ดังนั้นระบบบำบัดแต่ละระบบจึงแตกต่างกันตรงที่ วิธีการให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรียและการควบคุมสภาพต่าง ๆ ที่เอื้ออำนวยให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียเท่านั้น

ปฏิกิริยาที่วเคมีแบบที่ใช้ออกซิเจนอิสระ เกิดขึ้นเมื่อแบคทีเรียใช้ออกซิเจนอิสระไปเผาผลาญสารอินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานดำรงชีวิตอยู่ได้ สารประกอบต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นสารที่คงตัวไม่มีกลิ่นเหม็น ที่สำคัญได้แก่ CO_2 , H_2O สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



ออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการสลายอินทรีย์นั้น อาจได้มาจาก

1. การสังเคราะห์แสงของอัลจี (พวก Protista)
2. การถ่ายเทออกซิเจนตามธรรมชาติระหว่างน้ำกับอากาศ เช่น การผสมอากาศกับน้ำโดยอาศัยเครื่องมือกล (mechanical aeration) หรือ โดยการอัดอากาศลงไปในน้ำเสียโดยตรง (diffused aeration)

3. การอัดก๊าซออกซิเจนเข้าไปในน้ำเสีย

ปริมาณออกซิเจนละลาย ในน้ำเสียที่เหมาะสมแก่การบำบัดแบบใช้ออกซิเจนอิสระนั้น ต้องมีปริมาณออกซิเจนละลายเพียงพอ ถ้าต่ำมากคือน้อยกว่า 1 mg/l ประสิทธิภาพในการบำบัดจะไม่ดี การละลายออกซิเจนในน้ำขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ, ความดัน, ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ ความเข้มข้นของเกลือต่าง ๆ (ค่า TDS) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่า TDS ของน้ำชนิดต่าง ๆ

ชนิดน้ำ	TDS
น้ำกร่อย	1000-5000
น้ำเสียตามบ้านเรือนชนิดเข้มข้น	850
น้ำเสียตามบ้านเรือนชนิด	510
น้ำเสียตามบ้านเรือนชนิด	250

การคำนวณหาความเข้มข้นของความอิ่มตัวของ Dissolved Oxygen สามารถหาได้จากสมการ

$$C_s = \frac{475 - 2.65S}{33.5 + T} \left(\frac{P}{760} \right)$$

เมื่อ C_s : ความเข้มข้นของความอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่ T,P และความเข้มข้นของเกลือที่กำหนดให้ (mg/l)

S : ค่า TDS (g/l)

T : อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}C$)

P : ความดันของอากาศระดับต่าง ๆ (mmHg)

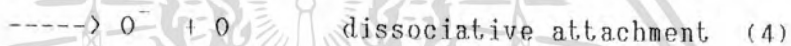
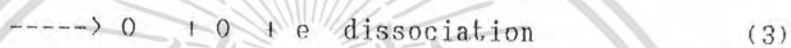
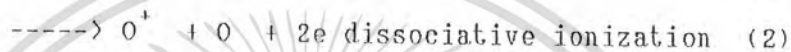
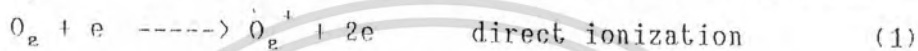
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

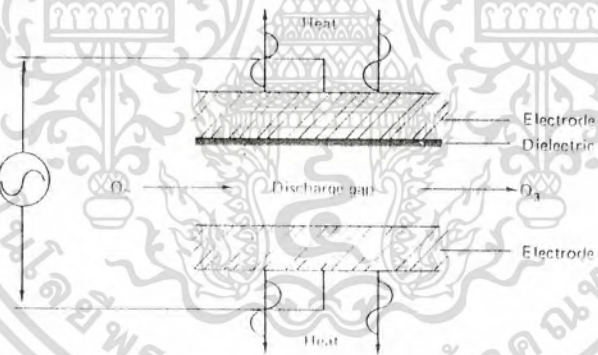
การกำเนิดโอโซน (Ozone Generation)

รูปข้างล่างแสดงตัวสร้างโอโซนแบบพื้นฐาน แรงดันไฟฟ้าจะถูกป้อนให้อิเล็กโทรดทั้งสองหัว ที่มีไดอิเล็กตริกและช่องอากาศคั่นอิเล็กโทรดทั้งสองอยู่ อากาศจะถูกดูดผ่านช่องอากาศนี้และจะเกิดการแตกตัวของอากาศเนื่องจากเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจนอิเล็กโทรดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ออกซิเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นโอโซนตามขั้นตอนดังนี้

1. Oxygen-free radicals are generated by ionic processes:



2. Ozone is generated by free radical reaction:



Basic ozonator configuration. (Source: H. Rosen, "Ozone Generation and Its Relationship to the Economical Application of Ozone in Wastewater Treatment," in F. L. Evans III (ed.) Ozone in Water and Wastewater Treatment, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., 1972.)

รูปที่ 17 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน

แรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญในการกำเนิดโอโซน ที่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างหัวของอิเล็กโทรดและความดัน

$$V = k_1 pg$$

เมื่อ V : แรงดันที่จำเป็น

p : ความดันที่ช่องว่างอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

g : ระยะแกป
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน ความสามารถในการกำเนิดไอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแรงดันกำลังสองและผกผันกับความหนาของไดอิเล็กตริก

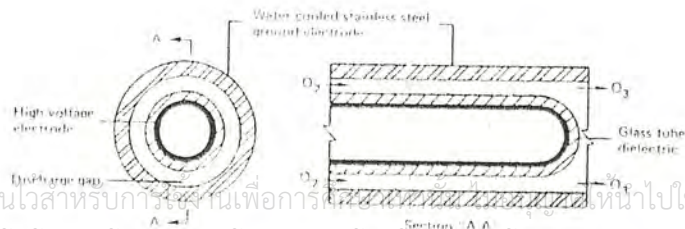
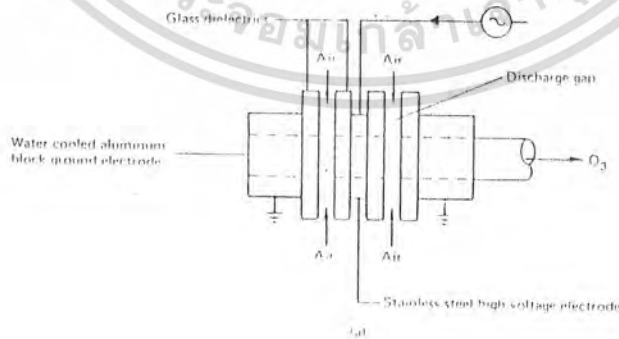
$$\text{Yield} : k_p (\text{feV}^2) / d$$

- เมื่อ f : ความถี่
- V : แรงดัน
- ϵ : dielectric constant
- d : ความหนาของไดอิเล็กตริก

จากสมการพบว่าจะมีปัญหาในการออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซน คือ เราต้องพยายามทำไดอิเล็กให้บางที่สุดเท่าที่จะทำได้ และทนที่จะเบรคดาวน์ได้สูง ขณะเดียวกันเพื่อให้ไอโซนมาก ๆ เราก็ต้องเพิ่มแรงดันให้สูง ๆ ด้วย เพราะแรงดันยิ่งสูงยิ่งดี ($O_3 \propto V^2$) ในอีกทางหนึ่งขณะที่แรงดันสูง ๆ ถูกนำมาใช้ สารไดอิเล็กตริกก็จะเสียหายได้ง่ายขึ้น ในปัจจุบันมีวิธที่นิยมในการเพิ่มปริมาณไอโซนที่ต้องการผลิตได้โดยเพิ่มความถี่ของกระแสที่ให้นอกจากนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไอโซนก็ยังมีการพัฒนาคุณภาพไดอิเล็กตริกให้ดียิ่งขึ้น และการระบายความร้อนออกจากเซลล์กำเนิดไอโซนในปัจจุบันมีวิธีการที่จะผลิตไอโซน 3 ชนิดพื้นฐานที่ใช้คือ Otto plate The Conventional horizontal tube และ The Lowther plate แต่ละวิธีก็ได้แสดงไว้ดังรูปข้างล่าง

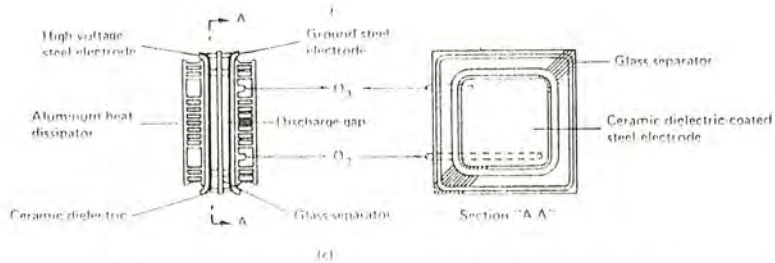
The Otto plate ถูกออกแบบขึ้นในปี 1905 แบบนี้มีประสิทธิภาพไม่ต่ำ แต่ก็ยังมีใช้กันอยู่ในบางส่วนของยุโรปตะวันตก

The tube-type generator นี้ประกอบด้วยจำนวนหลอดหลายหลอดที่มีรูปแสดงในรูปที่ 18 อิเล็กโตรดตัวข้างนอกจะเป็น Stainless Steel Tube และรอบ ๆ จะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ ท่อแก้วที่อยู่ตรงกลางที่มีการเคลื่อนด้วยตัวนำลอย



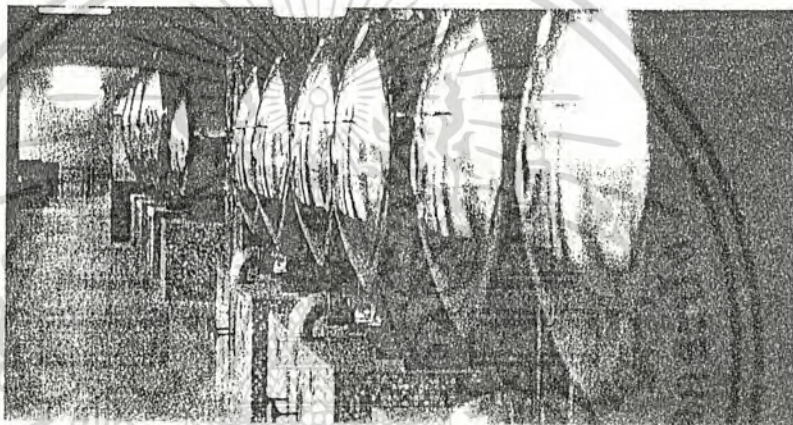
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ส่งแรงลงเนื้อหา และดูอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Alternative ozonator configurations. (a) Otto plate-type generator unit; (b) tube-type generator unit; (c) Lowther plate generator unit. (Source: H. Rosen, "Ozone Generation and Its Relationship to the Economical Application of Ozone in Wastewater Treatment," in F. L. Evans III (ed.), *Ozone in Water and Wastewater Treatment*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., 1972.)

รูปที่ 19 เครื่องกำเนิดโอโซนชนิด Tube-type และ Lowther plate



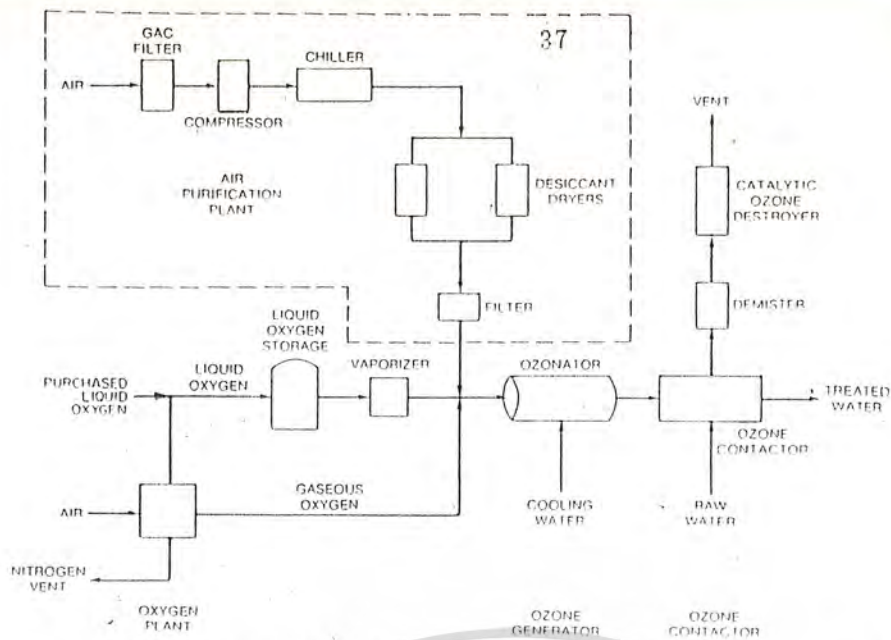
Typical tube-type generators at Choisy Le Roy, France. (Courtesy of Trailigaz Ozone of America, Inc.)

รูปที่ 20 รูปแบบของเครื่องกำเนิดโอโซนชนิด Tube-type

ภายในท่อสามารถทนด้วยท่อ Stainless Steel แรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกป้อนเข้าระหว่างตัวนำที่เคลือบอยู่ในหลอดแก้วกับท่อเหล็กที่ล้อยู่ด้านนอก และอากาศหรือออกซิเจนจะถูกทำให้ผ่านระหว่างช่องว่างนั้น รูปแบบที่หลากหลายของการออกแบบวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

รูปแบบที่พัฒนาปรับปรุงที่ใหม่เร็ว ๆ นี้คือ The Lowther plate unit วิธีนี้จะใช้การระบายความร้อนโดยอากาศ (2 แบบข้างต้นใช้น้ำในการระบายความร้อน) ถูกทำขึ้นจาก a gas-tight arrangement of an aluminum heat dissipator, อิเล็กโทรดเหล็กเคลือบด้วยเซรามิกส์, Silicone-rubber spacer, และเคลือบเซรามิกส์ชั้นสองที่อิเล็กโทรดเหล็กที่ด้านนอกและด้านใน รูปแบบนี้ให้ประสิทธิภาพสูง

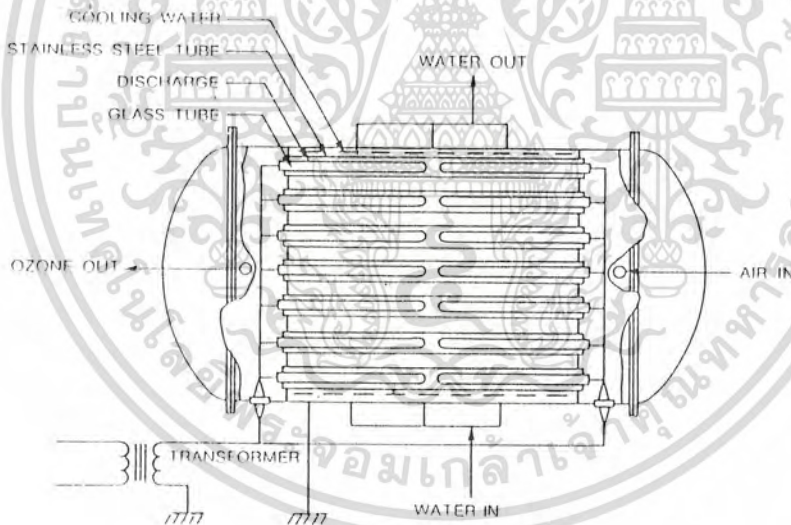
การระบายความร้อนที่เสถียรกำเนิดโอโซน [tubes or plates] จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำเนิดโอโซน เครื่องกำเนิดโอโซนจะถูกป้อนด้วยออกซิเจน, ออกซิเจนปนอากาศ หรือ อากาศผ่านเข้าไประหว่างอิเล็กโทรดของเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีสนามไฟฟ้าแรงสูงคร่อมอยู่, ถ้าอากาศถูกเอกสรณ์เป็นเอกสารที่ส่งไปสำหรับการเชิงมุมเพื่อการศึกษาของท่าน เมืออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าใช้ในการไหลวนจะได้อโอโซน 2% โดยน้ำหนัก ถึงจะคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ถ้าเป็นออกซิเจนควรวางภาครณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุแ่เนื่องหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้จะได้โอโซน 5-7% โดยน้ำหนักถึงจะคุ้มทุน



~ Flow diagrams for air and oxygen purification for ozone production from oxygen-enriched air. The air purification unit may be omitted when pure oxygen is used or it may be used without oxygen enrichment.

รูปที่ 21 Flow diagram แสดงการสร้างโอโซนโดยใช้ออกซิเจน

รูปที่ 21 แสดง flow diagram สำหรับการสร้างโอโซนโดยใช้ออกซิเจนเพิ่มเข้าไปในอากาศในการป้อนเพื่อกำเนิดโอโซน



Large-scale, tube-type generator for production of ozone from air or oxygen by cold plasma discharge.

รูปที่ 22 เครื่องกำเนิดโอโซนชนิด Tube-type

วัสดุที่ใช้ในระบบสร้างโอโซนนั้นจะต้องระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากโอโซนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง (oxidized) วัสดุจำพวกยางหรือพลาสติกทุกชนิด, นีโอพรีน, EPDM, และอลูมิเนียม ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ สิ่งที่เหมาะนำมาใช้คือ Stainless Steel, แก้ว, ไส้พลาลอน, เทฟลอนและคลอนกริต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ขอไปใช้สำหรับงานวิจัยที่อาจารย์ศิวะวิฑูรย์ทำร่วมกับอาจารย์ประไพโยธิน การค้า
 4.2 ออณหภูมิกับการเกิดโอโซน ถ้าเพิ่มอุณหภูมิที่ป้อนเข้าเซลล์สร้างโอโซนจะทำให้อัตรา
 การเกิดโอโซนลดลง ขณะที่อัตราการสลายตัวของโอโซนเพิ่มขึ้น นั่นคือว่าการระบายความร้อนให้
 เซลล์โอโซนเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดโอโซน

4.3 วิธีตรวจหาปริมาณไอโอดีน

สารที่ต้องเตรียม (Reagent)

1. Potassium iodide solution:

ละลาย KI 20 g ในน้ำกลั่น 1 L (น้ำกลั่นต้องต้มให้เดือดแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจึงจะนำมาใช้ได้) เก็บไว้ในขวดสีชา 1 ลิ้น จึงจะใช้ได้ (ถ้าเตรียม 2 L ต้องใช้ 40 g)

2. Sulfuric acid, H_2SO_4 1 N (1N = 1 Normal)

3. Standard sodium thiosulfate, 0.1 M:

ละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ จำนวน 25 g ในน้ำกลั่น 1L ถ้าจะให้มาตรฐานต้องทำการ standardize กับ potassium bi-iodate (แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการ standardize)

4. Standard sodium thiosulfate titrant 0.005 M :

นำ $Na_2S_2O_3$ 0.1 M ที่เตรียมไว้ประมาณ 50 mL ทำการเจือจางให้เป็น 1000 mL สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องมาก ๆ จะต้องทำการ standardize สารละลายที่จะนำมาใช้งานนี้วันต่อวัน โดยนำไป standardize กับ สารละลาย potassium bi-iodate หรือ สารละลาย potassium dichromate ความเข้มข้น 0.005 M (ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการ standardize)

5. Starch indicator solution :

การเตรียมน้ำแป้งทำได้โดยละลายแป้ง 5 g ทำให้มีปริมาตร 800 ml โดยประมาณ โดยใช้ น้ำกลั่นต้มแล้ว หลังจากนั้นเจือจางให้เป็น 1L ทิ้งไว้ให้เย็นข้ามคืน

หยดกรด salicylic 1.25 g/L หรือเติม toluene เล็กน้อยเพื่อให้เก็บไว้ได้นาน ในการทดลองนี้เตรียมน้ำแป้งโดยใช้แป้ง 1 g แล้วทำให้เป็น 200 mL

6. Standardize iodine 0.1 M ละลาย KI 40 g ในน้ำกลั่น 25 mL และเติมเกล็ดไอโอดีนบริสุทธิ์ 13 g ร่อนละลายหมด แล้วเจือจางให้เป็น 1 L แล้วทำการ Standardize (ในการทดลองใช้ KI 4 g ละลายในน้ำกลั่น 2.5 mL ใช้เกล็ดไอโอดีน 1.3 g แล้วเจือจางเป็น 100 mL)

7. Standard iodine 0.005 M :

ละลาย KI 16 g ในน้ำกลั่นเล็กน้อย ใส่ใน volumetric flask ขนาด 1L (โดยให้มีปริมาตรประมาณ 50 mL) ของสารละลาย iodine 0.1 M แล้วเจือจางให้ครบ 1L

สำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงให้ทำการ standardize วันต่อวันที่ใช้งาน เก็บไว้ในขวดสีชาในที่มืด ไม่ให้โดนแสงแดดและไม่ให้สัมผัสกับสารจำพวกยาง (ในการทดลองไม่ได้ทำการ standardize)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หมายเหตุ ทั่ว 6 และ 7 การเตรียมไอโอดีนจะต้องระมัดระวังเพราะเป็นสาร
ไวไฟและมีพิษสูง อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเป็นไอ และต้องระวังถึงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เคมีทนต์ราย ควบคุมภายใต้การควบคุมของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Procedure)

1. Ozone absorption

ผ่านอากาศจากชุดทดลอง ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ที่มี KI อยู่ 100 mL เป็นเวลา 5 นาที

2. Titration

นำ KI ที่พ้นไอโอดีนจากข้อ 1. (ตอนนสารละลายจะมีสีเหลืองหรือส้ม) เติม H_2SO_4 1N 5 mL เพื่อปรับค่า pH นำมาทำการไตเตรทกับ 0.005 M $Na_2S_2O_3$ ที่เตรียมไว้จนกระทั่งสีเหลืองค่อย ๆ จางหายไป (แสดงว่าใกล้จุดยุติ) เติมน้ำแข็ง 1 mL (มีหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์) ตอนนสารละลายจะกลายเป็นสีน้ำเงิน ทำการไตเตรทต่อจนกระทั่งสีน้ำเงินจางหายไป บันทึกค่าของ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้เพื่อไปคำนวณหา mg ของไอโอดีนต่อไป

3. Blank test

ในการพ้นไอโอดีนลงไปนสารละลาย KI จะมีอากาศส่วนหนึ่งผ่านลงไปด้วย จึงต้องทำการ blank test เพื่อหาปริมาณไอโอดีนที่แท้จริง ทำได้โดยนำ สารละลาย KI 100 mL พ่นอากาศเป็นเวลา 5 นาที และน้ำแข็ง 1 mL

- 1) ถ้าหากเกิดสีน้ำเงินขึ้น ให้ไตเตรทด้วย $Na_2S_2O_3$ 0.005 M จนสีน้ำเงินจางหายไปบันทึกค่าไว้
- 2) ถ้าหากไม่เกิดสีน้ำเงินให้ไตเตรทด้วย 0.005 M $Na_2S_2O_3$ จากข้อ 7 จนกระทั่งเกิดสีน้ำเงินขึ้น จึงไตเตรทกลับด้วย 0.005 M $Na_2S_2O_3$ จนสีน้ำเงินจางหายไป และบันทึกผลต่างเอาไว้

การคำนวณหาปริมาณไอโอดีน (Calculation)

$$\text{mg } O_3 / L = (A+B) * M * 24000 / \text{mL sample}$$

A = mL titrant for sample

B = mL titrant for blank (มีค่าเป็นบวกหรือลบ)

M = molarity of $Na_2S_2O_3$

* B มีค่าเป็นบวกเมื่อเกิดภาวะ 1) และเป็นลบในกรณี 2)

การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

ก๊าซโอโซน (O₃) คือก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปรับปรุงโครงสร้างให้มีพลังงานมากขึ้นเมื่อถูกอัดให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น จะเป็นก๊าซที่มีสีน้ำเงินสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ก๊าซโอโซนมีแนวโน้มจะสลายตัวเองกลายเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซโอโซนให้มีความหนาแน่นสูง ๆ และเก็บไว้ได้นาน ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการผลิตโอโซน ณ แหล่งที่จะใช้งานนั้นเลย คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของโอโซน คือ มันเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก โอโซนจะทำการออกซิไดซ์หรือเติมออกซิเจนให้กับสารประกอบทางเคมีได้หลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติพิเศษนี้เองที่มีส่วนในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย, บำบัดน้ำสำหรับดื่ม, น้ำที่จะนำมาใช้ในกรรมวิธีการผลิตต่าง ๆ, น้ำในสระ โดยสารที่ไม่พึงต้องการจะถูกออกซิไดซ์และสามารถกำจัดออกไปได้ ประโยชน์ที่สำคัญอีกอย่างคือสิ่งที่หลงเหลือในน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนแล้วนั้นจะมีเพียงก๊าซออกซิเจนเท่านั้น นอกจากนี้โอโซนยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้และช่วยทำให้น้ำที่บำบัดมีรสดี ไม่มีกลิ่นและไม่มีสีหลงเหลืออยู่

5.1 คุณสมบัติของโอโซน

- เป็นก๊าซที่เกิดจาก Oxygen ที่ถูกกระตุ้นด้วยภาวะแรงแม่เหล็กไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) หรือรังสี Ultra Violet
- ไม่มีสีแต่มีกลิ่นฉุน
- พบมากในชั้นบรรยากาศ Stratosphere
- มีค่า Oxidation Potential สูงถึง 2.07 V แต่คลอรีนมีค่า Oxidation Potential เพียง 1.36 V
- การละลายน้ำของโอโซนเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- สามารถคงตัวได้นานที่ pH ต่ำ
- สามารถฆ่าไวรัส, แบคทีเรียได้
- สามารถออกซิไดซ์กับสารอื่นได้เป็นอย่างดี
- มีน้ำหนักโมเลกุล 48.00 ความสามารถในการละลายน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ 25 c คือ 6 mg/l จุดเดือด -112.0 c จุดหลอมเหลว 192 c

5.2 ข้อดีของการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแทนคลอรีน

5.2.1 ประหยัดพลังงานความร้อน ที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา Ozonization

โดยทั่วไปโอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นปฏิกิริยา

Ozonization ของโอโซนในน้ำเสียจึงเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ระบบจึงไม่ต้องเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิเลย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยังต้องมีการแก้ไขเพิ่มเติมให้สอดคล้องกับเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ง่ายและสะดวกต่อการสลายโอโซนที่เหลือจากการใช้งาน

เนื่องจากโอโซนมีวงจรรีไซเคิล จึงทำให้โอโซนสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย

5.2.3 โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ดีกว่าคลอรีน

เนื่องจากโอโซนมีค่า Oxidation Potential สูงกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า ดังนั้นโอโซนจึงสามารถออกซิไดซ์สารประกอบเคมีที่มีพิษในน้ำเสียได้ดีกว่าคลอรีน โดยโอโซนจะสามารถออกซิไดซ์ได้ทั้งสารประกอบ Organic และ Inorganic

Oxidation of Organic

McGuire ได้ทำการทดลองโดยนำสาร Organic compounds ที่มีพิษ 16 ตัวมาทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ 3 ตัว คือ คลอรีน โพตัสเซียมเปอร์มังกาเนต โอโซน ในสภาวะเดียวกัน แล้วทำการวัดเวลาที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปได้ 50% ของความเข้มข้นเริ่มต้น (Half Life) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

Compound	Chlorine	Permanganate	Ozone
Acetophenone	24 d	43 d	25 min
Benzaldehyde	>3.2 d	36 min	28 min
Benzothiazole	8.2 min	> 5.8 d	22 min
1, 2-Bis (2-chloroethoxy) ethane	>20 d	67 d	50 min
Bis (2-chloroethyl) ether	>20 d	15 d	21 min
Borneol	1.4 d	7 d	33 min
Camphor	>3.2 d	> 5.8 d	> 12 min
p-Dichlorobenzene	>4.2 d	>22 d	N/A
p-Nitrophenol	2.1 h	1.1 d	2 min
Mertnyl-m-rotate	>20 d	22 d	5.5 min
p-Tolunitrile	>20 d	28 d	5.4 min
Diacetone-L-sorbose	100 d	> 14 d	2.8 min
Diacetone-L-xylose	>15 d	> 14 d	2.3 h
Toluene	N/A	N/A	2.8 min
Ethylbenzene	N/A	N/A	2.8 min
1, 2, 3-Trimethylbenzene	N/A	N/A	1.9 min

d : day

min : minute

N/A : Non Application

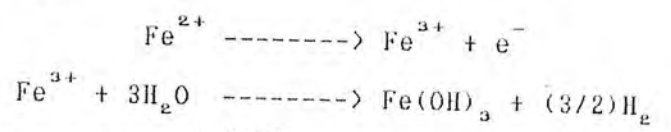
ตารางที่ 4 แสดงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารต่าง ๆ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า โอโซนมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงกว่าสารออกซิไดซ์ตัวอื่น

Oxidation of Inorganic

โอโซนสามารถออกซิไดซ์สาร Inorganic ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ โดยโอโซนจะไปออกซิไดซ์ไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำให้มีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น แล้วเกิดเป็นสารประกอบตัวอื่นที่ไม่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนแยกออกมาจากสารละลาย อย่างไรก็ตามอาจมีเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย Fe²⁺ ที่ละลายน้ำได้ โอโซนจะไปออกซิไดซ์ Fe²⁺ ไปเป็น Fe³⁺ จากนั้น Fe³⁺ จะถูก Hydrolyzed กลายเป็น Fe(OH)₃ ตกตะกอนออกมา ดังสมการ



5.2.4 สามารถกำจัดสีได้ดี

ในสารประกอบ Organic Compound ที่เป็น Polycyclic บางตัวมีหมู่โคโรมฟอร์ คือเป็นหมู่ function group ที่ไม่มืดตัวซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UV Visible ได้ ทำให้สารประกอบที่มีหมู่โคโรมฟอร์นี้ให้สีได้

เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์หมู่โคโรมฟอร์ได้ คือไปทำลายพันธะคู่ของมัน ทำให้สารประกอบที่มีหมู่โคโรมฟอร์ให้สีไม่ได้อีกต่อไป ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้

5.2.5 สามารถกำจัดกลิ่นได้ดี

ในสารประกอบ Inorganic และ Organic บางตัวจะมี Sulpher และ Nitrogen ซึ่งเป็นสารที่มีกลิ่นเหม็น ทำให้สามารถกำจัดกลิ่นในน้ำเสียได้

เช่น H₂S เมื่อถูกโอโซนออกซิไดซ์จะกลายเป็น H₂SO₄ ดังสมการ



5.2.6 ความสามารถในการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Algae) ได้

พืชน้ำที่อยู่ในน้ำเสียเป็นตัวกำเนิดกลิ่น ซ้ำยังชอบอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 35-40 องศาเซลเซียส และอาหารของมันคือ Organic Compound

โอโซนไม่สามารถกำจัดพืชน้ำได้โดยตรงได้ เนื่องจากพืชน้ำสามารถสร้างภูมิคุ้มกันตัวมันเองตลอดเวลา แต่โอโซนนี้สามารถกำจัดได้โดยทางอ้อมคือ โอโซนสามารถออกซิไดซ์สาร Organic Compound ที่เป็นอาหารของมัน ทำให้พืชน้ำหยุดการเจริญเติบโตและตายไปในที่สุด

5.2.7 สามารถแยกของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) ออกได้

ในน้ำเสียมื้ออุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อยที่มีขนาดเล็กเป็นประจุอยู่ตามผิว เมื่อกำหนดน้ำมีประจุเป็นกลางอนุภาคพวกนี้จะจับตัวเป็นกลุ่มลอยขึ้นมา ซึ่งโอโซนจะทำหน้าที่เป็นตัว Flocculant ทำให้ผิวของน้ำมีประจุเป็นกลาง อนุภาคต่าง ๆ ก็ลอยขึ้นมารวมกันเป็นกลุ่มและสามารถแยกออกมาได้โดยการตกตะกอน กรอง หรือ ฟิล์นออก

5.2.8 มีความปลอดภัยกว่าคลอรีน

เนื่องจากเมื่อคลอรีนไปออกซิไดซ์สาร Organic Compound บางตัวแล้วทำให้เกิดสารประกอบ Chlorinate ที่เป็นพิษขึ้น แต่เมื่อใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์แล้วจะไม่เกิดสารประกอบที่เป็นพิษแบบ Chlorinate ขึ้นเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

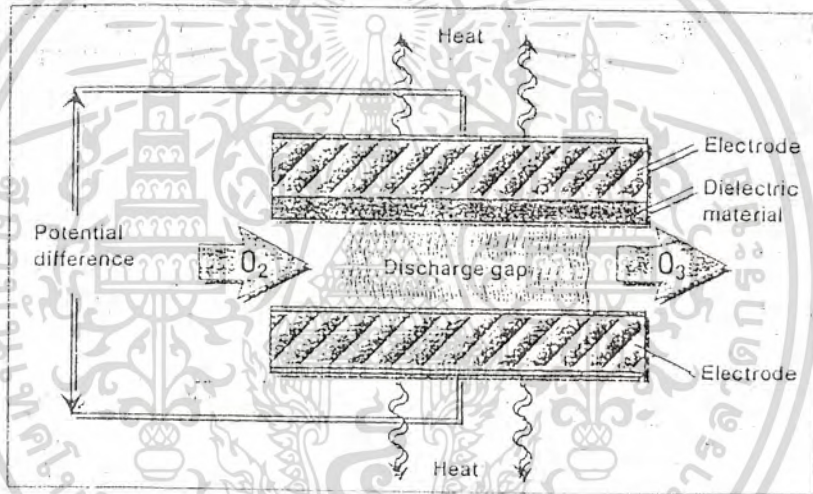
5.3 ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซน แบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

5.3.1 Feed gas treatment

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่จำหน่ายอากาศ หรือก๊าซออกซิเจนไปยังหน่วยสร้าง ซึ่งจะมีการกำจัดพวกอนุภาคแปลกปลอม ละอองในอากาศ ความชื้นและสารไฮโดรคาร์บอนก่อนที่จะไปถึงหน่วยสร้าง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.3 ไมครอน จะถูกกำจัดออกมาโดยการ Feed gas เข้าไปที่ความดัน 2 บรรยากาศ จากนั้นทำการกรอง และนำไปอบแห้ง แล้วก็นำแยกออกมาที่ก๊าซออกซิเจนที่ผ่านส่วนนี้จะมีสารปนเปื้อนน้อยกว่าก๊าซออกซิเจนในอากาศปกติ แต่ถ้าจะให้สะอาดจริง ๆ เครื่องมือที่ใช้ควรจะสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนด้วย

5.3.2 Ozone generation

เป็นหน่วยสร้างโอโซน (O_3) จากก๊าซออกซิเจน (O_2) โดยเครื่องมือที่ใช้คือ Corona-discharge ozone generator ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดง Corona discharge ozone generation

โดยทำการ feed ก๊าซออกซิเจนเข้าไประหว่าง electrode 2 ตัว ที่ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าสูง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงระหว่างช่องว่างของ electrode ไปกระตุ้นโมเลกุลของ O_2 ให้สลายกลายเป็น O จากนั้น O จะไปรวมตัวกับ O_2 กลายเป็น O_3 ดังสมการ

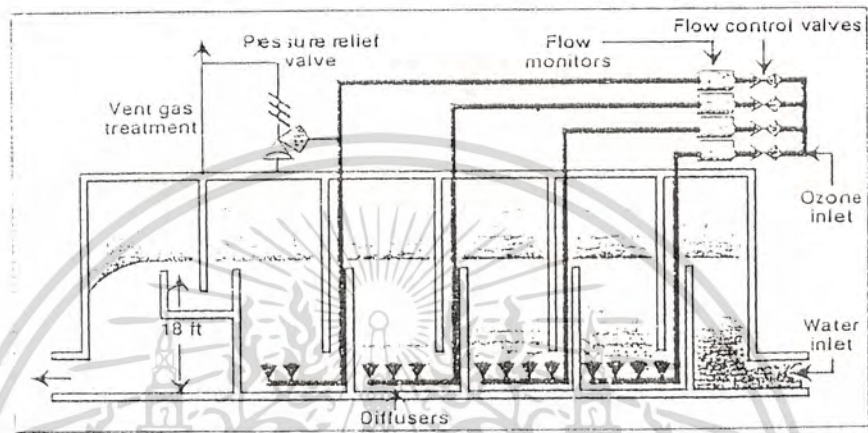
ข้อควรระวังคือ 80% ของพลังงานที่ใช้ให้กิลเซลล์จะกลายเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งถ้าร้อนมาก ๆ จะไปสลายโอโซนได้ ดังนั้นในหน่วยสร้างนี้จึงควรมีเครื่องทำความเย็นอยู่ด้วย โดยขนาดและชนิดของเครื่องนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับขนาดของ generator

5.3.3 Ozone contact

หน่วยนี้จะจะเป็นหน่วยที่เกิดปฏิกิริยา Ozonization ขึ้น ซึ่งโอโซนและน้ำเสียจะผสมกันโดยวิธีทางเชิงกลหลายวิธี เช่น Turbine, Diffusers, Injection เป็นต้น

การผสมแบบ Diffusers เป็นวิธีที่มีควรร่งผ่านก๊าซโอโซนอย่างรวดเร็วและใช้พลังงานต่ำ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบจึงจะยื่นขึ้นต้น
โดยใช้เครื่องมือดังรูปที่ 24

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นผู้ที่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

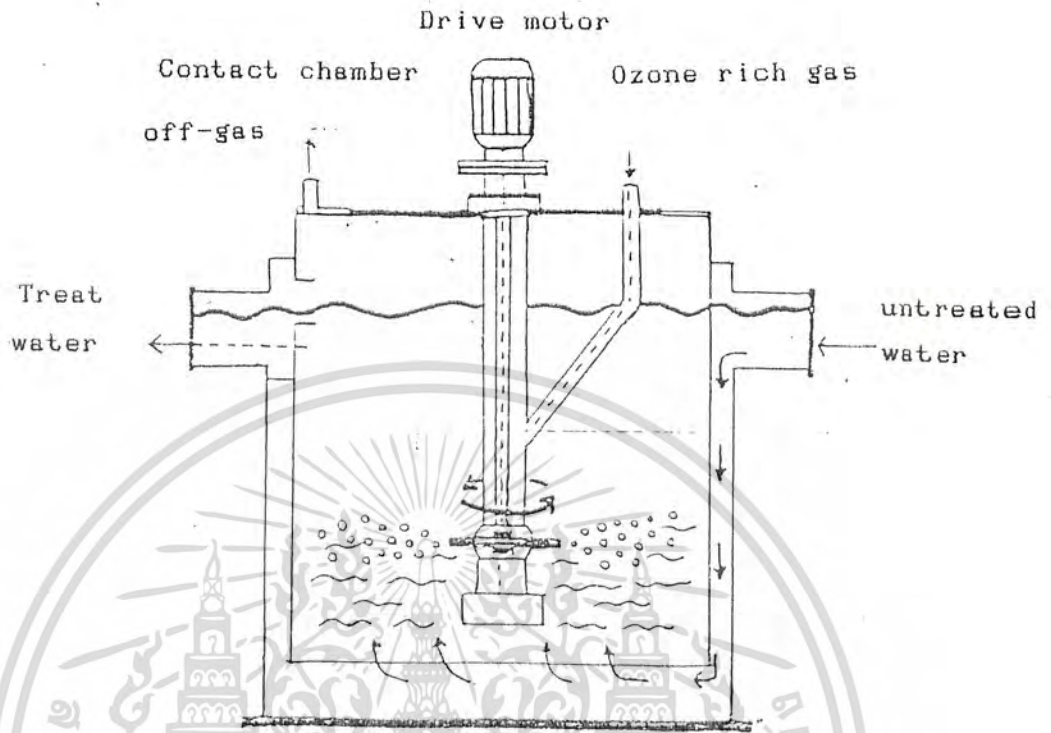


รูปที่ 24 Ozone contact ชนิด Diffusers

รูปที่ 24 Ozone contact ชนิด Diffusers

เครื่องนี้ประกอบด้วยถัง 4 ถัง มีตัว diffusers 13 ตัว ซึ่งอยู่ลึกลงมา 7 เมตร โดยจะทำการส่งก๊าซให้แพร่ออกมาทางตัว diffusers แล้วทำการปล่อยน้ำเสียเข้ามาบำบัดเป็นเวลา 5-15 นาที แต่การผสมโดยวิธี Diffusers นี้ยังมีข้อเสีย คือ อนุภาคขนาดใหญ่ในน้ำเสียจะเข้าไปติดในตัว diffusers ทำให้สกปรกได้ง่ายและการส่งผ่านของก๊าซไม่สะดวก

ดังนั้นจึงนิยมใช้การผสมแบบ Turbine (กังหันไอน้ำ) แทน เพราะมีประสิทธิภาพในการส่งก๊าซดีกว่า นอกจากนั้นการสัมผัสกันระหว่างน้ำกับโอโซนก็มีมากกว่า คือมีประสิทธิภาพถึง 90% โดยโอโซนจะถูกส่งลงมายังส่วนล่างแล้วแพร่ออกสู่ส่วนกังหันใบพัด ซึ่งจะให้น้ำเสียกับโอโซนมีการสัมผัสกันหลาย ๆ รอบ โดยเครื่องมีการผสมแบบ Turbine เป็นดังนี้



รูปที่ 25 Ozone contact ชนิด Turbine

5.3.4 Ozone destruction

หน่วยนี้เป็นหน่วยทำลายโอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถกัดกร่อนโลหะและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้เมื่อมีความเข้มข้นสูงถึง 100-2000 ppm ดังนั้นจึงต้องมีการทำลายโอโซนที่เหลืออยู่ในระบบ ให้มีความเข้มข้นเหลือเพียง 0.1 ppm ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งวิธีการทำลายของหน่วยเอนเวอซึ่งง่าย ๆ หลายวิธีคือ

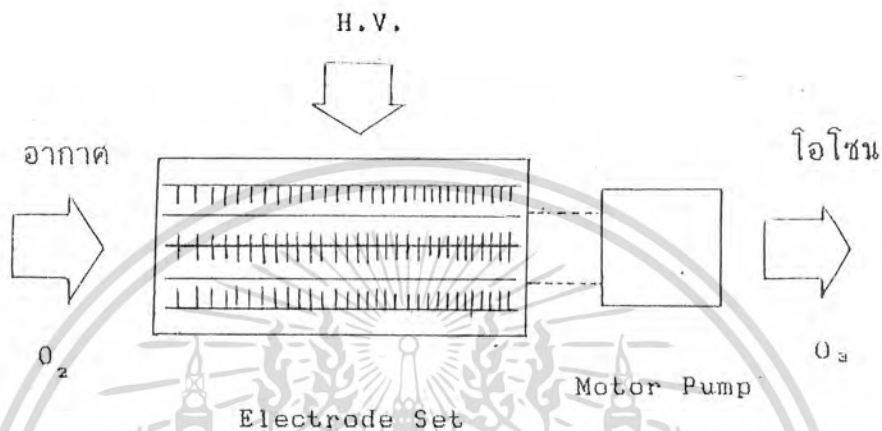
- 1.reinjection (นำกลับมาใช้อีก)
- 2.การใช้ความร้อนเพื่อให้เกิด autodecomposition
- 3.dilution คือ ทำให้เจือจางกับอากาศ
- 4.catalytic reduction with metal oxide

โอโซนเป็นก๊าซที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สูงสุดจึงเป็นที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำสำหรับดื่ม และสระว่ายน้ำร่วมกับเครื่องกรองถ่านเพื่อช่วยดูดซับสารที่ออกทำปฏิกิริยากับสารพิษหรือโลหะที่ละลายอยู่ให้หมดไป นอกจากนี้โอโซนยังมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้อย่างดีดีกว่าคลอรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการเป็นเจ้าของโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไอโชนต้นแบบและกระบวนการทดลอง

6.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไอโชนเพื่อการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 26 แสดงแผนภาพของเครื่องกำเนิดไอโชน

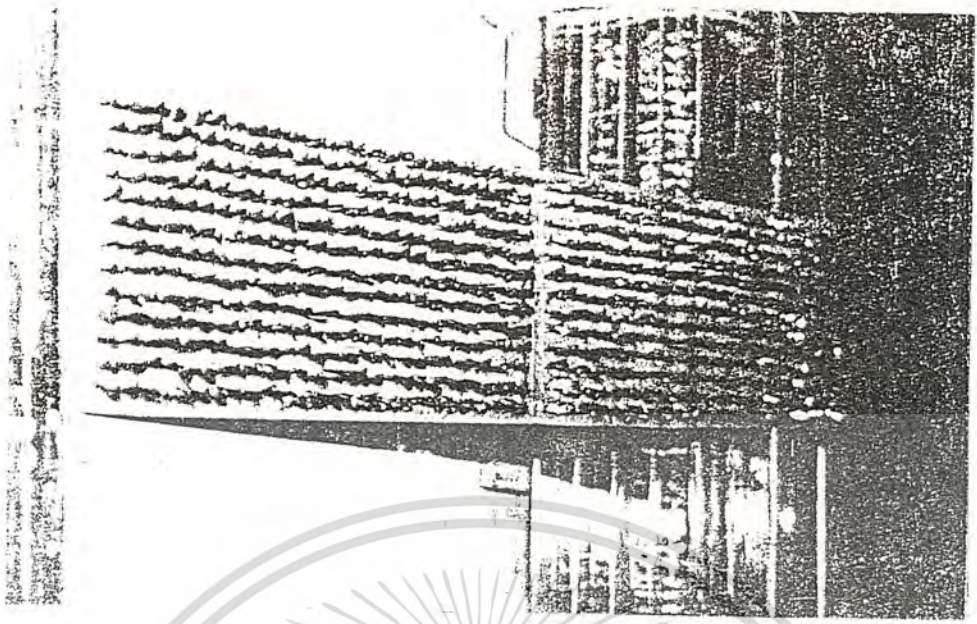
เครื่องกำเนิดไอโชนต้นแบบที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 26 ลักษณะการทำงานคือ อากาศ (O_2) จะถูกดูดผ่านเข้าไปในเครื่องกำเนิดไอโชนต้นแบบ ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงป้อนอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ (Electrode set) อากาศที่ผ่านเข้าไปเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงจะเกิดการแตกตัวและรวมตัวกันได้ไอโชน (O_3) ออกมาและไอโชนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่อไป จะเห็นว่าส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไอโชนต้นแบบจะมีด้วยกัน 3 ส่วน คือ

1. กล่องพลาสติกสำหรับบรรจุแผงอิเล็กโทรด โดยสามารถเปลี่ยนแผงอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ได้โดยสะดวกและสามารถบรรจุแผงอิเล็กโทรดได้สูงสุด 5 แผง พลาสติกสำหรับบรรจุแผงอิเล็กโทรดมีขนาด ความกว้าง 15 cm. ความยาว 60 cm. ความสูง 14 cm. และพลาสติกที่ใช้มีความหนา 0.5 cm.

2. แผงอิเล็กโทรด ลักษณะของแผงอิเล็กโทรดที่ใช้จะมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ

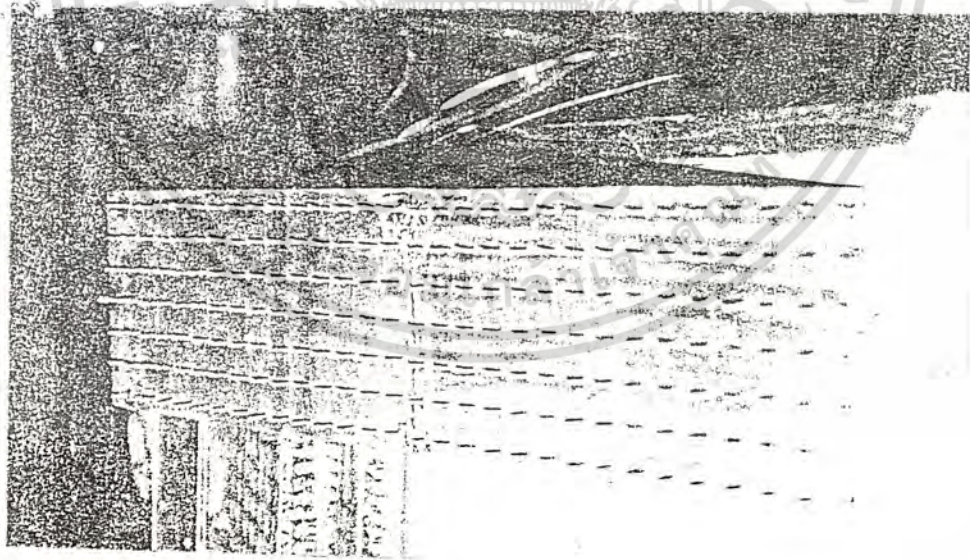
2.1 อิเล็กโทรดที่เป็นกลุ่มของเส้นลวด ซึ่งแผงอิเล็กโทรดแต่ละแผงจะมีความกว้าง 13.5 cm. ความยาว 60 cm. และในแต่ละแผงอิเล็กโทรดจะมีกลุ่มของเส้นลวดจำนวน 754 จุด ดังแสดงในรูปที่ 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 แสดงแผงอิเล็กทรอนิกส์ชนิดกลมของเส้นลาด

2.2 อิเล็กทรอนิกส์แผงปลายแหลม อิเล็กทรอนิกส์แต่ละแผงมีขนาด ความกว้าง 13.5 ซม. ความยาว 80 ซม. ในแต่ละแผงอิเล็กทรอนิกส์จะมีจำนวนแผงปลายแหลมอยู่ 210 แผง ดังแสดงในรูปที่ 28

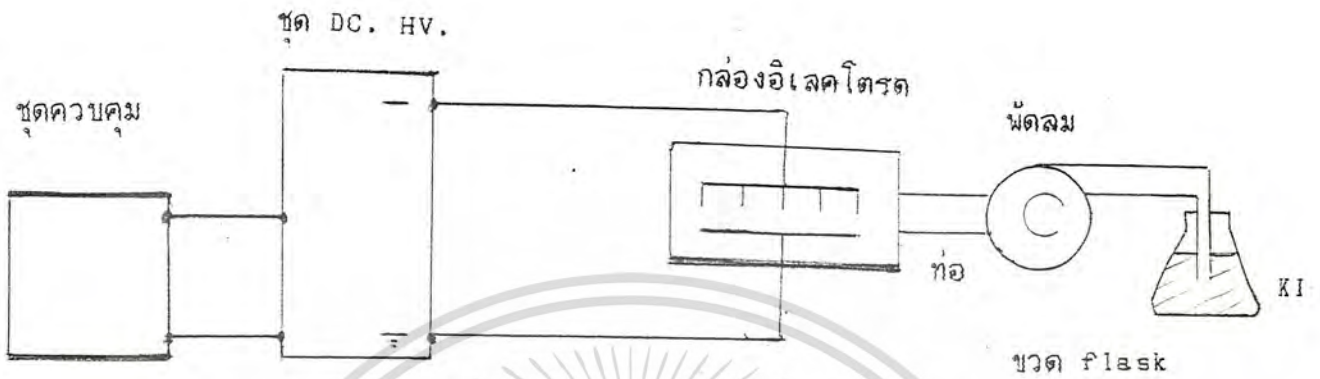


รูปที่ 28 แสดงแผงอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแผงปลายแหลม

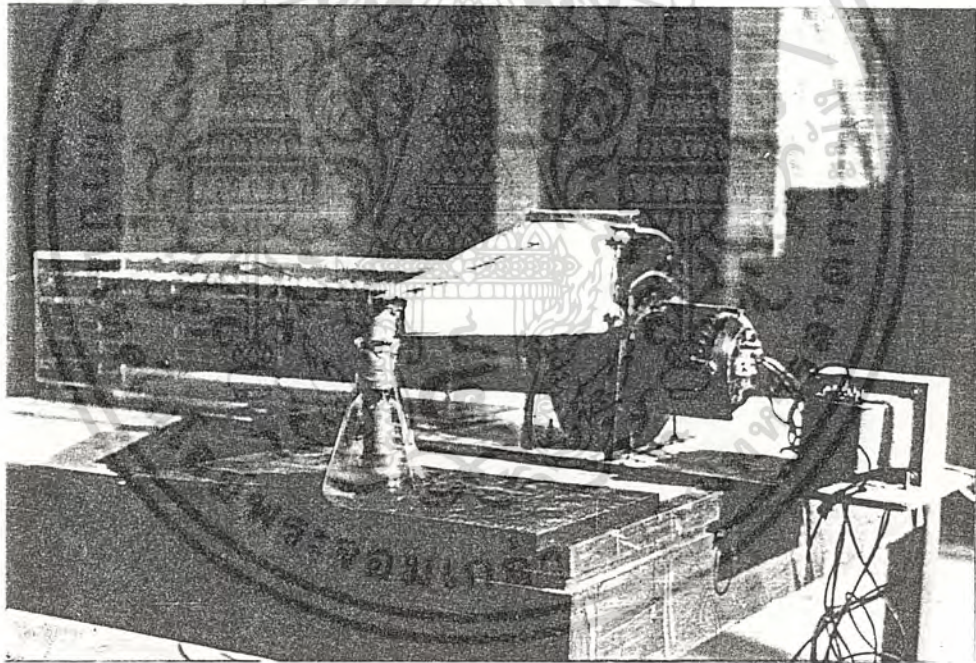
3. พัฒนาคูดูดอากาศ (Motor Pump) สำหรับดูดอากาศให้ผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์ (Electrod set) แล้วนำไปบำบัดน้ำเสียต่อไป มอเตอร์ที่ใช้มีขนาดพิกัดกำลัง 163/228 วัตต์ ราคา ไม้กว่า 100 บาท ที่ความถี่ไฟ 50/60 Hz และพิกัดแรงดันไฟฟ้า 115 โวลต์

6.2 กระบวนการทดลอง

1. ต่อกับอุปกรณ์ตามรูป



รูปที่ 29 แสดงการทดลอง

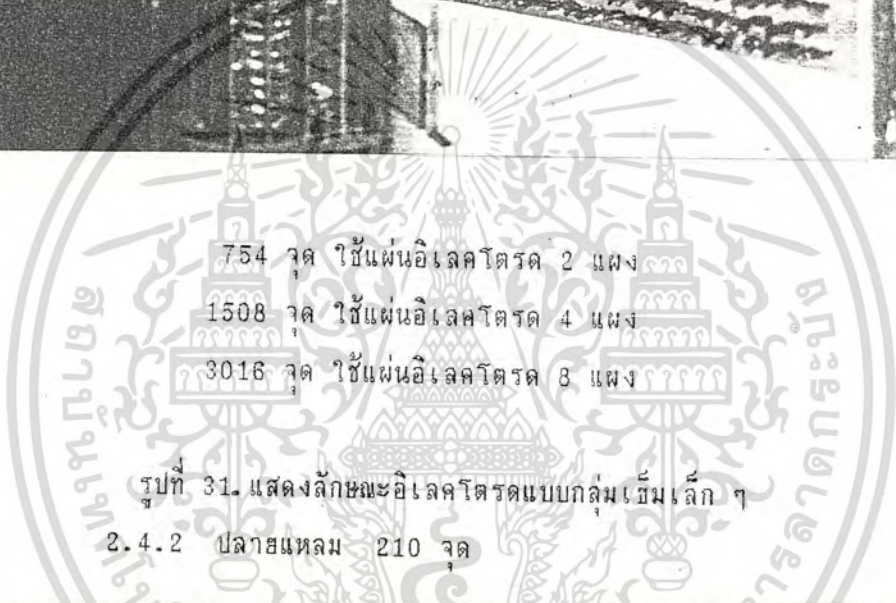
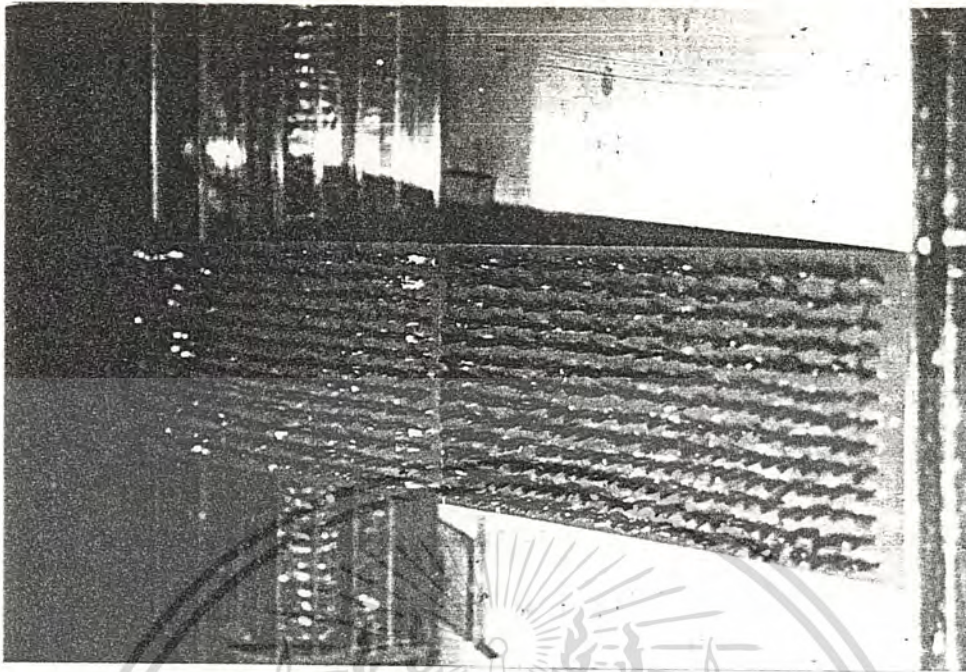


รูปที่ 30 โครงสร้าง, ชุดต้นแบบเครื่องกำเนิดไอโซน

2. ทำการเตรียมชุดทดลองอิเล็กโตรดต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1 ระยะแคบ 0.5 cm., 1 cm., 1.5 cm.
- 2.2 ประเภทของไฟ DC^- , DC^+
- 2.3 ชนิดของแผ่นอิเล็กโตรด Dielectric, No Dielectric
- 2.4 ลักษณะของอิเล็กโตรด

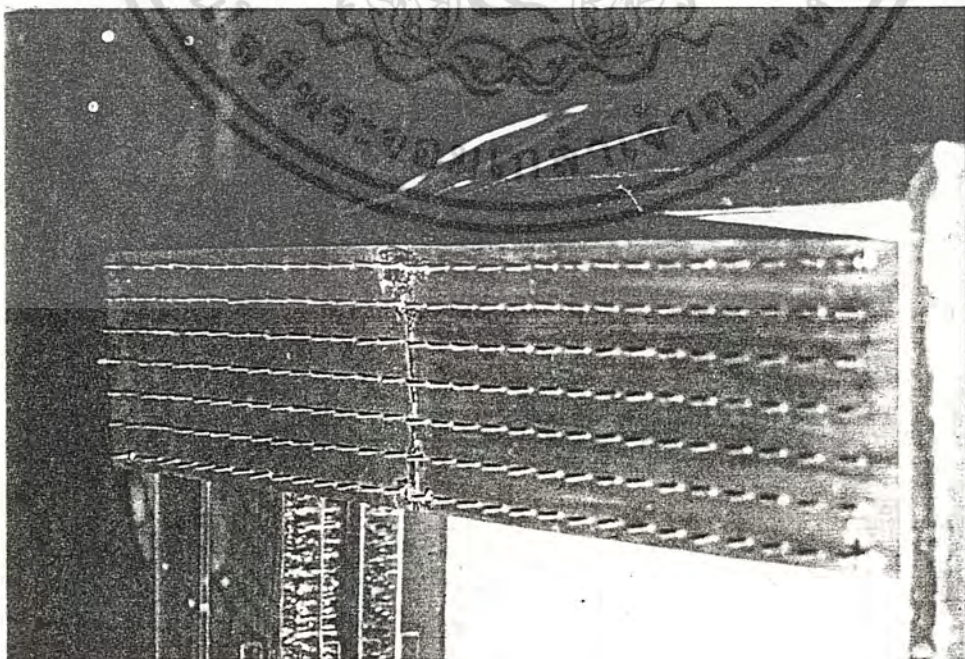
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกลุ่มที่ 754 จุด, 1508 จุด, 3016 จุด ดังรูป
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



754 จุด ใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 2 แผง
 1508 จุด ใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 4 แผง
 3016 จุด ใช้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ 8 แผง

รูปที่ 31. แสดงลักษณะอิเล็กทรอนิกส์แบบกลุ่มเข็มเล็ก ๆ

2.4.2 ปลายแหลม 210 จุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 32 แสดงลักษณะอิเล็กทรอนิกส์แบบปลายแหลมเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจะปรับชนิดของแผ่นอิเล็กโทรด, ประเภทไฟ และระยะแกป ที่ค่าต่าง ๆ ข้าง
ต้นจนครบทุกชุด

3. การทดลองแต่ละชุดการทดลอง

3.1 จะนำสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ ($KI\ sol^n$) 100 mL ใส่ใน flask
(ขวดรูปชมพู่) ปริมาตร 250 mL

3.2 ทำการปรับค่า Voltage เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะนี้ ค่า $I_{\text{saturation}}$ จาก
โศรนำของแกปจะเพิ่มขึ้นตาม แต่พยายามอย่าให้ถึงจุดเบรคดาวน์ บันทึกค่า
kV และ mA

3.3 ที่ค่า mA ต่าง ๆ ทำการเปิดพัดลม พ่นไอโชนลงในสารละลายโปตัสเซียมไอ
โอไดด์ ($KI\ sol^n$) เป็นเวลา 5 นาที

3.4 นำสารละลายโปตัสเซียมไอโอไดด์ที่ผ่านการพ่นไอโชน 5 นาที ไปทำการ
ไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) บันทึกค่า
สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้

4. คำนวณหาปริมาณไอโชน ที่ได้ในเวลา 5 นาที จากสูตร

$$mg\ O_3 / L = (A \pm B) \times M \times 24000 / mL\ sample$$

A : mL titrant for sample

B : mL titrant for blank

M : molarity of $Na_2S_2O_3$

(รายละเอียดการหาปริมาณไอโชนดูได้จากบทที่ 3)

5. ไอโชนที่ได้เป็นปริมาณที่เกิดขึ้นในช่วง 5 นาที มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม ($mgO_3/5$ นาที)

นำไปคำนวณเป็นค่า mgO_3 / min โดยเอา 5 คูณ

นำไปคำนวณเป็นค่า mgO_3 / hr โดยเอา 12 คูณ

นำไปคำนวณเป็นค่า $mgO_3 / kWhr$ โดยเอา mgO_3/hr ทหารด้วย $(kV * mA / 1000)$

นำไปคำนวณเป็นค่า $micro\ gO_3 / sec$ โดยเอา $(mgO_3/hr) \times 1000 / 3600$

6. บันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

7. ทดลองนำไอโชนไปพ่นลงในน้ำเสี่ย สังเกตผล ทำการเปรียบเทียบกับที่พ่นด้วยอากาศ
และตัวอย่างเปรียบเทียบ

6.3 ผลการทดลอง

ข้อกำหนด

1. T : อุณหภูมิขณะทำการทดลอง
2. H : ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะทำการทดลอง
3. 754 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 754 กลุ่ม
4. 1508 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 1508 กลุ่ม
5. 3016 g.points : อิเลคโตรดที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 3016 กลุ่ม
6. 210 point : อิเลคโตรดปลายแหลมจำนวน 210 แท่ง
7. gap : ระยะกั้นระหว่างอิเลคโตรด
8. No Dielectric : แผ่นฉนวนทองแดงที่ไม่ได้เคลือบสารฉนวนใด ๆ
9. Dielectric : แผ่นระนาบทองแดงที่เคลือบฉนวนแลคเกอร์ไว้
10. DC⁻ : แรงดันไฟลบที่ใช้ป้อนระหว่างแผ่นอิเลคโตรด
11. DC⁺ : แรงดันไฟบวกที่ใช้ป้อนระหว่างแผ่นอิเลคโตรด
12. KV : แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ป้อนระหว่างอิเลคโตรด
13. mA : กระแสโคโรนาที่เกิดขึ้นระหว่างอิเลคโตรด
14. Watt : กำลังไฟฟ้าโคโรนาที่เกิดขึ้นระหว่างอิเลคโตรด
15. current/point : ค่า leakage current ที่เกิดขึ้นต่ออิเลคโตรดแท่งหนึ่ง ๆ (micro amp/point)
16. ozone production rate : อัตราการเกิดโอโซน คือ ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นต่อช่วงเวลาหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็น น้ำหนักโอโซน (mgO₃/hr, microgO₃/min, microgO₃/sec)
17. ozone production rate/power : อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานที่ใช้ หรือ ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ไป (mgO₃/KWhr)
18. ozone production rate/point : อัตราการเกิดโอโซนต่ออิเลคโตรดแท่งหนึ่ง ๆ (microgO₃/sec/point x 10⁻³)

ตารางแสดงผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = 32 C
H = 62 %

754 g.points
gap = 0.5 cm.

No Dielectrric
DC-

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
4.1	0.5	2.1	0.663	33.6	2.02	983.41	0.560	0.743
4.8	1.0	4.8	1.326	57.6	3.46	720.00	0.960	1.273
5.4	1.5	8.1	1.989	69.6	4.18	515.56	1.160	1.338
5.8	2.0	11.6	2.653	74.4	4.46	384.83	1.240	1.645
6.1	2.5	15.3	3.316	103.2	6.19	406.03	1.720	2.281
6.4	3.0	19.2	3.979	136.8	8.21	427.50	2.280	3.024
6.8	3.5	23.8	4.642	172.8	10.37	435.63	2.880	3.820
7.1	4.0	28.4	5.305	208.8	12.53	441.13	3.480	4.615
7.3	4.5	32.9	5.968	220.8	13.25	403.29	3.680	4.881
7.4	5.0	37.0	6.631	232.8	13.97	377.51	3.880	5.146

T = 33 C
H = 57 %

754 g.points
gap = 0.5 cm.

No Dielectrric
DC+

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
6.4	0.01	0.1	0.013	2.4	0.14	2250.00	0.040	0.053
6.5	0.02	0.1	0.027	3.6	0.22	1661.54	0.060	0.080

T = 32 C
H = 62 %

754 g.points
gap = 0.5 cm.

Dielectric
DC-

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
3.6	0.1	0.4	0.133	3.6	0.22	600.00	0.060	0.080
3.8	0.2	0.8	0.265	4.8	0.29	378.95	0.080	0.106
4.0	0.3	1.2	0.398	6.0	0.36	300.00	0.100	0.133
4.1	0.4	1.6	0.531	10.8	0.65	395.12	0.180	0.239

T = 32 C
H = 62 %

754 g.points
gap = 0.5 cm.

Dielectric
DC+

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
4.5	0.01	0.0	0.013	0.5	0.03	640.00	0.008	0.011
4.8	0.05	0.2	0.066	1.7	0.10	420.00	0.028	0.037

T = 31 C
H = 62 %

754 g.points
gap = 1.0 cm.

No Dielectrric
DC-

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
8.0	0.5	4.0	0.663	31.2	1.87	468.00	0.520	0.690
8.4	1.0	8.4	1.326	43.2	2.59	308.57	0.720	0.955
8.9	1.5	13.4	1.989	64.8	3.89	291.24	1.080	1.432
9.4	2.0	18.8	2.653	76.8	4.61	245.11	1.280	1.698
9.9	2.5	24.8	3.316	93.6	5.62	226.91	1.560	2.069
10.2	3.0	30.6	3.979	132.0	7.92	258.82	2.200	2.918
10.6	3.5	37.1	4.642	160.8	9.65	260.05	2.680	3.554

10.9	4.0	43.6	5.305	196.8	11.81	270.83	3.280	4.350
11.3	4.5	50.9	5.968	235.2	14.11	277.52	3.920	5.199
11.6	5.0	58.0	6.631	271.2	16.27	280.55	4.520	5.995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และหรืออ้างถึงชื่อของกรมการทหารบก หรือ หน่วยงานใดๆ

11.8	5.5	64.9	7.294	290.4	17.42	268.47	4.840	6.419
12.1	6.0	72.6	7.958	316.8	19.01	261.82	5.280	7.003
12.2	6.5	79.3	8.621	345.6	20.74	261.49	5.760	7.639
12.4	7.0	86.8	9.284	362.4	21.74	250.51	6.040	8.011
12.7	7.5	95.3	9.947	388.8	23.33	244.91	6.480	8.594
13.0	8.0	104.0	10.610	405.6	24.34	234.00	6.760	8.966
13.3	8.5	113.1	11.273	427.2	25.63	226.73	7.120	9.443
13.7	9.0	123.3	11.936	468.0	28.08	227.74	7.800	10.345
14.0	9.5	133.0	12.599	480.0	28.80	216.54	8.000	10.610
14.4	10.0	144.0	13.263	499.2	29.95	208.00	8.320	11.034

T = 31 C 754 g.points No Dielectric
H = 68 % gap = 1.0 cm. DC+

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μgO3/sec	μgO3/sec/point
7.25	0.01	0.1	0.013	3.4	0.14	1986.21	0.040	0.053
7.60	0.05	0.4	0.066	11.5	0.69	1818.95	0.192	0.255
7.70	0.10	0.8	0.133	27.6	1.66	2150.65	0.460	0.610

T = 29 C 754 g.points Dielectric
H = 75 % gap = 1.0 cm. DC-

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μgO3/sec	μgO3/sec/point
6.4	0.5	3.2	0.663	24.0	1.44	450.00	0.400	0.531
7.0	1.0	7.0	1.326	43.2	2.59	370.29	0.720	0.955
7.5	1.5	11.2	1.989	50.4	3.02	270.60	0.840	1.114
7.8	2.0	15.6	2.653	64.8	3.89	249.23	1.080	1.432
8.1	2.5	20.3	3.316	76.8	4.61	227.56	1.280	1.698
8.4	3.0	25.2	3.979	86.4	5.18	205.71	1.440	1.910
8.6	3.5	30.1	4.542	94.8	5.69	183.97	1.580	2.095
8.8	4.0	35.2	5.305	103.2	6.19	175.91	1.720	2.281
9.0	4.5	40.5	5.968	136.8	8.21	202.67	2.280	3.024
9.3	5.0	46.5	6.631	138.4	9.50	204.39	2.640	3.501
9.5	5.5	52.3	7.294	162.0	9.72	186.03	2.700	3.581
9.7	6.0	58.2	7.958	163.2	9.79	168.25	2.720	3.607

T = 30 C 754 g.points Dielectric
H = 68 % gap = 1.0 cm. DC+

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μgO3/sec	μgO3/sec/point
7.8	0.1	0.3	0.133	4.3	0.29	369.23	0.080	0.106
8.4	0.2	1.7	0.265	16.8	1.01	600.00	0.280	0.371

T = 31 C 754 g.points No Dielectric
H = 68 % gap = 1.5 cm. DC-

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μgO3/sec	μgO3/sec/point
11.7	0.5	5.9	0.663	21.6	1.30	221.54	0.360	0.477
12.8	1.0	12.8	1.326	52.8	3.17	247.50	0.880	1.167
13.8	1.5	20.7	1.989	72.0	4.32	208.70	1.200	1.592
14.4	2.0	28.8	2.653	93.6	5.62	195.00	1.560	2.069
15.2	2.5	38.0	3.316	122.4	7.34	193.26	2.040	2.706
15.8	3.0	47.4	3.979	160.8	9.65	203.54	2.680	3.554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรแก้ไขหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.8	3.5	58.8	4.642	170.4	10.22	173.88	2.840	3.767
17.4	4.0	69.6	5.305	184.8	11.09	159.31	3.080	4.085
18.0	4.5	81.0	5.968	242.4	14.54	179.56	4.040	5.358
18.0	5.0	90.0	6.631	295.2	17.71	196.80	4.920	6.525
18.4	5.5	101.2	7.294	338.4	20.30	200.63	5.640	7.480
18.8	6.0	112.8	7.958	384.0	23.04	204.26	6.400	8.488
19.2	6.5	124.8	8.621	422.4	25.34	203.08	7.040	9.337
19.7	7.0	137.9	9.284	463.2	27.79	201.54	7.720	10.239
20.0	7.5	150.0	9.947	547.2	32.83	218.88	9.120	12.095
20.3	8.0	162.4	10.610	631.2	37.87	233.20	10.520	13.952
20.7	8.5	176.0	11.273	700.8	42.05	238.98	11.680	15.491
21.0	9.0	189.0	11.936	777.6	46.66	246.86	12.960	17.188
21.3	9.5	202.4	12.599	876.0	52.56	259.75	14.600	19.363
21.6	10.0	216.0	13.263	938.4	56.30	260.67	15.640	20.743

T = 30 C

754 g.points

No Dielectric

H = 75 %

gap = 1.5 cm.

DC+

10⁻³

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
11.1	0.1	1.1	0.133	12.0	0.72	648.65	0.200	0.265
11.7	0.2	2.3	0.265	26.4	1.58	676.92	0.440	0.584
12.6	0.6	7.6	0.796	117.6	7.06	933.33	1.960	2.599
13.2	1.0	13.2	1.326	170.4	10.22	774.55	2.840	3.767

T = 29.5 C

754 g.points

Dielectric

H = 75 %

gap = 1.5 cm.

DC-

10⁻³

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
9.5	0.5	4.8	0.663	19.2	1.15	242.53	0.320	0.424
10.5	1.0	10.5	1.326	52.8	3.17	301.71	0.880	1.167
11.2	1.5	16.8	1.989	72.0	4.32	357.14	1.200	1.592
11.6	2.0	23.2	2.653	91.2	5.47	235.86	1.520	2.016
12.1	2.5	30.3	3.316	108.2	6.19	204.69	1.720	2.281
12.5	3.0	37.5	3.979	112.8	6.77	180.48	1.880	2.493
12.8	3.5	44.8	4.642	124.8	7.49	167.14	2.080	2.759
13.2	4.0	52.8	5.305	131.2	9.07	171.82	2.520	3.342

T = 27 C

754 g.points

Dielectric

H = 85 %

gap = 1.5 cm.

DC+

10⁻³

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
9.3	0.05	0.5	0.066	7.2	0.43	929.03	0.120	0.159
11.1	0.10	1.1	0.133	21.6	1.30	1167.57	0.360	0.477
11.8	0.15	1.8	0.199	28.8	1.73	976.27	0.480	0.637
12.1	0.20	2.4	0.265	45.6	2.74	1130.58	0.760	1.008
12.3	0.25	3.1	0.332	60.0	3.60	1170.73	1.000	1.326
12.4	0.30	3.7	0.398	76.8	4.61	1238.71	1.280	1.698
12.5	0.35	4.4	0.464	108.0	6.48	1481.14	1.800	2.387
12.6	0.40	5.0	0.531	124.8	7.49	1485.71	2.080	2.759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = 31 C
H = 62 %

1508 g.points
gap = 1.0 cm

No Dielectric
DC-

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
7.4	0.5	3.7	0.332	43.2	2.59	700.54	0.720	0.477
8.0	1.0	8.0	0.663	81.6	4.90	612.00	1.360	0.902
8.4	1.5	12.6	0.995	124.8	7.49	594.29	2.080	1.379
8.9	2.0	17.8	1.326	170.4	10.22	574.38	2.840	1.883
9.3	2.5	23.3	1.658	189.6	11.38	489.29	3.160	2.095
9.7	3.0	29.1	1.989	199.2	11.95	410.72	3.320	2.202
10.1	3.5	35.4	2.321	268.8	16.13	456.24	4.480	2.971
10.5	4.0	42.0	2.653	326.4	19.58	466.29	5.440	3.607
10.8	4.5	48.6	2.984	336.0	20.16	414.81	5.600	3.714
11.2	5.0	56.0	3.316	343.2	20.59	367.71	5.720	3.793
11.5	5.5	63.3	3.647	362.4	21.74	343.78	6.040	4.005
11.8	6.0	70.8	3.979	427.2	25.63	362.03	7.120	4.721
12.0	6.5	78.0	4.310	494.4	29.66	380.31	8.240	5.464
12.3	7.0	86.1	4.642	583.2	34.99	406.41	9.720	6.446
12.6	7.5	94.5	4.973	648.0	38.38	411.43	10.800	7.162
12.8	8.0	102.4	5.305	763.2	45.79	447.19	12.720	8.435
13.2	8.5	112.2	5.637	832.8	49.97	445.35	13.880	9.204
13.5	9.0	121.5	5.968	885.6	53.14	437.33	14.760	9.788
13.6	9.5	129.2	6.300	912.0	54.72	423.33	15.200	10.080
13.8	10.0	138.0	6.631	914.4	54.86	397.57	15.240	10.106

T = 31 C
H = 62 %

1508 g.points
gap = 1.0 cm

No Dielectric
DC+

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
7.3	0.10	0.8	0.066	21.6	1.30	1661.54	0.360	0.239
8.0	0.20	1.6	0.133	62.4	3.74	2340.00	1.040	0.690
8.1	0.30	2.4	0.199	72.0	4.32	1777.78	1.200	0.796

T = 31 C
H = 68 %

1508 g.points
gap = 1.0 cm

Dielectric
DC-

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO3/min	mgO3/hr	mgO3/KW hr	μ gO3/sec	μ gO3/sec/point
6.4	0.5	3.2	0.332	36.0	2.16	675.00	0.600	0.398
6.9	1.0	6.9	0.663	50.4	3.02	438.26	0.840	0.557
7.3	1.5	11.0	0.995	60.0	3.60	328.77	1.000	0.663
7.7	2.0	15.4	1.326	72.0	4.32	280.52	1.200	0.796
7.9	2.5	19.8	1.658	76.8	4.61	233.32	1.280	0.849
8.2	3.0	24.6	1.989	86.4	5.18	210.73	1.440	0.955
8.4	3.5	29.4	2.321	98.4	5.90	200.82	1.640	1.088
8.7	4.0	34.8	2.653	120.0	7.20	206.90	2.000	1.326
9.1	4.5	41.0	2.984	141.6	8.50	207.47	2.360	1.565
9.3	5.0	46.5	3.316	170.4	10.22	219.87	2.840	1.883
9.5	5.5	52.3	3.647	160.8	9.65	184.65	2.680	1.777
9.6	6.0	57.6	3.979	163.2	9.79	170.00	2.720	1.804

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = 30 C 1508 g.points Dielectric
 H = 68 % gap = 1.0 cm DC+ 10⁻³

KV	mA	Watt	MA/point	µgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KWhr	µgO3/sec	µgO3/sec/point
7.7	0.10	0.8	0.066	9.6	0.58	748.05	0.160	0.106
7.8	0.15	1.2	0.099	16.8	1.01	861.54	0.280	0.186

T = 28 C 3016 g.points No Dielectrric
 H = 63 % gap = 1.0 cm DC- 10⁻³

KV	mA	Watt	MA/point	µgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KWhr	µgO3/sec	µgO3/sec/point
6.6	0.5	3.3	0.166	67.2	4.03	1221.82	1.120	0.371
7.2	1.0	7.2	0.332	100.8	6.05	840.00	1.680	0.557
7.8	1.5	11.7	0.497	110.4	6.62	566.15	1.840	0.610
8.2	2.0	16.4	0.663	124.8	7.49	456.59	2.080	0.690
8.6	2.5	21.5	0.829	170.4	10.22	475.53	2.840	0.942
8.9	3.0	26.7	0.995	242.4	14.54	544.72	4.040	1.340
9.3	3.5	32.6	1.160	297.6	17.86	548.57	4.960	1.645
9.6	4.0	38.4	1.326	360.0	21.60	562.50	6.000	1.989
10.0	4.5	45.0	1.492	427.2	25.63	569.60	7.120	2.361
10.3	5.0	51.5	1.658	477.6	28.66	556.43	7.960	2.639
10.6	5.5	58.0	1.824	544.8	32.69	563.34	9.080	3.011
10.9	6.0	65.1	1.989	621.6	37.30	572.90	10.360	3.435
11.1	6.5	72.2	2.155	667.2	40.03	554.84	11.120	3.687
11.3	7.0	79.1	2.321	760.8	45.65	577.09	12.680	4.204
11.5	7.5	86.3	2.487	794.4	47.66	552.63	13.240	4.390
11.8	8.0	94.4	2.653	820.8	49.25	521.69	13.680	4.536
12.1	8.5	102.9	2.818	861.6	51.70	502.63	14.360	4.761
12.4	9.0	111.6	2.984	895.2	53.71	481.29	14.920	4.947
12.7	9.5	120.7	3.150	918.3	55.01	455.93	15.280	5.066
12.9	10.0	129.0	3.316	969.6	58.18	450.98	16.160	5.358

T = 30 C 3016 g.points No Dielectrric
 H = 72 % gap = 1.0 cm DC- 10⁻³

KV	mA	Watt	MA/point	µgO3/min	mgO3/hr	mgO3/KWhr	µgO3/sec	µgO3/sec/point
6.8	0.5	3.4	0.166	36.0	2.16	635.29	0.600	0.199
7.3	1.0	7.3	0.332	69.6	4.18	572.05	1.160	0.385
7.8	1.5	11.7	0.497	93.6	5.62	480.00	1.560	0.517
8.2	2.0	16.4	0.663	127.2	7.63	465.37	2.120	0.703
8.7	2.5	21.8	0.829	146.4	8.78	403.86	2.440	0.809
9.0	3.0	27.0	0.995	163.2	9.79	362.67	2.720	0.902
9.3	3.5	32.6	1.160	213.6	12.82	393.73	3.560	1.180
9.6	4.0	38.4	1.326	278.4	16.70	435.00	4.640	1.538
10.0	4.5	45.0	1.492	292.8	17.57	390.40	4.880	1.618
10.3	5.0	51.5	1.658	328.8	19.73	383.07	5.480	1.817
10.6	5.5	58.3	1.824	343.2	20.59	353.21	5.720	1.897
10.9	6.0	65.4	1.989	372.0	22.32	341.28	6.200	2.056
11.3	6.5	73.5	2.155	460.8	27.65	376.42	7.680	2.546
11.6	7.0	81.2	2.321	571.2	34.27	422.07	9.520	3.156
11.8	7.5	88.5	2.487	607.2	36.43	411.66	10.120	3.355
12.0	8.0	96.0	2.653	669.6	40.18	418.50	11.160	3.700
12.2	8.5	103.7	2.818	739.2	44.35	427.70	12.320	4.085
12.4	9.0	111.6	2.984	794.4	47.66	427.10	13.240	4.390
12.6	9.5	119.7	3.150	828.0	49.68	415.04	13.800	4.576
12.7	10.0	127.0	3.316	856.8	51.41	404.79	14.280	4.735

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้สามารถนำไปใช้
 ไม่ว่าการมีลิขสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ และขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = 30 C		3016 g.points		No Dielectric					
H = 68 %		gap = 1.0 cm		DC+				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
7.00	0.10	0.7	0.033	19.2	1.15	1645.71	0.320	0.106	
7.48	0.20	1.5	0.066	38.4	2.30	1540.11	0.640	0.212	
7.50	0.25	1.9	0.083	72.0	4.32	2304.00	1.200	0.398	

T = 29 C		3016 g.points		Dielectric					
H = 70 %		gap = 1.0 cm		DC-				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
5.8	0.5	2.9	0.166	45.6	2.74	943.45	0.760	0.252	
6.3	1.0	6.3	0.332	57.6	3.46	548.57	0.960	0.318	
6.7	1.5	10.1	0.497	60.0	3.60	358.21	1.000	0.332	
7.1	2.0	14.2	0.663	62.4	3.74	263.66	1.040	0.345	
7.4	2.5	18.5	0.829	69.6	4.18	225.73	1.160	0.385	
7.7	3.0	23.1	0.995	81.6	4.90	211.95	1.360	0.451	
7.9	3.5	27.7	1.160	103.2	6.19	223.94	1.720	0.570	
8.1	4.0	32.4	1.326	112.8	6.77	208.39	1.880	0.623	
8.4	4.5	37.8	1.492	116.4	6.98	184.76	1.940	0.643	
8.6	5.0	43.0	1.658	122.4	7.34	170.79	2.040	0.676	
8.9	5.5	49.0	1.824	139.2	8.35	170.62	2.320	0.769	
9.2	6.0	55.2	1.989	156.0	9.36	169.57	2.600	0.862	

T = 30 C		3016 g.points		Dielectric					
H = 68 %		gap = 1.0 cm		DC+				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
7.5	0.1	0.8	0.033	9.6	0.58	768.00	0.160	0.053	
7.8	0.2	1.6	0.066	21.6	1.30	330.77	0.360	0.119	

T = 31 C		210 points		No Dielectric					
H = 68 %		gap = 0.5 cm.		DC-				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
4.00	0.5	2.0	2.381	21.6	1.30	648.00	0.360	1.714	
4.60	1.0	4.6	4.762	31.2	1.87	406.96	0.520	2.476	
5.10	1.5	7.7	7.143	67.2	4.03	527.06	1.120	5.333	
5.60	2.0	11.2	9.524	91.2	5.47	488.57	1.520	7.238	
6.00	2.5	15.0	11.905	117.6	7.06	470.40	1.960	9.333	
6.35	3.0	19.1	14.286	146.4	8.78	461.10	2.440	11.619	

T = 31 C		210 points		No Dielectric					
H = 68 %		gap = 0.5 cm.		DC+				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
3.4	0.05	0.2	0.238	4.8	0.29	1694.12	0.080	0.381	
3.5	0.10	0.4	0.476	8.4	0.50	1440.00	0.140	0.667	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งในการนำไปใช้

T = 31 C		210 points		Dielectric					
H = 68 %		gap = 0.5 cm.		DC-				10 ⁻³	
KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point	
3.1	0.05	0.2	0.238	6.7	0.40	2601.29	0.112	0.533	

6.5	1.5	9.8	7.143	42.0	2.52	258.46	0.700	3.333
7.0	2.0	14.0	9.524	50.6	3.04	217.03	0.844	4.019
7.4	2.5	18.5	11.905	59.0	3.54	191.48	0.984	4.686
7.8	3.0	23.4	14.286	67.2	4.03	172.31	1.120	5.333
8.2	3.5	28.7	16.667	76.3	4.58	159.55	1.272	6.057
8.5	4.0	34.0	19.048	86.2	5.17	152.05	1.436	6.838
8.8	4.5	39.6	21.429	94.3	5.66	142.91	1.572	7.486
9.1	5.0	45.5	23.810	103.2	6.19	136.09	1.720	8.190
9.4	5.5	51.7	26.190	100.8	6.05	116.98	1.680	8.000
9.7	6.0	58.2	28.571	105.6	6.34	108.87	1.760	8.381
10.0	6.5	65.0	30.952	108.0	6.48	99.69	1.800	8.571
10.2	7.0	71.4	33.333	117.6	7.06	98.32	1.960	9.333
10.5	7.5	78.8	35.714	115.2	6.91	87.77	1.920	9.143
10.8	8.0	86.4	38.095	124.8	7.49	86.67	2.080	9.905
11.0	8.5	93.5	40.476	129.6	7.78	83.17	2.160	10.286
11.3	9.0	101.7	42.857	134.4	8.06	79.29	2.240	10.667
11.6	9.5	110.2	45.238	139.2	8.35	75.79	2.320	11.048
11.8	10.0	118.5	47.619	151.2	9.07	76.56	2.520	12.000

T = 29 C

H = 75 %

210 points

gap = 1.0 cm.

Dielectric

DC+

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point
5.8	0.1	0.6	0.476	3.4	0.50	368.97	0.140	0.667
6.3	0.2	1.3	0.952	10.8	0.63	514.29	0.180	0.857
6.9	0.5	3.5	2.381	19.2	1.15	333.91	0.320	1.524
7.8	1.0	7.8	4.762	45.6	2.74	350.77	0.760	3.619

T = 30 C

H = 70 %

210 points

gap = 1.5 cm.

No Dielectric

DC-

10⁻³

KV	mA	Watt	μA/point	μgO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μgO ₃ /sec	μgO ₃ /sec/point
7.8	0.5	3.9	2.381	24.0	1.44	369.23	0.400	1.905
9.1	1.0	9.1	4.762	43.2	2.59	284.84	0.720	3.429
10.2	1.5	15.3	7.143	62.4	3.74	244.71	1.040	4.952
11.1	2.0	22.2	9.524	84.0	5.04	227.03	1.400	6.667
12.0	2.5	30.0	11.905	105.6	6.34	211.20	1.760	8.381
12.9	3.0	38.7	14.286	129.6	7.78	200.93	2.160	10.286
13.8	3.5	48.1	16.667	139.2	8.35	173.55	2.320	11.048
14.5	4.0	58.0	19.048	182.4	10.94	188.69	3.040	14.476
15.3	4.5	68.9	21.429	165.6	9.94	144.31	2.760	13.143
16.0	5.0	80.0	23.810	148.8	8.93	111.60	2.480	11.810
16.6	5.5	91.3	26.190	180.0	10.80	118.29	3.000	14.286
17.2	6.0	103.2	28.571	211.2	12.67	122.79	3.520	16.762
17.8	6.5	115.7	30.952	252.0	15.12	130.68	4.200	20.000
18.4	7.0	128.8	33.333	288.0	17.28	134.16	4.800	22.857
19.0	7.5	142.5	35.714	324.0	19.44	136.42	5.400	25.714
19.6	8.0	156.8	38.095	362.4	21.74	138.67	6.040	28.762
20.1	8.5	170.9	40.476	429.6	25.78	150.87	7.160	34.095
20.6	9.0	185.4	42.857	492.0	29.52	159.22	8.200	39.048
21.1	9.5	200.5	45.238	516.0	30.96	154.45	8.600	40.952
21.5	10.0	215.0	47.619	573.6	34.42	160.07	9.560	45.524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = 30 C
H = 70 %

210 points
gap = 1.5 cm.

No Dielectric
DC+

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
3.6	0.5	4.3	2.381	33.6	2.02	468.84	0.560	2.667
9.8	1.0	9.8	4.762	74.4	4.46	455.51	1.240	5.905
10.8	1.5	16.2	7.143	144.0	8.64	533.33	2.400	11.429
11.7	2.0	23.4	9.524	213.6	12.82	547.69	3.560	16.952
12.4	2.5	31.0	11.905	249.6	14.98	483.10	4.160	19.310
13.0	3.0	39.0	14.286	285.6	17.14	439.38	4.760	22.667
13.6	3.5	47.6	16.667	348.0	20.38	438.66	5.800	27.619
14.1	4.0	56.4	19.048	405.6	24.34	431.49	6.760	32.190

T = 26 C
H = 90 %

210 points
gap = 1.5 cm.

Dielectric
DC-

10^{-3}

KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
7.2	0.5	3.6	2.381	26.4	1.38	440.00	0.440	2.095
8.3	1.0	8.3	4.762	55.2	3.31	599.04	0.920	4.381
9.2	1.5	13.8	7.143	98.4	5.90	427.83	1.640	7.810
9.9	2.0	19.8	9.524	124.8	7.49	378.18	2.080	9.905
10.5	2.5	26.3	11.905	139.2	8.35	318.17	2.320	11.048
11.1	3.0	33.3	14.286	153.6	9.22	276.76	2.560	12.190
11.6	3.3	40.6	16.667	170.4	10.22	251.82	2.840	13.524
12.2	4.0	48.8	19.048	192.0	11.52	236.07	3.200	15.238
12.6	4.3	56.7	21.429	196.8	11.81	208.25	3.280	15.619
13.1	5.0	65.5	25.810	201.6	12.10	184.67	3.560	16.000
13.5	5.5	74.3	26.190	201.6	12.10	162.91	3.360	16.000
14.0	6.0	84.0	28.571	199.2	11.95	142.29	3.320	15.810
14.3	6.5	93.0	30.952	204.0	12.24	131.68	3.400	16.190
14.6	7.0	102.2	33.333	213.6	12.82	125.40	3.560	16.952
14.9	7.5	111.8	35.714	230.4	13.82	123.70	3.840	18.286
15.3	8.0	122.4	38.095	244.8	14.69	120.00	4.080	19.429
15.7	8.5	133.4	40.476	271.2	16.27	122.01	4.520	21.524
16.0	9.0	144.0	42.857	285.6	17.14	119.00	4.760	22.667
16.3	9.5	154.9	45.238	304.8	18.29	118.10	5.080	24.190
16.6	10.0	166.0	47.619	324.0	19.44	117.11	5.400	25.714

T = 26 C
H = 90 %

210 points
gap = 1.5 cm.

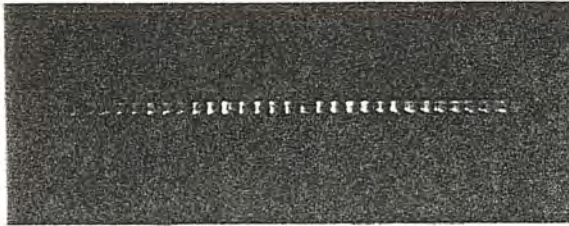
Dielectric
DC+

10^{-3}

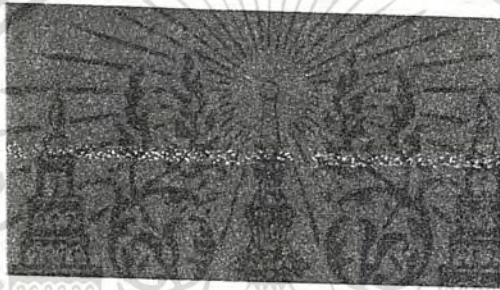
KV	mA	Watt	μ A/point	μ gO ₃ /min	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /KWhr	μ gO ₃ /sec	μ gO ₃ /sec/point
7.6	0.1	0.8	0.476	19.2	1.15	1515.79	0.320	1.524
9.2	0.5	4.6	2.381	79.2	4.75	1033.04	1.320	6.286
10.6	1.0	10.6	4.762	156.0	9.36	883.02	2.600	12.381
11.4	1.5	17.1	7.143	201.6	12.10	707.37	3.360	16.000
14.9	7.5	111.8	35.714	230.4	13.82	123.70	3.840	18.286
15.3	8.0	122.4	38.095	244.8	14.69	120.00	4.080	19.429
15.7	8.5	133.4	40.476	271.2	16.27	122.01	4.520	21.524
16.0	9.0	144.0	42.857	285.6	17.14	119.00	4.760	22.667
16.3	9.5	154.9	45.238	304.8	18.29	118.10	5.080	24.190
16.6	10.0	166.0	47.619	324.0	19.44	117.11	5.400	25.714

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 33 แสดงการเกิดโคโรนาของชุดอิเล็กโตรดแบบแท่งเข็มที่ ระยะแกป 1 cm
แรงดัน 14.5 kV กระแสโคโรนา 9 mA



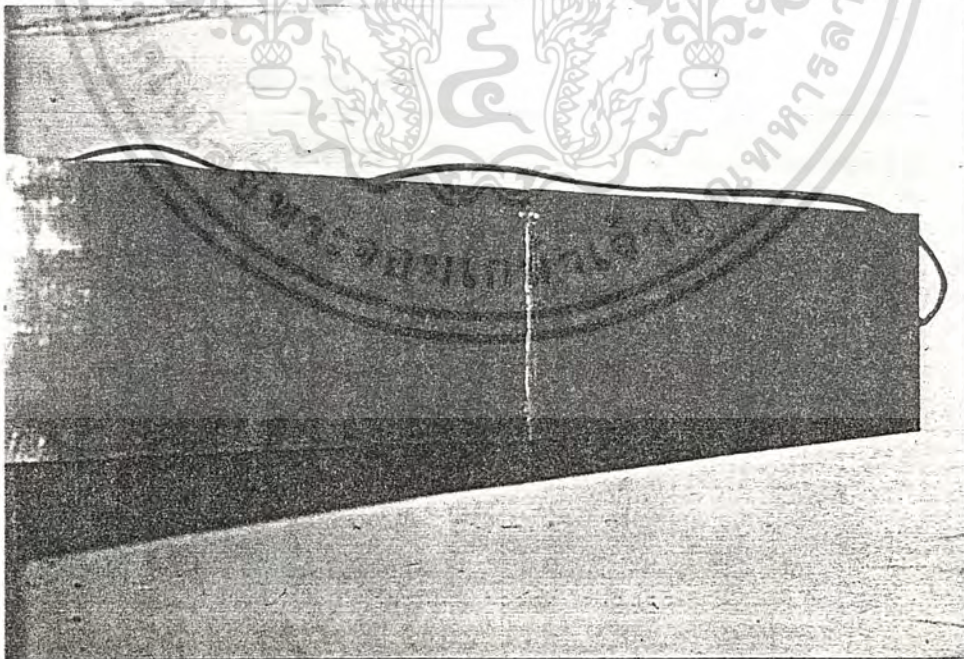
รูปที่ 34 แสดงการเกิดโคโรนาของชุดอิเล็กโตรดแบบกลมเข็มเล็ก ๆ ที่ ระยะแกป 1.5 cm
แรงดัน 20.3 kV กระแสโคโรนา 10 mA



รูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบน้ำเสีย 3 ตัวอย่าง จากซ้ายไปขวา คือน้ำที่ปนไอออนที่กระแส
โคโรนา 8 mA 13.8 kV, น้ำที่ปนอากาศ และน้ำตัวอย่างก่อนผ่านการบำบัด การนำไปใช้



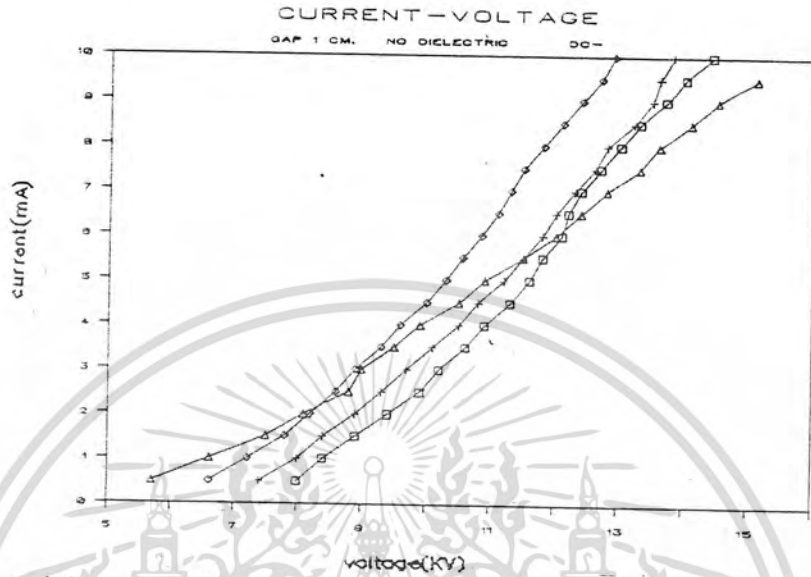
รูปที่ 36 แสดงสีของสารละลายโบตัสเซียมไอโอดेटที่ใช้ในการวัดไอโอดีน ช้ำย ก่อนการพ่นไอโอดีน และขวาหลังการพ่นไอโอดีน จะพบว่า หลังการพ่นไอโอดีนจะเป็นสีส้มของไอโอดีน สามารถนำไปวิเคราะห์ทางเคมีหาปริมาณไอโอดีนได้



รูปที่ 37 แสดงร่องรอยการเกิด oxidize ของอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่เคลือบไดอิเล็กตริก หลัง
 เอกผ่านกิจการใช้งานที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

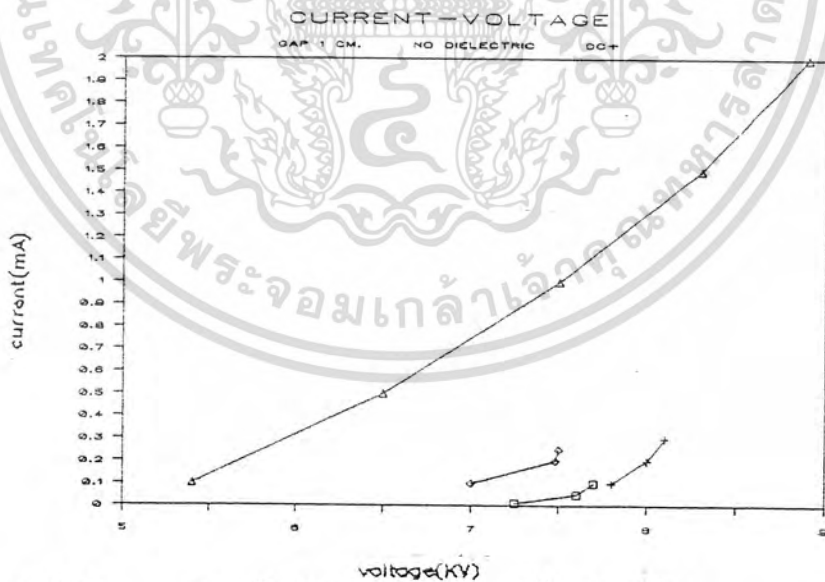
6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางผลการทดลองสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้



□ 754 ฐ. points + 1508 ฐ. points ◇ 3016 ฐ. points ▲ 210 points

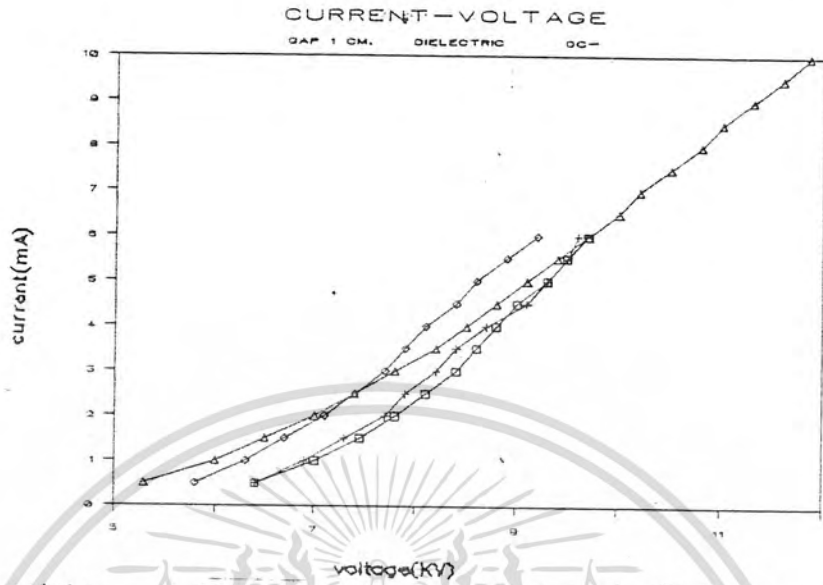
กราฟที่ 1 กระแสไอโรนากับแรงดันไฟฟ้า กระแสกลับ 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC



□ 754 ฐ. points + 1508 ฐ. points ◇ 3016 ฐ. points ▲ 210 points

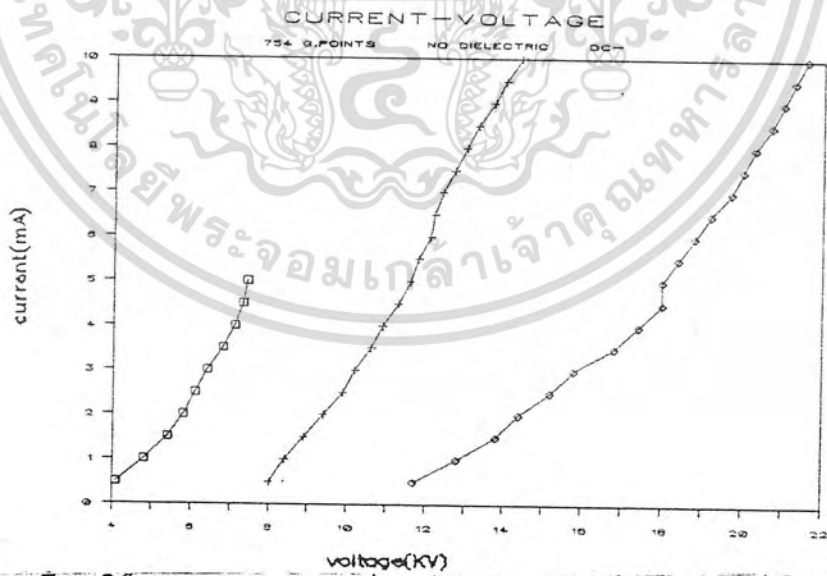
กราฟที่ 2 กระแสไอโรนากับแรงดันไฟฟ้า กระแสกลับ 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



□ 754 g.points + 1508 g.points + 3015 g.points + 210 points

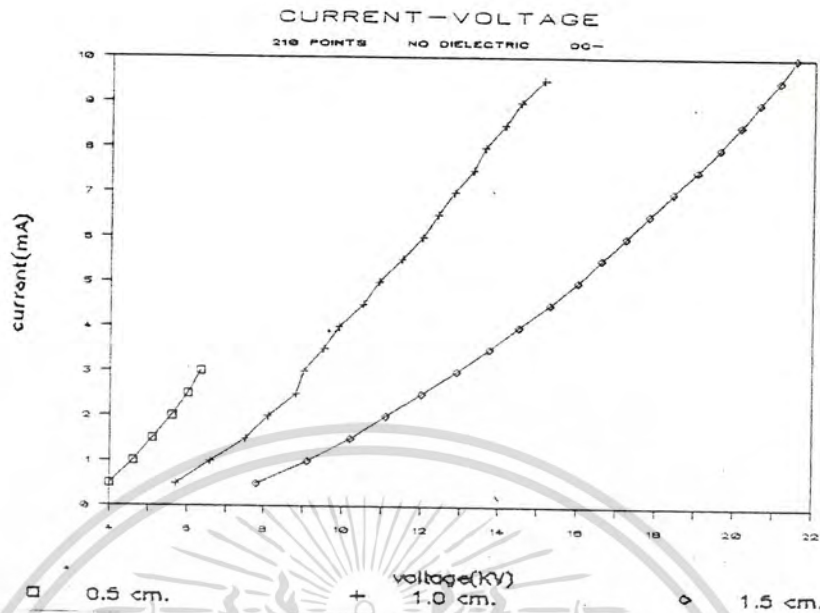
กราฟที่ 3 กระแสโคโรนากับแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะยก 1 cm. เครื่องชั่งน้ำหนักเครื่องใช้ DC



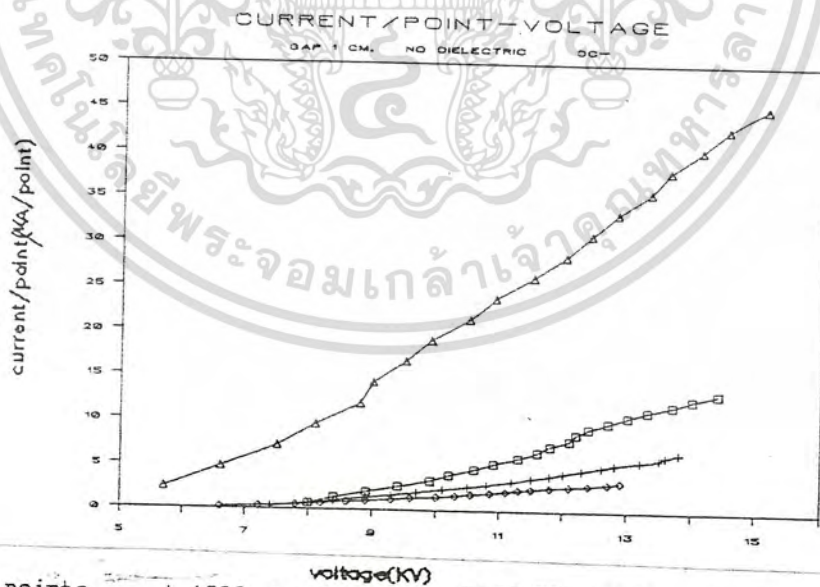
□ 0.5 cm. + 1.0 cm. ○ 1.5 cm.

กราฟที่ 4 กระแสโคโรนากับแรงดันไฟฟ้า อิเล็กโทรดเป็นกลุ่มของเส้นลวด 754 จุด ไม่เคลือบขงน ใช้ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

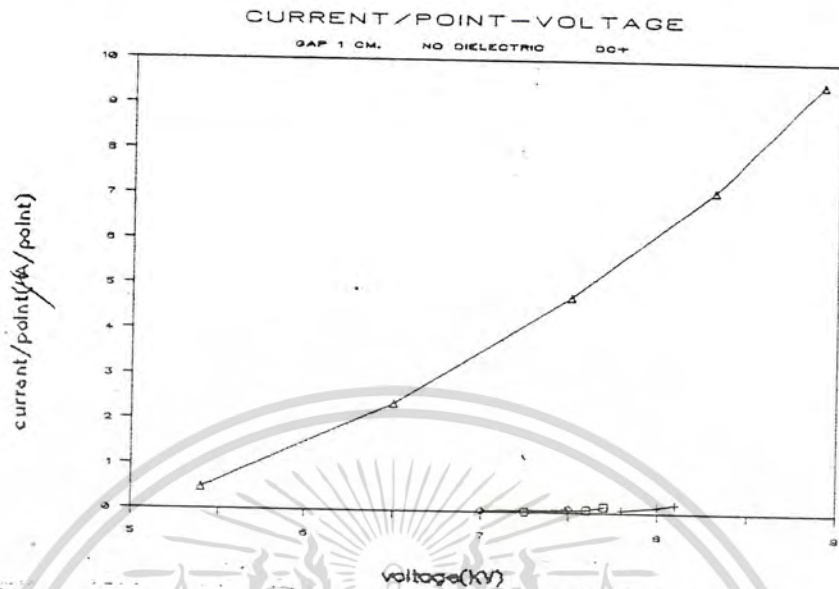


กราฟที่ 5 กระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า อิเล็กโตรดทั้งปลายแหลม 210 จุด ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC



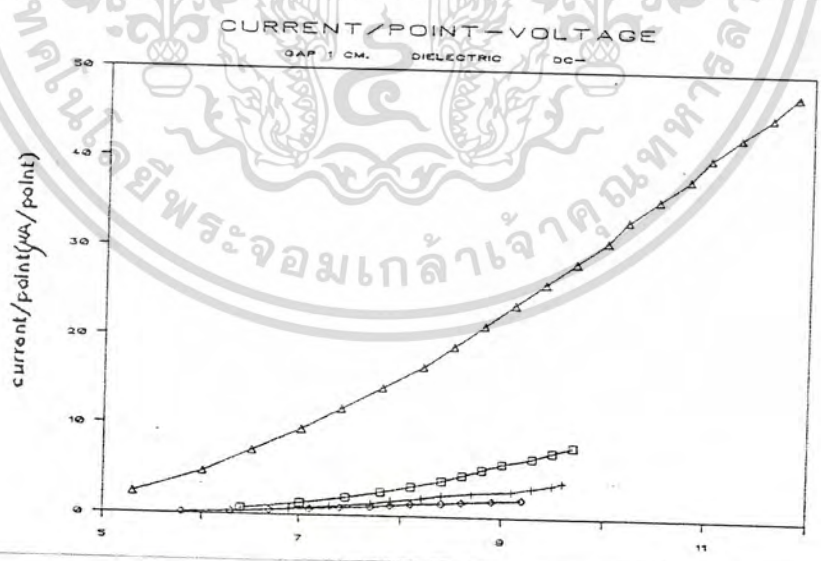
กราฟที่ 6 กระแสไฟฟ้าต่ออิเล็กโตรดกับแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะแคบ 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



□ 754 g. points + 1508 g. points ◇ 3016 g. points ▲ 210 points

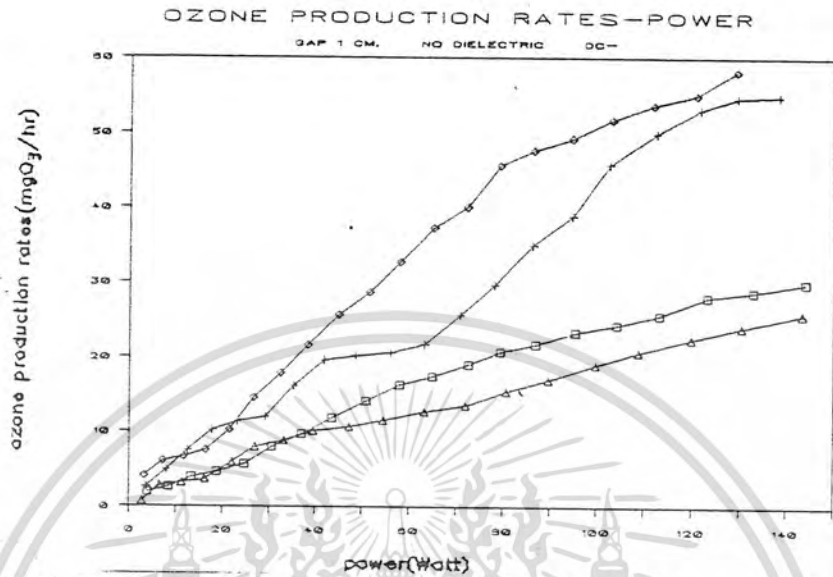
กราฟที่ 7 กระแสไดโรรุ่นตัวลิวไดโรรดกัมรังต้นโซฟ้า กระยะแถบ 1 ซม. ไม่ใส่อะหนาน โซ DC⁺



□ 754 g. points + 1508 g. points ◇ 3016 g. points ▲ 210 points

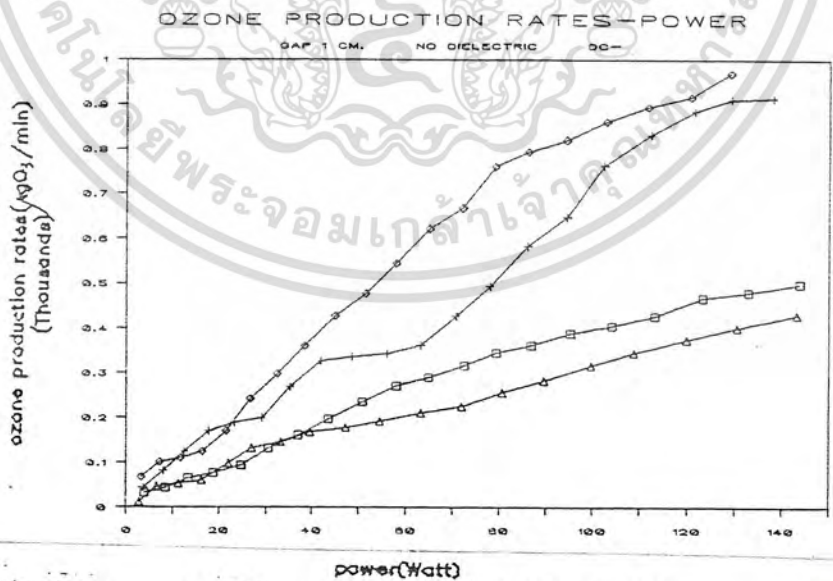
กราฟที่ 8 กระแสไดโรรุ่นตัวลิวไดโรรดกัมรังต้นโซฟ้า กระยะแถบ 1 ซม. ใส่ปริมาณแอลกอฮอล์ โซ DC⁻

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 9.1 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา ที่ระยะกบ 1 ซม. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

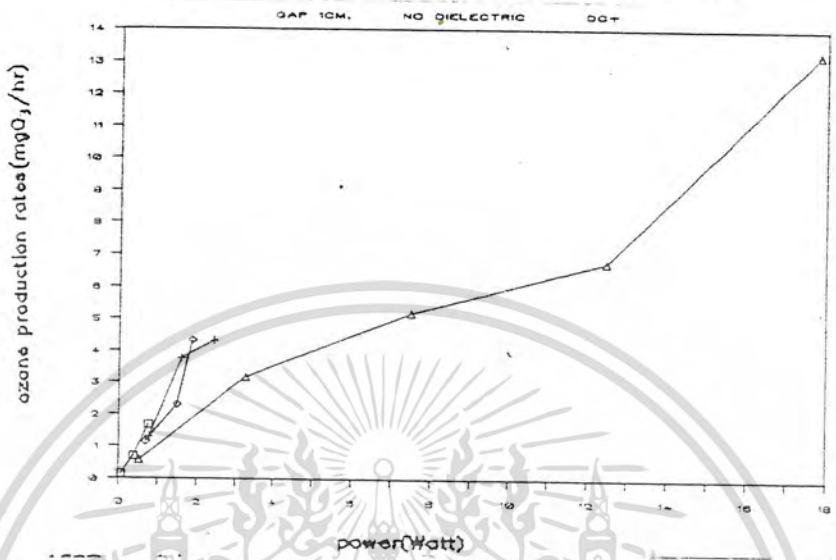


□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 9.2 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา ที่ระยะกบ 1 ซม. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

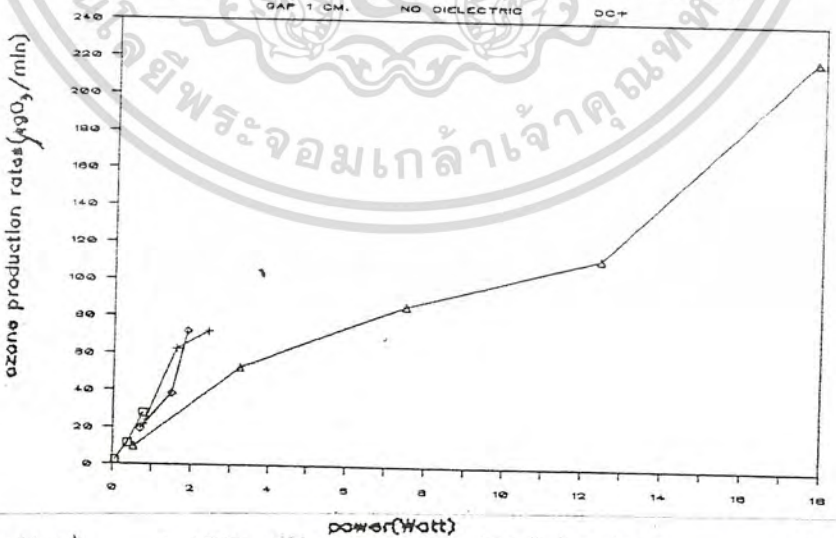
OZONE PRODUCTION RATES-POWER



□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 10.1 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา ที่ระยะแยก 1 cm. ไม้เคลือบฉนวน ไซ DC⁺

OZONE PRODUCTION RATES-POWER



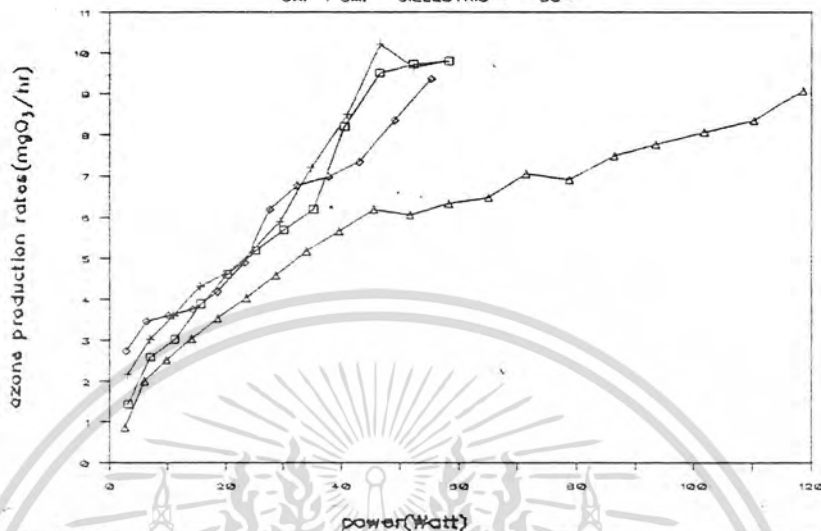
□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 10.2 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา ที่ระยะแยก 1 cm. ไม้เคลือบฉนวน ไซ DC⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE PRODUCTION RATES-POWER

GAP 1 CM. DIELECTRIC DC-

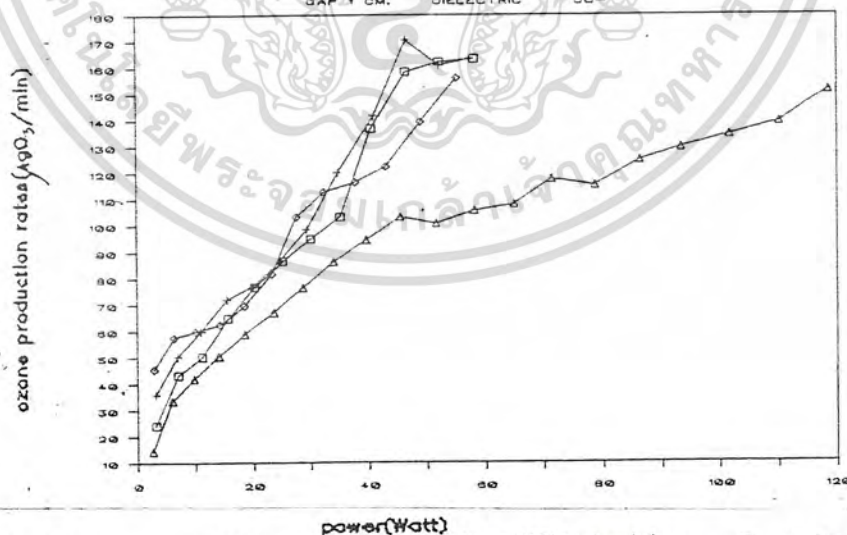


□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 11.1 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา กระแสขนาด 1 cm. เกล็ดขนาดนาโนลดแรงดัน ไฟ DC

OZONE PRODUCTION RATES-POWER

GAP 1 CM. DIELECTRIC DC-



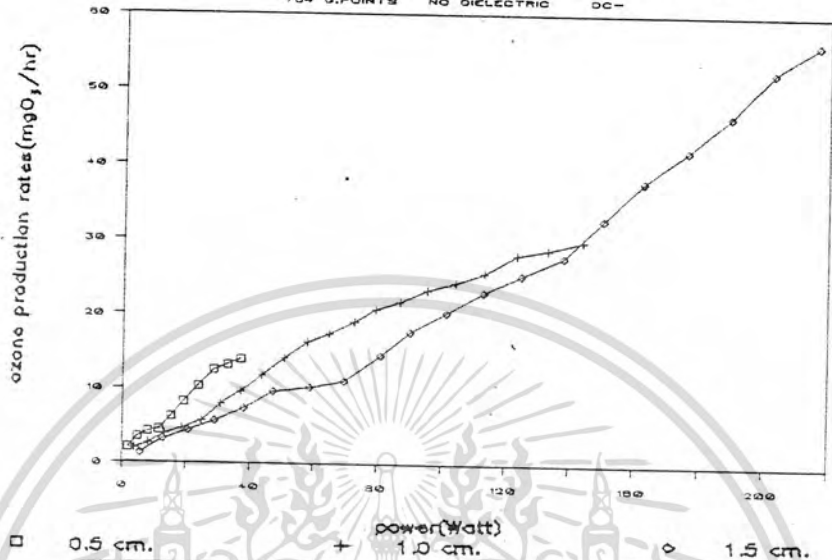
□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 11.2 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงานโคโรนา กระแสขนาด 1 cm. เกล็ดขนาดนาโนลดแรงดัน ไฟ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE PRODUCTION RATES-POWER

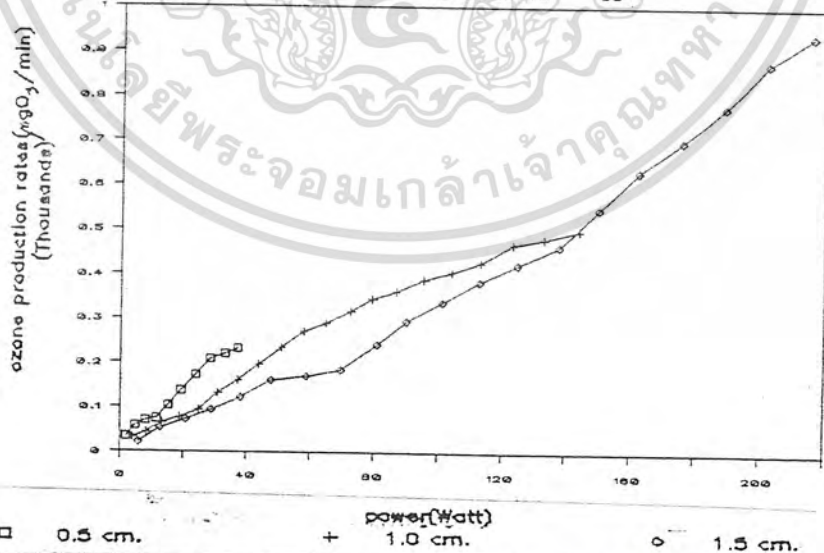
754 G.POINTS NO DIELECTRIC DC-



กราฟที่ 12.1 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงาน อิเลคโตรดเป็นกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 754 จุด ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

OZONE PRODUCTION RATES-POWER

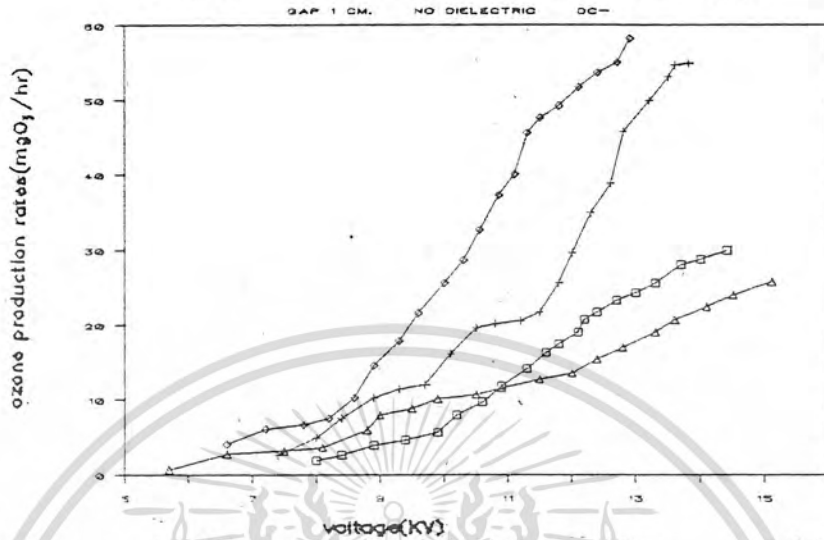
754 G.POINTS NO DIELECTRIC DC-



กราฟที่ 12.2 อัตราการเกิดโอโซนกับกำลังงาน อิเลคโตรดเป็นกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 754 จุด ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

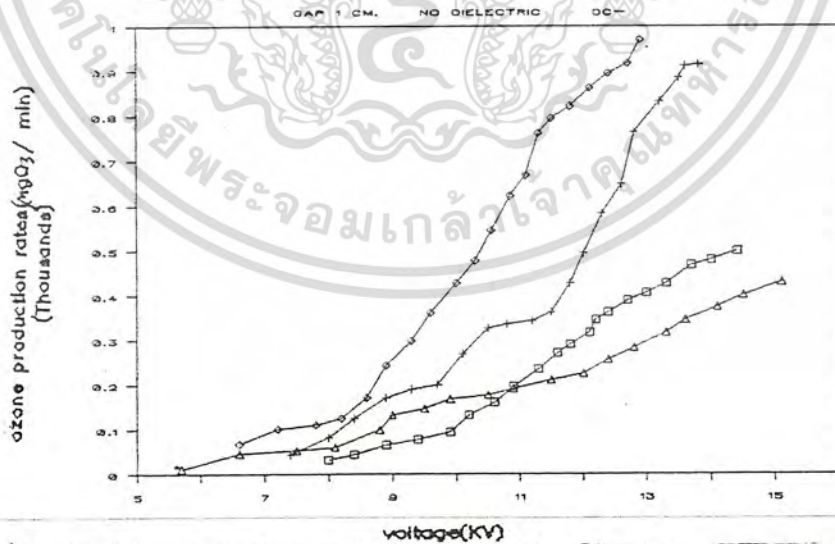
OZONE PRODUCTION RATES-VOLTAGE



□ 754 จุด. points + 1508 จุด. points ◇ 3016 จุด. points ▲ 210 points

กราฟที่ 13.1 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะห่าง 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

OZONE PRODUCTION RATES-VOLTAGE



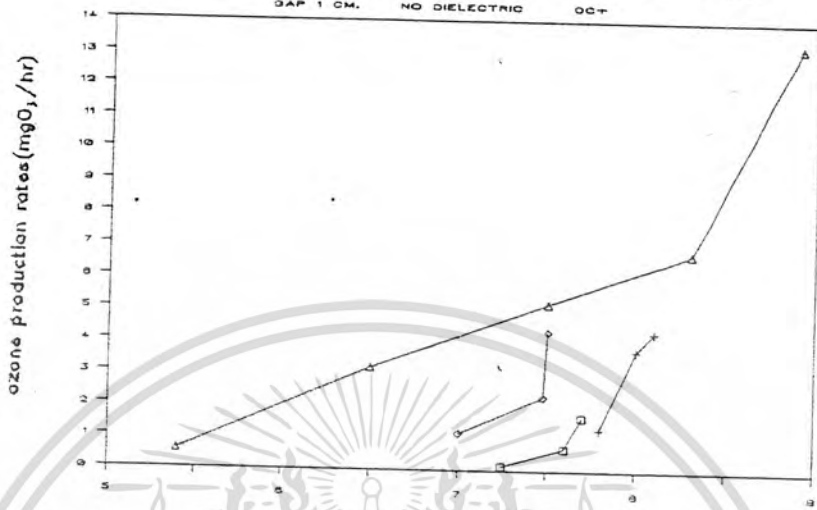
□ 754 จุด. points + 1508 จุด. points ◇ 3016 จุด. points ▲ 210 points

กราฟที่ 13.2 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า ที่ระยะห่าง 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE PRODUCTION RATES-VOLTAGE

GAP 1 CM. NO DIELECTRIC OCT

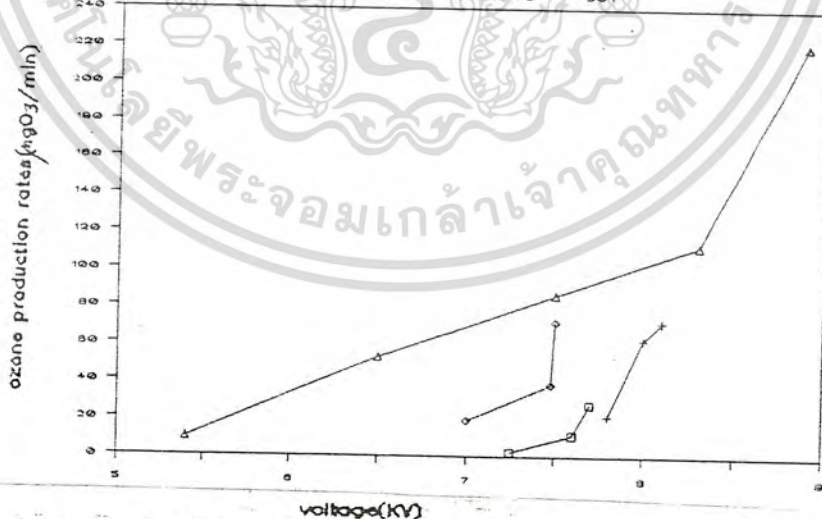


□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 14.1 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า กระแสขนาด 1 ca. ไม่เคลือบฉนวน 1พ DC⁺

OZONE PRODUCTION RATES-VOLTAGE

GAP 1 CM. NO DIELECTRIC OCT



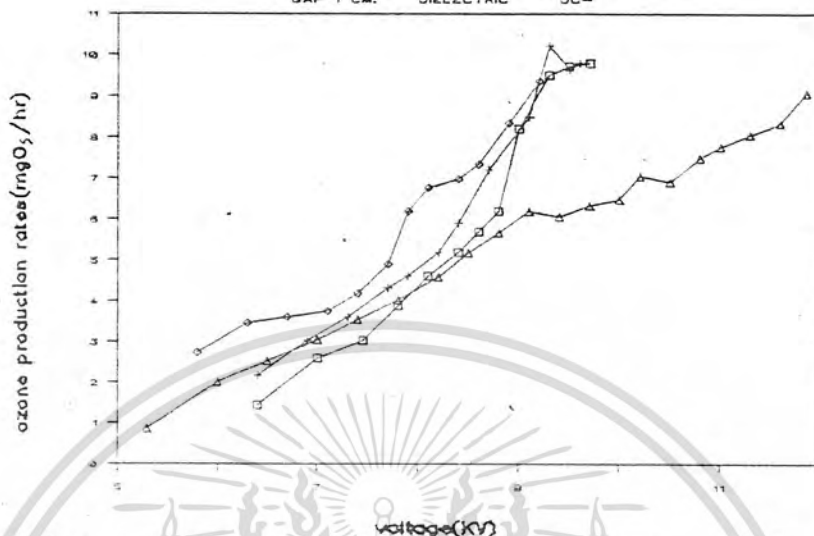
□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 14.2 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า กระแสขนาด 1 ca. ไม่เคลือบฉนวน 1พ DC⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ให้นำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE PRODUCTION RATES—VOLTAGE

GAP 1 CM. DIELECTRIC DC-

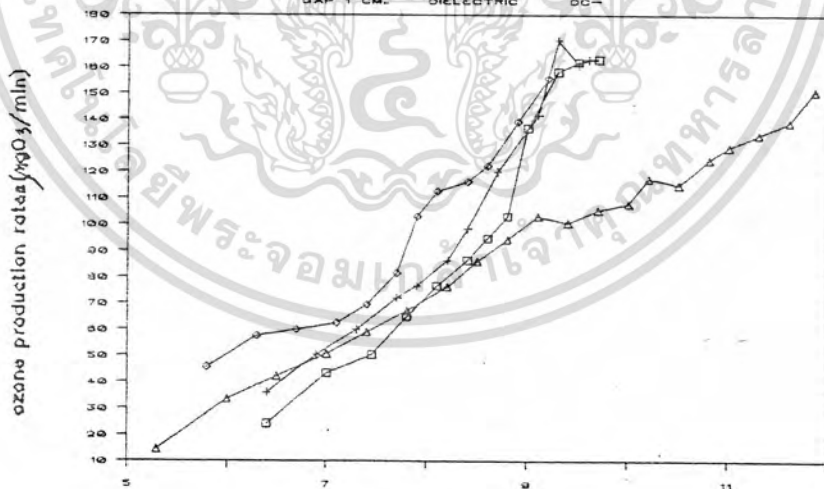


□ 754 g. points + 1508 g. points ◇ 3016 g. points △ 210 points

กราฟที่ 15.1 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า กระแสขนาด 1 cm. เฉลี่ยความหนาแน่นกระแส ไฟ DC

OZONE PRODUCTION RATES—VOLTAGE

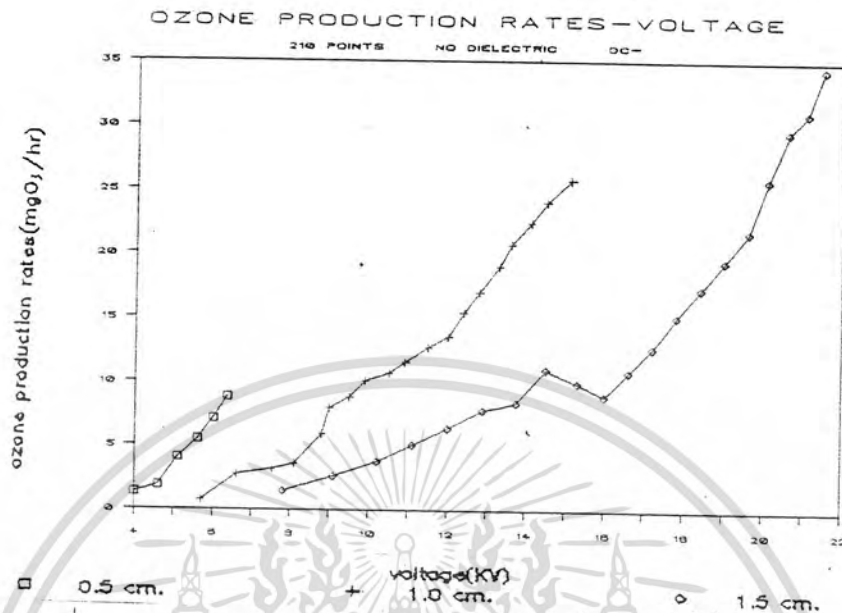
GAP 1 CM. DIELECTRIC DC-



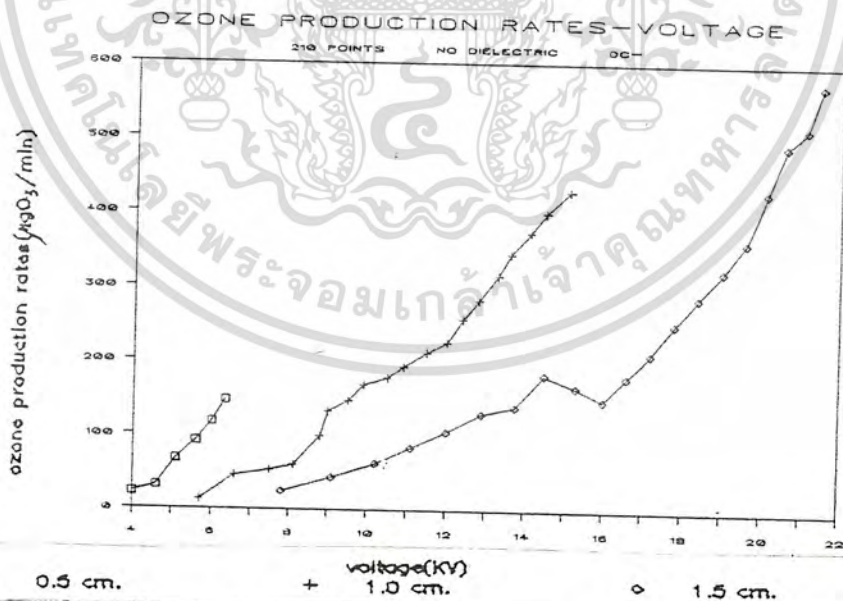
□ 754 g. points + 1508 g. points ◇ 3016 g. points △ 210 points

กราฟที่ 15.2 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า กระแสขนาด 1 cm. เฉลี่ยความหนาแน่นกระแส ไฟ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



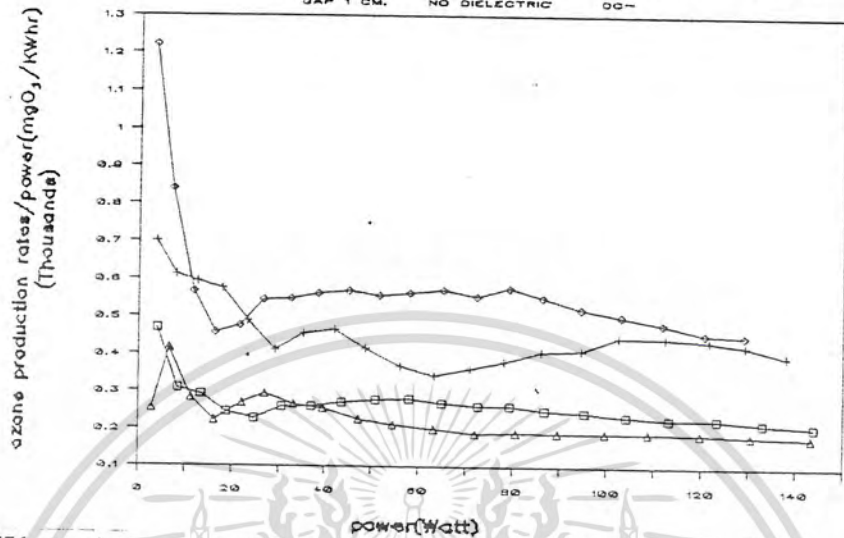
กราฟที่ 17.1 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า อิเล็กโตรดแบบทรงแปดเหลี่ยม 210 ท่าง. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC



กราฟที่ 17.2 อัตราการเกิดโอโซนกับแรงดันไฟฟ้า อิเล็กโตรดแบบทรงแปดเหลี่ยม 210 ท่าง. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

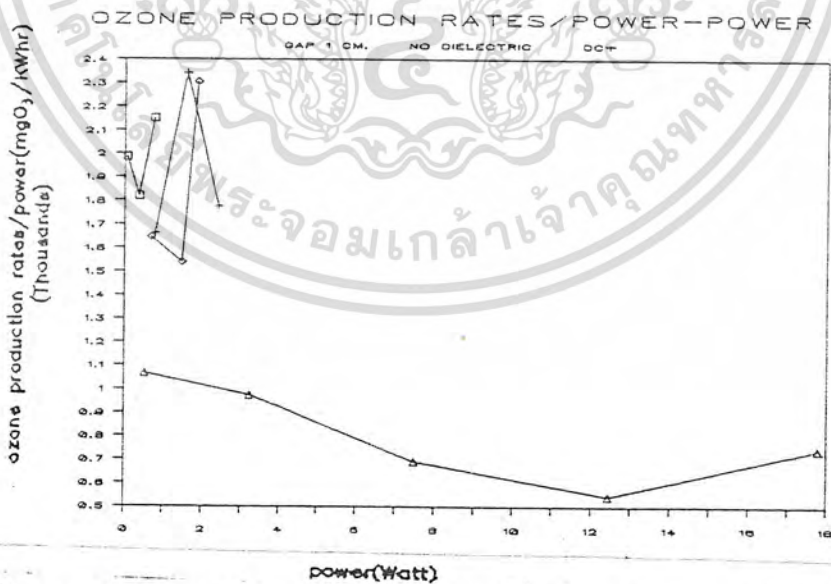
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE PRODUCTION RATES/POWER-POWER



□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points ▲ 210 points

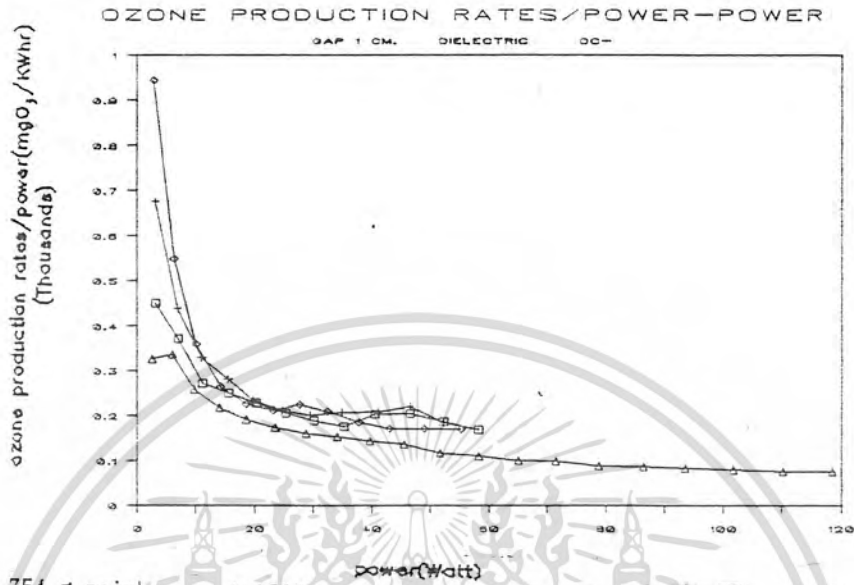
กราฟที่ 18 อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานกับกำลังงาน ระยะนกบ 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไฟ DC



□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points ▲ 210 points

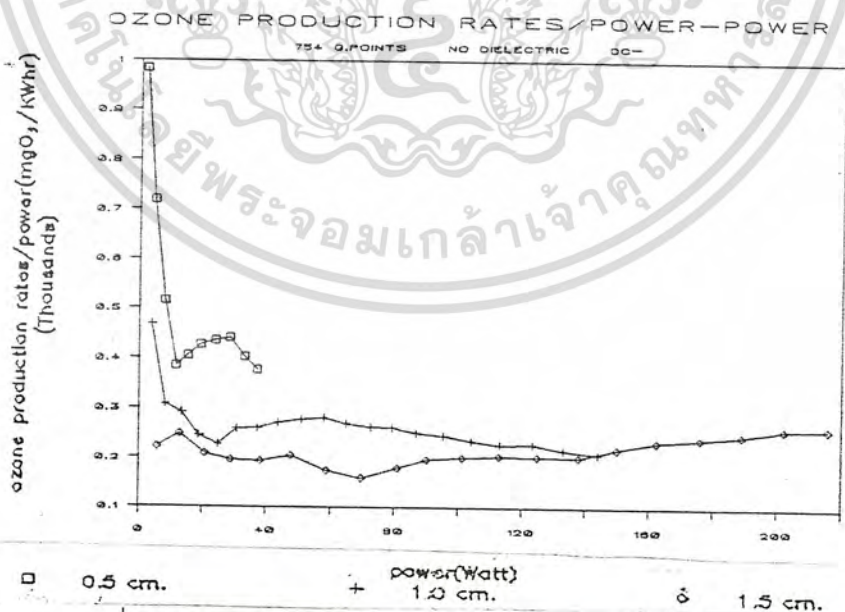
กราฟที่ 19 อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานกับกำลังงาน ระยะนกบ 1 cm. ไม่เคลือบฉนวน ไฟ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



□ 754 g. points + 1508 g. points ◇ 3016 g. points ▲ 210 points

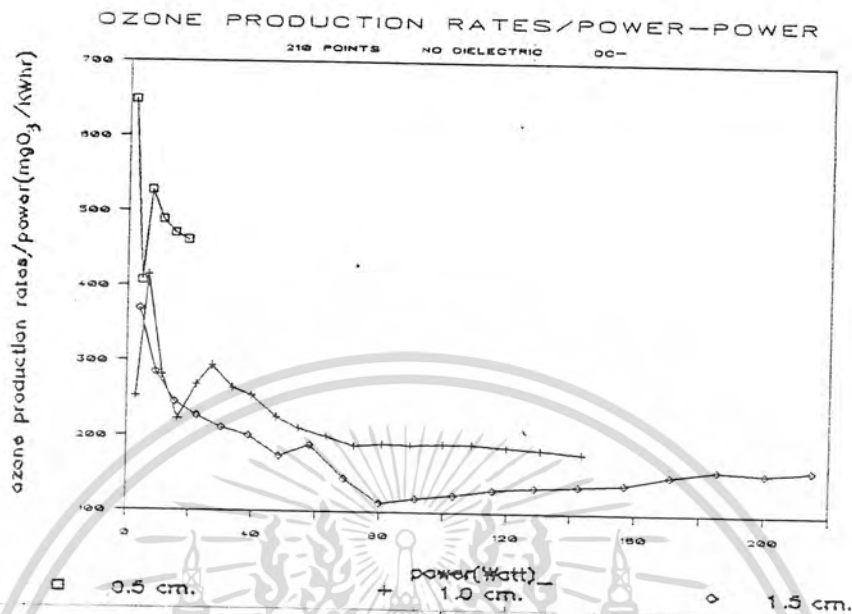
กราฟที่ 20 อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานที่ทำงาน ระยะแกป 1 ซม. เคลือบฉนวนแลคเกอร์ ไซ DC



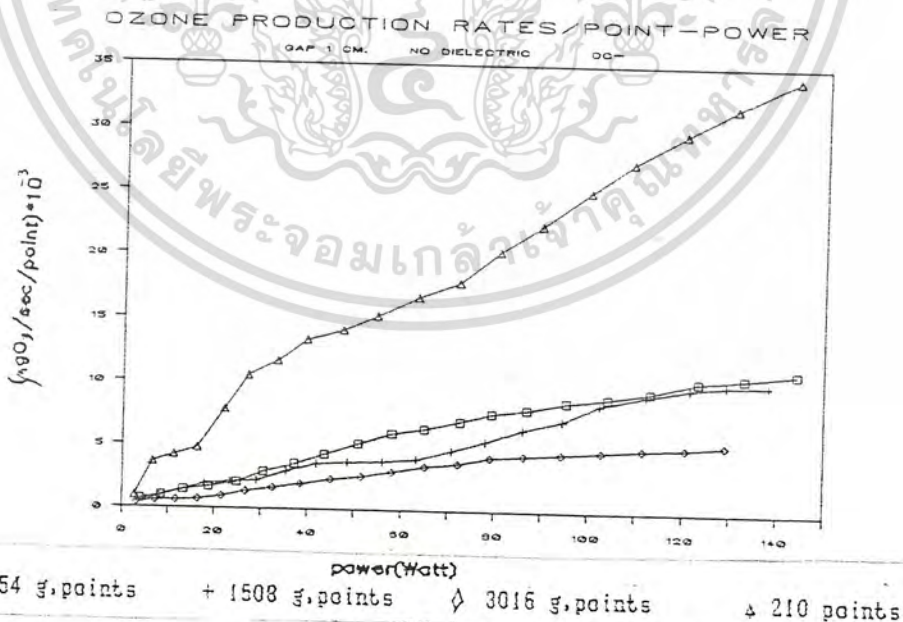
□ 0.5 cm. + 1.0 cm. ◇ 1.5 cm.

กราฟที่ 21 อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานที่ทำงาน อิเลคโตรดเป็นกลุ่มเข็มเส้นลวด 754. วัต. ไม่เคลือบฉนวน ไซ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



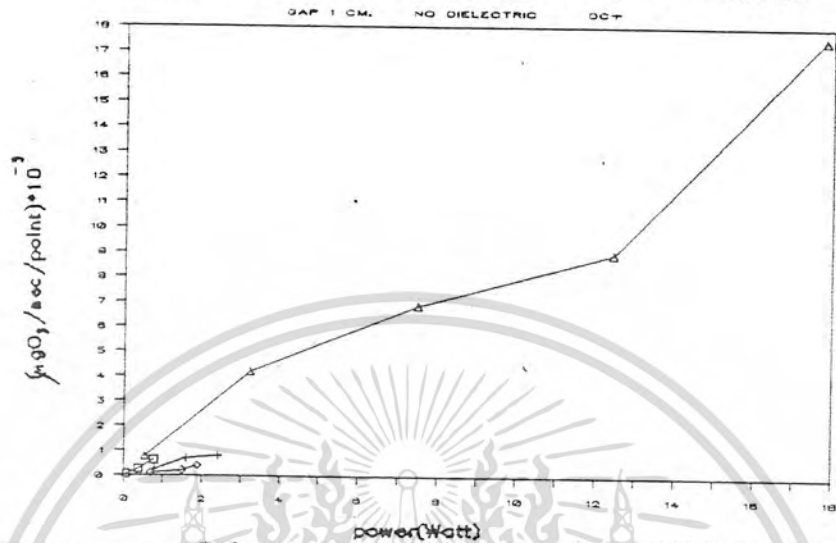
กราฟที่ 22 อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังงานที่ทำงาน อิเล็กโตรดเป็นแท่งพลาสติก 210 แห่ง, ไม่เคลือบฉนวน ไฟ DC



กราฟที่ 23 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดอิเล็กโตรดกับกำลังงาน ที่ระยะแกป 1 cm. แท่งพลาสติก 210 แห่ง, ไม่เคลือบฉนวน, ไฟ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

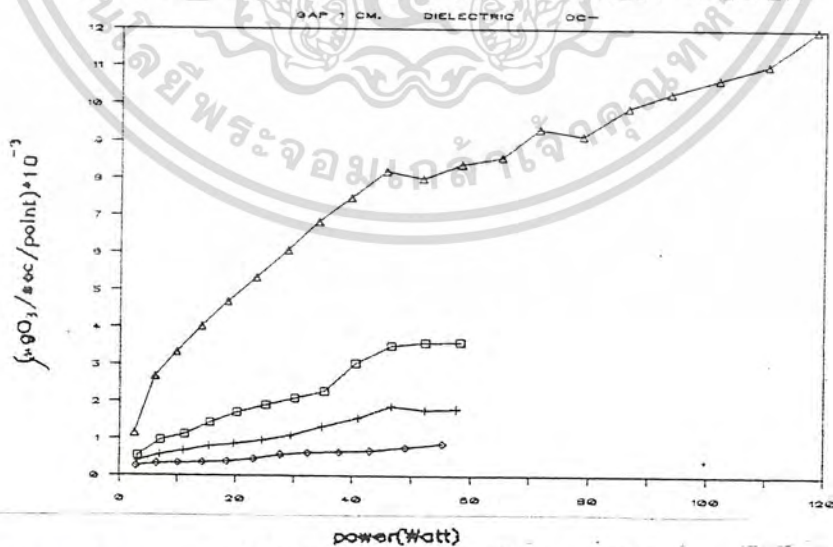
OZONE PRODUCTION RATES/POINT-POWER



□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 24 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดต่อวัตต์ที่ต่าง ๆ ระยะห่างขั้ว 1 ซม. แบ่งปลายแหลม 210 แห่ง ใช้เซลล์เหนวน 14 DC

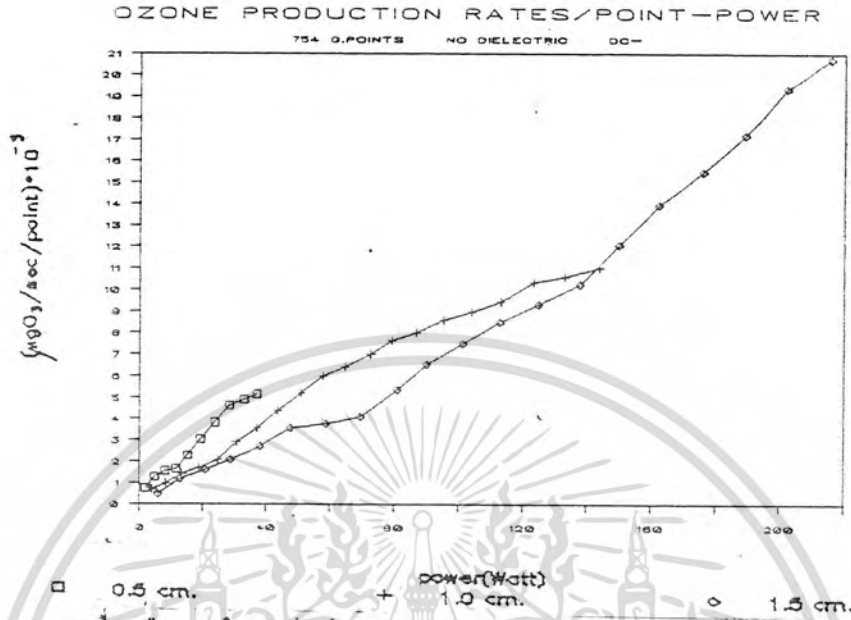
OZONE PRODUCTION RATES/POINT-POWER



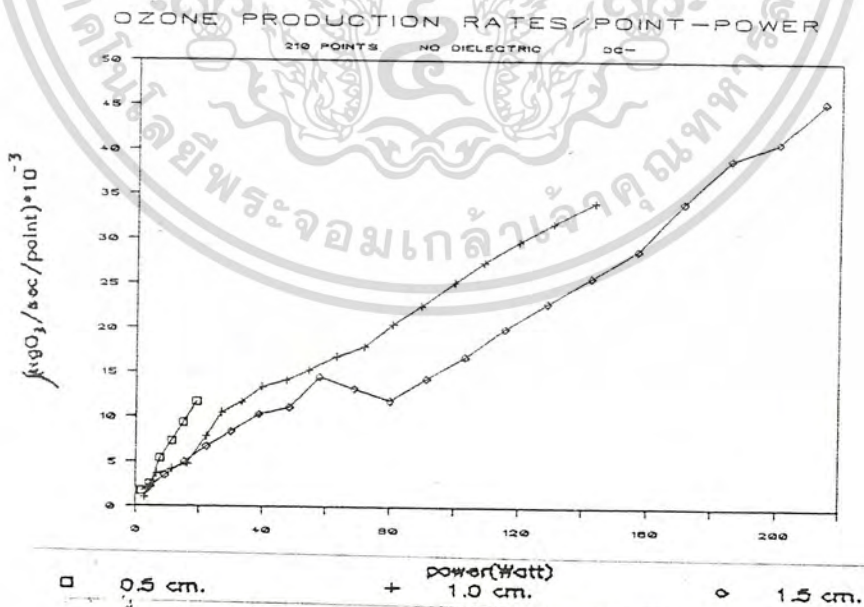
□ 754 g.points + 1508 g.points ◇ 3016 g.points △ 210 points

กราฟที่ 25 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดต่อวัตต์ที่ต่าง ๆ ระยะห่างขั้ว 1 ซม. แบ่งปลายแหลม 210 แห่ง ใช้เซลล์เหนวนผลึกเกอร์ 14 DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 26 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดอิเล็กโตรดกับกำลังงาน กลุ่มอิเล็กโตรด 754 จุด ไม่เคลือบฉนวน ใช้ DC



กราฟที่ 27 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดอิเล็กโตรดกับกำลังงาน อิเล็กโตรดปลายแหลม 210 แห่ง ไม่เคลือบฉนวน ใช้ DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่แสดงผลของความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ จะได้ว่า
ที่ระดับแรงดันเดียวกัน ระยะแกบเท่ากัน อิเล็กโตรด ที่มีจำนวนจุดมากกว่าจะให้กระแสโคโรน่า
มากกว่าด้วย

- ณ ที่ระดับแรงดันเดียวกัน ระยะแกบเท่ากัน ชนิดไฟที่ป้อนเป็นกระแสตรงบวก จะให้
กระแสโคโรน่าน้อยกว่าแบบชนิดไฟที่ป้อนเป็นกระแสตรงลบ . และยังพบว่าไฟกระแสตรงบวกก่อให้เกิด
เบรคดาวน์ที่แรงดันต่ำกว่าไฟกระแสตรงลบ

- การเบรคดาวน์จะเกิดขึ้น ณ ที่แรงดันต่ำกว่า สำหรับรูปแบบอิเล็กโตรดที่มีการ
เคลือบไดอิเล็กตริกที่ plate และ ณ ระดับแรงดันเดียวกัน จะให้กระแสโคโรน่ามากกว่า

- ถ้าระยะแกบมากขึ้น จะต้องเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นเพื่อให้ได้กระแสเท่ากัน และที่ระยะ
แกบมากกว่าจะสามารถเพิ่มแรงดันเพื่อให้ได้กระแสโคโรน่ามากกว่า ขณะที่ระยะแกบน้อย ๆ จะทำ
ได้น้อย

- เมื่อพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบกระแสโคโรน่าที่อิเล็กโตรดจุดหนึ่งๆจะพบว่า อิเล็กโตรด
ปลายแหลมจะให้กระแสโคโรน่ามากกว่าอิเล็กโตรดแบบกลุ่มลวด ดังนั้น ถ้าหากสามารถเพิ่มจำนวน
จุดให้มากเท่าจำนวนจุดอิเล็กโตรดแบบกลุ่มลวด กระแสโคโรน่ารวมก็จะสูงกว่า

- จากกราฟที่ 9 รูปแบบอิเล็กโตรดที่มีจำนวนจุดอิเล็กโตรดมากที่สุด คือ กลุ่มลวด 3016
จุด จะให้อัตราการกำเนิดโอโซนสูงสุด คือ $58 \text{ mgO}_3/\text{hr}$ (ที่ 12.8 kV, 128 Watt)
ไฟที่ใช้คือกระแสตรงลบ และที่ใ้มากรองลงมา คือ แบบที่มี 1508 จุด , 754 จุด และอิเล็กโตรด
ปลายแหลม 210 จุด

เมื่อพิจารณากราฟ Ozone production rate-power กับกราฟ current-voltage
พบว่า ปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ไปในแนวเดียวกันกับกระแสโคโรน่าและแรงดัน

- จากกราฟที่ 18-กราฟที่ 22 ที่อัตราการเกิดโอโซนต่อกำลังไฟฟ้าหนึ่งหน่วย (KWhr)
จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เครื่องที่มีกำลังเพิ่มขึ้น (V, I เพิ่มขึ้น) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพลังงานโคโร
น่าที่ใช้ไปมีบางส่วนที่เปลี่ยนไปเป็นความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้อัตราการเกิดโอโซน
ลดลง

- จากกราฟที่ 23-กราฟที่ 25 อัตราการเกิดโอโซนต่อจุดอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมจะ
ให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ ค่าของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ นั่นคือ ถ้าเราสามารถเพิ่มจำนวนจุดอิเล็กโตรดแบบ
ปลายแหลมให้มีค่าจำนวนจุดเท่ากับจำนวนจุดอิเล็กโตรดแบบกลุ่มลวด ก็จะทำให้ได้อัตราการเกิด
โอโซนรวมสูงที่สุดด้วยและพบว่าอัตราการเกิดโอโซนต่อจุดที่ต่ำที่สุดเป็นของอิเล็กโตรดแบบ 3016
จุด (กลุ่มลวด) ทั้งที่อัตราการเกิดโอโซนรวมสูงสุด ทั้งนี้เพราะนอกจากจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัว
ของอิเล็กโตรดแล้ว ยังเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กโตรด ทำให้มีเพียงบางส่วนของจุด
อิเล็กโตรดเท่านั้น ที่มีส่วนให้กระแสโคโรน่าหรือกำเนิดโอโซน

- ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้สูงสุด คือ $966 \text{ micro gO}_3/\text{min}$ (ไมโครกรัม โอโซน/
นาที) หรือ $58 \text{ mgO}_3/\text{hr}$ จากชุดอิเล็กโตรดแบบ 3016 จุด แม้อิเล็กโตรดจะหาไม่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับข้าราชการเพื่อกำหนดตำแหน่ง เมื่อผู้จัดทำแบบใช้ประโยชน์ในการค้ำ
ไมวารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ปรากฏบนฉบับใช้

เคลือบไดอิเล็กตริก ไฟที่ป้อน คือ กระแสตรงลบ โดยที่ใช้พลังงานโคโรนา 129 Watt (ที่ 12.9 kV, 10 mA)

นั่นคือ ที่ 1 ชั่วโมง จะผลิตโอโซนได้ 58 mg

โดยที่ใช้พลังงาน = 0.129 kWhr

สมมติให้ ค่าไฟชุนิตละ 2 บาท

ดังนั้น โอโซน 58 mg สามารถผลิตได้ในราคา = 2×0.129
= 0.258 บาท

หรืออาจกล่าวได้ว่า ลงทุนค่าไฟ 1 บาท จะได้โอโซน 225 mg

(จากชุดอิเล็กโตรด 3016 จุด แผ่นระนาบไม่เคลือบไดอิเล็กตริก ระยะแกป 1 cm. ป้อนไฟกระแสตรงลบ ใช้ที่ 12.9 kV)

ในการทดลองเมื่อพ่นโอโซนลงไปสัมผัสกับน้ำเสียเพื่อทำการบำบัดจะสังเกตเห็นสีที่เปลี่ยนไปคือ ใสขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่พ่นอากาศ และตัวอย่างเปรียบเทียบกับ

แสดงว่า โอโซนสามารถบำบัดได้

ในส่วนของน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน เช่น แมงกานีส, เหล็ก ยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ตามทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจาก ยังมีปัจจัยอื่นที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องอยู่ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับสารละลายแมงกานีส (Mn^{2+} ; จำลองน้ำเสียที่มีแมงกานีสละลายอยู่) เมื่อพ่นโอโซนลงไปจะพบว่า สารละลายเริ่มมีการตกตะกอน แต่ก็ไม่สามารถคำนวณหาปริมาณ Mn^{2+} ที่ตกตะกอนลงไปได้จึงไม่สามารถบอกได้ว่า โอโซนที่ผลิตได้สูงสุด บำบัดน้ำเสียที่มีแมงกานีสได้มากเท่าไร

แต่ถ้าเอาค่าตามทฤษฎีมาคำนวณ คือ ปริมาณโอโซน 0.87 mg จะทำปฏิกิริยากับแมงกานีสให้ตกตะกอนไป 1 mg

นั่นคือ ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้สูงสุด คือ 58 mg/hr

จะสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีแมงกานีสอยู่ได้ เป็นปริมาณ แมงกานีส = $58 = 1/0.87$
= 67 mg

โดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์

7.1 เครื่องต้นแบบของเครื่องกำเนิดโอโซนที่สร้างขึ้นประกอบด้วยชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงแบบไม่สมมาตร และพีดลมที่ใช้ดูดอากาศให้เคลื่อนผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่กรณีต่าง ๆ พบว่า ปริมาณกระแสโคโรน่าและปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยแล้วแต่กรณี และในกรณีของชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบกลุ่มลวด 3016 จุด (จำนวนจุดอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด), แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ระบายไม่เคลือบแลคเกอร์, ไฟกระแสตรงลบ จะให้ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้รวมต่อเวลาสูงสุด คือประมาณ 966 ไมโครกรัมต่อนาที แต่ถ้าพิจารณาถึงอัตราการเกิดต่อจุดอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งปลายแหลมจะให้ค่าสูงกว่าแบบอิเล็กทรอนิกส์กลุ่มลวด นั่นคือ ถ้าเพิ่มจำนวนจุดอิเล็กทรอนิกส์ของอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งปลายแหลมให้เท่ากับจำนวนจุดอิเล็กทรอนิกส์แบบกลุ่มลวด แล้วทำให้กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งปลายแหลมได้อัตราการเกิดโอโซนรวมสูงกว่า

7.2 ส่วนของการบำบัดน้ำเสียยังไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างเด่นชัดทั้งนี้เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องอยู่และปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ยังอาจน้อยเกินไป แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถแสดงให้เห็นอย่างง่าย ๆ ว่า โอโซนบำบัดน้ำได้ คือ ดูจากสีที่ใสขึ้นของน้ำเสีย หรือ ดูจากตะกอนที่เกิดขึ้นของสารละลายแมงกานีสหลังการพ่นโอโซน

7.3 ปริมาณโอโซนที่วัดได้ เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการเตรียมความเข้มข้นของสารที่ใช้วัดให้ถูกต้องอย่างละเอียดและความไม่ชำนาญของนักศึกษาที่ทำการใช้เครื่องมือ

7.4 แนวทางการพัฒนา

7.4.1 การปรับระดับปลายอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมให้เท่ากันนั้นทำได้ยาก ควรหาวิธีปรับปรุงทั้งนี้เพราะเป็นการป้องกันไม่ให้มีปลายแหลมที่ยาวกว่าแท่งอื่น (ระยะแกบน้อยกว่า) เบรคดาวนก่อน เป็นปัญหาต่อการเพิ่มแรงดันเพื่อที่จะให้เกิดกระแสโคโรนามากขึ้น นั้นหมายความว่า ปลายแหลมที่ยาวกว่าแท่งอื่น ๆ จะให้กระแสโคโรนามากกว่าและเบรคดาวนที่แรงดันต่ำกว่าขณะที่ปลายแหลมอื่น ๆ (ที่สั้นกว่าหรือระยะแก่มากกว่า) ยังไม่มีความเครียดสนามไฟฟ้ามากพอที่จะให้กระแสโคโรน่า ซึ่งก็หมายความว่าปลายแหลมอื่น ๆ ที่สั้นกว่าไม่ได้ถูกใช้ให้เกิดประโยชน์

7.4.2 มอเตอร์ที่ใช้อยู่ขณะนี้ (พีดลมดูดอากาศ) มีกำลังน้อยทำให้การพ่นอากาศหรือโอโซนให้ผสมกับน้ำได้น้อย มีผลให้การวัดปริมาณโอโซน (ซึ่งใช้วิธีการเคมีโดยใช้สารละลายโพตัสเซียมไอโอไดน์ทำปฏิกิริยากับโอโซนจะได้ไอโอดีนออกมา จากนั้นนำไอโอดีนไปทำการไตเตรทหาปริมาณโอโซนโดยการคำนวณ) คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง นั่นคือ จะน้อยกว่าที่เครื่องผลิตได้ ทั้งนี้เพราะโอโซนที่เกิดขึ้นจากความปฏิกิริยาเป็นจริง นั่นคือ จะน้อยกว่าที่เครื่องผลิตได้ ทั้งนี้เพราะโอโซนที่เกิดขึ้นไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายโพตัสเซียมไอโอดีนได้หมดในเวลาอันสั้น ดังนั้นควร

เปลี่ยนมอเตอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะสามารถพ่นโอโซนผสมกับสารละลายโพตัสเซียมไฮโอไดด์ ได้ลึกมากขึ้น - ระยะเวลาที่ทําปฏิกิริยาก็มากขึ้น การวัดก็จะแม่นยำขึ้น

นอกจากนี้การเพิ่มขนาดมอเตอร์ยังมีประโยชน์ต่อการนำโอโซนที่ผลิตได้ไปบำบัดน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะระยะเวลาที่โอโซนสัมผัสกับน้ำ (contact time) มากขึ้น การทําปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับน้ำก็เกิดได้มากขึ้น

7.4.3 เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากพลังงานโคโรนาที่อิเล็กโตรดส่วนที่สร้างโอโซน (รวมพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมด้วย) มีผลให้อัตราการเกิดโอโซนลดลง ขณะที่อัตราการสลายตัวของโอโซนเพิ่มขึ้น ดังนั้นควรหาวิธีการระบายความร้อนออกจากอิเล็กโตรดสร้างโอโซน ซึ่งก็จะเป็นผลให้การผลิตโอโซนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

7.4.4 เนื่องจากโอโซนมีความสามารถในการทําปฏิกิริยาสูง (oxidized) วัสดุจำพวกยาง, นีโอพรีน, EPDM, เหล็กและอลูมิเนียมไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของตัวสร้างโอโซน รวมทั้งท่อนำโอโซนไปใช้ วัสดุที่สามารถนำมาใช้ได้ stainless steel, แก้ว, ไส้พลาเนทพลอนและคอนกรีต

โอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถบำบัดน้ำเสียได้เป็นอย่างดีสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีไฮดรอกซิล, เหล็ก, แมงกานีส, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, สีส, กลิ่น รวมทั้งฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้น การศึกษาหาแนวทางในการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนให้ได้ปริมาณและประสิทธิภาพที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง

7.5 การบอกปริมาณโอโซนเป็นหน่วย ppm เมื่อทราบความเร็วอากาศที่ผ่านกล่องอิเล็กโตรด เมื่อทราบความเร็วอากาศที่ผ่านกล่องอิเล็กโตรด (ซึ่งได้จากการวัดโดยเครื่องมือหรือจากการคำนวณ เมื่อทราบพิกัด, ชนิดของมอเตอร์และพื้นที่หน้าตัด)

$$\text{สมมติให้ ความเร็วของอากาศผ่านอิเล็กโตรด} = v \text{ m/s}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของกล่องอิเล็กโตรด} = A \text{ m}^2$$

$$\text{ความหนาแน่นของอากาศขณะทดลอง} = \rho \text{ kg/m}^3$$

$$\text{จะได้ ปริมาณอากาศเคลื่อนผ่านอิเล็กโตรด (Air flow rate, Q)} = vA \text{ m}^3/\text{s} \text{ ---1)}$$

$$\text{จาก 1) หมายความว่า ใน 1 วินาทีมีอากาศผ่านกล่องอิเล็กโตรด} = vA \text{ m}^3$$

$$\text{ดังนั้น มวลของอากาศที่เคลื่อนผ่านกล่องอิเล็กโตรด} = \rho vA \text{ kg}$$

$$= 1000 \rho vA \text{ กรัม (ใน 1 วินาที)}$$

สามารถเปลี่ยนหน่วย อัตราการเกิดโอโซน ($\text{micro gO}_3/\text{s}$) ได้ดังนี้

$$\text{จาก } x \text{ micro gO}_3/\text{s} \text{ คือ ใน 1 วินาที เกิดโอโซน} = x \text{ micro g}$$

$$= 10^{-6} \text{ g}$$

เทียบให้เป็น 1 ล้านส่วนของอากาศในช่วงระยะเวลาเดียวกัน

คือ อากาศ 1000 ρvA กรัม มีโอโซน $10^{-6} x$ กรัม

ดังนั้น อากาศ 1,000,000 กรัม มีโอโซน $10^{-6} x \cdot (1,000,000) / (1,000 \rho vA)$

เพราะฉะนั้น $x \text{ micro } gO_3 / s$ = $x / (1000 \mu vA)$
 ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า $y \text{ mg } O_3 / hr$ = $x / (1000 \mu vA) \text{ ppm}$
 $y \text{ mg } O_3 / hr$ = $y / (3600 \mu vA) \text{ ppm}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงการเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไอโชนต้นแบบที่มีจำหน่ายในตลาด รุ่น BO10/50A

เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการกำเนิดไอโชนสูงสุด 58 mgO₃/hr โดยใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 128 วัตต์ (กำลังงานโคโรน่า) รวมกับกำลังของพัดลม 163 วัตต์ เป็น 291 วัตต์ สามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ดังนี้

ข้อมูล	เครื่องต้นแบบ	เครื่องที่มีจำหน่ายในตลาดรุ่น BO10/50A
1. อัตราการเกิดไอโชนสูงสุด	58 mgO ₃ /hr	10000 mgO ₃ /hr
2. กำลังไฟรวมที่ใช้	291 Watt	3000 Watt
3. อัตราการเกิดไอโชนต่อกำลังไฟรวม	0.199 mgO ₃ /hr/Watt	3.33 mgO ₃ /hr/watt
4. ส่วนประกอบ	ก) ชุดอิเล็กทรอนิกส์ - กล่องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับบรรจุแผงอิเล็กทรอนิกส์ ขนาด 15*60 cm. - แผงอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นกลุ่มเส้นลวดจำนวน 4 แผง หรือที่เป็นแท่งปลายแหลม 1 แผง ขนาด 13.5*60 cm. กับแผ่นระนาบ ข) พัดลมดูดอากาศ กำลัง 163 วัตต์	ก) หลอดไอโอดีน (อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกัน) จำนวน 12 หลอด ข) ระบบเตรียมอากาศซึ่งมีถังดูดความชื้น 2 ถัง ไว้ใช้งานสลับกัน ค) ระบบระบายความร้อน ให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ ง) ระบบควบคุมของตัวผลิตไอโชนและบูสเตอร์ปั๊มของระบบหัวฉีด รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันสูง - คอมพิวเตอร์ - หม้อแปลงแรงสูง - มอเตอร์ - หม้อแปลงควบคุมแรงดัน - โทเทินซีโอมิเตอร์ - เครื่องส่งสัญญาณคัลโคมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 5. ราคา ใ้ว่าครุฑีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงแหล่งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ไม่เกิน 2000 บาท ไม่ต่ำกว่า 1000000 บาท

- An electrode system for measuring dissolved oxygen. *Anal. Chem.* 31:5.
19. MANCY, K.H. & W.C. WESTGARTH. 1962. A galvanic cell oxygen analyzer. *J. Water Pollut. Control Fed.* 34:1037.
 20. MANCY, K.H., D.A. OKUN & C.N. REILLEY. 1962. A galvanic cell oxygen analyzer. *J. Electroanal. Chem.* 4:65.
 21. WEISS, C.M. & R.T. OGLESBY. 1963. Instrumentation for monitoring water quality in reservoirs. American Water Works Ass. 83rd Annual Conf., New York, N.Y.
 22. CLEARY, E.J. 1962. Introducing the ORSANCO robot monitor. *Proc. Water Quality Meas. Instrum. Publ. No. 108*, U.S. Public Health Serv., Washington, D.C.
 23. MACKERETH, F.J.H. 1964. An improved galvanic cell for determination of oxygen concentrations in fluids. *J. Sci. Instrum.* 41:38.
 24. SULZER, F. & W.M. WESTGARTH. 1962. Continuous D.O. recording in activated sludge. *Water Sewage Works* 109:376.
 25. DUXBURY, A.C. 1963. Calibration and use of a galvanic type oxygen electrode in field work. *Limnol. Oceanogr.* 8:483.
 26. LIPNER, H.J., L.R. WITHERSPOON & V.C. CHAMPEAUS. 1964. Adaptation of a galvanic cell for microanalysis of oxygen. *Anal. Chem.* 36:204.

422 OZONE (RESIDUAL)*

Ozone, O₃, a potent germicide, also is used as an oxidizing agent for the destruction of organic compounds producing taste and odor in water, for the destruction of organic coloring matter, and for the oxidation of reduced iron or manganese salts to insoluble oxides, which can be precipitated or filtered from the water.

1. General Discussion

The iodometric method described is quantitative, subject to few interferences except for most volatile oxidants, and capable of good precision. The method also can be used for the determination of ozone in air by absorption of the ozone in iodide solution.

If iodometric titration is considered undesirable, any method for measuring residual chlorine (see Section 408) may be applied after ozone stripping into the adsorber has been completed. These methods determine iodine with acceptable accuracy.

The ozone concentration in water, air, or oxygen also can be determined continuously by photometric instruments, which measure the strong absorption ozone exerts at the wavelength of 253.7 nm.

a. Principle: Ozone liberates iodine from a potassium iodide (KI) solution. For accurate results make the solution alkaline during absorption of ozone. In practice, KI solutions quickly become alkaline during the process, so buffering is not required. After immediate acidification, the liberated iodine is titrated with standard 0.005*M* so-

dium thiosulfate (Na₂S₂O₃) with starch indicator.

b. Interference: Because ozonated water may contain manganese dioxide, ferric ion, chlorine, possibly peroxide, and other oxidation products, avoid these interferences by passing the ozone through the gaseous phase into a KI solution for titration. Titrating a sample added directly to the KI solution (without first passing ozone through the gaseous phase), as compared with titrating after ozone stripping, will indicate whether interfering oxidants are present. If such interferences are absent or negligible, ozone transfer through inert gas stripping may be eliminated.

The stability of ozone solutions decreases progressively at each increment in temperature above freezing and with each increment in pH above 3.0.

c. Sampling and storage: Determine ozone immediately; samples cannot be preserved or stored because of instability of the residual. The stability of residual ozone is markedly improved at low temperatures and low pH. Minimize aeration during sample collection.

d. Minimum detectable concentration: Approximately 30 μg O₃/L.

2. Apparatus

The following are required for sample collection:

a. Gas-washing bottles and absorbers, 1-L and 500-mL capacities. To prevent loss of ozone on glass frits found on standard wash bottles, cut off glass diffusers and draw tube into a 1-mm tip extending to approximately 5 mm from bubbler bottom.

b. Pure air or pure nitrogen gas supply, 0.2- to 1.0-L/min capacity.

c. Glass, stainless steel, or aluminum piping, for carrying ozonized air. Good-quality polyvinyl† tubing also may be used for short runs, but do not use rubber.

3. Reagents

a. Potassium iodide solution: Dissolve 20 g KI, free from iodine, iodate, and reducing agents, in 1 L freshly boiled and cooled distilled water. Store in a brown bottle in a refrigerator. Store at least 1 d before using.

*b. Sulfuric acid, H₂SO₄, 1*N*.*

*c. Standard sodium thiosulfate, 0.1*M*:* Dissolve 25 g Na₂S₂O₃ · 5H₂O in 1 L freshly boiled distilled water. Standardize against potassium bi-iodate (also called potassium hydrogen iodate) or potassium dichromate according to the procedure described in Section 408A.2c.

*d. Standard sodium thiosulfate titrant, 0.005*M*:* Dilute proper volume (approximately 50 mL) of 0.1*M* Na₂S₂O₃ to 1000 mL. For accurate work, standardize this solution daily, using either 0.005*M* potassium bi-iodate or potassium dichromate solution. Standardize as described in ¶ 4c below; 1.00 mL standard Na₂S₂O₃ titrant, 0.005*M* = 120 μg O₃.

e. Starch indicator solution: Use either an aqueous solution or soluble starch powder mixtures.

To prepare aqueous solution, add a cold water suspension of 5 g arrowroot or soluble starch to approximately 800 mL boiling water, with stirring. Dilute to 1 L, boil a few minutes, and let settle overnight. Use clear supernate. Preserve with 1.25 g salicylic acid/L or by adding a few drops of toluene.

*f. Standard iodine, 0.1*M*:* Dissolve 40 g KI in 25 mL distilled water. Add 13 g resublimed iodine and stir until dissolved. Dilute to 1 L and standardize as described in Section 408B.3g.

*g. Standard iodine, 0.005*M*:* Dissolve 16 g KI in a little distilled water in a 1-L volumetric flask, add proper volume (approximately 50 mL) of 0.1*M* iodine solution, and dilute to mark. For accurate work, standardize daily. Store solution in a brown bottle or in the dark. Protect from

*Approved by Standard Methods Committee, 1981.

†Tygon, US Stoneware Company, or equivalent.

direct sunlight at all times and keep from all contact with rubber.

4. Procedure

a. Sample collection: Collect an 800-mL sample in a 1-L gas washing bottle.

b. Ozone absorption: Pass a stream of pure air or N₂ through sample and then through an absorber containing 400 mL KI solution. Continue for 5 to 10 min at a rate of 0.2 to 1.0 L/min to insure that all ozone is swept from sample and absorbed in KI solution.

c. Titration: Transfer KI solution to a 1-L beaker, rinse absorber, and add 20 mL 1N H₂SO₄ to reduce pH below 2.0. Titrate with 0.005M Na₂S₂O₃ titrant until yellow color of liberated iodine almost is discharged. Add 4 mL starch indicator solution and continue titrating carefully but rapidly to the end point, at which the blue color just disappears. Long contact of iodine and starch develops a blue compound that is difficult to decolorize. The end point may be determined amperometrically as described in Section 408C.4b except that Na₂S₂O₃ can be used as the titrant. Other procedures given in Section 408 for measuring iodine may be used.

d. Blank test: Correct sample titration result by determining blank contributed by such reagent impurities as free iodine or iodate in KI, or traces of reducing agents that might reduce liberated iodine.

Take 400 mL KI solution, 20 mL 1N H₂SO₄, and 4 mL starch indicator solution. Perform whichever blank titration below applies:

1) If a blue color appears, titrate with 0.005M Na₂S₂O₃ to disappearance of blue and record result.

2) If no blue color appears, titrate with 0.005M iodine solution until a blue color appears. Back-titrate with 0.005M Na₂S₂O₃ to disappearance and record difference.

Before calculating ozone concentration subtract blank titration in ¶ 4d1) from sample titration, or add result of ¶ 4d2) above.

5. Calculation

$$\text{mg O}_3/\text{L} = \frac{(A \pm B) \times M \times 24\,000}{\text{mL sample}}$$

where:

A = mL titrant for sample,

B = mL titrant for blank (positive or negative), and

M = molarity of Na₂S₂O₃.

6. Interpretation of Results

The precision of the test is within $\pm 1\%$ for concentrations of 3 mg O₃/L or greater. However, rapid decrease of the residual occurs in the time elapsing between sampling and testing. Temperature also is an important factor in the decrease.

7. Bibliography

BIRDSALL, C.M., A.C. JENKINS & E. SPADINGER. 1952. The iodometric determination of ozone. *Anal. Chem.* 24:662.

ZEHENDER, F. & W. STUMM. 1953. Determination of ozone in drinking water. *Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg.* 44:206.

INGOLS, R.S., R.H. FETNER & W.H. EBERHARDT. 1956. Determination of ozone in solution. Proc. Int. Ozone Conf., American Chemical Soc., Advan. Chem. Ser. No. 21.

BYERS, T.H. & B.E. SALTZMAN. 1958. Determination of ozone and air by neutral and alkaline iodide procedures. *J. Ind. Hyg. Ass.* 19:251.

SALTZMAN, B.E. & N. GILBERT. 1959. Iodometric microdetermination of organic oxidants and ozone. *Anal. Chem.* 31:1914.

ALTSHULLER, A.P., C.M. SCHWAB & M. BARE. 1959. Reactivity of oxidizing agents with potassium iodide reagent. *Anal. Chem.* 31:1987.

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. 1965. Selected Methods for the Measurement of Air Pollutants. Publ. No. 999-AP-11, U.S. Public Health Serv., Washington, D.C.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1972. Method of Air Sampling and Analysis. Intersociety Comm., American Public Health Ass., Washington, D.C.

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. 1974. NIOSH Manual of Analytical Methods. Publ. No. (NIOSH) 75-121,

U.S. Dep. Health, Education & Welfare, Washington, D.C.

423 pH VALUE*

Measurement of pH is one of the most important and frequently used tests in water chemistry. Practically every phase of water supply and wastewater treatment, e.g., acid-base neutralization, water softening, precipitation, coagulation, disinfection, and corrosion control, is pH-dependent. pH is used in alkalinity and carbon dioxide measurements and many other acid-base equilibria. At a given temperature the *intensity* of the acidic or basic character of a solution is indicated by pH or hydrogen ion activity. Alkalinity and acidity are the acid- and base-neutralizing capacities of a water and usually are expressed as milligrams CaCO₃ per liter. Buffer capacity is the amount of strong acid or base, usually expressed in moles per liter, needed to change the pH value of a 1-L sample by 1 unit. pH as defined by Sorenson¹ is $-\log [H^+]$; it is the "intensity" factor of acidity. Pure water is very slightly ionized and at equilibrium the ion product is

$$[H^+][OH^-] = K_w \\ = 1.01 \times 10^{-14} \text{ at } 25^\circ\text{C} \quad (1)$$

and

$$[H^+] = [OH^-] \\ = 1.005 \times 10^{-7}$$

where:

[H⁺] = activity of hydrogen ions, moles/L,
[OH⁻] = activity of hydroxyl ions, moles/L, and
K_w = ion product of water.

Because of ionic interactions in all but very dilute solutions, it is necessary to use the "activity" of an ion and not its molar concentration. Use of the term pH assumes that the activity of the hydrogen ion, *a*_{H⁺}, is being considered. The *approximate* equivalence to molarity, [H⁺] can be presumed only in very dilute solutions (ionic strength < 0.1).

A logarithmic scale is convenient for expressing a wide range of ionic activities. Equation 1 in logarithmic form and corrected to reflect activity is:

$$(-\log_{10} a_{H^+}) + (-\log_{10} a_{OH^-}) = 14 \quad (2)$$

or

$$\text{pH} + \text{pOH} = \text{p}K_w$$

where:

$$\text{pH} = -\log_{10} a_{H^+} \text{ and} \\ \text{pOH} = -\log_{10} a_{OH^-}.$$

Equation 2 states that as pH increases pOH decreases correspondingly and vice versa because pK_w is constant for a given temperature. At 25°C, pH 7.0 is neutral, the activities of the hydrogen and hydroxyl ions are equal, and each corresponds to an approximate activity of 10⁻⁷ moles/L. The neutral point is temperature-dependent and is pH 7.5 at 0°C and pH 6.5 at 60°C.

The pH value of a highly dilute solution is approximately the same as the negative common logarithm of the hydrogen ion concentration. Natural waters usually have pH values in the range of 4 to 9, and most

*Approved by Standard Methods Committee, 1985

to designate $-\log$ of a number

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยเหลือเพื่อเอกสารคำแนะนำและอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาเอน์ดังต่อไปนี้

อ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะและถ่ายทอดความรู้ต่าง ๆ ในการทำโครงการ

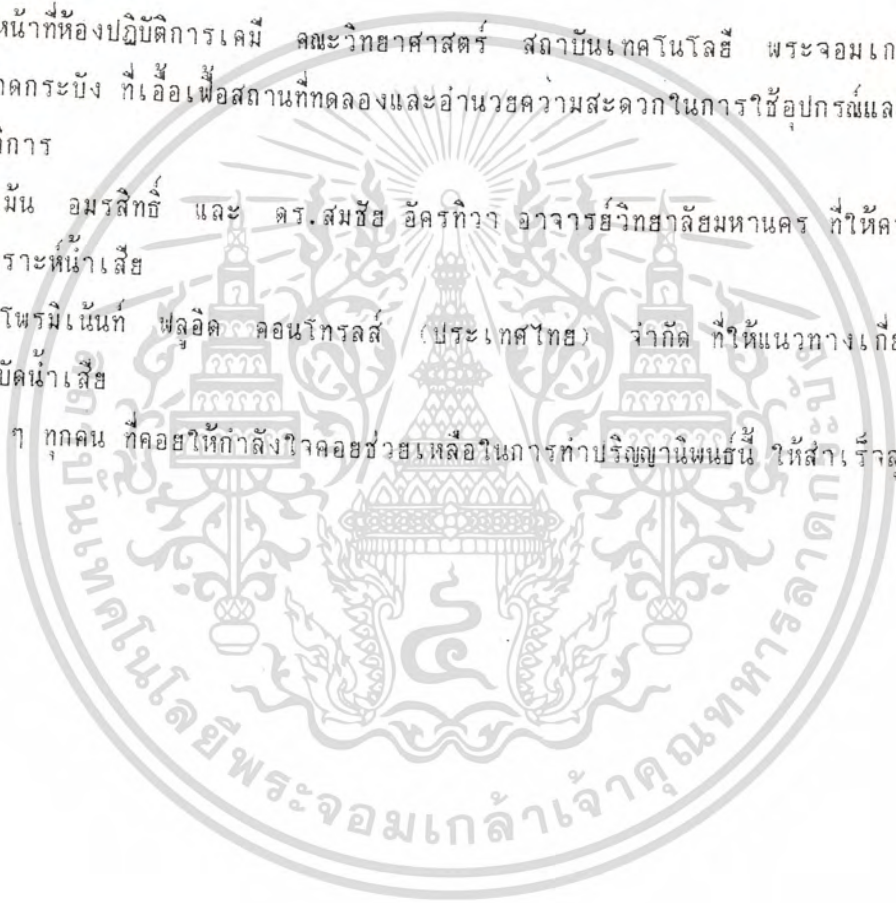
อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าฯ เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยค้นคว้าในการหาวิธีวัดไอโซน

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าฯ เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และสารเคมีในห้องปฏิบัติการ

รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และ ดร. สมชัย อัครทิวา อาจารย์วิทยาลัยมหานคร ที่ให้ความรู้ทางด้านการวิเคราะห์น้ำเสีย

บริษัทโพรมิเนนทึ ฟลูอิดคอนโทรลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้แนวทางเกี่ยวกับการนำไอโซนไปบำบัดน้ำเสีย

เพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจคอยช่วยเหลือในการทำปริญญาเอน์นี้ ให้สำเร็จลุล่วงลง
ฉิวสดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ชงชัย พรรณสวัสดิ์ ศ.ดร., อุษษา วิเศษสุนน, "คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย", สมาคมสิ่งแวดล้อมไทย, 2535.
2. Resue, "Waste water Engineering Treatment Disposal".
3. American Water Works Association, "Water Quality and Treatment Handbook of Community Water Supplied", Mc Graw Hill.
4. สำราญ สังกัษะอาด ดร., "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
5. สุนทร กาญจนทวิ, "ภาพรวมการจัดตั้งเทคโนโลยีการจัดการของเสีย", Engineering KKU. Journal, Vol.19 No.(69-88), 1992
6. Apha, Awwa W pef., "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater", 1985.
7. Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, Andrew D. Eston, "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater", 1992.
8. นุสรณ์ บุญประเสริฐ, "การใช้ไฮโดรโนในการบำบัดน้ำเสีย", วิชาสัมมนา ปีการศึกษา 2536 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. พรงค์ วุฑฒเสถียร, "การปรับสภาพน้ำในอุตสาหกรรมและหม้อไอน้ำ", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2529.
10. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ ดร., "วิศวกรรมกาจัดน้ำเสีย", เล่ม1, 2534.
11. Toshikazu Ohkubu, "The Effect of Corona Wire Heating on the Downstream Ozone Concentration Profiles an Air Cleaning Wire-Duct Electrostatic Precipitator, IEEE. Trans. on Ind. App, Vol 26 No.3, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้