

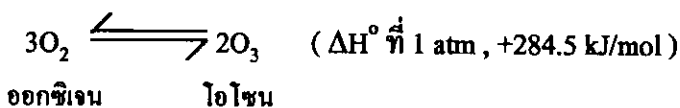
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีการเกิดโอโซน

โอโซนในธรรมชาติเกิดขึ้นในชั้นบนของบรรยากาศ ทำหน้าที่เสมือนเกราะป้องกันการแผ่ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต การถูกทำลายและลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศส่งผลให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ส่งผ่านมายังผิวโลกมากขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยบนโลก สำหรับบริเวณผิวโลก โอโซนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก แต่ปริมาณนี้จะเปลี่ยนแปลงโดยมลภาวะต่าง ๆ เช่น การปลดปล่อยสาร Chloro - Fluoro - Carbons หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่า สาร CFC ไปยังชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้สารเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับโอโซนในชั้นบรรยากาศ ทำให้ปริมาณโอโซนในบรรยากาศลดลง รังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงถูกส่งมาสู่ผิวโลกมากยิ่งขึ้น

โอโซน ( $O_3$ ) เป็นแก๊สไม่มีสีที่อุณหภูมิห้อง โอโซนเป็นโมเลกุลไม่เสถียร เกิดจากการรวมตัวของธาตุออกซิเจน มีสูตรโมเลกุล  $O_3$  น้ำหนักโมเลกุล 48 g/mol โอโซนเป็นไดออกซิไดส์ที่รุนแรง ( มีค่าศักย์ออกซิเดชัน +2.07 V ) สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด โอโซนมีค่าครึ่งชีวิตในน้ำ ประมาณ 15 นาที แต่ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนจะนานกว่านี้เมื่ออยู่ในอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาโดยรวมของการเกิดโอโซน สามารถอธิบายได้ดังนี้



เมื่อพิจารณาค่าเอนโทรปีของปฏิกิริยา เป็นดังนี้

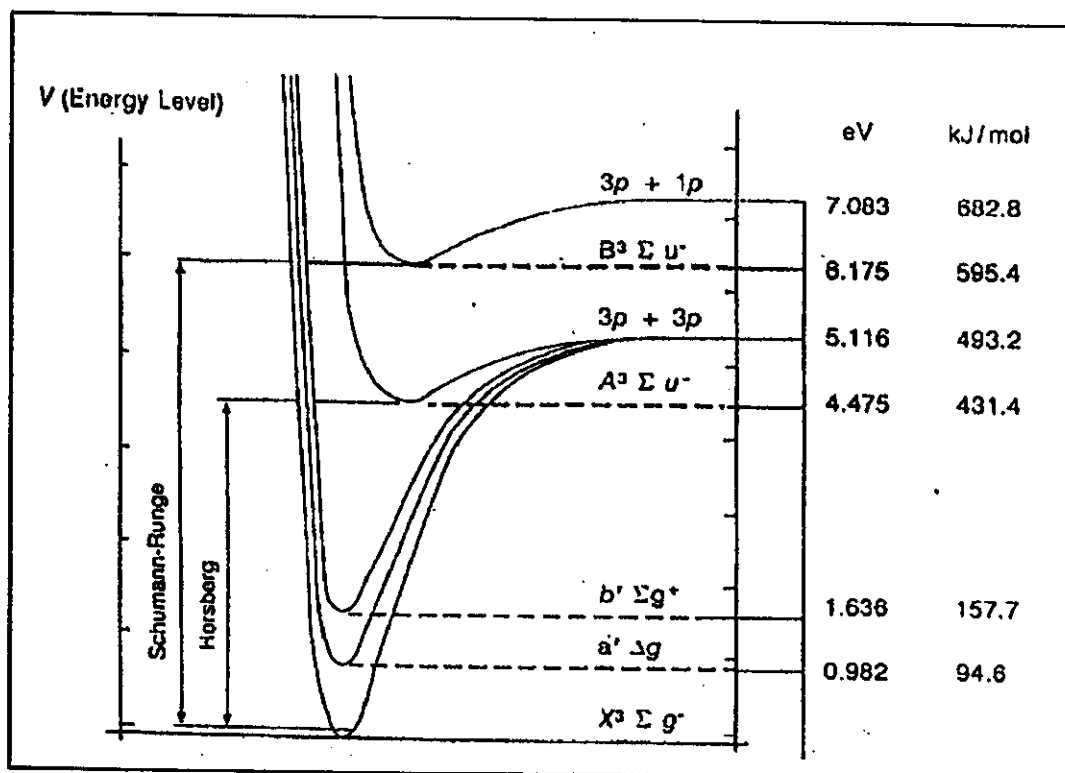
$$\Delta S^\circ (1 \text{ atm}) = -69.9 \text{ (J/mol) / degree}$$

จะเห็นว่า โอโซนไม่สามารถให้กำเนิดโดยกระบวนการทางความร้อนของออกซิเจนได้ เนื่องจากค่าพลังงานอิสระของกิบส์  $\Delta G^\circ$  (Gibbs free energy) ที่ 1 atm มีค่าเท่ากับ +161.3 kJ/mol หรืออาจกล่าวโดยรวมคือ โอโซนสามารถสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ดังนั้น การควบคุมอุณหภูมิ จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิด โอโซน

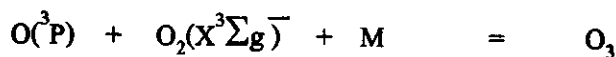
การกำเนิดโอโซน เกิดจากอนุพันธ์ของอะตอมออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับ โมเลกุลออกซิเจน โดยเริ่มจากโมเลกุลออกซิเจน ใช้พลังงาน 493.3 kJ/mol  $O_2$  สำหรับอนุพันธ์  $O(^3P)$  และ 682.8 kJ/mol  $O_2$  สำหรับอนุพันธ์  $O(^1D)$  ดังแสดงตามภาพประกอบที่ 3

ภาพประกอบ 3 แสดงพลังงานศักย์ของออกซิเจน

ที่มา : Bruno Langlais, 1991



ดังนั้น ปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดโอโซน คือ



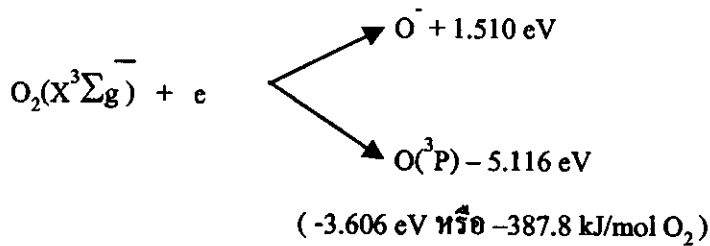
และ



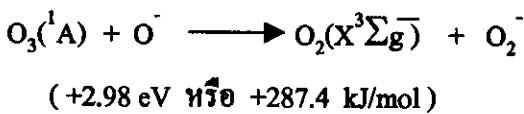
เมื่อ M หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ

แหล่งกำเนิดพลังงานของปฏิกิริยาดังกล่าว คือ อิเล็กตรอนหรือโฟตอนที่ได้พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูงในกระบวนการไซเลนท์ดิสชาร์จ

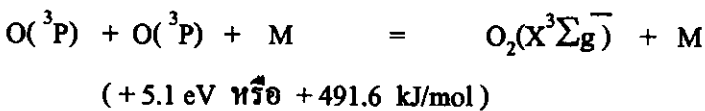
สำหรับการกระตุ้นอิเล็กตรอนของออกซิเจน จะทำให้เกิดออกซิเจนไอออนหรือเกิดอะตอมของออกซิเจนที่มีพลังงานอยู่ในระดับ ( $^3P$ ) ดังปฏิกิริยาข้างล่างนี้



นอกจากนี้ ออกซิเจนไอออนอะตอมเดี่ยว ( $O^-$ ) สามารถทำลายโมเลกุลของโอโซนได้ ดังปฏิกิริยา



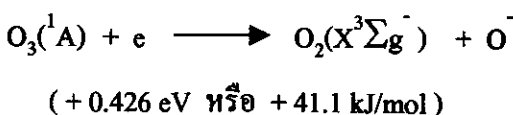
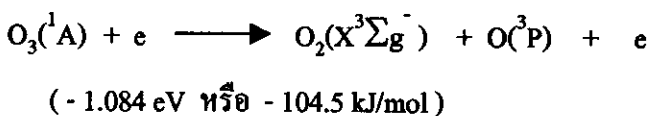
และอนุพันธ์ของออกซิเจนสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นออกซิเจน ดังปฏิกิริยาข้างล่าง



เมื่อ M หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลอื่น ๆ

อาจกล่าวได้ว่า ถ้าปริมาณอนุพันธ์ของออกซิเจนสูงเกินไป ปริมาณโอโซนที่ได้จะลดลง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพจาก  $[O_3] / [O]$  จะเห็นว่า ประสิทธิภาพนี้จะลดลง เมื่อสัดส่วนของอนุพันธ์ของออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ อิเล็กตรอนยังสามารถทำให้โอโซนสลายตัวได้อีกด้วย ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ผลกระทบของโอโซนที่มีต่อร่างกายมนุษย์ อาการโดยทั่วไปเมื่อได้รับโอโซนเข้าไปอาจเริ่มตั้งแต่ปวดศีรษะ ระคายเคืองเยื่อจมูกและลำคอ สายตาพร่า ลดความคมชัดในการมองเห็น หรืออาจเสียชีวิตได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาที่สูดดม โดยทั่วไปปริมาณ โอโซนที่สามารถรับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.02 – 0.05 ppm. The Public Health Service ได้กำหนดค่าปริมาณสูงสุดที่สูดดมแล้วไม่เกิดอันตรายในการทำงาน คือ 0.1 ppm โดยปริมาตร แต่เนื่องจากมนุษย์สามารถรับรู้กลิ่นของโอโซนได้ที่ปริมาณ 0.01 ppm โดยปริมาตร ดังนั้นจึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงอันตรายที่เกิดจากโอโซนได้ สำหรับอาการต่าง ๆ สามารถแบ่งตามปริมาณที่สูดดมเข้าไปได้ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงอาการผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นเมื่อสูดดมโอโซนในปริมาณต่าง ๆ

ที่มา : Francis L. Evans III, 1977

ปริมาณ โอโซน (ppm)	อาการผิดปกติที่ปรากฏ
0.02 – 0.03	ระคายเคืองของจมูกและคอ
0.1	ระบบหายใจแห้ง
สูงกว่า 0.1 เล็กน้อย	คอแห้ง
0.2 – 0.5	ปัญหาเกี่ยวกับระบบสายตา (การมองเห็น การทรงตัว)
0.1 – 1.0	ผลกระทบต่อระบบปอด
1.0	ปวดศีรษะ (หากสูดดมในเวลานานกว่า 30 นาที)

## 2.2 การกำเนิดโอโซน

จากปี ค.ศ.1840 เป็นต้นมา สามารถรวบรวมวิธีการผลิตโอโซนในระดับห้องปฏิบัติการได้ 3 วิธี ดังนี้

- 1) การกระตุ้นออกซิเจนด้วยรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet exposure of O<sub>2</sub>)
- 2) การใช้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic process)
- 3) การคายประจุไฟฟ้า (Electrical discharge)

แม้ว่าโอโซนสามารถผลิตได้หลายวิธี แต่ทุกวิธีต้องเริ่มจากการทำลายพันธะของโมเลกุลออกซิเจนเป็นออกซิเจนอะตอม และอะตอมเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนอื่น เกิดเป็นโอโซน วิธีที่ให้โอโซนในปริมาณมากที่สุด และนิยมใช้กันแพร่หลายที่สุด คือ วิธีคายประจุไฟฟ้า

การกำเนิดโอโซนด้วยรังสีเหนือม่วง เป็นการทำให้ออกซิเจนแตกตัวโดยใช้รังสีเหนือม่วงที่มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 140 – 190 นาโนเมตร วิธีนี้ค้นพบในปี ค.ศ. 1900 หลังจากนั้นมีการ

ค้นพบว่า ความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโอโซน โดยวิธีนี้ คือ ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร

การกำเนิดโอโซนโดยวิธีอิเล็กโทรไลติก เป็นวิธีผลิตโอโซนวิธีแรกที่ค้นพบ โดย Schonbein ในปีค.ศ. 1840

ข้อดีของวิธีนี้คือ

1. ใช้ไฟกระแสตรง แรงดันไฟฟ้าต่ำ
2. สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้
3. ไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมอากาศที่ป้อน

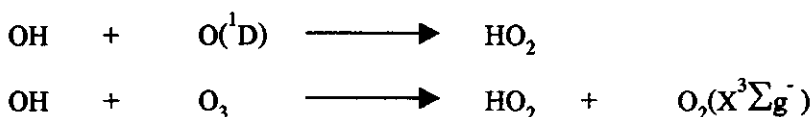
ข้อด้อยของวิธีนี้คือ

1. เกิดความเสียหายและสึกกร่อนของอิเล็กโทรดได้ง่าย
2. ในการเกิดปฏิกิริยา จะมีอุณหภูมิตั้งขึ้น
3. ต้องใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์พิเศษหรือใช้น้ำที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ
4. ใช้พลังงานสูงกว่าวิธีโคโรนาดีสชาร์จ 2-5 เท่า (Bruno Langlais, 1991)

การกำเนิดโอโซนโดยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เริ่มจากอิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนมีให้พลังงานจลน์ โดยเมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูง และมีพลังงาน 6-7 eV เพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างออกซิเจนเมื่อเกิดการชนกันกับ โมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ทำให้เกิดเป็นออกซิเจนอะตอม 2 อะตอม  $O + O$  โดยการแตกตัวนี้จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การชนกันของออกซิเจนอะตอมสามารถจัดตัวเป็นโมเลกุลใหม่ โดยอาจเป็น  $O_2$  หรือ  $O_3$  ก็ได้ นอกจากนี้ การชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลออกซิเจนก็อาจเกิดเป็นโอโซนได้เช่นกัน แต่การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลออกซิเจนจะไม่เกิดเป็นอะตอมออกซิเจนเสมอไป ในบางครั้งอิเล็กตรอนอาจรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็นโมเลกุลประจุลบ  $O_2^-$  ได้

ข้อสำคัญของการกำเนิดโอโซนวิธีนี้ คือ อากาศที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนจะต้องแห้งปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์โอโซน และมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดโอโซนอีกด้วย

ถ้าปริมาณของไอน้ำในอากาศที่ป้อนเข้าไปเพิ่มขึ้น ในโครเจนออกไซด์จำนวนมากจะเกิดขึ้นในระหว่างเกิดการดีสชาร์จ นอกจากนี้ยังเกิดอนุพันธ์ของไฮดรอกซิลขึ้น ซึ่งอนุพันธ์นี้สามารถรวมตัวกับอนุพันธ์ของออกซิเจนและโอโซน ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตโอโซนลดต่ำลง ดังสมการ



จะเห็นได้ว่า ปฏิกริยาทั้งสอง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดโอโซนลดต่ำลง ดังนั้น อากาศที่ใช้ในการผลิตโอโซนจะต้องแห้ง เพื่อให้ได้โอโซนในปริมาณสูงสุด นอกจากนี้ในอากาศที่มีความชื้นจะทำให้เกิดกรดไนตริกขึ้น ซึ่งสามารถกัดทำลายอุปกรณ์ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดโอโซน ทำให้เกิดความเสียหายได้

ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตโอโซน

1. ตัวแปรทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า, ความถี่กระแส
2. ตัวแปรของเครื่องกำเนิดโอโซน ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้
  - 2.1 ช่องคิสซาร์ด (discharge gap) ได้แก่ ระยะห่างของช่องคิสซาร์ด รูปร่างของช่องคิสซาร์ด
  - 2.2 ไดอิเล็กทริก ได้แก่ ชนิด ความยาว ความหนา พื้นที่ผิว ตลอดจนรูปร่างของไดอิเล็กทริก
  - 2.3 ขั้วอิเล็กโทรด ได้แก่ ชนิดของโลหะที่ใช้ บริเวณสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับไดอิเล็กทริก และการสัมผัสระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับขั้วไฟแรงสูง
3. อากาศที่ใช้กับเครื่องกำเนิดโอโซน ได้แก่ ชนิดของอากาศ %ของออกซิเจน อุณหภูมิ ความดัน ความแห้ง ความสะอาด และช่วงเวลาที่อากาศอยู่ในช่องคิสซาร์ด

สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตโอโซนโดยวิธีโคโรนาคิสซาร์ด เป็นไปตามความสัมพันธ์ ดังนี้ (Francis L. Evans III, 1977)

$$v \propto p/g$$

$$(Y/A) \propto fev^2/d$$

เมื่อ

- v เป็นความต่างศักย์ที่ให้กับช่องคิสซาร์ด
- p เป็นความดันแก๊สในช่องคิสซาร์ด
- g เป็นความกว้างของช่องคิสซาร์ด
- (Y/A) ปริมาณโอโซนต่อหน่วยพื้นที่ผิวอิเล็กโทรด
- f ความถี่ของไฟที่ใช้
- e ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
- d ความหนาไดอิเล็กทริก

จากเงื่อนไขทั้งสองข้อ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $p/g$  สามารถช่วยให้ใช้ความต่างศักย์ต่ำได้ ซึ่งการใช้ความต่างศักย์ต่ำเป็นการป้องกันการถูกทำลายของ ไดอิเล็กทริกและผิวอิเล็กโทรดจากความต่างศักย์สูงได้
2. ไดอิเล็กทริกที่ใช้ควรบางและมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จากเงื่อนไขที่สอง จะเห็นว่าคุณสมบัติทั้งสอง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอโซนให้สูงขึ้น แต่ถึงแม้ว่าการลดความหนาของไดอิเล็กทริกจะทำให้ได้ปริมาณไอโซนที่ได้สูงขึ้นและสามารถกำจัดความร้อนจากระบบได้ง่ายขึ้น แต่อาจทำให้ไดอิเล็กทริกเกิดการเสียหายได้ง่าย จึงมีความจำเป็นต้องรักษาความหนาของไดอิเล็กทริกไว้
3. แหล่งกำเนิดไฟ ควรใช้ไฟกระแสสลับความถี่สูง เนื่องจากที่ความถี่สูงจะเกิดความเสียหายต่อผิวไดอิเล็กทริกน้อยกว่าที่ความต่างศักย์สูง ทำให้ลดการบำรุงรักษา เพิ่มระยะเวลาในการใช้เครื่องยาวนานยิ่งขึ้น ในขณะที่สามารถเพิ่มปริมาณไอโซนอีกด้วย
4. การระบายความร้อน ต้องมีประสิทธิภาพสูง ในบางครั้งการระบายความร้อนโดยอาศัยการไหลของแก๊สเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ หากต้องการปริมาณความเข้มข้นของไอโซนสูง ควรจะมีการใช้ระบบหล่อเย็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

### 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไอโซน

1. ขั้วอิเล็กโทรด ควรทำจากโลหะที่นำความร้อนได้ดี และไม่ทำปฏิกิริยากับไอโซน โดยทั่วไปขั้วอิเล็กโทรดมักทำจากโลหะสแตนเลส ขั้วอิเล็กโทรดในเครื่องกำเนิดไอโซนประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว โดยขั้วอิเล็กโทรดในเป็นขั้วความต่างศักย์สูง ส่วนขั้วอิเล็กโทรดนอกเป็นขั้วดิน
2. ไดอิเล็กทริก วางระหว่างอิเล็กโทรด มีหน้าที่เพื่อให้เกิดการคายประจุสม่ำเสมอ และป้องกันการเกิดอาร์คไฟฟ้า ไดอิเล็กทริกมักทำจากแก้วบางชนิด (Pyrex) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกสูง หาง่ายและราคาไม่สูงนัก สำหรับความหนาของไดอิเล็กทริกมักอยู่ระหว่าง 1 – 3 มิลลิเมตร
3. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงให้กับเครื่องกำเนิดไอโซน ช่วงความต่างศักย์ที่ใช้มักอยู่ในช่วง 5 – 20 กิโลโวลต์ กรณีที่ความต่างศักย์ที่สูงกว่า 20 กิโลโวลต์ อาจทำให้ไดอิเล็กทริก ซึ่งทำจากแก้วเสียหายได้ สำหรับความถี่ที่มักนิยมใช้ คือ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 60 เฮิร์ตซ์
4. แก๊สที่ใช้ ควรมีออกซิเจนในปริมาณสูง และจะต้องแห้ง ( มีค่าไม่เกิน Dew point – 50 °C หรือ – 60 °F ) เนื่องจากไอโซนสลายตัวได้เร็วเมื่อมีความชื้น นอกจากนี้เมื่อในแก๊สมีไนโตรเจนและรวมกับออกซิเจน ไอโซน และน้ำ ทำให้เกิดเป็นกรดไนตริก (  $\text{HNO}_3$  ) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอโซนทำให้ไอโซนที่ได้ลดลง อีกทั้งกรดไนตริกยังสามารถทำลายส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไอโซนอีกด้วย ในกรณีที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการผลิตไอโซน อาจไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องทำความเย็น

## Central Library Prince of Songkla University

และสารดูดความชื้นในการทำให้อากาศแห้ง เนื่องจากออกซิเจนจะถูกผลิตที่อุณหภูมิต่ำและมีคุณสมบัติที่แห้ง

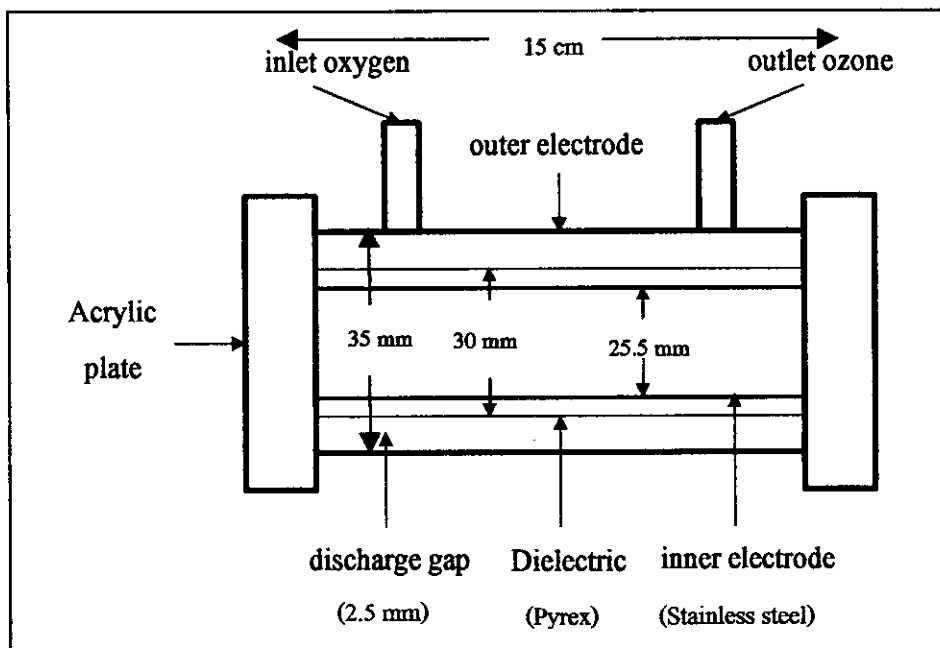
โดยทั่วไป ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดโอโซนที่ไม่ได้ทำจากโลหะ ต้องทำจากวัสดุที่ต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน เช่น เทฟลอน เป็นต้น

### หลักการทํางานของเครื่องกำเนิดโอโซน

เมื่อจ่ายไฟกระแสสลับความต่างศักย์สูง ผ่านช่องคิซชาร์ต ซึ่งมีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ จะทำให้มีโอโซนเกิดขึ้น แต่พลังงานที่ให้เพียง 10 % เท่านั้นที่ใช้ในการผลิตโอโซน พลังงานส่วนที่เหลือจะสูญเสียในรูปของแสง เสียง และความร้อน ซึ่งหากการกำจัดความร้อนไม่มีประสิทธิภาพ ช่องคิซชาร์ตและผิวโคอิเล็กทริก จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลเสียต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น และเนื่องจากอุณหภูมิมีผลอย่างมากในการสลายตัวของโอโซนและอาจส่งผลกระทบต่อโคอิเล็กทริก ทำให้โคอิเล็กทริกเสียหายได้ ดังนั้น กระบวนการกำจัดความร้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากในกระบวนการผลิตโอโซน

ก่อนใช้เครื่องกำเนิดโอโซน จะต้องผ่านอากาศแห้ง เพื่อกำจัดความชื้น ในทำนองเดียวกัน หลังจากการใช้เครื่องกำเนิดโอโซน จะต้องผ่านอากาศแห้งเพื่อกำจัดโอโซนที่เหลือ

### ภาพประกอบ 4 แสดงภาคตัดขวางของเครื่องกำเนิดโอโซน





## 2.4 การนำโอโซนประยุกต์ใช้งาน

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้มากมายหลายด้าน ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนมีข้อดี ดังต่อไปนี้

1. โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่มีประสิทธิภาพ ทำให้การออกซิไดส์เกิดขึ้นรวดเร็ว และสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดส์อื่น ๆ
2. สามารถลดค่า BOD ( Biological Oxygen Demand ) และ COD ( Chemical Oxygen Demand ) ได้
3. สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และไม่มีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เมื่อใช้ในปริมาณมากจะสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการออกซิไดส์ได้
4. สามารถลดสี กลิ่น ความขุ่น และสารตั้งผิว ได้
5. การไม่มีโอโซนเหลืออย่างถาวร ทำให้ไม่เหลือผลิตภัณฑ์เป็นพิษให้ต้องทำการกำจัด
6. เพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ( DO ) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการผลิตโอโซน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา คือ ออกซิเจน และธาตุบางชนิดเช่น OH ซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้มีส่วนสำคัญในการฆ่าเชื้อโรคอีกด้วย
7. ไม่มีปัญหาในการเคลื่อนย้ายสารเคมีที่เป็นพิษ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของโอโซน มีมากมายหลายด้าน เช่น

1. อุตสาหกรรมยา และอาหาร
2. โรงงานผลิตน้ำแข็ง เนื่องจากโอโซนไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรสเหมือนการใช้คลอรีน
3. ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุขวดพลาสติก เนื่องจากไม่สามารถใช้ความร้อนและคลอรีนซึ่งอาจทำลายขวดพลาสติกได้ และการย่อยสลายอย่างรวดเร็วของโอโซนที่เหลือ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โอโซนถูกใช้ในการฆ่าเชื้อของขวดพลาสติก
4. อุตสาหกรรมโรงงาน ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น แต่เนื่องจากการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานบางชนิดไม่สามารถใช้วิธีทางชีวภาพได้ เพราะในน้ำทิ้งเหล่านี้ อาจประกอบด้วยสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กได้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้

ในการประยุกต์ใช้โอโซน ปริมาณโอโซนที่ใช้ไปไม่เพียงเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารประกอบเป้าหมายเท่านั้น แต่ยังอาจเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำอีก ทำให้สูญเสียปริมาณโอโซนก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเป้าหมาย นอกจากนี้ยังมีการสลายตัวของโมเลกุลโอโซนเองอีกด้วย

### 2.4.1 องค์ประกอบของน้ำ

โดยทั่วไปน้ำประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน และอนุภาคสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ สารอินทรีย์เหล่านี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์ธรรมชาติเช่น กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น และสารประกอบไม่เปลี่ยนรูป ที่มีขนาดเล็ก (untransformed micropollutants) เช่นสารประกอบอะโรมาติก สาร surfactant เป็นต้น

### 2.4.2 ลักษณะน้ำทิ้งจากการข้อมลึ

น้ำจะมีสีเมื่อมีสารซึ่งดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่สายตามองเห็นละลายอยู่ หรือเมื่อมีสารแขวนลอยซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของแสง จากเหตุผลของการเกิดสีทั้งสอง ทำให้เกิดข้อแตกต่างระหว่างสีปรากฏกับสีจริง สีปรากฏเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ส่วนสีจริงเกิดจากการกระเจิงของแสง ขึ้นกับชนิดของสารที่ละลายในน้ำ ซึ่งการกระเจิงเกิดขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคอยู่ภายในช่วงความยาวคลื่นแสงเห็น (400 - 800 นาโนเมตร) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะลดผลที่เกิดจากการกระเจิงของแสง โดยการกรองด้วยเมมเบรน 0.45 ไมครอน

โมเลกุลสารที่ทำให้เกิดสี จะประกอบด้วย วงแหวนอะโรมาติก 1 วงขึ้นไป หรือมากกว่า

### 2.4.3 วิธีบำบัดน้ำทิ้งจากการข้อมลึ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การที่น้ำทิ้งจากการข้อมลึถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปราศจากการบำบัด อาจทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นได้ จึงได้มีการรวบรวมวิธีการบำบัดรวมทั้งข้อดี ข้อเสีย ของแต่ละวิธี ดังนี้

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารส้มลงไปเพื่อทำให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาเกาะกัน เกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้การตกตะกอนเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไป การใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการกรองสามารถกำจัดสีข้อมลึที่ละลายน้ำได้มากกว่า 70 % (ธงชัย, 2527)
2. การใช้คลอรีน เป็นการกำจัดสีโดยการเติมคลอรีนลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ในน้ำที่เป็นสาเหตุของการเกิดสี
3. การใช้โอโซน เป็นวิธีการกำจัดสีที่มีหลักการคล้ายกับการใช้คลอรีน แต่ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับสารอินทรีย์จะรุนแรงกว่าการใช้คลอรีน เนื่องจาก โอโซนมีศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงกว่าคลอรีน (Francis L. Evans III, 1977) คือ โอโซนมีศักย์ไฟฟ้า +2.07 V. ในขณะที่คลอรีนมีศักย์ไฟฟ้าเพียง +0.94 V.

4. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) โดยใช้คุณสมบัติการดูดซับของถ่าน ในการกำจัดสีของน้ำเสีย
5. การกรอง อาจเป็นการกรองแบบ microfiltration หรือ reverse osmosis

ตาราง 2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อด้อย
1.) การตกตะกอนด้วยสารเคมี	เนื่องจากมักใช้สารส้มเป็นตัว ทำให้ตกตะกอน จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ และสามารถหาได้ง่าย	มีปัญหาด้านการกำจัดกากตะกอนและไม่สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2.) การใช้คลอรีน	หาง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ	ต้องใช้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับการใช้โอโซนนอกจากนี้ยังอาจให้สารอินทรีย์กลุ่ม Chlorinated organics ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ
3.) การใช้โอโซน	มีประสิทธิภาพสูง ผลิตภัณฑ์ที่เหลือไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเก็บและขนย้าย	ไม่สามารถเก็บโอโซนได้เป็นเวลานานจึงต้องผลิตในบริเวณที่ใช้งานเท่านั้นและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง
4.) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	มีราคาถูก และหาได้ง่าย	ไม่สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5.) การกรองด้วยเมมเบรน	สามารถกำจัดสีและอนุภาคต่างๆ ได้ดี	อาจมีปัญหาเนื่องจากการอุดตันของเมมเบรน

โดยทั่วไป สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง การบำบัดมักใช้หลายวิธีร่วมกัน เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม นอกจากจะทำให้ระยะเวลาในการใช้โอโซนน้อยลง ยังทำให้ลดปริมาณกากตะกอนที่จะเกิดขึ้นให้น้อยลงอีกด้วย