

บทที่ 2

ทฤษฎีและสำรวจเอกสาร

2.1 พลาสมาและดิสชาร์จไฟฟ้า

การศึกษาพลาสมานั้นสามารถแบ่งออกตามสถานะการเกิดพลาสมาได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ พลาสมาแบบสมดุล (Equilibrium plasma) และพลาสมาแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium plasma) โดยความหมายของสมดุลหรือไม่สมดุลก็คือ การเกิดพลาสมาในสถานะที่จำนวนไอออนบวกของอนุภาคที่แตกตัวจากก๊าซที่ได้รับพลังงาน กับจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยมีความหนาแน่นเท่ากันหรือไม่เท่ากัน ตามลำดับ (ทั้งนี้รวมไปถึงกรณีที่มีอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนต่างกันด้วย) และสำหรับกรณีพลาสมาแบบสมดุลนั้น ก็สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณีใหญ่ ๆ อีก ได้แก่ พลาสมาแบบสมดุลที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศหรือความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง ซึ่งจะพบว่าเมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนและไอออนบางส่วนนั้นมีพลังงานจลน์โดยเฉลี่ยสูงกว่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุล อีกกรณีหนึ่งที่เหลือก็คือ พลาสมาแบบสมดุลที่ความดันสูง โดยมีลักษณะสำคัญ คือ อนุภาคที่ถูกเร่งจะมีการชนครั้งต่อไปในระยะพิสัยต่ำหรือกล่าวได้ว่า ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำมาก ๆ ค่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเร่งอาจจะใกล้เคียงกับพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอน

ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ (Silent discharges) เป็นกระบวนการทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซแตกตัวเป็นไอออนบวกและอนุภาคอิเล็กตรอนรวมไปถึงไอออนลบด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบนี้จะต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อยหนึ่งขั้วที่ครอบคลุมไว้ด้วยสารโคอีเล็กตริก หรือฉนวนไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการอาร์คไฟฟ้าขึ้นขณะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโตรด ทำให้การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าที่ค่อนข้างเงียบมาก กล่าวคือ ไม่มีเสียงของการปะทุของประจุไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าที่ความเข้มสูง นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ศึกษาผ่านมา พบว่า อุณหภูมิของไอออนบวกและอนุภาคอิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากัน หรือไม่เกิดสมดุลทางความร้อนในพลาสมา จึงจัดเป็นการดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไม่สมดุลอีกประเภทหนึ่ง (Eliasson and Kogelschatz, 1991) ลักษณะเฉพาะของการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการดิสชาร์จไฟฟ้านี้เกิดขึ้นที่ระดับความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย (0.1-10 bar) โดยปกติแล้วดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์จะเกิดขึ้นในก๊าซที่มีความดันสูง ซึ่งประกอบด้วยปริมาณของไส้กระแส (current filament) และเกิดดิสชาร์จขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ (ระดับไมโครวินาทีถึงนาโนวินาที) การดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ จัดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีสถานะไม่คงตัว (Steady state) ดิสชาร์จไฟฟ้านี้เป็นแหล่งกำเนิดของกระแสขนาดเล็ก ๆ ในระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ และพลังงานอิเล็กตรอนสูงเพียงพอ ก็สามารถจะทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคของก๊าซที่เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เป็นล้าวิงจากขั้วอิเล็กโตรดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง มีขนาดเล็กมากจนเรียกอีกอย่างว่า

เป็นไส้กระแสไฟฟ้า (Discharge filament) ปริมาณมากเหล่านี้จะเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดสปีก (spikes) หรือถ้ากระแสไฟฟ้าจำนวนมากระหว่างช่องว่างที่แสดงระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกป้อนด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในขณะที่เกิดการดิสชาร์จ ข้อได้เปรียบของการดิสชาร์จแบบไซเลนท์ (Eliasson and Kogelschatz, 1991) ก็คือ ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงผลคูณของความหนาแน่นของก๊าซ (n) กับความกว้างของช่องว่าง (d) มีค่าสูง ซึ่งสามารถแยกกระบวนการขั้นตอนที่แตกต่างกัน 3 ขั้นตอนระหว่างช่วงวงจรชีวิตของไส้กระแสแต่ละเส้นขณะเกิดการดิสชาร์จไฟฟ้า ดังนี้คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการสร้างการดิสชาร์จ นั่นคือ มีการแตกตัวทางไฟฟ้า (Electrical breakdown) เกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาในการเกิดเสร็จสิ้นภายในนาโนวินาที

ขั้นตอนที่ 2 ที่เกิดขึ้นต่อมา กระแสพัลส์เคลื่อนต่อมาและเกิดการถ่ายโอนประจุข้ามช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งใช้เวลาในการถ่ายโอนกระแสภายใน 1-100 ns และขั้นตอนที่ 3 เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับขั้นตอนที่สอง เป็นสถานะที่จะมีการกระตุ้นของอะตอมและโมเลกุลเกิดขึ้นด้วย เพื่อเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ ในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นในระหว่างโมเลกุลของก๊าซที่ได้รับพลังงานจลน์ ในขั้นตอนนี้จะเสร็จสิ้นในช่วงเวลาดังแต่ ระดับนาโนวินาทีไปจนถึง วินาที ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ที่สามารถใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขและสถานะของการเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์

(ดัดแปลงจาก Eliasson and Kogelschatz, 1991)

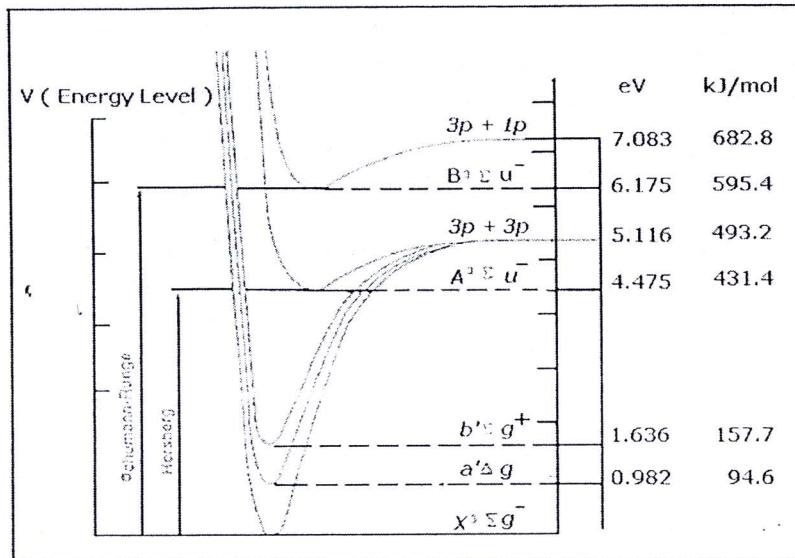
ลักษณะของพารามิเตอร์การดิสชาร์จแบบไซเลนท์	ค่าต่าง ๆ
ความดัน (Pressure)	1 bar
สนามไฟฟ้า (Electric field)	0.1-100 kV/cm.
สนามไฟฟ้ารีดิวซ์ (Reduced field)	1-500 Td.
พลังงานอิเล็กตรอน (Electron energy)	1-10 eV
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density)	10^{14} cm ³
ระดับของการไอออนไนเซชัน (degree of ionization)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

2.2 ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนา (Electrical corona discharges)

ในที่นี้จะกล่าวถึงการกำเนิดไอโซนโดยวิธี การโคโรนาดิสชาร์จ เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเริ่มจากการที่อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนให้พลังงานจลน์ โดยเมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูงและมีพลังงาน 6-7 eV เพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างออกซิเจน เมื่อเกิดการชนกันกับโมเลกุลของออกซิเจนอื่น ทำให้เกิดเป็นอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอม (O+O) โดยการแตกตัวนี้เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การชนกันของออกซิเจนอะตอมสามารถจัดตัวเป็นโมเลกุลใหม่โดยอาจเป็น O₂ หรือ O₃ ก็ได้ นอกจากนี้การชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลออกซิเจนก็อาจเกิดเป็น ไอโซนได้เช่นกัน การชนกันของอิเล็กตรอนกับ

โมเลกุลออกซิเจนจะไม่เกิดเป็นอะตอมของออกซิเจนเสมอไป ในบางครั้งอิเล็กตรอนอาจรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็นโมเลกุลประจุลบ O_2^- ได้

การกำเนิดโอโซนเกิดจากอนุพันธ์ของอะตอมออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับ โมเลกุลออกซิเจน โดยเริ่มจากโมเลกุลออกซิเจน ใช้พลังงาน 493.3 kJ/mol O_2 สำหรับอนุพันธ์ $O(^3P)$ และ 682.8 kJ/mol O_2 สำหรับอนุพันธ์ $O(1D)$ ดังรูปที่ 2.1 [4]



รูปที่ 2.1 พลังงานศักย์ของออกซิเจน (นวลศรี, 2535; Eliasson et al., 1987)

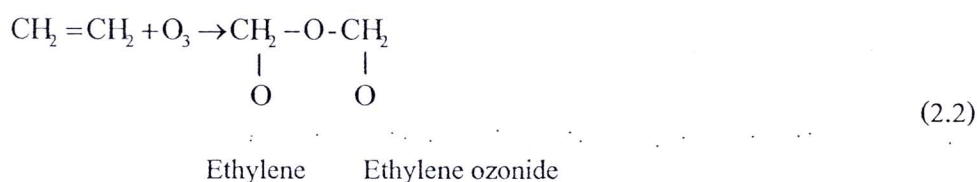
ปริมาณก๊าซโอโซนที่สามารถผลิตได้ ตามที่ Francis ได้ให้รายละเอียดไว้ โดยกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณที่ก๊าซโอโซนผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังสมการที่ 6 ต่อไปนี้ [4]

$$\frac{Y}{A} = k \frac{f \epsilon V^2}{d} \quad (2.1)$$

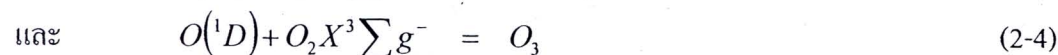
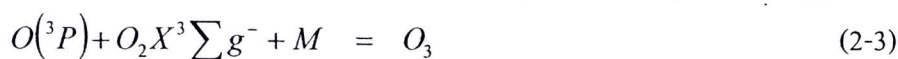
- โดยที่
- Y/A = ปริมาณโอโซนต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า
 - k = ค่าคงที่
 - f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า
 - ϵ = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
 - V = ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง
 - d = ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ก๊าซโอโซน (Ozone, O₃) เป็นโมเลกุลกึ่งเสถียรของก๊าซที่เกิดจากองค์ประกอบของออกซิเจนหรือเรียกว่า allotropic form ของออกซิเจน ปฏิกิริยาของการทำให้เกิดโอโซนสามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ก๊าซโอโซนไม่สามารถเกิดจากกระบวนการกระตุ้นออกซิเจนด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานอิสระของกิบส์ [$\Delta G^\circ(1 \text{ atm}) = +161.3 \text{ kJ/mol}$] เป็นบวก ดังนั้นพลังงานความร้อนจะทำให้โอโซนสลายตัวได้ และกระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมและการออกแบบระบบผลิตโอโซน จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องอุณหภูมิของห้องคิสซาร์จไฟฟ้าแบบในขณะระบบทำงานเป็นสิ่งสำคัญ

ก๊าซโอโซนสามารถละลายในออกซิเจนเหลวได้ถึง 30% โดยน้ำหนักและสามารถเกิดการระเบิดได้เองเมื่อมีปริมาณมากกว่า 72% โดยน้ำหนักของโอโซนที่ละลายในออกซิเจนเหลว จึงยากที่จะเก็บสะสมในปริมาณมากและความเข้มข้นสูง ๆ ในบริเวณที่มีออกซิเจนเหลวอยู่ ปกติก๊าซโอโซนมีแนวโน้มที่จะสลายตัวได้รวดเร็วในบริเวณที่มีอากาศร้อน หรืออาจจะรวมตัวกันเองของโมเลกุลโอโซนที่กึ่งเสถียรในขณะที่ระเหยในบรรยากาศของออกซิเจน เช่น ในบรรยากาศปกติ เนื่องจากก๊าซโอโซนมีค่า Electronegative oxidation potential มากกว่าก๊าซฟลูออรีน ก๊าซโอโซนจึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมากและทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นได้หลายวิธี โดยเฉพาะสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารประกอบอินทรีย์ประเภทยังไม่อิ่มตัว ซึ่งจะให้เกิดสารประกอบโอโซนในได้ ดังตัวอย่าง โครงสร้างในสมการที่ (2.2)

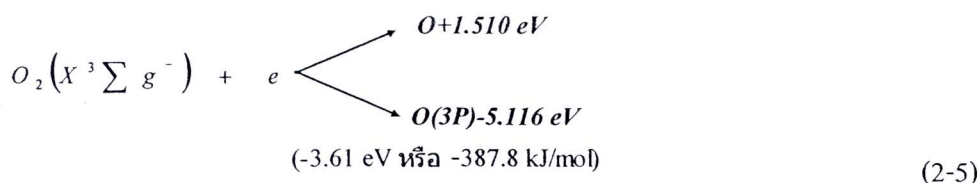


การผลิตโอโซนต้องเกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ของอะตอมออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน เริ่มจากอะตอมของออกซิเจนต้องใช้พลังงาน 493.3 kJ/mol สำหรับการแตกตัวเป็นอนุพันธ์ O(3P) และต้องการใช้พลังงาน 682.8 kJ/mol สำหรับอนุพันธ์ O(1D) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสำหรับโอโซน แสดงดังสมการที่ (2-3) และ (2-4) ดังนี้

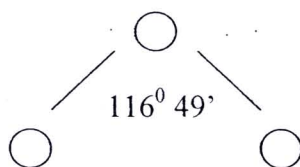


กระบวนการทั้งหมดที่สามารถทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอนุพันธ์ออกซิเจน คือปฏิกิริยาการเกิดก๊าซโอโซน แหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัว คือ อนุภาคอิเล็กตรอนหรือพลังงานโฟตอนควอนตัม อิเล็กตรอนสามารถได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงในโคโรนาคิสซาร์จแบบไซเลนท์ ปฏิกิริยาเคมีนิวเคลียร์ และจากกระบวนการอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic processes) ซึ่งพลังงานโฟตอนควอนตัมที่

เหมาะสมจะรวมถึงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm และรังสีแกมมา การกระตุ้นอนุภาคอิเล็กตรอนของอะตอมออกซิเจน จะทำให้เกิดอะตอมเดี่ยวของไอออนของออกซิเจน(O⁻) ดังสมการที่ (2-5)



ในการศึกษาสเปกตรัมช่วงคลื่นไมโครเวฟของโมเลกุลโอโซน แสดงให้เห็นว่าโอโซนไม่ได้เป็นสารจำพวกพาราแมกเนติก (Non-paramagnetic material) โดยมีมุมป้านเป็น $116^\circ 49'$ ความยาวพันธะระหว่างอะตอมออกซิเจนกับอะตอมออกซิเจนเท่ากับ 1.278 \AA ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และมีค่าไดโพลโมเมนต์ต่ำมากคือ 0.49-0.58 ดีบายต์ ซึ่งสามารถอธิบายในรูปของ resonance hybrid การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมออกซิเจนเป็นแบบ sp^2 โดยพบว่าที่ sp^2 จะมีอนุภาคอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม ดังนั้นจึงเกิดเป็นพันธะซึ้นหรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าไม่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมระหว่างอะตอมของออกซิเจนที่เกิดขึ้นในพันธะ และการซ้อนทับของระดับชั้นพลังงาน p (p orbitals) จะให้เกิดระดับชั้นพลังงาน π ของโมเลกุล (π molecular orbital) ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน 4π ขึ้น

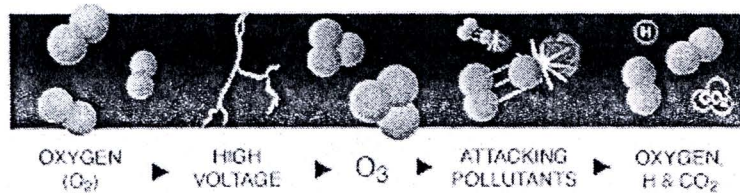


รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของก๊าซโอโซน

เทคนิคการกำจัดก๊าซหรือเปลี่ยนสภาพโมเลกุลของก๊าซชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่ง มีรายงานวิจัยไว้ในต่างประเทศจำนวนมาก (Koichi et al., 1998; Yang et al., 2001) แต่จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่ มุ่งเน้นไปที่ก๊าซเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม

2.3 การประยุกต์ใช้โอโซน

โอโซน คือ รูปแบบหนึ่งของออกซิเจน ปกติออกซิเจนหนึ่งโมเลกุลมี 2 อะตอม เมื่ออยู่ในรูปโอโซนหนึ่งโมเลกุลจะมี 3 อะตอม ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษกว่าออกซิเจน โอโซนนั้นถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1840 โดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ C.F. Schobein



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดโอโซน (<http://www.kanchanapisek.or.th.html>)

ในการทดลองในห้องปฏิบัติการเราสามารถผลิตโอโซนได้หลายวิธี เช่น การใช้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลติก การกระตุ้นออกซิเจนด้วยรังสีเหนือม่วง การดิสชาร์จไฟฟ้า ซึ่งวิธีการดิสชาร์จไฟฟ้าเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตโอโซนในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ในชั้นบรรยากาศและสามารถผลิตโอโซนได้ในปริมาณที่สูง ซึ่งการดิสชาร์จทางไฟฟ้าก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีโคโรนาดีสชาร์จ วิธีไซเลนทดีสชาร์จ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีรูปแบบการเกิดที่แตกต่างกันและปริมาณของโอโซนที่เกิดขึ้นก็แตกต่างกันด้วย

จากการศึกษาพบว่าโอโซนเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค และเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงที่สุดรองจากฟลูออรีน โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท เช่น การฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม การประยุกต์ ใช้งานในการบำบัดน้ำเสีย การกำจัดสีและกลิ่นจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม การกำจัดก๊าซพิษในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการกำจัดมลพิษในอากาศ

(Eliasson and Kogelschatz, 1991; http://www.goodhealth.co.th/new_page_17.html)

มลพิษ	HEPA	Electrostatic filter	Electrostatic precipitator media Filter	Negative ion generator	Ozone	UV
ฝุ่นขนาดเล็ก	ดี	ใช้ได้	ดี	ดี	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้
ฝุ่นขนาดกลาง	ดี	ดี	ดี	ดี	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้
ฝุ่นขนาดใหญ่	ดี	ดี	ดี	ดี	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้
แบคทีเรีย	พอใช้	พอใช้	ใช้ไม่ได้	ดี	ดี	ดี
ไวรัส	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ดี	ดี
รา	ดี	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ดี	ดี
ก๊าซ	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ดี	พอใช้
กลิ่น	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ใช้ไม่ได้	ดี	ใช้ไม่ได้

ตารางที่ 2.3 ปฏิกริยาออกซิเดชันของสารประกอบอนินทรีย์โดยใช้โอโซน

(http://www.goodhealth.co.th/new_page_17.html)

สารประกอบอนินทรีย์	สารผลิตภัณฑ์	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
Fe^{2+}	$Fe(OH)_3$	เร็ว
Mn^{2+}	$MnO(OH)_2$	เร็ว
	MnO_4^-	เร็ว
NO^{2-}	NO_3^-	เร็ว
NH^+ / NH^3	NO_3^-	ช้าที่ pH < 9
		ปานกลางที่ pH > 9
CN^-	CO_2, NO_3^-	เร็ว
H_2S / S^{2-}	SO_4^{2-}	เร็ว
AS-III	As-V	เร็ว
Cl^-	HOCl	น้อยมาก
Br^-	HOBr / OBr ⁻	ปานกลาง
	BrO_3^-	
I^-	HOI / OI ⁻ , IO_3^-	เร็ว
HOCl / OCl ⁻	ClO_3^-	ปานกลาง
Chloramines, Bromamines		
ClO_2	ClO_3^-	เร็ว
ClO_2^-	ClO_3^-	เร็ว

2.4 น้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบของน้ำยางแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของน้ำยาง

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
ของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
โปรตีน	1-1.5
เรซิน	1-2.5
เถ้า	1
น้ำตาล	1
น้ำ (ในปริมาณรวมแล้วเป็น)	100

(ที่มา : ผลชิด บัวแก้ว, 2531)

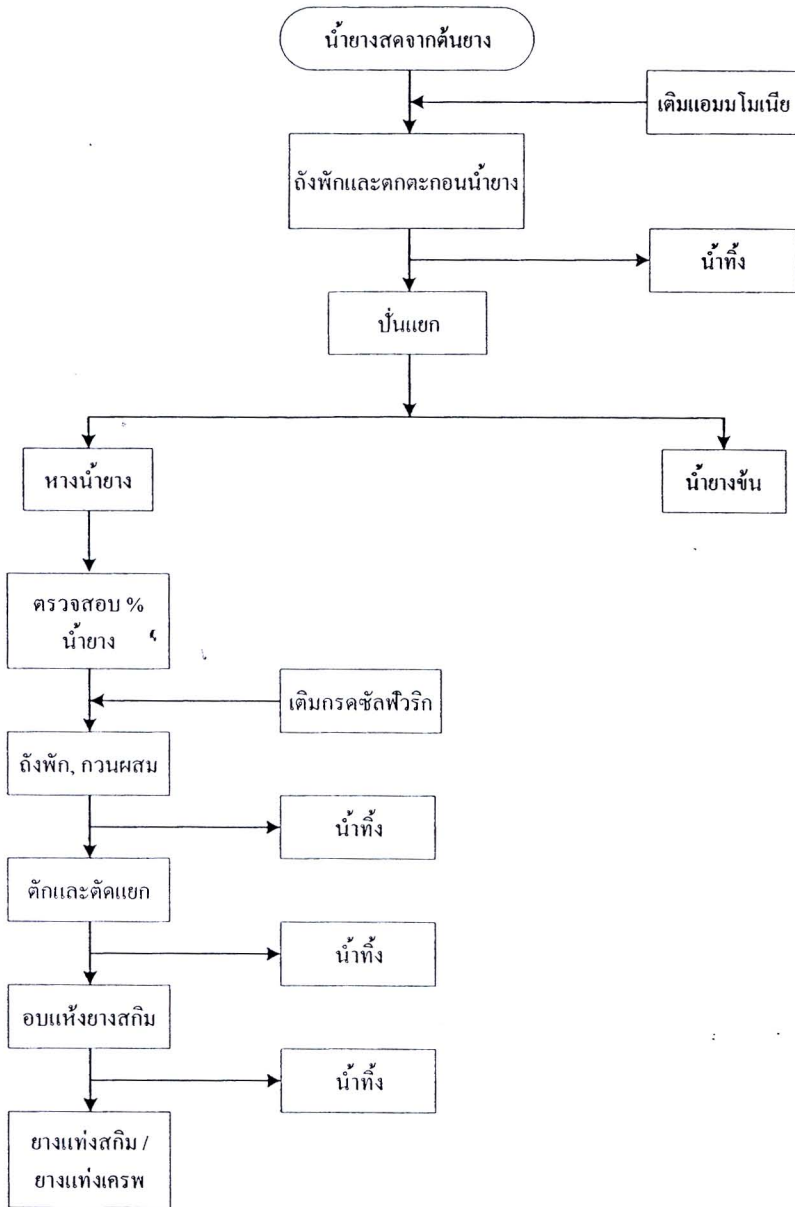
น้ำยางสดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975 -0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีค่า pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดไม่แน่นอน มีส่วนประกอบของสารต่างๆ ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง การกรีด และฤดูกาล สำหรับสมบัติและส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติโดยปริมาตร แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

2.5 การผลิตน้ำยางข้น

น้ำยางสดจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 25-45 นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นน้ำและมีสารของแข็งที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber matter) ดังนั้นหากต้องการนำน้ำยางไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ไกลจากสวนยางพาราเพราะมีการปลูกกันอย่างกระจัดกระจาย จึงเป็นการไม่สะดวกที่จะเก็บน้ำยางสดไว้เพราะจะบวมเสียได้ง่าย นอกจากนี้ สารต่าง ๆ บางอย่างที่อยู่ในน้ำยางยังอาจมีผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่อีกด้วย เหตุผลเหล่านี้ คือที่มาของการทำน้ำยางสดให้มีความเข้มข้น โดยมีปริมาณเนื้อยางแห้งสูงถึงร้อยละ 60

วิธีการผลิตน้ำยางข้นที่ทำกันในเชิงการค้ามี 3 วิธี คือ วิธีระเหยน้ำ วิธีทำให้เกิดครีม วิธีปั่น และอีกวิธีหนึ่งซึ่งไม่สามารถทำเป็นการค้าได้ เพราะไม่สะดวกและลงทุนสูง คือ การใช้กระแสไฟฟ้าแยก สำหรับในประเทศไทยปัจจุบันการผลิตน้ำยางข้นดำเนินการโดยวิธีการปั่นเพียงอย่างเดียว กรรมวิธีการปั่นน้ำยางข้น แสดงรายละเอียดขั้นตอนการแยกน้ำออกจากเนื้อยางแห้ง ซึ่งจะทำให้น้ำยางข้นขึ้นดังรูปที่ 2.4 กระบวนการเริ่มจากการรวบรวมน้ำยางสดที่ได้จากสวนยางจะโดยวิธีการใด ๆ ก็ตาม อาทิเช่น การออกไปรับซื้อน้ำยางโดยตรง การรับซื้อน้ำยางจากพ่อค้าคนกลาง หรือเกษตรกรนำน้ำยางสดมาขายที่โรงงานโดยตรง เป็นต้น ข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ การรักษาความสะอาดและการลดสารปลอมปน การใช้สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางอย่างถูกต้องและเพียงพอ ปกติจะใช้แอมโมเนียตามลำพังหรือร่วมกับสารช่วย เช่น Tetramethyltiuram disulphide (TMTD) กับ Zinc oxide (ZnO) โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้นจะนำน้ำยางที่รวบรวมได้ เข้าสู่กระบวนการผลิตให้เร็วที่สุด (ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิตน้อยที่สุด) เมื่อนำน้ำยางสดเข้าโรงงานแล้วจะทำการถ่ายลงถังรวม และเก็บตัวอย่างน้ำยางสดตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้ง ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ ตลอดจนปริมาณธาตุแมกนีเซียม เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับสมบัติน้ำยางสดให้เหมาะสมต่อไป ในทางปฏิบัติ โรงงานจะปล่อยให้ น้ำยางตกตะกอนแมกนีเซียมโดยการเติมสารไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate (DAHP)) และทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ต่อจากนั้นผู้ผลิตจะเปิดวาล์วเพื่อนำน้ำยางออกจากถังเก็บ และนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูง ซึ่งน้ำยางที่ออกจากเครื่องปั่นส่วนหนึ่ง คือ น้ำยางข้นที่ต้องการ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลพลอยได้ คือ หางน้ำยาง (skim latex) ซึ่งยังคงมีปริมาณเนื้อยางอยู่บ้าง ประมาณไม่เกิน 8% หางน้ำยางนี้ถูกนำไปผลิตเป็นยางสกิม ดังรูปที่ 2.2

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการบำบัดหรือกำจัดก๊าซเสียจากอุตสาหกรรมในพื้นที่ภาคใต้โดยในที่นี้เลือกกลุ่มอุตสาหกรรมน้ำยางข้น เพราะเป็นกลุ่มที่มีปัญหาในเรื่องน้ำเสียในอันดับต้น ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้นประกอบด้วยสารอินทรีย์ปริมาณมหาศาล ทำให้ค่าบีโอดี และค่าซีโอดีสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งหลายเท่า นอกจากนี้จะเห็นได้จากแผนภาพที่ 2.4 ว่ากระบวนการทำน้ำยางข้น จะต้องใช้สารเคมีและสารเคมีเหล่านี้เมื่อปะปนในน้ำทิ้งจะทำให้มีความเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศน์และผู้คนในละแวกใกล้เคียง



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตและน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น และยางสกิม

2.6 การผลิตยางแท่งโดยใช้หางน้ำยางจากน้ำทิ้ง

ในการผลิตน้ำยางข้นจะมีผลพลอยได้ คือหางน้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางอยู่ประมาณ 8 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ และการปรับเครื่องปั่นน้ำยาง หางน้ำยางเหล่านี้ถูกนำไปแปรรูปเป็นยางคิบแห้ง ชนิดสกิม บล็อก หรือชนิดสกิมเครพ จำหน่ายต่อไป ขั้นตอนการผลิตเริ่มจาก หางน้ำยางเมื่อออกจากเครื่องปั่นจะผ่านการไล่แอมโมเนียโดยวิธีการปล่อยให้หางน้ำยางไหลไปตามรางรองรับ ซึ่งมีอากาศพัดผ่านลงสู่บ่อพักที่อยู่ในที่โล่งมีอากาศพัดพาช่วยไล่ก๊าซแอมโมเนียได้ดี หางน้ำยางควรเหลือแอมโมเนียเพียงประมาณ 0.2 % (ต่อน้ำหนักหางน้ำยาง) ก่อนการทำการจับให้หางน้ำยางเป็นก้อนด้วยการเติมกรดซัลฟิวริก เมื่อได้ก้อนยาง

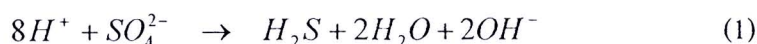
จับตัวแล้วจึงนำไปผ่านการตัดย่อย อบอุ่นแห้งเป็นสกิมบล็อต หรือเข้าเครื่องเครพรีดเครพ ผึ่งแห้งอัดก้อน เป็นสกิมเครพ

2.7 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานน้ำยางข้น

จากกระบวนการผลิตในโรงงานน้ำยางข้นจะมีน้ำเสียเกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต เช่น การล้างบ่อหรือพื้น การล้างเครื่อง การแยกเนื้อยางน้ำยาง โดยในน้ำเสียเหล่านี้จะมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากเศษยาง สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่งผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานน้ำยางมีลักษณะเด่น ๆ ได้แก่ มีปริมาณสารอินทรีย์สูง และมีปริมาณซัลเฟตและปริมาณแอมโมเนียสูง ดังจะเห็นได้จากแผนภาพรูปที่ 2.4

ในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานน้ำยางข้น ซึ่งมีปริมาณซัลเฟตอยู่สูงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการหายใจแบบใช้ซัลเฟตของแบคทีเรียที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมทั่วไป เป็นการหายใจที่ใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในสภาพไม่มีออกซิเจน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การรีดักชันซัลเฟตเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต หรืออาจเรียกว่า ดีซัลฟูริแคนท์ (*Desulfuricans*) เป็นพวกที่สามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ดังสมการรีดักชันที่ (1) ดังนี้

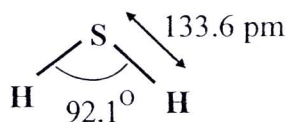


- แบคทีเรียนี้เป็นพวกออกพลิเคตและแอนแอโรบ ซึ่งจะเจริญเติบโตในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น แบคทีเรียกลุ่มนี้มีหลายชนิด ได้แก่ *Desulfovibrio*, *Desulfuricans*, *D. vulgaris*, *D. gigas*, *Desulfotomaculum nigrificans*, *D. orientis*, *D. ruminis* และ *D. acetoxidans*
- การรีดักชันซัลเฟตเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากแบคทีเรียกลุ่มนี้ที่เรียกรวม ๆ ว่า *Desulfuromonas acetoxidans* โดยแบคทีเรียนี้สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้และมักจะร่วมกับแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในการทำงาน เช่น แบคทีเรีย *Chlorobium* ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียสังเคราะห์แสงจะให้กำมะถันกับแบคทีเรีย *Desulfuromonas acetoxidans* ขณะเดียวกันแบคทีเรีย *Desulfuromonas acetoxidans* จะสร้างไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แก่แบคทีเรีย *Chlorobium*

2.8 ก๊าซมีกลิ่นและก๊าซที่เป็นมลพิษ

2.8.1 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

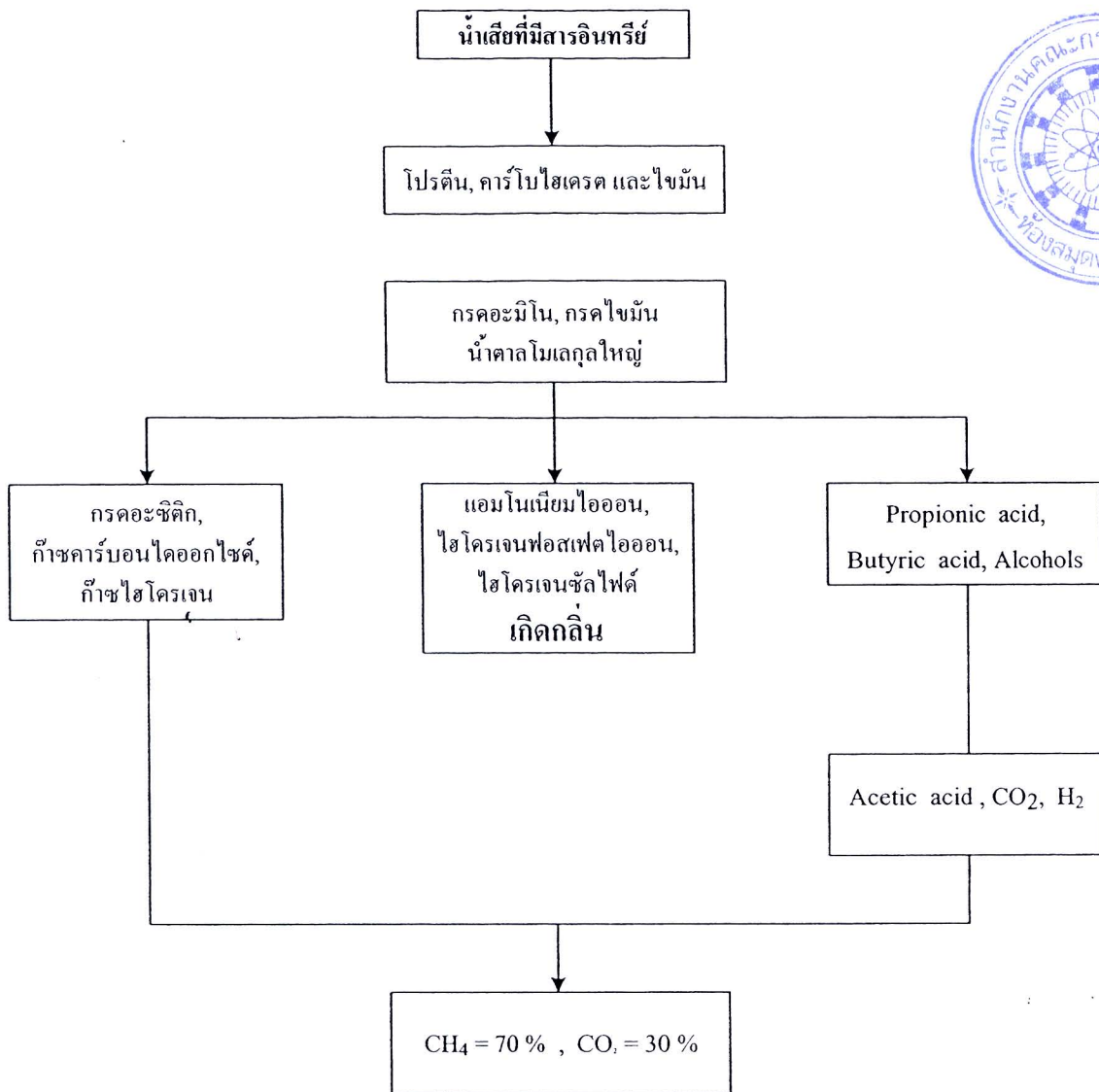
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศนั้น เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นเหม็นเหมือนไข่เน่า มีความสามารถละลายน้ำได้และเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เยื่อจมูกและตาเกิดความระคายเคือง โครงสร้างของโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงดังรูปที่ 2.5 ถ้าหายใจเข้าไปที่ละน้อยเป็นเวลานาน จะปวดศีรษะเวียนศีรษะ รู้สึกเหมือนเผาไหม้ในลำคอ ไอ หรือเกิดอาการหลอดลมอักเสบ และในที่สุดก็เกิดเป็นตะคริว ซึ่งจรด้น้ำหรืออ่อน ซัก หายใจไม่ออก และถ้าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่า 200 ppm จะทำให้รู้สึกอ่อนเพลียและสูญเสียประสาททางการดมกลิ่น และถ้าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่า 700 ppm จะทำให้หมดสติอย่างรวดเร็ว หยุดหายใจ อาจเสียชีวิตได้หากไม่ได้รับการช่วยเหลือทันที รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากสารอินทรีย์ โดยก๊าซเสียที่ได้จากการย่อยสลายยังประกอบด้วยก๊าซที่เป็นกลุ่มออกไซด์ของคาร์บอน และก๊าซชนิดอื่น ๆ ปะปนออกมาด้วย ทั้งนี้ปริมาณก๊าซเสียชนิดต่าง ๆ จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์วัตถุดิบเป็นตัวแปรหลัก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ H_2S (คัดแปลงจาก www.th.wikipedia.org)

2.8.2 ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีรส และไม่มึนกลิ่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เบากว่าอากาศทั่วไปเล็กน้อยสามารถใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้ สำหรับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อหายใจเข้าสู่ปอดในร่างกาย จะรวมตัวกับฮีโมโกลบิน (Haemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าก๊าซออกซิเจนถึง 200-250 เท่า และก่อรูปเป็นสารประกอบคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (COHb) ทำให้กระแสเลือดนำก๊าซออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อได้น้อยลง โดยทั่วไป องค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอกซีฮีโมโกลบินในเลือดมากหรือน้อย ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในอากาศที่สูดเข้าปอด และระยะเวลาการมีอยู่ของปริมาณก๊าซในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ ซึ่งอาการที่แสดงออกของการได้รับปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ของคนทั่ว ๆ ไป คือ อาการง่วงซึมและหมดสติ จนอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้เนื่องจากขาดออกซิเจน อย่างไรก็ตามอาการที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับความไวในการรับรู้ของแต่ละบุคคลด้วย

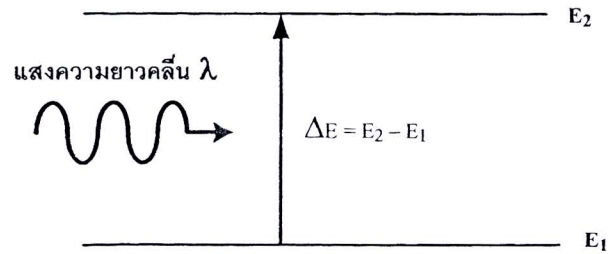


รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (เกรียงศักดิ์, 2539)

2.9 การดูดกลืนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

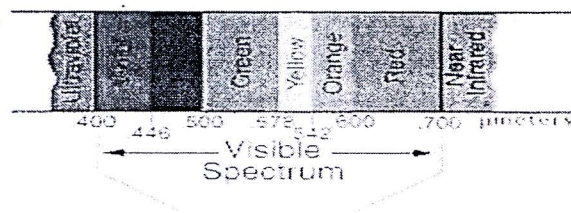
การดูดกลืน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน การดูดกลืนพลังงานจะเกิดขึ้นที่ความยาวช่วงคลื่นบางช่วง ปกติอะตอมอิสระจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุด หรือสถานะพื้น เมื่ออะตอมในสถานะพื้นดูดกลืนแสงในช่วง อัลตราไวโอเลต และแสงที่ตามองเห็น เฉพาะอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่านั้นที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงาน จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น





รูปที่ 2.7 ลักษณะการดูดกลืนพลังงานแสงของอะตอม (<http://www.kanchanapisek.or.th.html>)

โดยเฉพาะก๊าซที่มีความสามารถดูดกลืนเป็นพิเศษ คือ ก๊าซออกซิเจนและก๊าซโอโซน จะดูดกลืนคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่ำ กว่าความยาวคลื่นแสงที่เรามองเห็น โดยปกติจะอยู่ในกลุ่มของความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตลงมา (0.03-0.4 μm)



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองเห็น (<http://www.kanchanapisek.or.th.html>)

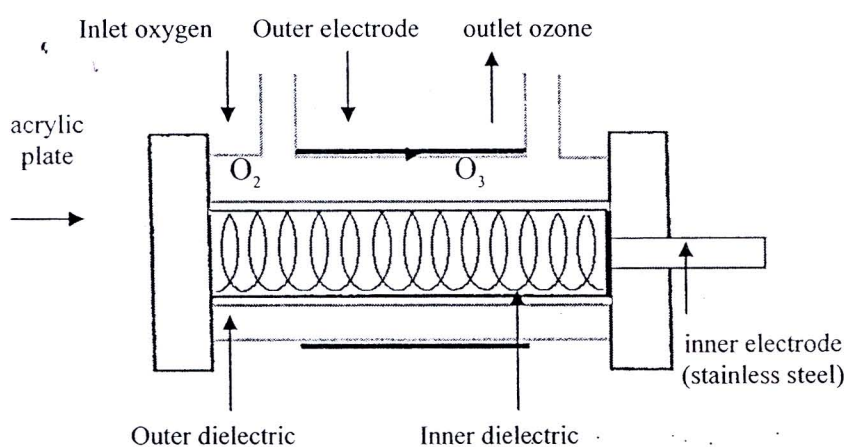
2.10 กำหนดมาตรฐานสุขภาพ (Health standard)

การกำหนดมาตรฐานสุขภาพต่าง ๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเกณฑ์ป้องกันในการปลดปล่อยสารที่อาจเป็นพิษและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมออกสู่บรรยากาศ ซึ่งอาจอยู่ในรูปสถานะของแข็ง ของเหลวและก๊าซ มาตรฐานต่าง ๆ ที่เป็นข้อกำหนดตกลงกันระหว่างประเทศที่สำคัญมีหลาย ๆ องค์การระหว่างประเทศวางมาตรฐานขึ้น ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซโอโซนสู่สิ่งแวดล้อม อาทิเช่น

- FDA (Federal Drug Association) องค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดว่าเครื่องผลิตโอโซนไม่ควรผลิตโอโซนเกิน 0.05 ppm. (ส่วนในล้านส่วน) สำหรับใช้ภายในอาคาร
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ตั้งข้อกำหนดว่า ไม่ควรทำงานในบริเวณที่มีความเข้มข้นของโอโซนเกิน 0.10 ppm. เกินกว่า 8 ชั่วโมง
- NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) ได้ตั้งข้อกำหนดว่า ไม่ควรอยู่ในบริเวณที่มีโอโซนเกิน 0.10 ppm. ไม่ว่ากรณีใด
- EPA (Environmental Protection Agency) ตั้งข้อกำหนดว่าไม่ควรอยู่ในบริเวณที่มีโอโซนถึง 0.08 ppm. เกิน 8 ชั่วโมง (http://www.goodhealth.co.th/new_page_17.html)

2.11 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน

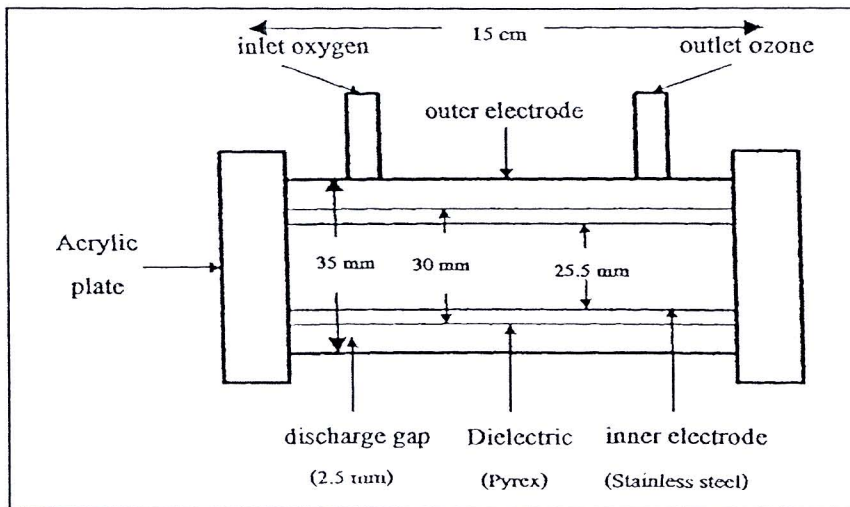
เมื่อต่อขั้วศักย์ไฟฟ้าแรงสูงและจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงเข้าเครื่องกำเนิดโอโซนแล้ว ผ่านอากาศเข้าทางช่องขาเข้าของออกซิเจน แล้วภายในเครื่องจะเกิดการดีสชาร์จของไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายนอกกับขั้วอิเล็กโทรดภายใน โดยการดีสชาร์จของไฟฟ้านี้จะกระตุ้นให้อะตอมของก๊าซออกซิเจนเกิดการแตกตัว แล้วเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอะตอมของออกซิเจนกลายเป็นก๊าซโอโซนผ่านช่อง outlet ozone ออกมา ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตโอโซนจะใช้พลังงานไปเพียงส่วนหนึ่งประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น พลังงานส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน เสียงและแสง ซึ่งทั้งนี้ถ้ามีการกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดโอโซนอย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ในจำนวนมากขึ้น



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีการดีสชาร์จแบบไดอิเล็กตริก (นาถพงษ์, 2549)

ส่วนประกอบของชุดเครื่องกำเนิดโอโซนแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 โดยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. ขั้วไฟฟ้า ควรทำจากโลหะที่นำความร้อนได้ดี และไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้ามักทำจากโลหะสแตนเลส ขั้วไฟฟ้านี้ในเครื่องกำเนิดโอโซนประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้านี้เป็นขั้วของความต่างสูง ส่วนขั้วไฟฟ้านอกเป็นขั้วดินหรือขั้วกราวด์
2. สารไดอิเล็กตริก วางระหว่างขั้วไฟฟ้ามีหน้าที่เพื่อให้เกิดการดีสชาร์จสม่ำเสมอและป้องกันการอาร์คของไฟฟ้า ไดอิเล็กตริกมักทำจากแก้วบางชนิด (pyrex) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกสูง หาง่ายและราคาไม่สูงนัก สำหรับความหนาของ ไดอิเล็กตริกมักอยู่ระหว่าง 1-3 มิลลิเมตร



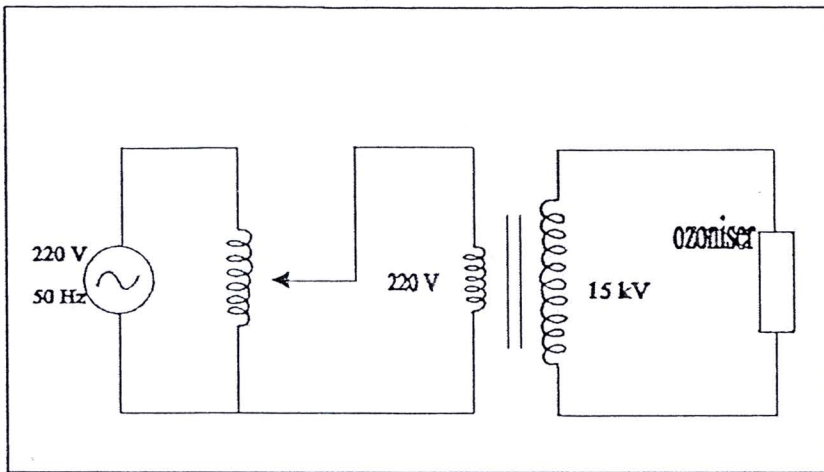
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดโอโซน (Thaiphon, 2001)

ซึ่งในรูปที่ 2.10 ภายในชุดเครื่องกำเนิดโอโซนประกอบด้วย

- ท่อแก้ว pyrex ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 40.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 35.0 มิลลิเมตร
- ท่อแก้ว pyrex ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 30.0 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 26.7 มิลลิเมตร

2.12 หลักการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

หลักการทำงานของวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ที่ต่ออนุกรมกับเซลล์โอโซนในเซอร์ วงจรนี้ประกอบด้วยโวลต์มิเตอร์ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 240 โวลต์ ซึ่งต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาด 0 ถึง 15 กิโลโวลต์ ซึ่งไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงจะไหลไปเซลล์โอโซนในเซอร์ และจะต้องมีปรับเทียบไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออก มากับค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเสียก่อน โดยใช้ตัวต้านทานความต่างศักย์สูงเป็นตัวจับกับขั้วของเซลล์โอโซนในเซอร์ ซึ่งขณะหม้อแปลงจ่ายความต่างศักย์สูงให้กับเซลล์โอโซนในเซอร์ ตัวต้านทานความต่างศักย์สูงนี้ จะเป็นตัวจับความต่างศักย์สูงที่ตกคร่อมอยู่ระหว่างเซลล์โอโซนในเซอร์ โดยอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ที่อ่านได้ต่อความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจริง คือ 1: 1000 หมายความว่าเครื่องจะแปลงไฟฟ้าจาก 1000 โวลต์ที่ผ่านเซลล์โอโซนในเซอร์ ให้กลายเป็นศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ แล้วอ่านค่าความต่างศักย์ที่ได้ด้วยเครื่องออกสซิดิลอสโคป



รูปที่ 2.11 วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในการทดลอง (ยุทธนา และคณะ, 2541)