OZONE มีคุณแต่ก็ให้โทษ

ธีรพล คังคะเกตุ
สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

โอโซนเป็นก๊าซที่มีอยู่ในบรรยากาศโลกตามธรรมชาติแต่ว่ามีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก เมื่อมนุษย์รู้จักโอโซนเป็นครั้งแรกนั้นเรายังไม่รู้ถึงคุณสมบัติและบทบาทที่แท้จริงของโอโซนในธรรมชาติ หลายสิบปีต่อมาเราถึงได้รับรู้ถึงบทบาทที่สำคัญหรือคุณูปการของโอโซนที่มีต่อโลกในขณะเดียวกันเราก็ได้รับรู้ถึงพิษภัยของโอโซนในฐานะสารมลพิษทางอากาศที่สำคัญตัวหนึ่งเช่นกัน ปี พ.ศ. 2498 ถือว่าเป็นครั้งแรกที่มีการกำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของสารออกซิแดนท์ (Oxidant) ในบรรยากาศของรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา ต่อมาในปี พ.ศ. 2518 เมื่อรู้แน่ชัดแล้วว่าสาร Oxidant ที่เป็นตัวสำคัญที่ก่อปัญหาด้านสุขภาพคือโอโซน จึงได้มีการปรับมาตรฐานเป็นสาร Oxidant ที่เทียบเท่าโอโซน (Oxidant as Ozone) โดยคำนึงถึงผลเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบทางเดินหายใจและการระคายเคืองตา ดังนั้นกล่าวได้ว่าโอโซนมีสองบทบาทที่ตรงข้ามกันอยู่ในตัวเอง บทบาทหนึ่งเป็นพระเอกทำหน้าที่ปกป้องโลกจากรังสี UV (Ultraviolet) อีกบทบาทหนึ่งคือเป็นผู้ร้ายที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนเรารวมทั้งทำความเสียหายต่อพืชผลทางการเกษตร

โอโซนมาจากไหน? มีบทบาทอย่างไร?

โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซโดยธรรมชาติเช่นเดียวกับก๊าซออกซิเจนที่เราหายใจอยู่ตลอดเวลา แต่ต่างที่ว่าโอโซนมีอะตอมของออกซิเจนสามอะตอม ในขณะที่ก๊าซออกซิเจนมีออกซิเจนเพียงสองอะตอมเท่านั้น สูตรโมเลกุลของโอโซนจึงแสดงด้วยสัญญลักษณ์ O_3 และสูตรโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนแสดงด้วยสัญญลักษณ์ O_2 จำนวนหนึ่งอะตอมของออกซิเจนที่เพิ่มเข้ามาในโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีที่กำหนดบทบาทสำคัญของโอโซนทั้งทางดีและทางร้าย

โดยธรรมชาติโอโซนเกิดขึ้นในบรรยากาศจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนกับออกซิเจนอะตอม โอโซนส่วนใหญ่ปรากฏอยู่ในบรรยากาศชั้น Stratosphereซึ่งอยู่สูงขึ้นไปจากพื้นผิวโลกขึ้นไปเป็นระยะทางประมาณ 10 ถึง 50 กิโลเมตร ดังนั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นนี้จึงถูกเรียกว่า “Stratospheric ozone” และเนื่องจาก Stratospheric ozone ทำหน้าที่ปกป้องโลกจากรังสี UV ดังนั้นจึงถูกเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า “Good ozone” สำหรับโอโซนที่เป็นปัญหามลพิษเกิดขึ้นอยู่ในบรรยากาศชั้นล่างระดับผิวโลกจึงถูกเรียกว่า “Trotospheric ozone” หรือ “Bad ozone”

ในปี พ.ศ. 2328 Van Muramนักเคมีชาวดัทช์ได้กลิ่นแปลกๆบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องมือไฟฟ้าสถิตย์ อีก 16 ปีต่อมามีกลิ่นเช่นเดียวกันนี้เกิดขึ้นระหว่างการทดลองแยกน้ำด้วยไฟฟ้า แต่จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2383 Christian Friedrich Schonbein นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันจึงได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าเป็นผู้ค้นพบโอโซนและได้ตั้งชื่อตามภาษากรีกว่า “Ozein” ซึ่งหมายถึงกลิ่น

อีก 17 ปีต่อมา (ปี พ.ศ. 2400 หรือราวๆ 11 ปีหลังการถึงแก่กรรมของ Schonbein) จึงเป็นก้าวแรกในประวัติศาสตร์ของการใช้ประโยชน์จากโอโซนเมื่อนักเคมีชาวเยอรมัน Werner von Siemens ได้ประดิษฐ์เครื่องกำเนิดโอโซนขึ้นสำเร็จเป็นครั้งแรก เนื่องจากโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรและมีความไวปฏิกิริยาสูงดังนั้นจึงไม่เหมาะต่อการผลิตและบรรจุเพื่อนำไปใช้งาน แต่ควรต้องผลิตและใช้งานทันที เครื่องกำเนิดโอโซนดังกล่าวเป็นที่รู้จักในนาม “Siemens Type”Ozone generator แม้กระนั้นก็ตามสูตรเคมีของโอโซนก็ยังไม่เป็นที่รู้แน่ชัดจนกระทั่งในปี พ.ศ. 2408 เมื่อ Soret Jacques-Louis ได้ค้นพบสูตรเคมีของโอโซน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2413 เป็นต้นมามีการบันทึกเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากโอโซนมากขึ้นเรื่อยๆ ตัวอย่างเช่น

- พ.ศ. 2429 พบว่าโอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียได้
- พ.ศ. 2436 เป็นครั้งแรกที่มีการใช้โอโซนในระบบน้ำประปา
- พ.ศ. 2439 Nikola Tesla ได้จดสิทธิบัตรเครื่อง ผลิตโอโซนเป็นเครื่องแรกของเขา ต่อมาในปี พ.ศ. 2443 บริษัท The Tesla Ozone Company ได้เริ่มขายเครื่องผลิตโอโซนให้กับแพทย์
- พ.ศ. 2449 โรงผลิตน้ำประปาที่ใช้โอโซนได้ถูกติดตั้งขึ้นเป็นครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศสที่เมือง Nice และได้ใช้โอโซนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีจนได้ฉายาว่า *“Place of birth of ozone for drinking water treatment”*
- ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 (พ.ศ. 2457-2461) มีการใช้โอโซนเพื่อรักษาบาดแผล รักษา Trench foot (เกิดจากการที่เท้าสัมผัสกับความอับชื้นและความเย็นเป็นเวลานาน) และเนื้อตายเน่า (Gangrene) เป็นต้น
- พ.ศ. 2472 มีการพิมพ์เผยแพร่หนังสือ *“Ozone and Its Therapeutic Action”* ในสหรัฐอเมริกาและ พ.ศ. 2496 พิมพ์เผยแพร่หนังสือ *“Medical Ozone”* และมีการอบรมแพทย์ด้านการบำบัดด้วยโอโซนในเยอรมัน

นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้ประโยชน์จากโอโซนในด้านอื่นๆ เช่น การถนอมอาหาร การทำความสะอาดสระว่ายน้ำ เป็นต้น ที่ฟังดูแล้วค่อนข้างแปลกก็คือมีรายงานการใช้โอโซนในการรักษาผู้ป่วยเอดส์ ในปี พ.ศ. 2541 USEPA ได้ยืนยันถึงผลสัมฤทธิ์ของการใช้โอโซนในการกำจัดเชื้อโรคอันตรายต่างๆ ในน้ำซึ่งรวมถึงเชื้อ *Cryptosporidium* ที่ทนต่อคลอรีนด้วย

การใช้ประโยชน์จากโอโซนสรุปได้ว่าเกือบทั้งหมดเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับสุขภาพโดยเริ่มจากการใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในระบบน้ำประปาและจนถึงปัจจุบันนี้มีเมืองต่างๆมากกว่า 2,500 แห่งมีการใช้โอโซนในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม/ประปา

โอโซนปกป้องโลก
Stratospheric “good” Ozone

บรรยากาศของโลกแบ่งออกได้เป็น 5 ชั้นตามระยะความสูงขึ้นไปจากพื้นผิวโลกดังนี้ (1) Troposphere 0-10 กิโลเมตร (2) Stratosphere 10-50 กิโลเมตร (3) Mesosphere 50-80 กิโลเมตร (4) Thermosphere 80-500 กิโลเมตร และ

(5) Exosphere ตั้งแต่ 500 กิโลเมตรขึ้นไป บรรยากาศโลกประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ (78 และ 21 เปอร์เซนต์ตามลำดับ) ก๊าซอาร์กอน 0.9 เปอร์เซ็นต์ รวม 99.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ สำหรับโอโซนมีอยู่ประมาณ 0.00006 เปอร์เซนต์ ซึ่งส่วนใหญ่ (90 เปอร์เซนต์) อยู่ในชั้น Stratosphere และถูกเรียกว่า Stratospheric ozone ทำหน้าที่ปกป้องมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ บนโลกจากอันตราย ของรังสี UV (โดยเฉพาะ UV-b และ UV-a) ดังนั้นโอโซนในชั้นนี้จึงถูกเรียกว่า **"Good ozone"** ซึ่งตรงข้ามกับอโซนที่อยู่ในระดับพื้นโลก(ชั้น Troposphere)ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์รวมทั้งพืชผลทางการเกษตร/ป่าไม้ จึงถูกเรียกว่า **"Bad ozone"**

จะเกิดอะไรขึ้นถ้าโลกไม่มี Strartosphericozone

ถ้าไม่มีโอโซนกรองรังสี UV จากแสงอาทิตย์ก่อนที่จะส่องลงมาถึงผิวโลกก็คงจะไม่เหลือสิ่งมีชีวิตเหลืออยู่บนโลกอีกต่อไป โอโซนสามารถกรอง รังสี UV-b และ UV-c ได้เป็นส่วนใหญ่ แต่กรองรังสี UV-a ได้ประมาณครึ่งหนึ่ง เวลาเราออกแดดแรงๆเรายังต้องใส่เสื้อผ้าปกคลุมหรือใช้ร่มหรือใช้ครีมกันแดดเพื่อป้องกันผิวไหม้และป้องกันไม่ให้เป็นมะเร็งผิวหนัง ต้องสวมแว่นตากันแดดเพื่อป้องกันสายตานี่ หมายถึงว่าแสงแดดที่ถูกกรองแล้วโดยโอโซน ลองนึกภาพว่าถ้าโอโซนถูกทำลายไปลดลงแล้วจะเป็นอย่างไร? รังสี UV ที่เข้มข้นนอกจากทำให้เกิดปัญหาสุขภาพกับคนแล้วยังมีผลต่อพืชพรรณต่อระบบนิเวศทางทะเลเช่น การลดลงของแพลงค์ตอนพืชผลร้ายต่อพัฒนาการในช่วงต้นของสัตว์น้ำต่างๆ เป็นต้นและมีผลต่อการ เปลี่ยนแปลงของวัฏจักรตามธรรมชาติของธาตุ/สารประกอบ เป็นต้น

หลุมโอโซน

เป็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่สำคัญประการหนึ่งของโลกแม้ถูกเรียกว่าหลุมโอโซนหรือ "Ozone hole" ก็ตามแต่ในความเป็นจริงก็ไม่ได้หมายถึงหลุมหรือช่องว่างที่เกิดขึ้นในชั้นโอโซนแต่หมายถึงพื้นที่ในบรรยากาศชั้น Stratosphere ที่มีปริมาณโอโซนเหลืออยู่น้อยมาก โดยธรรมชาติระดับหรือความเข้มข้นของโอโซนก็มีความแปรผันไปตามปัจจัยบางอย่าง เช่น ฤดูกาล และ ความสูง เป็นต้น เมื่อมีการทำลายโอโซนเกิดขึ้นก็จะมีกระบวนการสร้างขึ้นเพื่อทดแทน ดังนั้นระดับของ Stratospheric ozone จึงค่อนข้างคงที่ตั้งแต่คริสตศตวรรษที่ 1970 มีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แสดงให้เห็นว่าโอโซนกำลังถูกทำลายในอัตราที่สูงกว่ากระบวนการตามธรรมชาติจนมีผลให้ระดับโอโซนลดลงอย่างผิดปกติ

Stratospheric ozone ถูกทำลายอย่างไร?

โอโซนในบรรยากาศชั้น Stratosphere ถูกทำลายได้เมื่อสัมผัสกับอะตอมของคลอรีนและโบรมีน คลอรีนหนึ่งอะตอมสามารถทำลายโอโซนได้มากกว่า 100,000 โมเลกุลก่อนที่จะถูกกำจัดออกไปจากชั้น Stratosphere สารประกอบบางอย่างสามารถปลดปล่อยอะตอมของคลอรีนหรือโบรมีนเมื่อกระทบกับรังสี UV ในชั้น Stratosphere สารประกอบเหล่านี้จึงถูกจัดว่าเป็นสารทำลายโอโซน หรือ ODS (Ozone-depleting substances) สารเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์ที่มีคลอรีนหรือโบรมีนเป็นองค์ประกอบ **ODS** นอกจากทำลายโอโซนได้รวดเร็วแล้วยังมีอายุยาวนานนับสิบนับร้อยปีในบรรยากาศชั้น Stratosphere ตัวอย่างของ ODS ได้แก่ CFCs HCFCs Carbon tetrachloride Methyl chloroform Halons และ Methyl bromide เป็นต้น

การลดลงของ Stratospheric ozone

เป็นปัญหาสำคัญระดับโลกที่ทุกๆประเทศจำเป็นต้องร่วมมือกันแก้ไขและป้องกันจึงทำให้เกิด "Montreal Protocol" ขึ้นในปี พ.ศ.2530 โดยมี 197 ประเทศร่วมลงนาม กล่าวได้ว่านี่เป็นข้อตกลงนานาชาติฉบับแรกในประวัติศาสตร์ที่ได้รับความร่วมมือจน

ประสบความสำเร็จด้วยดีและเพื่อเป็นการรำลึกถึงดังนั้นในปี พ.ศ. 2537 UN จึงได้ประกาศให้วันที่ 16 กันยายนของทุกปีเป็น *"International Day for the Protection of the Ozone Layer"* ขึ้น

โอโซน หนึ่งในสารมลพิษทางอากาศสำคัญ

AQG (Air Quality Guideline) ที่ออกโดยองค์การอนามัยโลก หรือ WHO ได้กำหนดให้โอโซนเป็น 1 ใน 4 ของ Classical/Common pollutants US.EPA ในคราวที่ประกาศใช้มาตรฐานคุณภาพอากาศระดับชาติหรือ NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2514 ได้กำหนด Principal pollutantไว้ 5 ชนิด และโอโซนเป็นหนึ่งในนั้นจึงปฏิเสธไม่ได้ว่าโอโซนเป็นสารมลพิษทางอากาศสำคัญตัวหนึ่ง ประการสำคัญคือมาตรฐานโอโซนมีการปรับเปลี่ยนมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงยี่สิบที่ผ่านมามีผลจากการศึกษาวิจัยมากมายที่บ่งชี้ว่าผลจากมลพิษทางอากาศมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับปัญหาสุขภาพของประชาชน เกี่ยวข้องกับภาวะป่วยไข้และการตายก่อนเวลาอันควร ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2540 เป็นต้นมา มาตรฐานโอโซนได้มีการปรับแก้ในทุกคราวที่ USEPA มีการทบทวนมาตรฐานคุณภาพอากาศ (ก่อนหน้านี้มีการปรับแก้ล่าสุดคือปี พ.ศ. 2522) WHO ก็มีการปรับแก้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับ USEPA แต่เป็นไปในลักษณะที่มีการปกป้องต่อสุขภาพของประชากรมากกว่า (ดูข้อมูลประกอบการอ่านในกรอบท้ายบทความ)

หลังจากที่เรารู้จักและตั้งชื่อให้ว่า "โอโซน" รวมถึงว่าไม่นานต่อมาโอโซนก็สามารถถูกผลิตขึ้นมาได้และได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ด้านสุขภาพและสาธารณสุขอย่างหลากหลายต่อเนื่องมาถึงปัจจุบัน โอโซนมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการยอมรับให้ใช้ได้กับน้ำดื่มทั้งในระบบผลิตน้ำประปาและน้ำดื่มบรรจุขวดรวมถึงการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์แต่ทำไมโอโซนถึงกลายมาเป็นสารมลพิษทางอากาศที่สำคัญได้ อันที่จริงแล้วคุณสมบัติสำคัญของโอโซนที่เรานำมาใช้ประโยชน์ก็เป็นลักษณะสมบัติเดียวกันที่ทำให้โอโซนเป็นสารมลพิษทางอากาศ นั่นคือความเป็นสาร Oxidant นั่นเอง

โอโซนเป็นสารมลพิษทางอากาศที่ค่อนข้างแปลกกว่าสารมลพิษอื่นๆที่แหล่งกำเนิด โอโซนไม่ได้ถูกปล่อยออกมาโดยตรงจากกิจกรรมใดๆของมนุษย์ทั้งสิ้น แต่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศระหว่างสารมลพิษทางอากาศอื่นๆโดยมีแสงแดดเป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นโดยกำเนิดโอโซนจึงจัดเป็นสารมลพิษทุติยภูมิ (Secondary pollutant) สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของโอโซนใน บรรยากาศจนทำให้เกิดเป็นปัญหามลพิษ (Ozone pollution) นั้นส่วนใหญ่มาจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ NO_2 กับ VOCs (สารอินทรีย์ระเหยง่าย) ดังแสดงในรูปสมการอย่างง่ายดังนี้

$$NO_2 + light = NO+O \quad .....(1)$$

$$O_2+O = O_3 \quad .....(2)$$

ผลกระทบต่อสุขภาพ

โอโซนมีผลต่อสุขภาพของคนเราโดยตรงจากการสูดลมหายใจเข้าไป โอโซนทำอันตรายต่อระบบลมหายใจและปอดตั้งแต่ช่องจมูกลงไปถึงส่วนลึกที่สุดบริเวณที่เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างอากาศที่หายใจเข้าไปกับเลือด นอกจากนี้ยังมีผลต่อตาและผิวหนังชั้นนอก

ผลต่อสุขภาพจากโอโซนโดยรวมพอกล่าวถึงโดยย่อได้ดังนี้

- ผลกระทบต่อระบบปอดและลดประสิทธิภาพการทำงานของปอด
- ผลกระทบต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด
- ทำให้เกิดพัฒนาการของโรคหลอดเลือดแข็งหรือตีบ
- ทำให้เกิดพัฒนาการของโรคหอบหืด
- ทำให้อายุสั้นลง

กลุ่มเสี่ยง

ผู้ที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงต่อการได้รับโอโซนผ่านทางลมหายใจประกอบด้วย ผู้ป่วยโรคหอบหืด เด็ก คนแก่ และผู้ที่มีกิจกรรมกลางแจ้ง (โดยเฉพาะผู้ที่ทำงานนอกอาคาร) นอกจากนี้ผู้ที่บริโภคสารอาหารบางอย่างไม่พอเพียง ได้แก่ วิตามิน C และ

วิตามิน E เป็นต้น มีความเสี่ยงสูงมากต่อการได้รับโอโซน เด็กถือว่าอยู่ในกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูงมากเนื่องจากเป็นวัยที่ปอดยังอยู่ในระยะพัฒนาการและมักมีกิจกรรมนอกอาคารสูง ทำให้มีโอกาสรับโอโซนมากขึ้น รวมทั้งเด็กมีแนวโน้มที่จะเป็นหอบหืดมากกว่าผู้ใหญ่

ท้ายเรื่อง

เรื่องของโอโซนนี้ค่อนข้างแปลกกว่าสารมลพิษอื่นๆอยู่บ้างที่ว่า ในขณะที่เราพยายามหาทางป้องกันไม่ให้เกิดโอโซน แต่ในอีกทางหนึ่งเราก็กำลังปกป้องโอโซนอยู่ด้วยเช่นกัน ก็โอโซนตัวเดียวกันนี่แหละ เพียงแต่ว่าตัวหนึ่งเกิดจากมนุษย์(แม้จะเป็นทางอ้อม)และอยู่ในบรรยากาศชั้นล่างสุด ส่วนอีกตัวหนึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติและอยู่ในบรรยากาศชั้นถัดขึ้นไป การที่โอโซนอยู่ต่างชั้นบรรยากาศจึงทำให้มีบทบาทต่างกันไป "ชั้นบนเป็นคุณ-ชั้นล่างเป็นโทษ"

ปัญหาที่เกิดกับโอโซนชั้นบนดูแล้วไม่น่ากังวลสักเท่าไร เนื่องจากได้รับความร่วมมือกันอย่างพร้อมเพียงกันจากนานาประเทศ แต่ปัญหาโอโซนชั้นล่างดูแล้วน่าเป็นห่วง หลักฐานจากการวิจัยทำให้ต้องมีการปรับแก้ความเข้มข้นของโอโซนในมาตรฐานคุณภาพอากาศมาตลอดในช่วงยี่สิบปีมานี้ การทำให้ความเข้มข้นของโอโซนในอากาศลดลงก็ไม่ได้ทำได้ง่ายๆ เนื่องจากเป็นสารมลพิษทุติยภูมิ ต้องอาศัยการไปควบคุมสารตั้งต้นหรือ Precursorได้แก่ NO_2 และ VOC_s เป็นต้น ประการสำคัญคือปฏิกิริยาการเกิดโอโซนขึ้นกับปัจจัยธรรมชาติที่อยู่นอกเหนือการควบคุม เช่น ความเข้มของแสงแดด อุณหภูมิ และระดับความสูง เป็นต้น นอกจากนี้โอโซนเป็นมลสารที่เดินทางได้ไกลจากแหล่งกำเนิด ทั้งหมดที่กล่าวถึงนี้จึงทำให้โอโซนเป็นมลพิษที่คาดเดาได้ยาก ดังนั้นการแก้ปัญหามลพิษโอโซนจึงยังคงเป็นความท้าทายหนึ่งที่รอการแก้ไขอยู่

ข้อมูลประกอบการอ่าน

> แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมออกซิเจน 2 อะตอม อะตอมออกซิเจนดังกล่าวส่วนหนึ่งทำปฏิกิริยากันเองกลายเป็นก๊าซออกซิเจนขึ้นมาใหม่ ส่วนหนึ่งทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนกลายเป็นโอโซนขึ้นมา

> WHO / AQG 4 most common pollutants

- Nitrogen dioxide
- Ozone
- Particulate matter
- Sulfur dioxide

> US.EPA / NAAQS 6 principal pollutants

- Carbon monoxide (CO)
- Nitrogen dioxide (NO_2)
- Ozone (O_3)
- Particulate matter (PM)
- Sulfur dioxide (SO_2)
- Lead (เพิ่มเข้ามาใน พ.ศ.2521)

> การปรับแก้มาตรฐานโอโซนของ US.EPA (มาตรฐาน 8 ชั่วโมง)

- ปี พ.ศ. 2540 0.08 ppm (160 mcg/m^3)
- ปี พ.ศ. 2551 0.075 ppm (150 mcg/m^3)
- ปี พ.ศ. 2558 0.070 ppm (140 mcg/m^3)

> การปรับแก้มาตรฐานโอโซนของ WHO (มาตรฐาน 8 ชั่วโมง)

- ปี พ.ศ. 2543 120 mcg/m^3 (0.06 ppm)
- ปี พ.ศ. 2548 100 mcg/m^3 (0.05 ppm)

> มาตรฐานประเทศไทย ปี พ.ศ. 2550 กำหนดไว้ไม่เกิน 0.07 ppm หรือ 0.14 mg/m^3 (8 ชั่วโมง)

บรรณานุกรม

- Cal/EPA."History of Ozone and Oxidant Ambient Air Quality Standards" California Environmental Protection Agency.https://www.arb.ca.gov/research/aaqs/caaqs/ozone/o-hist/o-hist.htm (accessed November 11, 2016)
- NASA."Ozone Hole Watch" National Aeronautics and Space Administration.https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html (accessed December 25, 2016)
- OZOFRESH." History of Ozone" https://ozofresh.co.uk/15-history-of-ozone.html (accessed November 11, 2016)
- US.EPA. "Table of Historical Ozone National Ambient Air Quality Standards" US Environmental Protection Agency.https://www.epa.gov/ozone-pollution/table-historical-ozone-national-ambient-air-quality-standards-naaqs (accessed December 22, 2016)
- US.EPA. "Health Effects of Ozone Pollution" US Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution (accessed December 24, 2016)
- US.EPA, "Basic Ozone Layer Science" US Environmental Protection Agency.https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science (accessed December 25, 2016)
- WHO, "Air Quality Guideline Global Update 2005" World Health Organization, 2006