

**การอบรมเคมีโอลิมปิก**

**ค่าย 2**

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

**เคมีสิ่งแวดล้อม**

**ผศ.ดร.ตริตาภรณ์ ชุตร์**

**สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์**

---

## เคมีสิ่งแวดล้อมกับภาวะสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ

เมื่อมองไปรอบๆ จะเห็นได้ไม่ยากว่าสภาพแวดล้อมรอบตัวเรามีสภาพเสื่อมโทรมลง อากาศเต็มไปด้วยสารมลพิษ น้ำในแม่น้ำลำคลองเน่าเสีย สารพิษจำนวนมากตกค้างปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม แต่ก่อนที่จะใช้ความรู้ทางเคมีในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้นั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้น ต้องรู้ว่าต้นเหตุของปัญหาคืออะไร ต้องรู้ผลกระทบด้านต่างๆ ของปัญหาที่เกิดขึ้น ตลอดจนความสัมพันธ์ของสิ่งต่างๆ เหล่านั้น และความรู้ทางเคมีจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้

### 1. เคมีสิ่งแวดล้อม

ตามความเข้าใจแต่เดิมนั้นวิชาเคมี คือ การศึกษาองค์ประกอบของสารและการเปลี่ยนแปลงของสาร ซึ่งที่จริงแล้วคือความพยายามหาหลักการหรือทฤษฎีที่จะอธิบายและทำนายปรากฏการณ์ธรรมชาติทางกายภาพได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีดังกล่าวได้จากการวางแผนในการทดลอง

เทคโนโลยี คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ไปประยุกต์ ในปัจจุบันการประยุกต์ทางเคมีมีผลกระทบต่อตรงต่อสาธารณสุข มีผลการวิจัยจำนวนมากที่นำไปสู่กระบวนการและผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ล้วนแต่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรา และยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เช่นเดียวกับเหรียญที่มีสองด้าน เทคโนโลยีซึ่งเป็นการกระทำของมนุษย์ก็มีทั้งด้านบวกและด้านลบ ดังนั้นจะต้องมีการประเมินและตรวจสอบเทคโนโลยีที่ค้นพบและจะนำมาใช้อย่างรอบคอบ และนักเคมีเองก็ต้องตระหนักถึงบทบาทในการจัดการและการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติเพื่อความสุขร่วมกัน และคงหมดสมัยแล้วสำหรับการเจริญเติบโตของนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ปราศจากการตรวจสอบ

ตามที่ได้กล่าวแล้วว่า นวัตกรรมทางเคมีมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิชาเคมีสิ่งแวดล้อมจึงเป็นการศึกษาถึงแหล่ง ปฏิบัติการ การเคลื่อนย้าย และสภาพสุดท้ายของสารเคมีในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ น้ำ และดิน ตลอดจนผลของสารเคมีที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ และสภาพของสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ

เคมีสิ่งแวดล้อม เป็นสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเคมีหลายด้าน และเกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอื่นๆ อีกด้วย เคมีสิ่งแวดล้อมมีส่วนเกี่ยวข้องกับเคมีอินทรีย์ เคมีวิเคราะห์ เคมีอนินทรีย์ เคมีฟิสิกัล ชีววิทยา พืชวิทยา ชีวเคมี สาธารณสุข โรคระบาดวิทยา หรือแม้แต่เคมีคศาสตร์และวิศวกรรม การประยุกต์ที่สำคัญของเคมีสิ่งแวดล้อมก็คือการสร้าง ความเข้าใจในพฤติกรรมและผลกระทบของสารเคมีที่ดู กิ่งไร่ที่มีต่อสุขภาพของคนเราและต่อธรรมชาติสิ่งแวดล้อม เมื่อสารเคมีที่ใช้ไปปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ก็จำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับความเข้มข้นที่ยอมรับให้มีได้ ในน้ำ ในอากาศ และในสิ่งมีชีวิต จะต้องมีการติดตามตรวจสอบค่าความเข้มข้นที่กำหนดและผลกระทบที่เกิดขึ้น เพื่อให้แน่ใจว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดคั้นนั้นเป็นไปได้จริงและป้องกันผลร้ายที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังต้องให้ความสนใจในกฎเกณฑ์ข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้สารเคมีตัวใหม่ๆ และการป้องกันมิ ให้สารเคมีที่อันตรายเข้าสู่ห้องตลาดและสิ่งแวดล้อม ซึ่งหน้าที่ด้านนี้ควรจะเป็นหน้าที่ของรัฐในการควบคุมดูแล อย่างไรก็ตามปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาทางการเมือง สังคม เศรษฐกิจ ปัญหาทางเทคนิค และจะต้องอาศัยความร่วมมือของทุกฝ่ายทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และแต่ละบุคคล ในการที่จะช่วยกันรักษาสภาพแวดล้อมให้คงอยู่

## 2. ภาวะสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ (Environmental pollution)

ภาวะสิ่งแวดล้อมเป็นพิษเป็นเทอมที่ใช้ได้กับการกระทำทุกอย่างของมนุษย์ที่ทำให้เกิดอันตราย ต่อสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติรอบๆ ตัวเรว ทุกๆ คนคงเคยเห็นกองขยะส่งกลิ่นเหม็นคุ้ง ควันดำ จากปล่องโรงงาน น้ำเน่าสีดำในลำคลอง อย่างไรก็ตามยังมีภาวะมลพิษบางลักษณะที่อาจไม่เห็นได้ ชัดเจนเพราะไม่มีกลิ่น ไม่มีรสที่เราจะรู้สึกได้ แต่ภาวะมลพิษเหล่านั้นทำให้คุณภาพชีวิตของมวล มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ด้อยลง ตัวอย่างเช่น มลพิษทางเสียง ยากำจัดศัตรูพืช ริงสี ส่วนมีผล กระทบต่อโลก โดยที่เราอาจเห็นไม่ชัดเจนนัก

ภาวะสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ต้องเผชิญอยู่ใน ปัจจุบัน มลพิษทางอากาศที่รุนแรงทำลายพืชผลทางการเกษตรและก่อให้เกิดโรคร้ายไข้เจ็บที่คุกคาม ต่อชีวิต สารมลพิษทางอากาศบางชนิดทำให้ชั้นบรรยากาศของโลกกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ น้อยลง ซึ่งทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังมากขึ้น นักวิทยาศาสตร์หลายคนเชื่อว่าสภาวะการณ์เช่นนี้ และ สารมลพิษทางอากาศอีกหลายตัว เป็นตัวการทำให้สภาพอากาศของโลกเปลี่ยนแปลง คือมีอุณหภูมิ สูงขึ้น (global warming) และสภาพอากาศมีการแปรวนแปร เช่น เกิดสภาพ เอล นินโย (El Nino), ลา นินยา (La nina) และคลื่นความร้อน (heat ware) ที่รุนแรง จนคร่าชีวิตผู้คนเป็นจำนวนมากโดย เฉพาะในยุโรปในปีนี้ (พ.ศ. 2546) ส่วนมลพิษทางน้ำและมลพิษทางดินก็คุกคามการทำเกษตร กรรมของเกษตรกร และสภาพมลพิษในมหาสมุทรกำลังทำให้สิ่งมีชีวิตในทะเลหลายชนิดเริ่ม สูญพันธุ์

มีสาเหตุหลายอย่างที่ทำให้เกิดสภาวะมลพิษทางดิน แต่ที่เห็นชัดเจนในปัจจุบันดูเหมือนจะมี 3 สาเหตุใหญ่ๆ คือ ปัญหาขยะมูลฝอย ปริมาณการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายยากในปริมาณสูง และการใช้สารเคมีทั้งปุ๋ยและสารเคมีในการปราบศัตรูพืช

ทุกวันนี้คนไทย 60 กว่าล้านคน สร้างขยะได้มากถึง 14 ล้านตันต่อปี แต่ความสามารถในการจัดเก็บขยะกลับมีไม่ถึง 70% ของขยะที่เกิดขึ้น ขยะตกค้างหรือการนำไปกำจัดโดยไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดกลิ่นเหม็น น้ำเสีย เป็นแหล่งพาหะนำโรค และทำความเดือดร้อนให้แก่ชุมชนที่อยู่ในบริเวณนั้น ซึ่งเป็นปัญหาข้อขัดแย้ง และก่อให้เกิดคดีร้ายแรงหลายครั้งแล้วในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น ความขัดแย้งระหว่างบริษัทผู้รับกำจัดขยะกับชุมชนราชาเทวะ ในกรุงเทพมหานคร จนผู้นำชุมชนถูกจ้างวานฆ่าจนเสียชีวิต และปัจจุบัน (พฤศจิกายน 2546) ก็มีความขัดแย้งระหว่างโรงงานกำจัดขยะอุตสาหกรรมกับชาวบ้านในจังหวัดสระบุรี

นอกจากขยะปกติแล้ว ขณะนี้เริ่มมีปัญหาจากขยะของเสียอันตราย เช่น ของเสียเคมี และขยะติดเชื้อที่เพิ่มปริมาณมากขึ้น และมีบางประเทศที่อาศัยช่องโหว่หรือความไม่เคร่งครัดในกฎหมายของไทย ใช้วิธีขนขยะประเภทนี้มาทิ้งไว้ตามท่าเรือของไทย หรือแม้แต่ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบของไทยเอง ก็ยังบกพร่อง ทำให้เกิดกรณีขี้เลนนำเอาอุปกรณ์ซึ่งมี Co-60 อยู่ด้วยไปขาย ทำให้เกิดโศกนาฏกรรม มีผู้ได้รับอันตรายจากรังสีหลายรายและบางรายถึงแก่ชีวิต

การใช้พลาสติกต่างๆ กันมากในปัจจุบัน ทำให้เกิดปัญหาเช่นกัน เพราะพลาสติกมีความทนทานต่อการย่อยสลาย จะใช้เวลาเป็นสิบๆ ปี ก่อนสลายตัวไป ปัจจุบันจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับ biodegradable plastic ซึ่งเป็นพลาสติกที่สลายตัวได้เองในธรรมชาติหรือมีความพยายามที่จะนำพลาสติกต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งก็ช่วยลดปัญหาหลงไปได้ในระดับหนึ่ง

ในหลายๆ ประเทศ นำวิธีการแยกขยะมาใช้ในการจัดการเกี่ยวกับขยะ โดยใช้ภาชนะแตกต่างกันในการรองรับขยะประเภทต่างๆ หน่วยงานหลายแห่งในประเทศไทย ได้ริเริ่มดำเนินการแยกขยะตามวิธีดังกล่าวอยู่บ้าง แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จมากนักเพราะระบบยังไม่ครบวงจร ผู้เก็บขยะยังมีการนำขยะที่แยกประเภทไว้แล้วไปทิ้งรวมกันใหม่ก็มี

สำหรับการคัดแยกขยะนั้น นิยมแยกใช้ถังรองรับขยะที่มีสีแตกต่างกันดังนี้

- ถังสีเหลือง : รองรับขยะที่สามารถนำมารีไซเคิลหรือขายได้ เช่น แก้ว พลาสติก กระดาษ โลหะ
- ถังสีเทา : รองรับขยะที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขวดยา ถ่านไฟฉาย กระป๋องสเปรย์ กระป๋องยาฆ่าแมลงและภาชนะบรรจุสารอันตรายอื่นๆ
- ถังสีฟ้า : รองรับขยะที่ย่อยสลายไม่ได้ รีไซเคิลยาก แต่ไม่เป็นพิษ เช่น ซองบะหมี่สำเร็จรูป ถุงพลาสติกใช้แล้ว โฟม ฟอยล์ห่ออาหาร
- ถังสีเขียว : รองรับขยะที่เน่าเสียและย่อยสลายได้เร็ว สามารถนำมาหมักทำปุ๋ยได้ เช่น ผัก ผลไม้ ใบไม้ ใบหญ้า และเศษอาหาร

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอแนวคิดในการจัดการขยะโดยใช้หลัก 7 R ดังนี้

- REFUSE : การปฏิเสธหรือหลีกเลี่ยงสิ่งของหรือบรรจุภัณฑ์ที่จะสร้างปัญหาขยะและเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กล่องโฟม และขยะมีพิษอื่นๆ
- REFILL : การใช้สินค้าชนิดเติม ซึ่งใช้บรรจุภัณฑ์น้อยชิ้นกว่า เพื่อลดปริมาณขยะ
- RETURN : การเลือกใช้สินค้าที่สามารถส่งคืนบรรจุภัณฑ์กลับสู่ผู้ผลิตได้ เช่น ขวดเครื่องดื่มประเภทต่างๆ
- REPAIR : การซ่อมแซมเครื่องใช้ให้สามารถใช้งานได้ต่อไป แทนที่จะทิ้งเป็นขยะ (R ตัวนี้เป็นกิจกรรมที่ทำอย่างเป็นลำดับขั้นที่วัดสวนแก้วของพระพยอม กัลยาโณ โดยนำอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ที่ใช้งานไม่ได้แล้วที่มีผู้บริจาคให้มาซ่อมแซมจนใช้งานได้ และจำหน่ายในราคาถูกให้กับผู้มีรายได้น้อย)
- REUSE : การนำบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ให้คุ้มค่าก่อนจะทิ้งไป เช่น การใช้ถุงพลาสติกใช้แล้วใส่ขยะแทนที่จะทิ้งไปเลยๆ
- RECYCLE : การแยกขยะที่ยังใช้ประโยชน์ได้กลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปแปรรูปเป็นวัสดุชนิดใหม่ เพื่อให้ใช้ประโยชน์ได้ต่อไป
- REDUCE : การลดการบริโภค และหาทางเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ เพื่อลดปริมาณของเสียขยะ

ทั้งนี้การจะนำแนวคิด 7R หรือจะเน้นที่ R 3 ตัวหลังก่อนมาใช้กัน จะทำให้สำเร็จได้ในประเทศที่มีรัฐบาลซึ่งมีวิสัยทัศน์ไกลๆ เท่านั้น เพราะต้องมีกระบวนการปลูกสำนึกให้ประชาชนรู้จักซื้อสินค้าที่สามารถแปรรูปได้ ใช้สิ่งของอย่างประหยัดคุ้มค่า ประโยชน์ เก็บทิ้งขยะเป็นระบบตามข้อกำหนดที่วางไว้ และมีระบบคัดแยกขยะที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ รัฐบาลจะต้องผลักดันการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิล ดำเนินการให้มีโรงงานอุตสาหกรรมรองรับขยะเพื่อการแปรรูปหรือผลิตสินค้าสอดคล้องกับ R 3 ตัวหลัง และออกกฎหมายเกี่ยวกับภาษีขยะ เพื่อนำเงินที่ได้มาใช้ในการบำบัดฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม ในประเทศเกาหลีใต้ จะไม่มีการใช้ถุงพลาสติกในร้านค้าต่างๆ ถ้าลูกค้าต้องการจะต้องซื้อในราคาสูง นอกจากนี้ในการทิ้งขยะจะต้องซื้อถุงใส่ขยะ โดยเฉพาะเท่านั้นและเป็นถุงที่มีราคาแพง เนื่องจากต้องเสียภาษีสูง เพื่อนำเงินไปใช้ในการกำจัดขยะ ตามกลุ่มอาคารอพาร์ตเมนต์ต่างๆ ในเมืองใหญ่ จะมีการกำหนดวันสำหรับการเก็บขยะที่รีไซเคิลได้ เช่น ทุกวันอังคารจะเป็นการเก็บขยะกระดาษ ทุกวันพฤหัสบดีที่สองของเดือน เป็นวันเก็บขยะประเภทขวดแก้ว เป็นต้น ซึ่งเมื่อหันกลับมามองเมืองไทยแล้ว คงพูดได้ว่ายังอยู่อีกไกล

การใช้ปุ๋ยเคมี และสารเคมีกำจัดศัตรูพืชก็ทำให้เกิดปัญหาเช่นกัน การใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณสูงทำให้สภาพดินเสีย เกษตรกรบางส่วนได้หันกลับมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์กันบ้างแล้ว แต่ก็ยังมีเกษตรกรจำนวนไม่น้อยที่ยังตกเป็นเหยื่อของสื่อโฆษณา โดยเฉพาะของบริษัทข้ามชาติบริษัทใหญ่ๆ สาร

กำจัดศัตรูพืชโดยเฉพาะที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบคือ ประเภทคลอรีเนเตด ไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) นอกจากจะมีอันตรายถึงชีวิตได้แล้ว ยังมีอายุตกค้างในสภาพแวดล้อมยาวนานมาก ทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหารและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศต่างๆ ซึ่งจะมีกรณีศึกษาเกี่ยวกับ DDT ในหัวข้อต่อไป

มีคนจำนวนมากที่มองสภาพมลพิษทางอากาศ น้ำ และดิน แยกส่วนกัน แต่ทว่า อากาศ น้ำ และดินต่างเป็นส่วนประกอบของสิ่งแวดล้อมที่ขึ้นต่อกัน รวมทั้งขึ้นอยู่กับพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตทั้งหมดในสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดระบบที่เรียกว่าระบบนิเวศ (ecosystem) ขึ้น และระบบนิเวศต่างๆ ของโลกล้วนเชื่อมโยงกัน ดังนั้นภาวะมลพิษที่ดูเหมือนจะมีผลกระทบต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของสิ่งแวดล้อมเท่านั้น อาจจะมีผลกระทบต่อส่วนอื่นๆ ของสิ่งแวดล้อมด้วย ตัวอย่างเช่น ดูเหมือนว่าเขม่าควันจากโรงงานไฟฟ้าจะมีผลต่อบรรยากาศเท่านั้น แต่ฝนจะชะล้าง เตาสารเคมีอันตราย (hazardous chemicals) ในอากาศลงมายบนพื้นดิน และลงไปสู่พื้นน้ำได้

ภาวะมลพิษบางชนิดมาจากพื้นที่หรือจุดใดจุดหนึ่งโดยเฉพาะ เช่น ท่อระบายน้ำทิ้งปล่อยน้ำสกปรกลงสู่แม่น้ำ ภาวะมลพิษลักษณะนี้เรียกว่า point source pollution ภาวะมลพิษที่มาจากพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น น้ำที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมจะพัดพาเอาสารกำจัดศัตรูพืชและปุ๋ยลงสู่แม่น้ำ น้ำฝนอาจชะล้างเอาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ลงสู่บ่อน้ำใช้ ภาวะมลพิษที่มาจากพื้นที่ขนาดใหญ่เรียกว่า nonpoint source pollution

เพื่อขจัดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม หรือลดปัญหาลง มนุษย์จะต้องมีความจริงจังในการพิจารณาใช้พลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อดำเนินการทางธุรกิจและอุตสาหกรรมต่อไปเพื่อความสะอาดกลบภัยของชีวิต พลังงานรูปแบบอื่นๆ นี้ได้แก่พลังงานลม พลังงานไฟฟ้าจากน้ำและพลังงานจากดวงอาทิตย์ โดยมีความหวังว่าเมื่อเทคโนโลยีเหล่านี้ได้พัฒนาไปอย่างต่อเนื่องแล้ว อาจจะช่วยแก้ปัญหาภาวะสิ่งแวดล้อมเกินพินได้

## ตอนที่ 7.2

### มลพิษทางอากาศ

ภาวะมลพิษทางอากาศเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้รถยนต์ยานพาหนะได้ปล่อยแก๊สและอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (particulates) ต่างๆ ออกมาสู่อากาศในปริมาณสูง จนกระบวนการทางธรรมชาติไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลของบรรยากาศเอาไว้ได้ ก่อนที่จะไปดูในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะมลพิษทางอากาศ ควรศึกษาเกี่ยวกับส่วนประกอบของอากาศโดยทั่วไปก่อน

#### 1. ส่วนประกอบของบรรยากาศ

นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งบรรยากาศออกเป็นชั้นต่างๆ ตามอุณหภูมิและส่วนประกอบที่แตกต่างกัน (ดูภาพที่ 7.12) ชั้นบรรยากาศที่สิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่เป็นชั้นบางที่สุด มีความหนาประมาณ 10 กิโลเมตรจากพื้นโลก แต่มีมวลของอากาศอยู่ถึง 80% เป็นชั้นที่อยู่ของไอน้ำที่มีอยู่ทั้งหมดในบรรยากาศ และเป็นชั้นที่อากาศมีความแปรปรวน คือ มีฝน พายุ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า และอุณหภูมิจะลดลงเมื่อขึ้นไปสูงขึ้น ชั้นนี้คือชั้นโทรโพสเฟียร์

เหนือชั้นโทรโพสเฟียร์ คือ ชั้นสตราโทสเฟียร์ ในบรรยากาศชั้นนี้จะมีไนโตรเจน ออกซิเจน และโอโซนเป็นส่วนประกอบ ในบรรยากาศชั้นนี้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของรังสี UV จากดวงอาทิตย์ ผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งของปฏิกิริยาดังกล่าวคือ โอโซน ซึ่งสามารถกรองรังสี UV ที่มีอันตรายที่จะลงมาสู่พื้นโลกได้

บรรยากาศชั้นเหนือขึ้นไปอีก คือชั้นเมโซสเฟียร์ จะมีโอโซนและแก๊สอื่นๆ อยู่ในปริมาณน้อย และอุณหภูมิของอากาศจะลดลงตามระยะทางที่สูงขึ้น บรรยากาศชั้นนอกสุดคือชั้นเทอร์โมสเฟียร์ หรือไอออโนสเฟียร์ อุณหภูมิของอากาศจะสูงขึ้นจากปฏิกิริยาที่มีอนุภาคพลังงานสูง เช่น อิเล็กตรอนและโปรตอนจากดวงอาทิตย์เข้าชนโมเลกุลของออกซิเจนและไนโตรเจนและอะตอมอื่นๆ ที่มีอยู่

ตารางที่ 7.1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของอากาศ เรียงลำดับตามความเข้มข้นที่มีอยู่ นอกจากแก๊สชนิดต่างๆ แล้ว ไอน้ำก็เป็นส่วนประกอบตามปกติของอากาศโดยมีความเข้มข้นในช่วง 1-3% ในบางพื้นที่อาจมีแก๊สบางชนิดเพิ่มขึ้นจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น อาจมีกรดไฮโดรคลอริก

(HCl) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และออกไซด์ชนิดต่างๆ ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) จากการระเบิดของภูเขาไฟ นอกจากนี้แล้วการระเบิดของภูเขาไฟยังเพิ่มปริมาณฝุ่นผงและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ในบรรยากาศ ซึ่งอาจมีผลกระทบไปทั่วโลกดังเช่นในปี ค.ศ. 1883 เมื่อภูเขาไฟลาซากะตัวในประเทศอินโดเนเซียเกิดการระเบิดครั้งใหญ่ ฝุ่นผงจากการระเบิดต้องลอยอยู่ในบรรยากาศเป็นเวลานานกว่าปี ทั่วโลกจะเห็นท้องฟ้ามีสีส้มขมดวงอาทิตย์คมมากกว่าปกติ

ตารางที่ 7.1 ส่วนประกอบของอากาศที่แห้งและสะอาดใกล้ระดับน้ำทะเล

ส่วนประกอบ	ปริมาณ		ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
	% โดยปริมาตร	ppm		% โดยปริมาตร	ppm
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	78.09	780,900	ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	0.00005	0.5
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	20.94	209,400	ไนตรัสออกไซด์ (N <sub>2</sub> O)	0.000025	0.25
อาร์กอน (Ar)	0.93	9,300	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.00001	0.1
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	0.0318	318	ซีนอน (Xe)	0.000008	0.08
นีออน (Ne)	0.0018	18	โอโซน (O <sub>3</sub> )	0.000002	0.02
ฮีเลียม (He)	0.00052	5.2	แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	0.000001	0.01
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	0.00015	1.5	ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	0.0000001	0.001
คริปทอน (Kr)	0.0001	1	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> )	0.00000001	0.0002

ตารางที่ 7.2 แสดงการจำแนกชนิดของสารมลพิษทางอากาศ ซึ่งมีทั้งแก๊สของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ และอนุภาคที่ลอยลอยในอากาศทั้งในสภาพของแข็งและของเหลว

ตารางที่ 7.2 การจำแนกประเภทของสารมลพิษทางอากาศ

กลุ่มหลัก	กลุ่มย่อย	ตัวอย่างของสารมลพิษในกลุ่มย่อย
แก๊สของสารอินทรีย์	ออกไซด์ของไนโตรเจน	ไนตริกออกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์
	ออกไซด์ของซัลเฟอร์	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์
	ออกไซด์ของคาร์บอน	คาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์*
	สารอินทรีย์อื่นๆ	ไฮโดรเจนซัลไฟด์, ไฮโดรเจนฟลูออไรด์, แอมโมเนีย, คลอรีน
แก๊สของสารอินทรีย์	ไฮโดรคาร์บอน	มีเทน, บิวเทน, ออกเทน, เบนซีน, แอเซทิลีน, เอทิลีน, บิวตะไดอิน
	แอลดีไฮด์และคีโตน	ฟอร์มัลดีไฮด์, แอซีโตน
	สารอินทรีย์อื่นๆ	คลอรีนเตตระไฮโดรคาร์บอน, เบนไซ-(เอ)-ไพรีน, แอลกอฮอล์, กรดอินทรีย์



ตารางที่ 7.2 (ต่อ)

กลุ่มหลัก	กลุ่มย่อย	ตัวอย่างของสารมลพิษในกลุ่มย่อย
อนุภาคแขวนลอย** (particulate)	อนุภาคของแข็ง	ไอ,ฝุ่นผง,ควัน ; เถ้า,คาร์บอน, ตะกั่ว, แอสเบสตอส
	อนุภาคของเหลว	ละออง,สเปรย์ ; น้ำมัน, ไขมัน, กรด

\* ในบางที่ไม่พิจารณาว่า CO<sub>2</sub> เป็นสารมลพิษ เพราะเป็นส่วนประกอบตามธรรมชาติของบรรยากาศและไม่มีส่วนในปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ อย่างไรก็ตามการที่ปริมาณ CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่ใช่สิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติแน่นอน

\*\* ในบางครั้งเรียกอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีขนาดตามที่กำหนดว่าละอองลอย (aerosol) ซึ่งมีขนาด 0.1 - 100 ไมครอน อนุภาคแขวนลอยที่ทำให้ทัศนวิสัยลดลง เช่น เมื่อเกิดหมอก มีขนาด 0.01 - 2 ไมครอน

2. ออกไซด์ของคาร์บอน

ออกไซด์ของคาร์บอนที่พบตามปกติ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.3

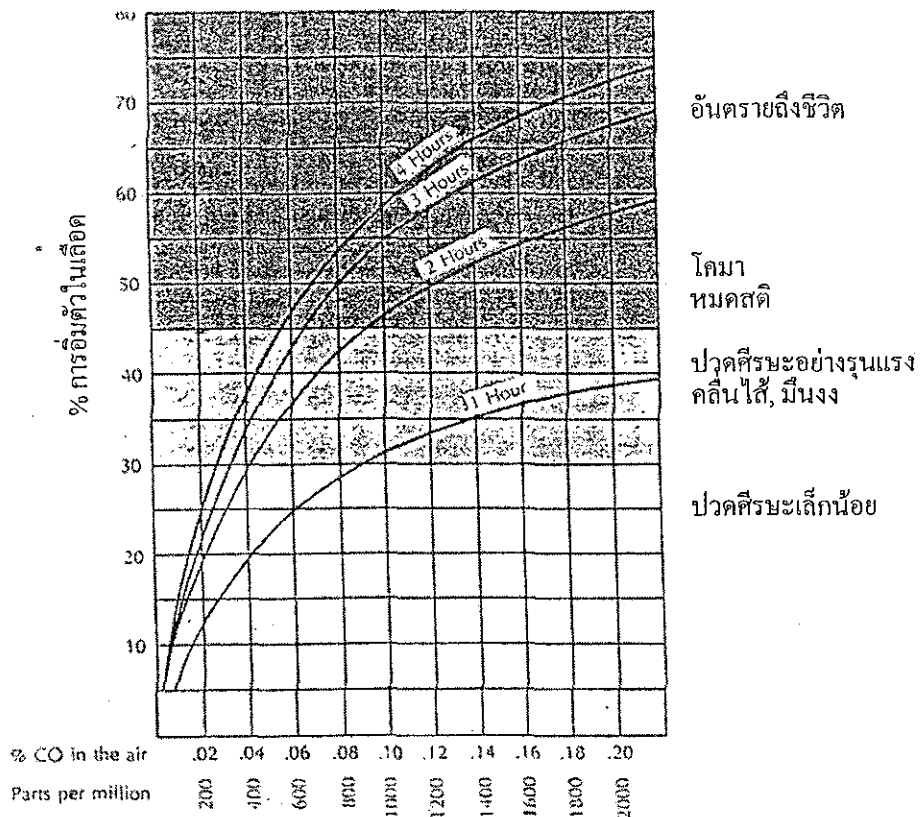
ตารางที่ 7.3 สมบัติของออกไซด์ของคาร์บอน

สูตร	ชื่อ	จุดหลอม เหลว °C	จุดเดือด °C	สมบัติ ทางกายภาพ	ความเกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ
CO	คาร์บอน มอนอกไซด์	-199	-191.5	- ไม่มีสี	- ใช้เป็นตัววัดพิษที่สำคัญทาง
				- ไม่มีกลิ่น	อุตสาหกรรม
				- ความหนาแน่นของ แก๊ส 1.25 g/l	- เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่ สมบูรณ์ - เป็นแก๊สพิษ
CO <sub>2</sub>	คาร์บอน ไดออกไซด์	- 78*		- ไม่มีสี	- ละลายน้ำได้บ้าง 1.45 g/l ที่ 25°C
				- ไม่มีกลิ่น	- เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ สมบูรณ์
				- ความหนาแน่นของ แก๊ส 1.98 g/l ของ แก๊สแข็ง 1.56 g/ml	- มีผลต่อสภาพบรรยากาศ

\* -78°C คืออุณหภูมิที่คาร์บอนไดออกไซด์ของแข็ง (dry ice) ระเหิดกลายเป็นแก๊ส ที่ความดันบรรยากาศปกติ

คาร์บอนมอนอกไซด์ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในบริเวณเมืองส่วนใหญ่เกิดมาจากการขนส่ง โรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้าและจากการเผาทำลายขยะของแข็ง แต่ถ้ามองในภาพกว้างแล้วคาร์บอนมอนอกไซด์ในบรรยากาศได้มาจากกระบวนการออกซิเดชันแก๊สมีเทน จากการเผาทำลายตัวของสารอินทรีย์โดยมีอนุมูลไฮดรอกซี ( $\text{OH}^-$ ) เป็นตัวช่วยให้เกิดกระบวนการดังกล่าวและยังช่วยในการออกซิไดซ์ CO ไปเป็น  $\text{CO}_2$  ซึ่งเป็นกลไกในการกำจัด CO ออกจากบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ กระบวนการทางชีวภาพในดิน ก็เป็นอีกหนทางหนึ่งในการกำจัด CO

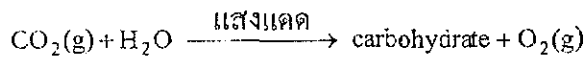
**ผลของ CO ต่อสุขภาพเป็นอย่างไร?** ผลกระทบต่อสุขภาพของ CO ต่างจากสารมลพิษทางอากาศตัวอื่นๆ ซึ่งมักจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ แต่ CO จะผ่านจากปอดเข้าไปในกระแสเลือดได้โดยตรง ความเป็นพิษเกิดขึ้นจากการที่ CO จับกับฮีโมโกลบินในเลือดได้ดีตามที่ทราบแล้วว่าบทบาทหน้าที่ของฮีโมโกลบิน คือ การขนส่งออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของร่างกาย แต่จากการที่ CO จับกับฮีโมโกลบินได้อย่างแข็งแรง ทำให้ฮีโมโกลบินไม่สามารถจับกับออกซิเจนได้เหมือนปกติ ถ้าหายใจเอา CO เข้าไปในปริมาณมากจะทำให้เกิดอันตรายได้ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 7.1



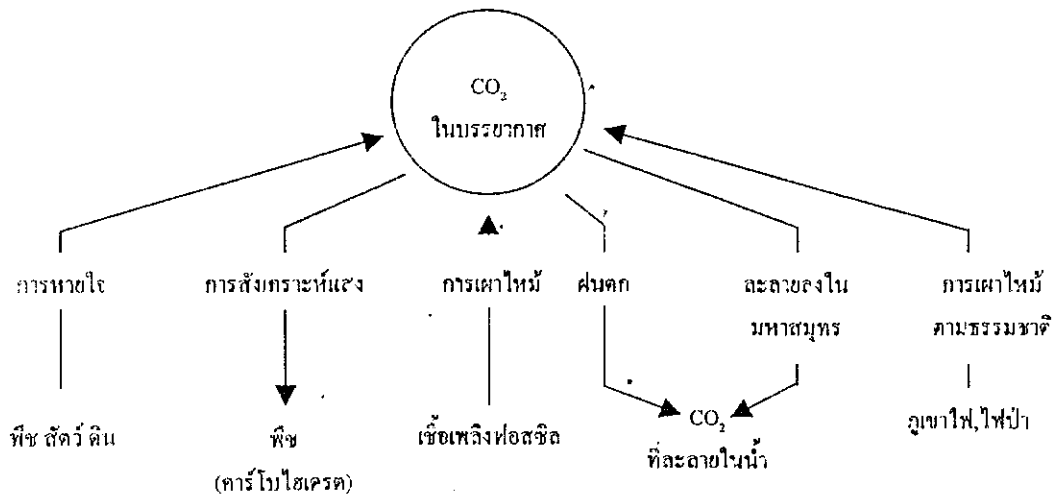
ภาพที่ 7.1 ผลของ CO ที่มีต่อมนุษย์

อาการของความเป็นพิษจาก CO ก็คืออาการของการขาดออกซิเจนและบางครั้งผู้มีอาการอาจมีจุดสีชมพูขึ้นตามร่างกาย ถ้านำผู้ป่วยออกไปรับอากาศบริสุทธิ์หรือให้ออกซิเจน ฮีโมโกลบินจะกลับไปมีความสามารถในการจับกับออกซิเจนได้ตามปกติ ความเป็นพิษจาก CO จึงเป็นอาการที่ฟื้นกลับได้ถ้าได้รับการรักษาทันที แต่ถ้าวางกายขาดออกซิเจนเป็นเวลานาน จนร่างกายเป็นสีคล้ำก็อาจจะสายไปเสียแล้ว อันตรายที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างฉับพลัน เพราะสมองและหัวใจเป็นอวัยวะที่ไวต่อการขาดออกซิเจนมาก และได้รับผลกระทบรุนแรงที่สุดจากความเป็นพิษของ CO จากภาพที่ 7.1 จะเห็นว่าความเป็นพิษของ CO นั้น ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและปริมาณ CO ที่ร่างกายได้รับที่จะทำให้มีปริมาณ CO ในกระแสเลือดมากจนเกิดอันตรายได้ ตามปกติแล้วระดับ CO ในบรรยากาศที่ 5-30 ppm เป็นระดับที่ร่างกายรับได้ต่อเนื่องโดยไม่เกิดอันตรายสำหรับประชาชนโดยทั่วไป ถ้ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป กำหนดให้มี CO ไม่เกิน 30 ppm ในเวลา 1 ชั่วโมง หรือไม่เกิน 9 ppm ในเวลา 8 ชั่วโมง แต่ในย่านธุรกิจที่มีการจราจรแออัดโดยเฉพาะในเมืองใหญ่ๆ เช่น กรุงเทพฯ ปริมาณ CO ที่มีอยู่บนท้องถนนมีปริมาณสูงกว่าค่าที่กำหนดบ่อยๆ

**คาร์บอนไดออกไซด์** เป็นแก๊สที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันและกระบวนการเผาไหม้ทั้งจากธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ CO<sub>2</sub> เป็นแก๊สที่ไม่มีพิษ ดังนั้น จึงอาจจัดไว้ลำดับท้ายสุดในแง่ของสารมลพิษทางอากาศ แต่ถ้าในระยะยาวแล้ว CO<sub>2</sub> เป็นแก๊สที่มีความสำคัญทีเดียว CO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในวัฏจักรชีวิตของพืช หรือมีความสำคัญต่อสัตว์โดยปริยาย พืชใช้ CO<sub>2</sub> ในการสังเคราะห์แสงตามกระบวนการนี้

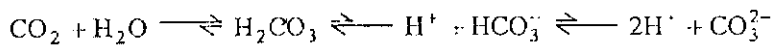


CO<sub>2</sub> ที่ใช้ไปในกระบวนการนี้ และที่ได้ออกมาในการหายใจของคนเราต่างเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของวัฏจักรคาร์บอน - คาร์บอนไดออกไซด์ ดังภาพที่ 7.2



ภาพที่ 7.2 วัฏจักรของคาร์บอน - คาร์บอนไดออกไซด์

ความสัมพันธ์ระหว่าง CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศ และ CO<sub>2</sub> ที่ละลายอยู่ในน้ำ คือลักษณะปกติของวัฏจักรต่างๆ ในธรรมชาติ สมดุลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการเกิดสมดุล ตัวอย่างเช่น CO<sub>2</sub> ที่ละลายอยู่ในน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อน แยกตัวได้เพียงบางส่วน ตามปฏิกิริยานี้



ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ปริมาณและทิศทางของปฏิกิริยาขึ้นกับสถานะในแต่ละท้องถิ่น

**ผลกระทบ CO<sub>2</sub> ต่อสิ่งแวดล้อม** มีการคาดการณ์กันว่าปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง จะเพิ่มขึ้นปีละ 2.3 ppm ถ้าไม่มีกลไกใดๆ ในการกำจัด CO<sub>2</sub> ออกไป แต่ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นจริงน้อยกว่าค่าที่ประมาณไว้ แสดงว่า CO<sub>2</sub> ส่วนหนึ่งละลายลงสู่มหาสมุทร และพืชใช้อีกส่วนหนึ่งในการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามปริมาณ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และส่งผลอย่างมากต่อ ปรากฏการณ์เรือนกระจก เพราะโมเลกุลของแก๊ส CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศจะดูดซับพลังงานความร้อนเอาไว้ ทำให้ความร้อนในบรรยากาศชั้นล่างไม่สามารถผ่านกลับออกไปสู่อวกาศได้ ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศจึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งมีผลกระทบในระยะยาวต่อการละลายของน้ำแข็งขั้วโลก ระดับน้ำในมหาสมุทร ตลอดจนโรคภัยไข้เจ็บบางอย่างที่พาหะของโรคหรือเชื้อโรคเจริญได้ดีในอุณหภูมิที่สูงขึ้น

### 3. ออกไซด์ของซัลเฟอร์

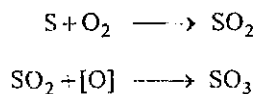
ซัลเฟอร์หรือกำมะถันเป็นตัวการสำคัญในการทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตพื้นที่อุตสาหกรรม โดยอยู่ในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงที่มาจากฟอสซิล ตารางที่ 7.4 แสดงสมบัติของออกไซด์ของซัลเฟอร์

#### 7.4 แสดงสมบัติของออกไซด์ของซัลเฟอร์

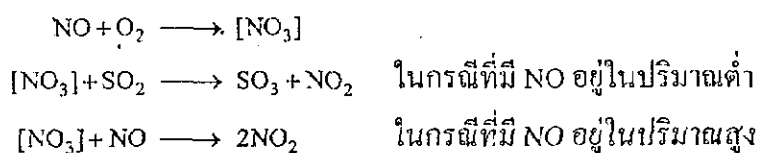
ตารางที่ 7.4 สมบัติของออกไซด์ของซัลเฟอร์

สูตร	ชื่อ	เลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์	จุดเดือด °C	สมบัติทางกายภาพ	ความเกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ
SO <sub>2</sub>	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	+4	-10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีสี</li> <li>- กลิ่นฉุน</li> <li>- ความหนาแน่นของแก๊ส 2.98 g/l</li> <li>- ละลายในน้ำ ได้ 22.8 g/100 ml</li> <li>- รวมกับน้ำได้เป็นกรดซัลฟิวรัส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นผลิตภัณฑ์ตัวแรกจากกระบวนการเผาไหม้ และเกิดสาเหตุของซัลเฟอร์ประมาณ 95% ที่มนุษย์ปล่อยออกมาสู่บรรยากาศ</li> <li>- เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ไปเป็น SO<sub>3</sub></li> <li>- ถ้าละลายน้ำจะถูกออกซิไดซ์อย่างช้าๆ กลายเป็น SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></li> </ul>
SO <sub>3</sub>	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	+6	44.8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ละลายได้ไม่ไวขึ้นและน้ำร้อน</li> <li>- รวมกับน้ำได้เป็นกรดซัลฟิวริก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กรดซัลฟิวริกอาจอยู่ในสภาพเป็นละอองลอยในอากาศและทำปฏิกิริยากลายเป็นละอองลอยซัลเฟตได้</li> </ul>

เมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ ผลิตภัณฑ์แรกที่ได้คือ SO<sub>2</sub> ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็น SO<sub>3</sub> ได้อย่างช้าๆ ถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาใดๆ ช่วยตามปฏิกิริยานี้

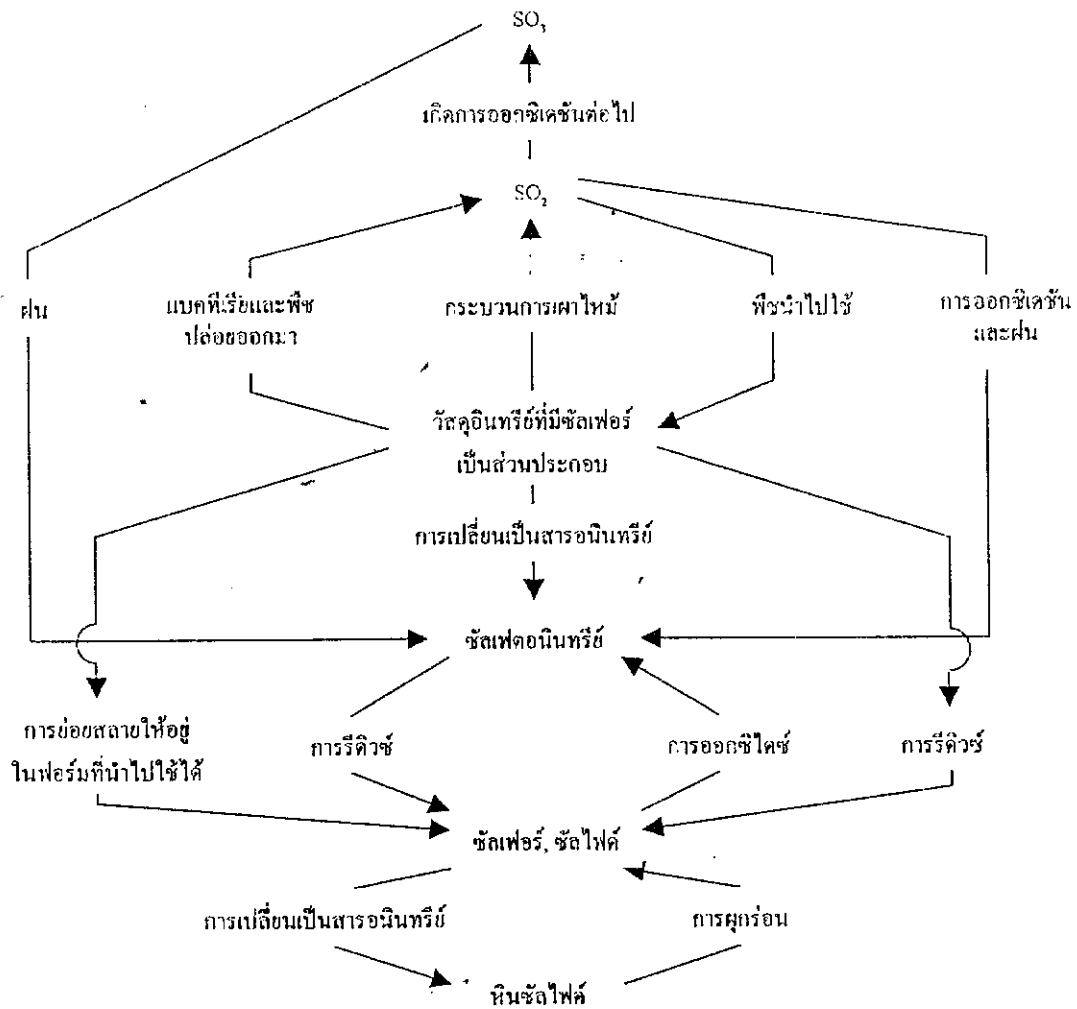


ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็น SO<sub>3</sub> อาจเกิดได้จากออกซิเจน, โอโซน, หรืออนุมูลอิสระไฮโดรคาร์บอน นักวิจัยบางคนเชื่อว่า NO อาจเป็นตัวช่วยในปฏิกิริยาดังกล่าวได้ดังนี้



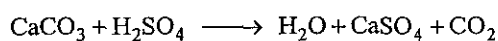
ถ้ากลไกดังกล่าวเป็นจริง แสดงว่า  $\text{SO}_2$  เน้นตัวทำให้ปริมาณ  $\text{NO}_2$  เพิ่มขึ้นโดยที่  $\text{NO}_2$  เป็นสารประกอบสำคัญในการเกิดเป็นหมอก (smog) ปฏิกิริยาการเปลี่ยนจาก  $\text{SO}_2$  ไปเป็น  $\text{SO}_3$  ยังเกิดขึ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยาพวกออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสที่มีปะปนอยู่ในถ่านหิน ส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตกรดซัลฟิวริกจะใช้  $\text{V}_2\text{O}_5$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากจะอยู่ในรูปของออกไซด์แล้ว ในบรรยากาศจะพบซัลเฟอร์ในรูปอื่นๆ ได้อีกคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide,  $\text{H}_2\text{S}$ ) และในรูปของเมอร์แคปแทน (mercaptan,  $-\text{SH}$ ) เช่น เมทิลเมอร์แคปแทน (methylmercaptan,  $\text{CH}_3\text{SH}$ ) สารประกอบในกลุ่มนี้ มีกลิ่นเหม็นมาก  $\text{H}_2\text{S}$  คือ กลิ่นของไข่เน่า ส่วน บิวทิลเมอร์แคปแทน (butylmercaptan,  $\text{C}_4\text{H}_9\text{SH}$ ) คือกลิ่นที่ตัวสก็งค์ปล่อยออกมา และ เพ็นทิลเมอร์แคปแทน (pentylmercaptan,  $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{SH}$ ) เป็นสารที่เติมลงไปเล็กน้อยในแก๊สธรรมชาติ เพื่อทำให้ตรวจสอบการรั่วของแก๊สได้ง่ายขึ้น สารประกอบของซัลเฟอร์เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรซัลเฟอร์-ออกไซด์ของซัลเฟอร์ดังแสดงในภาพที่ 7.3



ภาพที่ 7.3 วัฏจักรซัลเฟอร์-ออกไซด์ของซัลเฟอร์

**ผลกระทบของ SO<sub>2</sub> ต่อสิ่งแวดล้อม** SO<sub>2</sub> ในบรรยากาศมีผลกระทบต่อพืชมามากต่อพรรณพืช วัสดุต่างๆ และต่อมนุษย์ ใบของพืชจะถูกฟอกสีจนพืชถูกทำลาย นอกจากนี้ SO<sub>2</sub> ในบรรยากาศยังรวมกับไอน้ำกลายเป็นกรดซัลฟิวรัส (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) ในขณะที่ SO<sub>3</sub> จะกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) และถูกฝนชะลงมาในสภาพฝนกรด ตามปกติน้ำฝนจะมีสภาพเป็นกรดอ่อนอยู่แล้วจากการทำปฏิกิริยาของ CO<sub>2</sub> กับไอน้ำเป็นกรดคาร์บอนิก (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) และจะมีค่า pH ประมาณ 5.7 แต่ปัจจุบันในหลายพื้นที่ น้ำฝนมี pH 3-5 และทำให้น้ำในแม่น้ำทะเลสาบมีสภาพเป็นกรดตามไปด้วย นอกจากฝนกรดจะเป็นอันตรายต่อพืชแล้ว ยังทำให้อาคารบ้านเรือนและรูปปั้นงานศิลปะเสียหาย เพราะหินปูนและหินอ่อนก็คือแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งจะทำปฏิกิริยากับกรดได้ดี



**ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ** ถ้าหายใจเอา SO<sub>2</sub> ที่มีความเข้มข้นสูงเข้าไป SO<sub>2</sub> มากกว่า 99% จะถูกดูดซึมโดยระบบทางเดินหายใจส่วนบน แต่ถ้าเป็น SO<sub>2</sub> ความเข้มข้นต่ำ เช่น 0.1 ppm ปริมาณ SO<sub>2</sub> ที่ถูกดูดซึมจะลดลงเป็น 50% แก๊ส SO<sub>2</sub> เป็นตัวทำให้เกิดความระคายเคือง และทำให้ผู้ที่มีการผิดปกติของปอด เช่น หลอดลมอักเสบ, ถุงลมโป่งพองอยู่แล้ว มีอาการรุนแรงมากขึ้น องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้จัดอันดับให้ SO<sub>2</sub> เป็นสารมลพิษทางอากาศที่มีอันตรายมากที่สุด

อันตรายส่วนหนึ่งของ SO<sub>2</sub> เกิดจากการเปลี่ยนรูปได้ในบรรยากาศ SO<sub>2</sub> อาจเปลี่ยนเป็นละอองลอยของกรดซัลฟิวริกได้ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายอาจกลายเป็นอนุภาคแขวนลอยของแข็ง เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เมื่อทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย เมื่อหายใจเอาอนุภาคแขวนลอยตัวนี้เข้าไป อนุภาคแอมโมเนียมซัลเฟตจะถูกพาเข้าไปในปอดส่วนลึกและไปจับอยู่ที่นั่น ทำให้เกิดปัญหาสุขภาพที่ร้ายแรงมากขึ้นได้ นี่คือนิวส์ของผลกระทบของสถานะเสริม (synergistic effect) คือผลจาก SO<sub>2</sub> หรืออนุภาคแขวนลอย (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> อย่างใดอย่างหนึ่งมีน้อยกว่าผลที่เกิดจากสารมลพิษทั้งสองในเวลาเดียวกัน ครั้งหนึ่งในปี ค.ศ. 1950 ที่กรุงลอนดอน เกิดภาวะมลพิษทางอากาศอย่างร้ายแรง ในครั้งนั้นเกิดหมอก (smog - มาจากคำว่า fog กับ smoke) ของ SO<sub>2</sub> และอนุภาคแขวนลอยของแข็ง ในอากาศมีปริมาณ SO<sub>2</sub> สูงถึง 1.34 ppm และมีปริมาณอนุภาคแขวนลอย 4.5 mg/m<sup>3</sup> ในขณะที่อากาศสงบนิ่งไม่มีการเคลื่อนไหวเป็นเวลาถึง 5 วัน ในครั้งนั้น ทำให้มีผู้เสียชีวิตถึง 4,000 คน โดยส่วนใหญ่เป็นคนแก่และเด็ก สำหรับมาตรฐานคุณภาพของอากาศ จะยอมให้มี SO<sub>2</sub> ได้ไม่เกิน 0.3 ppm ในเวลา 1 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.12 ppm ในเวลา 24 ชั่วโมง และไม่เกิน 0.04 ppm ในเวลา 1 ปี

#### 4. ออกไซด์ของไนโตรเจน

ออกไซด์ของไนโตรเจน ส่วนใหญ่เกิดจากรถยนต์และอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้า มักเขียนแทนที่ว่า NO<sub>x</sub> มีความแตกต่างจากคาร์บอนและซัลเฟอร์ตรงที่ว่าสามารถพืชตัวที่ไม่ได้มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงแต่มาจากอากาศซึ่งต้องใช้ในการกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง สมบัติของออกไซด์ชนิดต่างๆ ของไนโตรเจนแสดงไว้ในตารางที่ 7.5 ส่วนภาพที่ 7.4 แสดงวัฏจักรของไนโตรเจน

ถึงแม้ว่าไนโตรเจนจะมีความสำคัญต่อชีวิต แต่พืชไม่สามารถนำไนโตรเจนมาใช้ได้โดยตรง จะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในฟอร์มที่ใช้ได้เสียก่อน โดยกระบวนการตรึงไนโตรเจนหรือ nitrogen fixation ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนให้เป็นสารประกอบ โดยเฉพาะในรูปของไนเตรท (NO<sub>3</sub>) และแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) การเปลี่ยนไนโตรเจนในบรรยากาศให้เป็นออกไซด์ทำได้โดยกระบวนการเผาไหม้ การตรึงทางอุตสาหกรรม ตลอดจนฟ้าผ่าก็มีบทบาทสำคัญ แต่การตรึงไนโตรเจนที่สำคัญที่สุดเป็นกระบวนการทางชีวภาพของแบคทีเรียที่พบในปมของรากพืชตระกูลถั่ว สำหรับสีน้ำเงิน-กรมเขียวก็สามารถตรึงไนโตรเจนได้เช่นเดียวกัน หลังจากตรึงไนโตรเจนให้เป็นไนเตรทแล้ว พืชก็จะนำไปใช้ได้และจะเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนอินทรีย์อื่นๆ เช่น กรดอะมิโน, ยูเรีย ต่อไป

ตารางที่ 7.5 สมบัติของออกไซด์ของไนโตรเจน

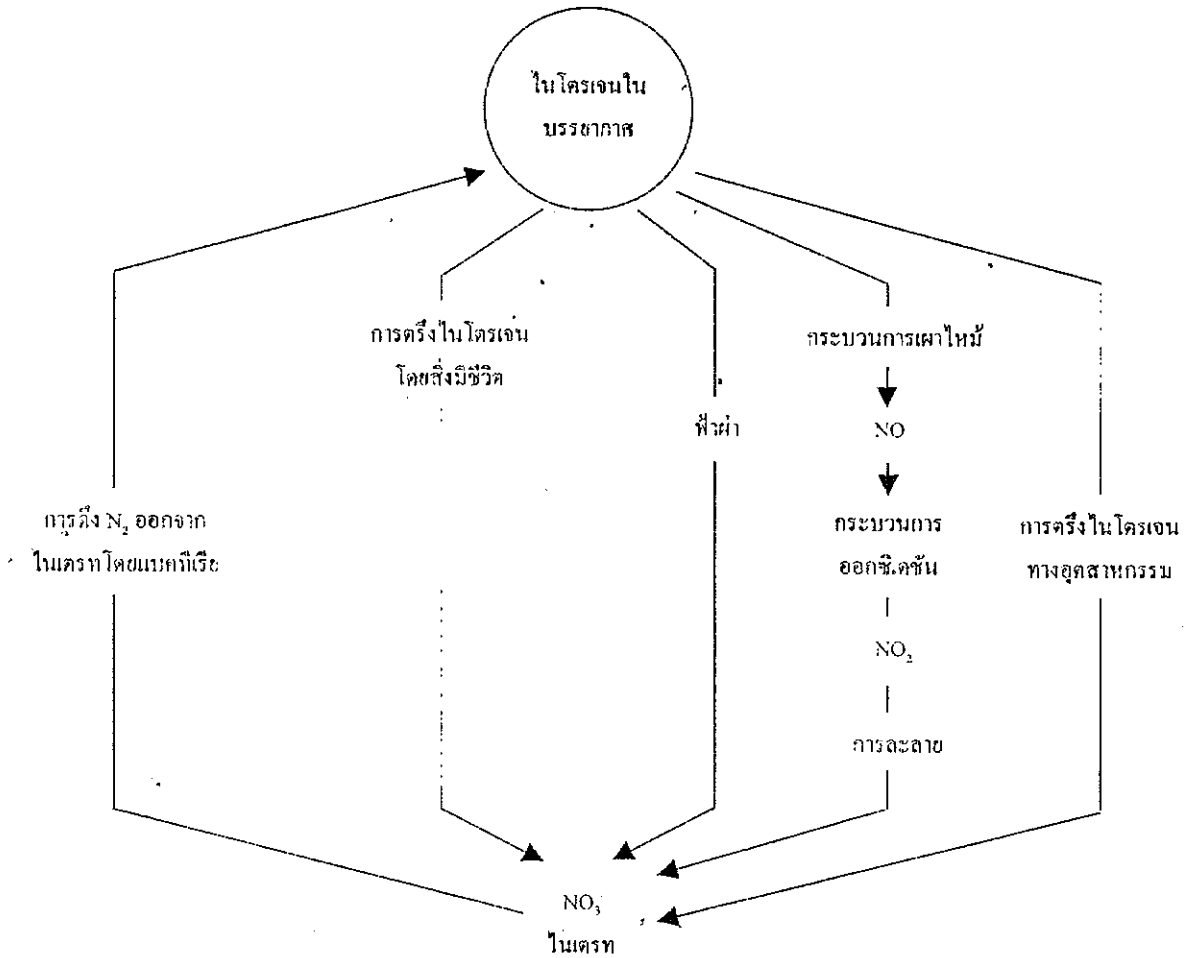
สูตร	ชื่อ	เลขออกซิเดชันของไนโตรเจน	จุดหลอมเหลว °C	จุดเดือด °C	สี	สมบัติทางกายภาพ	ความเกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ
N <sub>2</sub> O	ไนตริกออกไซด์	+1	-90.8	-88.5	ไม่มีสี	- ละลายได้ปานกลางที่อุณหภูมิห้อง - ใช้เป็นแก๊สดัดพลาโนสเปรย์ต่างๆ - ก๊าซหัวเราะ	- ในอากาศจะมีความเข้มข้นปกติเป็น 0.25 ppm - ก่อให้เกิดมลพิษ - ไม่ได้เกิดจากกระบวนการเผาไหม้
NO	ไนตริกออกไซด์	+2	-163.6	-151.7	ไม่มีสี (g) สีน้ำเงิน (l,s)	- พาราแมกเนติก	- ผลิตภัณฑ์หลักในกระบวนการเผาไหม้ของไนโตรเจน - ถูกออกซิไดซ์ด้วย O <sub>2</sub> อย่างช้าๆ เป็น NO <sub>2</sub> - ถูกออกซิไดซ์ด้วย O <sub>3</sub> อย่างรวดเร็วเป็น NO <sub>2</sub>



ตารางที่ 7.5 (ต่อ)

สูตร	ชื่อ	เลขออกซิเดชัน ของไนโตรเจน	จุดหลอม เหลว °C	จุดเดือด °C	สถานะ	สมบัติ ทางกายภาพ	ความเกี่ยวข้องกับ มลพิษทางอากาศ
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ไดไนโตรเจน ไตรออกไซด์	+3	-103	3.5	สีน้ำตาล (g) สีน้ำเงิน (l)	- ไม่เสถียรที่ อุณหภูมิห้อง หรือสูงกว่า อุณหภูมิห้อง - ทำปฏิกิริยากับ H <sub>2</sub> O ได้กรด ไนตริก, HNO <sub>3</sub>	
NO <sub>2</sub>	ไนโตรเจน ไดออกไซด์	+4	-11.2	21.2	สีน้ำตาล (g) สีเหลือง (l) สีขาว (s)	- 2NO <sub>2</sub> ↔ N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> สีน้ำตาล ไม่มีสี - สีจะเข้มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น	- ในอากาศจะมีความ เข้มข้น 0.001 ppm - ได้มาจากการ ออกซิไดซ์ NO - ดูดกลืนรังสี UV ได้ดี เป็นตัวเริ่มต้นทำให้เกิด ปฏิกิริยาเคมีเชิง แสงที่ทำให้เกิดหมอก - อาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สลายตัวเป็น N <sub>2</sub> และ O <sub>2</sub> ได้
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ไดไนโตรเจน เพนต็อกไซด์	+5	ระเหิดที่ 32.4	90.0	ไม่มีสี (g) สีขาว (s)	- สลายตัวที่ อุณหภูมิห้อง - ทำปฏิกิริยากับ H <sub>2</sub> O ได้กรด ไนตริก, HNO <sub>3</sub>	

ผลกระทบของ NO<sub>x</sub> ต่อสิ่งแวดล้อม ผลกระทบที่สำคัญของ NO<sub>2</sub> คือ เป็นส่วนประกอบสำคัญของหมอก นอกจากนี้ NO<sub>2</sub> และ NO ยังสามารถฟอกสีเส้นใยสังเคราะห์ได้เมื่อมีความเข้มข้นสูง พืชหลายชนิดจะใบร่วงและให้ผลผลิตน้อยเมื่อได้รับ NO<sub>2</sub> ปริมาณต่ำเป็นเวลานานๆ ผลกระทบของ NO<sub>x</sub> ต่อมนุษย์ไม่สำคัญมากนัก NO ไม่ทำให้เกิดความระคายเคือง แต่ความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อ NO ถูกออกซิไดซ์เป็น NO<sub>2</sub> แต่ NO สามารถจับกับฮีโมโกลบินได้ดีเช่นเดียวกับ CO ดังนั้น NO ในปริมาณสูงก็ทำให้ร่างกายมีอาการขาดออกซิเจนได้เช่นเดียวกัน NO<sub>2</sub> จะทำให้เกิดความระคายเคืองต่อดวงตาและระบบทางเดินหายใจ ค่ามาตรฐานสำหรับ NO<sub>x</sub> (ยกเว้น NO<sub>2</sub> ซึ่งมีในธรรมชาติที่ 0.25 ppm) คือ ไม่เกิน 0.17 ppm ในเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 7.4 วงจรของไนโตรเจน

### 5. ไฮโดรคาร์บอนและอนุภาคแขวนลอยในอากาศ

ไฮโดรคาร์บอน ประมาณ 85% ของไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศเกิดจากธรรมชาติ ตามปกติป่าไม้และพืชพรรณต่างๆ จะปล่อยไฮโดรคาร์บอนออกมาโดยกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ เมื่อแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์จะได้แก๊สมีเทนออกมา ส่วนบริเวณเมือง มนุษย์ได้เพิ่มปริมาณไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศจากการเผา การระเหยของตัวทำละลายในอุตสาหกรรม จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมันและไม้ แต่แหล่งกำเนิดใหญ่ที่สุดของไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศได้แก่ กระบวนการผลิตและการใช้ปิโตรเลียม

**ผลกระทบของไฮโดรคาร์บอนต่อสิ่งแวดล้อม** ไฮโดรคาร์บอนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดหมอก ไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดมีปัญหาคือสุขภาพ เช่น เป็นไซไฟริน เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารพวกอะโรแมติกไฮโดรคาร์บอนหลายตัวก็อาจเป็นสารอันตรายเช่นกัน จึงยังมีข้อถกเถียงกันอยู่เกี่ยวกับการเติมสารพวกนี้ลงในน้ำมันเชื้อเพลิง

อนุภาคแขวนลอยในอากาศ อนุภาคแขวนลอยในอากาศหรือ particulates นี้ เป็นได้ทั้งอนุภาคของแข็งและอนุภาคของเหลวที่พบได้ในอากาศ เช่น ฝุ่นดินที่ลมพัดพาขึ้นมา ละอองเกสรดอกไม้ หรืออนุภาคต่างๆ จากการระเบิดของภูเขาไฟ มนุษย์เองก็เพิ่มปริมาณสารมลพิษพวกนี้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม การบดสาร การสเปรย์สาร ถ้าเบาจากระบวนการเผาไหม้ และจากไอเสียของรถยนต์

ในบรรดาอนุภาคแขวนลอยในอากาศนี้ อนุภาคโลหะที่เป็นพิษจะอันตรายต่อสุขภาพมากที่สุด ถึงแม้จะมีอนุภาคโลหะเพียง 0.01-3.0% ของอนุภาคแขวนลอยทั้งหมด แต่มีความสำคัญมากที่สุด เพราะอาจมีการสะสมและมีผลในลักษณะเสริมกันได้ นอกจากนั้นการหายใจเอาไอโลหะพวกนี้เข้าไปนับว่ามีอันตรายมากกว่าการรับเอาโลหะปริมาณเท่ากันเข้าไปจากอาหารและน้ำดื่ม

อนุภาคโลหะที่มีมากที่สุดในอากาศได้แก่ตะกั่ว ซึ่งมาจากการเผาไหม้น้ำมันรถยนต์ที่มีการเติมเตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) นอกจากนี้อนุภาคโลหะอาจมาจากการเผาน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิล กระบวนการอุตสาหกรรม และการเผาผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีโลหะพวกนี้อยู่

ในปัจจุบันมีอนุภาคโลหะอยู่ 4 ชนิด ที่มีการแพร่กระจายอยู่ในอากาศและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และปรอท โดยที่แคดเมียมทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับหลอดเลือด หัวใจ และความดันสูง แคดเมียมยังรบกวนการเมแทบอลิซึมของสังกะสีและทองแดง แคดเมียมในอากาศส่วนใหญ่มาจากการกำจัดและการเผาผลิตภัณฑ์ที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบ เช่น ยางรถยนต์ และภาชนะพลาสติก ส่วนนิกเกิลนั้น เชื่อกันว่าลอยอยู่ในอากาศในรูปของนิกเกิลคาร์บอนิล (nickel carbonyl, NiCO) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคนิกเกิลเข้าสู่บรรยากาศที่มี CO อยู่ด้วย ซึ่งภาวะดังกล่าวเกิดขึ้นได้ในการเผาไหม้ถ่านหิน น้ำมันดีเซล ในกระบวนการถลุงแร่ นิกเกิล และในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังพบ NiCO ได้ในควันบุหรี่ และในอนาคตรถยนต์อาจเป็นแหล่งกำเนิดของอนุภาคนิกเกิล ถ้ามีการเติมโลหะดังกล่าวลงในน้ำมันเชื้อเพลิงกันมากขึ้น NiCO เป็นสารที่ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ และทำให้เกิดมะเร็งปอดทั้งในมนุษย์และสัตว์ได้ ถึงแม้ว่านิกเกิลจะไม่สะสมในปอดก็ตาม

อนุภาคปรอทที่แขวนลอยอยู่ในอากาศไม่เป็นปัญหามากนัก เมื่อเทียบกับปัญหาทั้งหมดที่มาจากโลหะปรอท แต่จากการที่ปรอทมีความดันไอสูง จึงกลายเป็นไอได้ง่าย ถ่านหินและปิโตรเลียมต่างก็มีปรอทปะปนอยู่เล็กน้อย ปรอทดังกล่าวจึงอาจระเหยออกมาได้ ปัญหาที่ร้ายแรงมากกว่าของภาวะมลพิษจากปรอท คือความสามารถในการเกิดเป็นสารปรอทอินทรีย์ เช่น แอลคิลเมอร์คิวรี (alkyl mercury) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อมลพิษทางน้ำ อย่างไรก็ตามร่างกายสามารถกำจัดปรอทอินทรีย์ออกจากร่างกายได้โดยไม่มี การสะสมแต่ก็ไม่ควรจะหายใจเอาไอปรอทเข้าไป หรือไปสัมผัสกับปรอทโดยตรง

**แอสเบสตอส** เป็นคำที่หมายถึงแร่เส้นใยหลายประเภท ซึ่งมีส่วนประกอบของออกไซด์หลายชนิด ได้แก่ ออกไซด์ของซิลิกอน แมกนีเซียม เหล็ก อะลูมิเนียม แคดเซียม และโซเดียม รวมทั้งน้ำ

ด้วยเล็กน้อย การหายใจเอาผงแอสเบสตอสเข้าไปมากๆ ทำให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพได้ ดังที่ได้พบว่า คนงานที่ทำงานเกี่ยวกับวัสดุฉนวนกันความร้อน มีปัญหาเกี่ยวกับมะเร็งปอดและมะเร็งระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น และนอกจากจะมาจากกรก่อสร้งแล้ว อนุภาคแอสเบสตอสในอากาศยังมาจาก ทรายนด์อีกด้วย เพราะเป็นส่วนประกอบของผ้าเบรค

## 6. มลพิษทางอากาศในอาคารบ้านเรือน

มลพิษทางอากาศในอาคารก็เป็นปัญหาเช่นเดียวกับมลพิษทางอากาศภายนอกอาคาร คุณภาพของอากาศภายในอาคารบ้านเรือนขึ้นอยู่กับกิจกรรมของมนุษย์เองและขึ้นกับวัสดุก่อสร้างที่นำมาใช้ ตลอดจนการออกแบบอาคารที่ทำให้การถ่ายเทอากาศไม่เหมาะสม สารมลพิษในอาคารที่พบบ่อยคือ CO, CO<sub>2</sub> ฟอรั่มัลดีไฮด์ และเรดอน (Radon, Rn)

เรดอนเป็นธาตุในกลุ่มแก๊สเฉื่อย (group 8 A) เป็นสารมีขั้วอันตรายจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี U-238 ไอโซโทปทุกชนิดของเรดอนเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี แต่ radon-222 เป็นชนิดที่อันตรายมากที่สุดเพราะมีเวลาครึ่งชีวิตยาวถึง 3.8 วัน มักจะนี้อยู่ในแร่ฟอสเฟตของยูเรเนียม ดังนั้นถ้าอาคารบ้านเรือนตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีแร่ยูเรเนียมอยู่ หรือใช้วัสดุก่อสร้างที่มีแร่พวกนี้เจือปนอยู่ ก็จะเกิดอันตรายจากเรดอนซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่มีสี กลิ่น และรส เรดอนละลายได้เล็กน้อยในน้ำ ดังนั้นจึงอาจแพร่ได้หลายรูปแบบ radon-222 เป็น ตัวให้อุณหภูมิแอลฟา (α-emitter) เมื่อสลายตัวจะให้อนุภาคแอลฟาออกมา และทำให้เกิดธาตุกัมมันตรังสีอีก 2 ตัวคือ polonium-214 และ polonium-218 ซึ่งอาจสะสมจนมีปริมาณสูงได้ในที่ปิด อนุภาคกัมมันตรังสีเหล่านี้อาจเกาะจับฝุ่นละอองและควันไฟซึ่งเมื่อหายใจเข้าไปมากๆ จะไปสะสมอยู่ในระบบทางเดินหายใจ และทำให้เกิดมะเร็งปอดได้

CO และ CO<sub>2</sub> ได้มาจากการเผาไหม้ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แหล่งที่มาของสารมลพิษทั้งสองตัวในอาคารบ้านเรือน มาจากในครัว ควันบุหรี่ และการหายใจของเรา CO<sub>2</sub> ไม่ใช่แก๊สพิษ แต่ CO<sub>2</sub> ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดอาการขาดออกซิเจนได้ ในอาคารปิด อาจมี CO<sub>2</sub> สูงถึง 2000 ppm โดยปรมาณ เทียบกับ 3 ppm ภายนอกอาคาร ผู้ที่อยู่ในอาคารที่มี CO<sub>2</sub> ปริมาณสูง จะมีอาการอ่อนเพลีย และไม่มีสมาธิในการทำงาน

CO เป็นแก๊สไม่มีสีไม่กลิ่นเช่นเดียวกับ CO<sub>2</sub> แต่เป็นแก๊สที่อันตรายมาก จากการที่ CO จับกับ Fe(II) ในฮีโมโกลบินได้แข็งแรงกว่า O<sub>2</sub> ถึง 200 เท่า คาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (carboxyhemoglobin) ไม่สามารถทำหน้าที่ขนส่ง O<sub>2</sub> ได้ การหายใจเอา CO เข้าไปในปริมาณไม่มากนักจะทำให้มีอาการมึนงง ปวดศีรษะ แต่ถ้าครึ่งหนึ่งของฮีโมโกลบินในร่างกายจับกับ CO จะมีอันตรายถึงชีวิต วิธีการที่ดีที่สุดในการช่วยเหลือผู้ได้รับพิษจาก CO คือพาออกมาอยู่ในที่อากาศบริสุทธิ์ หรือช่วยการหายใจโดยวิธีเป่าปาก (mouth to mouth)

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นของเหลวที่กลิ่นแสบจมูก ใช้เป็นน้ำยาองตัวอย่างในห้องทดลอง ในอุตสาหกรรมจะใช้เรซินฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสานในอาคารและในวัสดุที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เช่น ไม้อัด หรือบอร์ดต่างๆ และยังมีการใช้โฟมยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นฉนวน เรซินและโฟมเหล่านี้จะปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ออกมาได้ในสภาวะเป็นกรดและมีความชื้นอยู่ด้วย ฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่ำ จะทำให้มีอาการมีน้ำงกลื่นใส้อาเจียน และโรคอื่นๆ ของระบบทางเดินหายใจ

# ตอนที่ 7.3

## มลพิษทางน้ำ

### 1. มลพิษทางน้ำ

ยังมีผู้คนอีกเป็นจำนวนมากที่คิดว่าน้ำเป็นทรัพยากรของโลกที่มีอยู่เหลือเฟือ ใช้ไปเท่าไรก็ไม่หมด จึงใช้อย่างไม่มีความระมัดระวัง โลก มีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากก็จริง แต่น้ำส่วนใหญ่คือประมาณ 97% ของน้ำที่มีอยู่ทั้งหมด เป็นน้ำในทะเล และมหาสมุทร ส่วนที่เป็นน้ำจืดมีเพียงประมาณ 3% เท่านั้น และที่ร้ายไปกว่านั้น 2.5% ของน้ำจืดที่มีอยู่ คือน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก น้ำจืดที่มนุษย์นำมาใช้ได้จริงๆ ไม่ว่าจะป็นน้ำตามแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ รวมทั้งน้ำบาดาล มีเพียง 0.5% เท่านั้นเอง

ปัจจุบันภาวะมลพิษทางน้ำมีให้เห็นอยู่ทั่วไป โดยส่วนใหญ่แล้วเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งสิ้น สารมลพิษทางน้ำมีอยู่หลายประเภท ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 การจำแนกประเภทสารมลพิษทางน้ำ

ชนิด	ตัวอย่าง
ทางเคมี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์	<ul style="list-style-type: none"> <li>น้ำมัน, สีย้อม, ผงซักฟอก, ยาฆ่าแมลง, ฟีนอล, คาร์โบไฮเดรต, น้ำตาล</li> <li>กรด, เบส, โลหะหนัก, ไนเตรท, ฟอสเฟต, ซัลเฟต, ไบคาร์บอเนต</li> <li>แก๊สไข่เน่า, ชาติกัมมันตรังสี</li> </ul>
ทางกายภาพ สารที่ลอยได้ สารแขวนลอย ความร้อน	<ul style="list-style-type: none"> <li>โฟม, scum, ไม้, ใบไม้</li> <li>โคลน, ทราย, กรวด, ชิ้นส่วนโลหะ, กระดาษ, เยื่อกระดาษ, ขยะของเสีย, ซากสัตว์</li> <li>น้ำหล่อเย็นจากโรงงาน</li> </ul>
ทางชีวภาพ พวกที่นำเชื้อโรค สาหร่าย พิษน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>แบคทีเรีย, โปรโตซัว, เชื้อรา, สาหร่าย, ไวรัส, หนองพยาธิ</li> <li>การเจริญเติบโตมากเกินไป เนื่องจากมีสารอาหารสมบูรณ์, การเน่าเปื่อยจะต้องใช้ออกซิเจน</li> <li>การเจริญเติบโตต้องใช้น้ำ</li> </ul>

ในการบอกคุณภาพของน้ำ จะใช้ค่า DO (dissolved oxygen) หรือปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นตัวบ่งชี้ น้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่มากจัดเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี เพราะออกซิเจนมีความจำเป็นต่อการดำรงอยู่ของปลาและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ น้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่ 5-7 mg/l ถือว่าเป็นน้ำที่ดี

ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ มีความจำเป็นต่อกระบวนการทำความสะอาดตัวเองของน้ำในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ สิ่งมีชีวิตเล็กๆ พวกนี้ใช้สารอินทรีย์ในน้ำเป็นอาหาร และจะย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ ให้เล็กลง และถูกใช้เป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ด้วย การย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ เมื่อมีออกซิเจนอยู่ด้วยเรียกว่า aerobic decay

แต่ถ้าออกซิเจนที่มีอยู่ถูกใช้ไปหมด แต่การย่อยสลายยังคงดำเนินอยู่ ก็จะต้องเป็นไปโดยปราศจากออกซิเจน หรือ anaerobic decay ซึ่งการย่อยสลายโดยสภาวะเช่นนี้เพียงอย่างเดียวเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์อย่างยิ่ง เพราะมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดมีกากตะกอน (sludge) และแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น เช่น แก๊สไข่เน่า เป็นจำนวนมาก ผลิตภัณฑ์อีกอย่างที่ได้ออกจากการย่อยสลายโดยไม่มีออกซิเจน คือ แก๊สมีเทน หรือเรียกกันว่า "swamp gas" เพราะมักจะเกิดในบริเวณชื้นแฉะ และหนองบึง แก๊สมีเทนติดไฟได้ง่าย และถ้าเกิดสะสมอยู่ภายในที่ปิด จะเกิดการระเบิดได้ ตารางที่ 7.7 จะเปรียบเทียบให้เห็นว่า การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน จะได้ผลแตกต่างกันอย่างไร

ตารางที่ 7.7 เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน และแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารประกอบที่มีส่วนประกอบของ	ถูกย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็น	ถูกย่อยสลายแบบ ไม่ใช้ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็น
C	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
P	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	PH <sub>3</sub> (phosphine)
N	NH <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub> , amines
S	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S

เมื่อสารอินทรีย์จำนวนมากถูกทิ้งลงสู่แม่น้ำ และเริ่มการย่อยสลาย จะมีความต้องการออกซิเจนเกิดขึ้น เพราะแบคทีเรียและจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจน จะใช้ออกซิเจนด้วยอัตราเร็วกว่าปกติ ความต้องการออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบผลของสารมลพิษจากแหล่งต่างๆ ที่มีต่อคุณภาพของน้ำ มีการกำหนดให้ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biochemical oxygen demand หรือ BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปโดยจุลินทรีย์ในน้ำตัวอย่างในระหว่างการบ่ม (incubation) ที่ 20°C เป็นเวลา 5 วัน ซึ่งทำได้โดยเก็บน้ำตัวอย่างมาแล้วทำให้อิ่มตัวด้วยออกซิเจน หาปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่แล้วนำไปบ่มที่ 20°C เป็น

เวลา 5 วัน แล้วนำมาหาปริมาณออกซิเจนอีกครั้งหนึ่ง ค่าที่แตกต่างกันคือค่า BOD สารต่างๆ ในน้ำที่ทำให้มีค่า BOD นั้น ก็ได้แก่พวกขยะอินทรีย์, ไนโตรเจน, แอมโมเนีย, สารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจน,  $Fe^{2+}$ , ซัลไฟด์และซัลไฟด์ เป็นต้น น้ำที่ทิ้งจากชุมชนก่อนการบำบัด จะมีค่า BOD อยู่ระหว่าง 150-390 mg/l น้ำที่ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร 5000-6000 mg/l และน้ำที่ทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ จะมีค่า BOD สูงได้ถึง 15,000 mg/l

น้ำซึ่งมีการไหล เช่น น้ำในแม่น้ำลำคลอง จะดูดซึมออกซิเจนจากอากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่าการเติมอากาศ (reaeration) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) แต่ถ้ามีการใช้ออกซิเจนในปริมาณที่สูงมาก อัตราการเติมอากาศ อาจจะไม่ทันกับปริมาณการใช้ออกซิเจน แต่ถ้าไม่มีการทิ้งสารอินทรีย์ลงไปเพิ่มอีก ปริมาณออกซิเจนในน้ำก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นได้

นอกจากค่า DO, BOD ที่ใช้บอกคุณภาพของน้ำแล้ว ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ อีกที่ต้องตรวจสอบเพื่อบอกคุณภาพของน้ำ คือ ค่า pH, อุณหภูมิ, ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ทั้งหมด, ไอออนหลายชนิด, สารกำจัดศัตรูพืช, ธาตุกัมมันตรังสี, สี, กลิ่น, ความขุ่น และปริมาณสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic organism)

## 2. ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

ถ้าเป็นแหล่งน้ำที่น้ำค่อนข้างนิ่ง เช่น ในทะเลสาบ หรือในอ่างเก็บน้ำเหนือเขื่อนหรือเป็นลำน้ำที่ไหลช้าๆ การหาปริมาณสารอาหารที่มีอยู่เป็นสิ่งสำคัญมากในการบอกคุณภาพของน้ำ สารประกอบของฟอสฟอรัสและไนโตรเจน มีความจำเป็นต่อพืชที่ปลูกบนดินอย่างไร สารทั้งสองก็มีความสำคัญต่อพืชน้ำด้วยเช่นกัน เมื่อมีสารอาหารจำนวนมากถูกนำลงไปในแหล่งน้ำ จะทำให้สาหร่ายและพืชน้ำอื่นๆ เจริญเติบโตจนควบคุมไม่ได้ แหล่งน้ำซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ด้วยสารอาหารนี้ จะเรียกว่า อยู่ในสภาพยูโทรฟิค (eutrophic) และกระบวนการที่ทำให้มีความอุดมสมบูรณ์ดังกล่าวเรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน

ผลของการเกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชันที่มองเห็นได้ คือการเกิดอัลกัลบลูม (algal bloom) คือสภาพที่พื้นผิวน้ำถูกปกคลุมด้วยสีเขียวของสาหร่ายที่เจริญเติบโตอย่างมากมาเป็นชั้นหนา ซึ่งมีผลหลายอย่างต่อคุณภาพของน้ำ เช่น แสงอาทิตย์ไม่สามารถผ่านลงไปที่ด้านล่างของชั้นสาหร่ายได้ เมื่อสาหร่ายตายจะเกิดการย่อยสลาย และใช้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในการย่อยสลายดังกล่าว กลิ่นรสของน้ำ อาจเปลี่ยนแปลงไป สาหร่ายน้ำจืดบางชนิดจะสร้างสารพิษขึ้นมาในขณะที่เน่าเปื่อย โดยเฉพาะสาหร่ายในกลุ่มของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) สาหร่ายแต่ละชนิดจะมีความทนทานต่อการเน่าเสียของน้ำได้แตกต่างกัน เมื่อไรก็ตามที่แหล่งน้ำมีสาหร่ายสีเขียวลดน้อยลง แต่มีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าแหล่งน้ำนั้นเกิดสภาพยูโทรฟิเคชันมากขึ้นแล้ว



ในการทำงานเดียวกันสภาพการเปลี่ยนไปเป็นมีสาหร่ายเพียงชนิดเดียว ก็ไม่เป็นที่ติดต่อกับสภาพแวดล้อมเช่นกัน เพราะความหลากหลายต่างหากที่จะแสดงถึงระบบนิเวศที่สมบูรณ์

ถึงแม้ว่ากระบวนการยูโทรฟิเคชัน จะเกิดได้เองตามธรรมชาติ แต่จะเป็นกระบวนการที่ช้ามาก แต่กิจกรรมของมนุษย์ทำให้กระบวนการยูโทรฟิเคชันเกิดได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะจากการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส และไนโตรเจนในการเกษตร และการใช้ผงซักฟอกที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ ในปัจจุบันถึงแม้จะมีการใช้ผงซักฟอกสูตรใหม่ๆ ที่ปราศจากฟอสฟอรัส แต่น้ำที่มาจากชุมชน จากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท น้ำฝนที่ชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ โดยเฉพาะในช่วงที่มีพายุฝน ได้นำเอาสารอาหารลงสู่แหล่งน้ำเป็นจำนวนมาก

### 3. ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical oxygen demand, BOD)

ค่า BOD เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กันมากในการบอกคุณภาพของน้ำที่มาจากชุมชนและน้ำที่จากอุตสาหกรรม โดยนิยามแล้ว BOD จะบอกถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ในน้ำต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในกระบวนการออกซิเดชัน โดยใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20°C การหาค่า BOD นั้น โดยหลักการทำได้โดยหาค่า DO ในน้ำตัวอย่างแล้วเก็บน้ำตัวอย่างไว้ 5 วัน แล้วนำมาหาปริมาณ DO อีกครั้งหนึ่ง ก็จะหาปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปได้ น้ำคุณภาพดีจะมีค่า BOD ต่ำ เพราะแสดงว่ามีสารอินทรีย์อยู่น้อย ในขณะที่น้ำที่จากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานฆ่าสัตว์ อาจมีค่า BOD อยู่ในหลักหมื่นถึงแสนได้

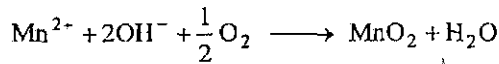
แต่อย่างไรก็ตาม การหาค่า BOD ที่เวลา 5 วันวันนั้น อาจไม่ได้บอกปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ทั้งหมด และยังมีสารอินทรีย์บางชนิดที่มีอยู่ในน้ำซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วย

ในการหาค่า BOD จำเป็นจะต้องหาปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ หรือค่า DO เสียก่อน การหาค่า DO ทำได้โดยใช้วิธีไอโอดิเมตรี (iodometry) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องกับไอโอดีน เป็นการหาปริมาณตัวออกซิไดซ์ทางอ้อม แต่มีการดัดแปลงเล็กน้อยโดยการเติมเอไซด์ (azide) ลงไปด้วย สารเคมีที่ใช้ได้แก่สารละลายแมงกานีสซัลเฟต ( $MnSO_4$ ), แอลคาไล - ไอโอดิไดด์ - เอไซด์, กรดซัลฟิวริกเข้มข้น, สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) และน้ำแข็งซึ่งใช้เป็นอินดิเคเตอร์

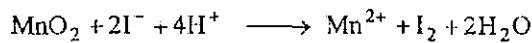
เริ่มต้นโดยการนำน้ำตัวอย่าง (น้ำตัวอย่างคือน้ำที่ต้องการวิเคราะห์หาค่า DO) มาเติมสารเคมี 2 ตัวแรก ผสมให้เข้ากันดี ถ้าน้ำตัวอย่างไม่มีออกซิเจนอยู่เลย  $Mn^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับ  $OH^-$  ได้ตะกอนสีขาวของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ ( $Mn(OH)_2$ )



และถ้ามีออกซิเจนอยู่ในน้ำ  $Mn^{2+}$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $Mn^{4+}$  และตกตะกอนเป็นออกไซด์สีน้ำตาลแดงของแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ )



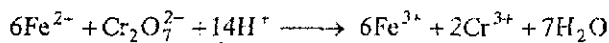
เมื่อปล่อยให้ออกซิเจนที่มีอยู่ทำปฏิกิริยาหมดแล้ว เดิมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น เขย่าจนตะกอนละลายหมดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือตะกอนออกไซด์ถูกรีดิวซ์เป็น  $Mn^{2+}$  และไอออนไฮโอไดด์ในปริมาณที่สมมูลกันถูกออกซิไดซ์เป็นไฮโอไดน์อิสระ ซึ่งจะสมมูลกับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่างเริ่มต้น



หลังจากนั้นจึงนำไปไทเทรตกับสารละลายไทโอซัลเฟตเพื่อหาปริมาณไฮโอไดน์ที่เกิดขึ้น ซึ่งไทโอซัลเฟตจะถูกออกซิไดซ์เป็นเททระไทโอเนต และไฮโอไดน์ถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นไฮโดไดด์ โดยที่จุดยุติของการไทเทรตสีน้ำเงินของสารเชิงซ้อนระหว่างไฮโอไดน์กับน้ำแป้งจะหายไป

#### 4. ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD)

ค่า COD จะใช้บอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียและสภาพการปนเปื้อนของน้ำธรรมชาติ โดยบอกถึงปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในกระบวนการออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยหลักการทำได้โดยการเติมสารละลายมาตรฐานของตัวออกซิไดซ์ เช่น โปแตสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ที่ทราบปริมาณลงในน้ำตัวอย่างในสถานะที่เป็นกรด แล้วไทเทรตหาปริมาณ  $K_2Cr_2O_7$  ที่เหลือด้วยสารละลายมาตรฐานของตัวรีดิวซ์ เช่น เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอโรอิน (ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ โดยที่จุดยุติจะมีการเปลี่ยนแปลงสีจากน้ำเงินแกมเขียวไปเป็นสีน้ำตาลแดง ปฏิกิริยาในการไทเทรต คือ



ในการหาค่า COD นี้ สารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีอยู่ในน้ำยกเว้นพวก แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) และพิริดีน (pyridine) จะถูกออกซิไดซ์ทางเคมีได้หมด ค่า COD ที่หาได้จะมีค่ามากกว่าค่า BOD และ DO ยกเว้นในกรณีที่มีสารอินทรีย์พวกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนและพิริดีน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

## 5. โลหะที่มีอันตราย

มนุษย์เราใช้ทะเลและมหาสมุทรเป็นถังขยะใบใหญ่มานานแล้ว ทำให้ในปัจจุบันมีสารพิษโดยเฉพาะโลหะที่มีอันตรายปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง และอันตรายของโลหะเหล่านั้นได้ปรากฏออกมาให้พวกเราได้รับรู้ จากกรณีของโรคมินามะตะกับโรคอิไตอิไต อันเนื่องมาจากพิษของปรอทและแคดเมียมที่ชาวญี่ปุ่นได้ประสบ เพราะเป็นชาติที่รับประทานปลาเป็นอาหารหลักและปลาก็มีการสะสมของโลหะพวกนี้อยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะปลาในบริเวณที่อยู่ใกล้แหล่งอุตสาหกรรม ปรอทอินทรีย์มีอันตรายไม่มากเท่ากับปรอทอินทรีย์ เพราะร่างกายสามารถกำจัดออกไปได้ แต่ปรอทอินทรีย์จะสะสมอยู่ในส่วนที่เป็นไขมันของร่างกาย เมื่อออกไปสู่สภาพแวดล้อมปรอทอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของปรอทอินทรีย์ เช่น ไดเมทิลเมอร์คิวรี,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  หรือ เอทิลเมทิลเมอร์คิวรี,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{HgCH}_3$  ได้ จากการสะสมเพิ่มปริมาณในห่วงโซ่อาหาร ทำให้มีอันตรายต่อสมอง กลายเป็นคนพิการทางสมองได้ ส่วนแคดเมียมนั้นไม่ว่าจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ล้วนแต่มีอันตรายต่อร่างกายทั้งสิ้น โดยจะมีการทำลายกระดูกจนกลายเป็นคนพิการถ้ามีการสะสมแคดเมียมในร่างกายในปริมาณสูง

สำหรับในประเทศไทยนั้น พิษจากโลหะอันตรายที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นข่าวใหญ่ในปี พ.ศ. 2541 คือ กรณีการปนเปื้อนของตะกั่วในห้วยคลิตี้ล่าง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ที่ทำให้กะเหรี่ยงหมู่บ้านคลิตี้ล่างและสัตว์เลี้ยงของพวกเขาเสียชีวิตไปหลายสิบชีวิต การปนเปื้อนของตะกั่วเกิดมาจากโรงงานแต่งแร่ตะกั่วของบริษัทตะกั่วคอนเซนเทรตส์ (ประเทศไทย) ที่อยู่ทางคั่นน้ำ ซึ่งโรงงานดังกล่าวได้ดำเนินงานมาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2510 ทำให้มีการปล่อยสารตะกั่วลงมาในในห้วยคลิตี้ล่าง และมีการสะสมตะกั่วในน้ำ และตะกอนดินใต้น้ำในปริมาณสูง คือ ในน้ำมีตะกั่วปะปนอยู่ถึง 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานไม่ควรเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนในดินตะกอนใกล้โรงแต่งแร่พบตะกั่วสูงที่สุดถึง 68,920 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่ามาตรฐานไม่ควรเกิน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) สภาพดังกล่าว ทำให้ตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกายของกะเหรี่ยงในปริมาณสูง เพราะชาวบ้านใช้น้ำในลำห้วยในการบริโภค และยังจับปลาซึ่งเป็นอาหารโปรตีนหลักจากลำห้วยมาเป็นอาหารเป็นเวลานาน พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ผู้ชายที่น้ำหนักตัว 60 กิโลกรัมจะได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายวันละ 0.0025 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน ส่วนผู้หญิงน้ำหนักตัว 50 กิโลกรัม จะได้รับตะกั่ว 0.003 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ต่อวัน ส่วนค่าที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency, EPA) กำหนดเอาไว้คือ ปริมาณสารตะกั่วที่บริโภคเข้าสู่ร่างกายได้โดยไม่เกิดอันตราย ไม่ควรมีค่าเกิน 0.00014 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ต่อวัน

หลังจากตะกั่วเข้าสู่ร่างกายแล้ว ตะกั่ว จะไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อแข็งเช่น กระดูก ฟัน เล็บ เส้นผม ที่เหลือจะไปอยู่ในเนื้อเยื่ออ่อน เช่น ไขกระดูก ระบบประสาท ตับ ไต โดยในผู้ใหญ่ประมาณ

90% ของตะกั่วจะอยู่ในกระดูก และมีเวลาครึ่งชีวิต (half life) 16-20 ปี ในขณะที่ในเด็ก ประมาณ 70% ของตะกั่วจะอยู่ในกระดูก แต่ความเป็นพิษของตะกั่วจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกั่วในเนื้อเยื่ออ่อน เด็กๆ จึงได้รับพิษตะกั่วมากกว่าผู้ใหญ่

ตะกั่ว จะมีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาท ระบบสมอง โลหิตและระบบสืบพันธุ์ อาการเป็นพิษจากตะกั่วจึงทำให้มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องอย่างรุนแรง กล้ามเนื้อแขนขาอ่อนแรง จนเป็นอัมพาต อาการทางสมองอาจทำให้นอนไม่หลับ ฝันร้าย สติ คุ่มคั่ง คุ้มร้าย ชัก หมคสติ และอาจเสียชีวิต ตะกั่วยังไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่มีหน้าที่ในการสร้างเม็ดเลือด ตะกั่วทำให้เป็นหมัน และทำลายไต และสิ่งเหล่านี้ทำให้กะเหรี่ยงหมู่บ้านคลิตี้ล่าง เสียชีวิตอย่างลึกลับในช่วงเวลาที่ผ่านมามากกว่า 30 ราย รวมทั้งชีวิตของสัตว์เลี้ยงเช่น วัว ตาย อีกมากมาย กว่าที่จะรับรู้ว่ามีชีวิตเหล่านั้นต้องสูญเสียไปเนื่องจากพิษของตะกั่ว และที่น่าทึ่งเป็นอย่าง มากก็คือ กรมทรัพยากรธรณีได้มีคำสั่งปิดโรงเต่งแร่แห่งนี้เป็นที่ 3 แล้ว ด้วยข้อหาเดิม พร้อมทั้งสั่งปรับกรณีปล่อยน้ำเสียลงสู่ลำห้วยในอัตราสูงสุดถึง 2000 บาท !!!!

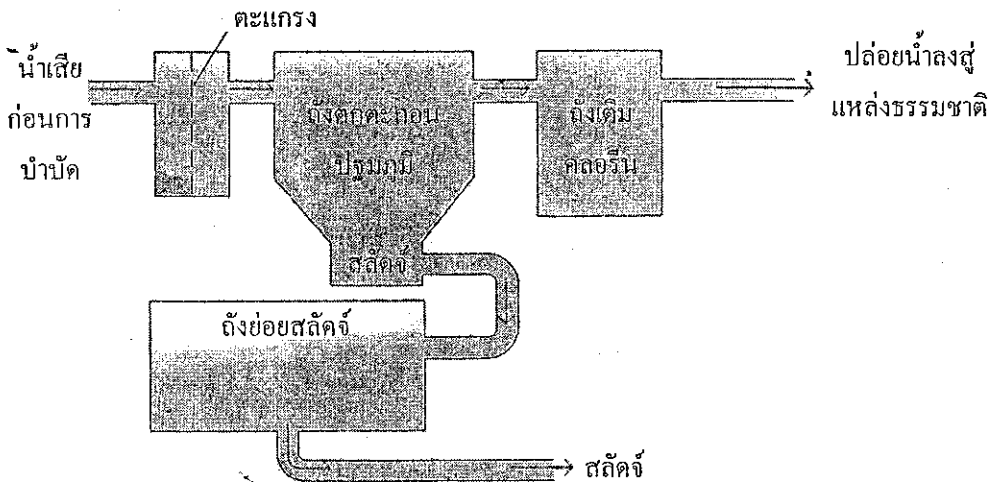
## 6. การบำบัดน้ำเสียและมาตรฐานคุณภาพน้ำ

ในสมัยก่อน แม่น้ำลำคลองเป็นที่รองรับของเสียจากแหล่งต่างๆ น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมทั้งเล็กและใหญ่ ถูกปล่อยลงในแม่น้ำลำคลองโดยไม่มี การบำบัด เมื่อจำนวนประชากรยังน้อยอยู่ แม่น้ำลำคลองสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ น้ำก็ไม่เน่าเสียแต่เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากร น้ำในแม่น้ำลำคลองเริ่มเน่าเสีย และในที่สุดรัฐก็ต้องเข้ามาจัดการเพื่อรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมทางน้ำโดยจัดให้มีโรงบำบัดน้ำเสียขึ้น ในน้ำเสียนั้น จะมีสารต่างๆ อยู่มากมายทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารบางอย่างย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น พวกไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต แต่ก็มีสารอีกเป็นจำนวนมากที่ย่อยสลายยากหรือย่อยสลายไม่ได้ เช่น พวก โฟม ขยะพลาสติกต่างๆ ในการบำบัดจึงมีการบำบัดเป็นขั้นตอนต่างๆ กัน คือ การบำบัดแบบปฐมภูมิ (primary treatment) การบำบัดแบบทุติยภูมิ (secondary treatment) และการบำบัดแบบตติยภูมิ (tertiary treatment)

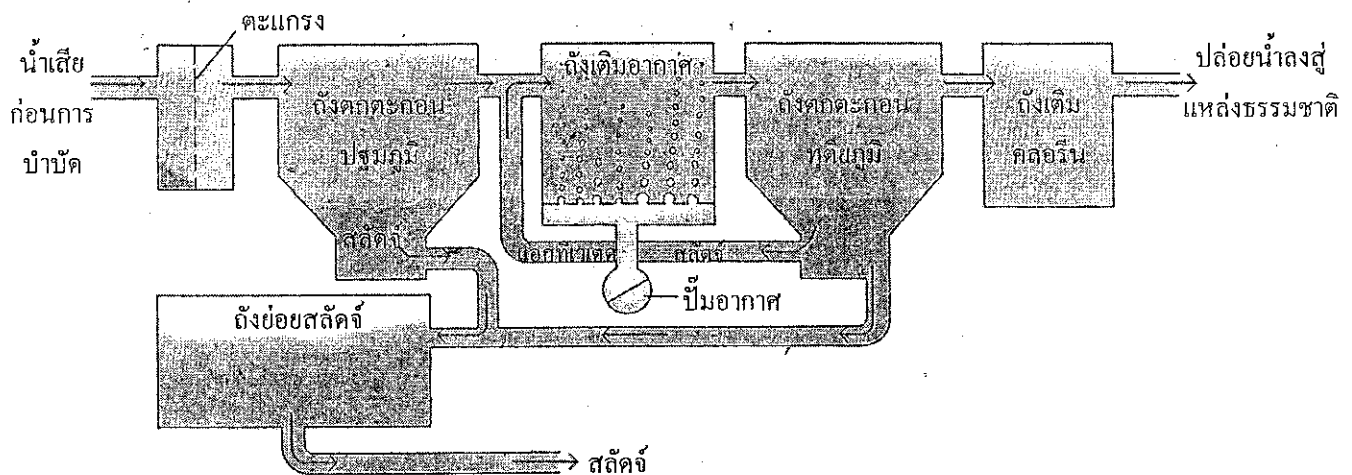
การบำบัดแบบปฐมภูมิ ขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย คือ การให้น้ำเสียผ่านตะแกรงแบบหยาบ เพื่อแยกขยะของแข็งชิ้นใหญ่ๆ ที่มีอยู่ออกไป ตะแกรงที่ใช้อาจมีอยู่หลายอัน หลังจากนั้นจะผ่านน้ำเสียไปยังถังตกตะกอน ซึ่งประมาณ 80% ของของแข็งจะตกตะกอนที่ก้นถัง หลังจากนั้นจะมีการเติมจุลินทรีย์ที่ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำมารวมตัวกันจนมีมวลมากขึ้นและแยกตัวออกจากน้ำในรูปของสลัดจ์ (sludge) ลงไปนอนก้นเช่นกัน น้ำจากถังตกตะกอนจะผ่านต่อไปยังถังเติมคลอรีนเพื่อฆ่าพวกแบคทีเรียก่อนจะปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือแม่น้ำลำคลองต่อไป น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบปฐมภูมินี้ จะยังมีของแข็งเหลืออยู่ประมาณ 40% และมีสารอินทรีย์เหลืออยู่อีกประมาณ

70% ส่วนสลัดจ์ที่ได้นั้นจะถูกนำไปย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ หรือบางทีก็นำไปตากแดดให้แห้งเพื่อนำไปทำเป็นปุ๋ยหรือใช้ถมที่ต่อไป ส่วนสลัดจ์ในส่วนที่เป็นของเหลวอาจนำไปสเปรย์พ่นฝักหรือต้นไม้ต่างๆ ได้ ภาพที่ 7.5 แสดงแผนภูมิของการบำบัดน้ำเสียแบบปฐมภูมิ

### โรงงานบำบัดน้ำเสียแบบปฐมภูมิ



### โรงงานบำบัดน้ำเสียแบบทุติยภูมิ



ภาพที่ 7.5 การบำบัดน้ำเสียแบบปฐมภูมิ และการบำบัดแบบทุติยภูมิ

การบำบัดแบบทุติยภูมิ ในการบำบัดแบบทุติยภูมิ ทั้งสลัดจ์และน้ำเสียจะถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียที่ใช้อากาศ น้ำเสียที่ผ่านตะแกรงและผ่านถังตกตะกอนถังแรกแล้ว จะผ่านไปสู่อ่างเติมอากาศ ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียชนิดที่ต้องการอากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นจะผ่านไปยังถังตกตะกอนถังที่สอง แอคติเวตเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่มีแบคทีเรียอยู่เป็นจำนวนมากที่แยกตัวลงมาบางส่วนจะถูกรีไซเคิลกลับเข้าไปในถัง

เดิมอากาศ (ดูภาพที่ 7.5) การย่อยสลายแบบใช้อากาศ จะทำให้ปริมาตรของสลัดจ์ลดลง ทำให้กำจัดได้ง่ายขึ้น

อีกวิธีการหนึ่งที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้อากาศ ทำได้โดยการกรองผ่านชั้นกรวดหิน (trickling filters) หลังจากน้ำผ่านการบำบัดแบบปฐมภูมิมาแล้ว จะถูกสเปรย์ผ่านชั้นกรวดหิน ซึ่งมีตัวย่อยสลายอยู่มากมาย เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา หน่อต่างๆ การสเปรย์มักจะทำโดยใช้หัวฉีดที่หมุนไปได้อย่างรอบๆ เพื่อให้ น้ำดูดซึมออกซิเจนจากอากาศให้มากที่สุด ก่อนที่จะตกลงผ่านชั้นกรวดหิน หลังจากทีน้ำผ่านจากถังเดิมอากาศ หรือผ่านการกรองด้วยชั้นกรวดหินแล้ว ก็จะผ่านไปยังถังตกตะกอนอีก ซึ่งพวกของแข็งจะตกตะกอนนอนกัน ส่วนที่เป็นน้ำจะมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ไม่มากนัก ส่วนสารอินทรีย์จะเหลืออยู่ประมาณครึ่งหนึ่ง เมื่อเติมคลอรีนแล้วจะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยจะทำให้เกิดการปนเปื้อนแหล่งน้ำธรรมชาติน้อยกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบปฐมภูมิ

อย่างไรก็ตามการบำบัดแบบทุติยภูมินี้ ไม่สามารถกำจัดสารเคมีอันตรายที่ละลายด้วยยาก เช่น สารกำจัดศัตรูพืช และสารจำนวนพอลิคัลลอรินเตดไบฟีนิล (polychlorinated biphenyls) ในน้ำเสียได้ สารอันตรายเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาในกรณีที่จะใช้ของเสียอินทรีย์ในการผลิตแก๊สชีวภาพ และยังทำให้ไม่สามารถนำเอาสลัดจ์ไปใช้ในการเกษตรอีกด้วย เพราะจะทำให้พืชผักปนเปื้อนสารพิษได้

การบำบัดแบบตติยภูมิ มีวิธีการหลายอย่างที่จะกำจัดสารมลพิษที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเสียหลังจากการบำบัดแบบทุติยภูมิ แต่ส่วนมากจะต้องใช้สารเคมีซึ่งมีราคาแพง จึงมักจะไม่นำมาใช้มากนักกรณีที่ต้องนำน้ำนั้นไปทำน้ำประปา ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้ได้แก่ การใช้โอโซนนิยมซัลเฟต เพื่อตกตะกอนพวกฟอสเฟต หรือการกรองน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งจะดูดซับสารปนเปื้อนได้หลายชนิด ในประเทศไทยเราก็กำลังมีการวิจัยหาวิธีที่จะลดค่าใช้จ่าย เช่น การผ่านน้ำเสียเข้าไปในบ่อที่มีผักตบชวาอยู่ เพื่อให้รากของผักตบดูดซับสารมลพิษต่างๆ รวมทั้งโลหะที่มีพิษด้วย

มาตรฐานคุณภาพน้ำ มาตรฐานคุณภาพน้ำจะมีอยู่หลายประเภท กำหนดโดย คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมตัวอย่างเช่น

- มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
- มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล
- มาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคาร
- มาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากที่ดินจัดสรร
- มาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เป็นต้น

ตัวอย่างของมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรมแสดงไว้ในตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 แสดงค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด – ด่าง	5.5 – 9.0	PH มิเตอร์
2. ค่าที่ดื้อเอส (TDS – Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก/ล หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก/ล - น้ำทิ้งที่ระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็มเกิน 2,000 มก/ล หรือระบายลงทะเลค่า TDS ของน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่า TDS ในแหล่งน้ำกร่อยหรือทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก/ล	ระเหยแห้งที่ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก/ล หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก/ล	กรองผ่านแผ่นกรองใยแก้ว
4. อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40°C	วัดอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่างน้ำ
5. ดินหรือโคลน	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	การไทเทรต
7. ไซยาไนต์ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก/ล	กลั่นแล้วตามด้วยวิธีการใช้กรดพิริดีนบาร์บิฟูริก (Pyridine Barbituric Acid)
8. น้ำมันและไขมัน	ไม่เกิน 5.0 มก/ล หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก/ล	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอสฟอรัส	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	สเปกโทรโฟโตเมทรี
10. สารประกอบฟีนอล	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	กลั่นแล้วตามด้วยวิธีการใช้ 4-อามิโนแอนไทไพรีน (4-Aminoantipyrine)
11. คลอรีนอิสระ	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	วิธีไอโอโดเมทรี
12. สารกำจัดศัตรูพืช	ต้องตรวจ ไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	แก๊สโครมาโทกราฟี
13. ค่าบีโอดี (BOD ที่ 5 วัน, 20°C)	ไม่เกิน 20 มก/ล หรืออาจแตกต่างกัน แต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก/ล	วิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่ 5 วัน, 20°C

ตารางที่ 7.7 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
14. ค่าซีโอดี (COD)	ไม่เกิน 120 มก/ล หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก/ล	ทำปฏิกิริยากับ โพตัสเซียมไดโครเมต
15. ค่าที่เคเอ็น (TKN, Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก/ล หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก/ล	วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method)
16. โลหะอันตราย		
- สังกะสี, Zn	ไม่เกิน 5.0 มก/ล	AAS, ICP
- โครเมียม, Cr(VI)	ไม่เกิน 0.25 มก/ล	
- โครเมียม, Cr(III)	ไม่เกิน 0.75 มก/ล	
- ทองแดง, Cu	ไม่เกิน 2.0 มก/ล	
- แคดเมียม, Cd	ไม่เกิน 0.03 มก/ล	
- แบเรียม, Ba	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	
- ตะกั่ว, Pb	ไม่เกิน 0.2 มก/ล	
- นิกเกิล, Ni	ไม่เกิน 1.0 มก/ล	
- แมงกานีส, Mn	ไม่เกิน 5.0 มก/ล	
- อาร์เซนิก, As	ไม่เกิน 0.25 มก/ล	AAS (Hydride generation)
- เซเลเนียม, Se	ไม่เกิน 0.02 มก/ล	AAS (Hydride generation), ICP
-ปรอท, Hg	ไม่เกิน 0.005 มก/ล	AAS (Cold vapor technique)

หมายเหตุ : AAS : Atomic Absorption Spectrophotometry

ICP : Inductively Coupled Plasma



# ตอนที่ 7.4

## สารกำจัดศัตรูพืช

ประมาณกันว่า โลกของเรามีแมลงมากกว่า 3 ล้านชนิด มากกว่าจำนวนชนิดของพืชและสัตว์รวมกันเสียอีก แมลงเหล่านี้ บ้างก็มีประโยชน์ บ้างก็มีโทษ เพราะเป็นแมลงศัตรูพืช หรือมีอันตรายต่อมนุษย์ แต่แมลงในกลุ่มหลังมีเพียงประมาณ 0.1% ของจำนวนแมลงทั้งหมด และที่เป็นปัญหาจริงๆ มีเพียงไม่กี่ร้อยชนิดเท่านั้น และมนุษย์ก็ได้ใช้สารเคมีในการควบคุมแมลงกลุ่มนี้ ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะประสบผลสำเร็จอยู่บ้าง แต่ปัญหาจากผลกระทบก็ตามมา แมลงจำนวนมาก รวมทั้งแมลงที่มีประโยชน์ด้วยถูกทำลาย แมลงอีกหลายชนิดพัฒนาความต้านทานต่อสารเคมีที่ใช้ ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ และต้องค้นหาสารเคมีตัวใหม่ที่ได้ผลกว่าอยู่ตลอดเวลา สารเคมีที่มนุษย์ใช้ในการควบคุมศัตรูพืชนั้น มีการตกค้างและสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ รวมทั้งมนุษย์ด้วย

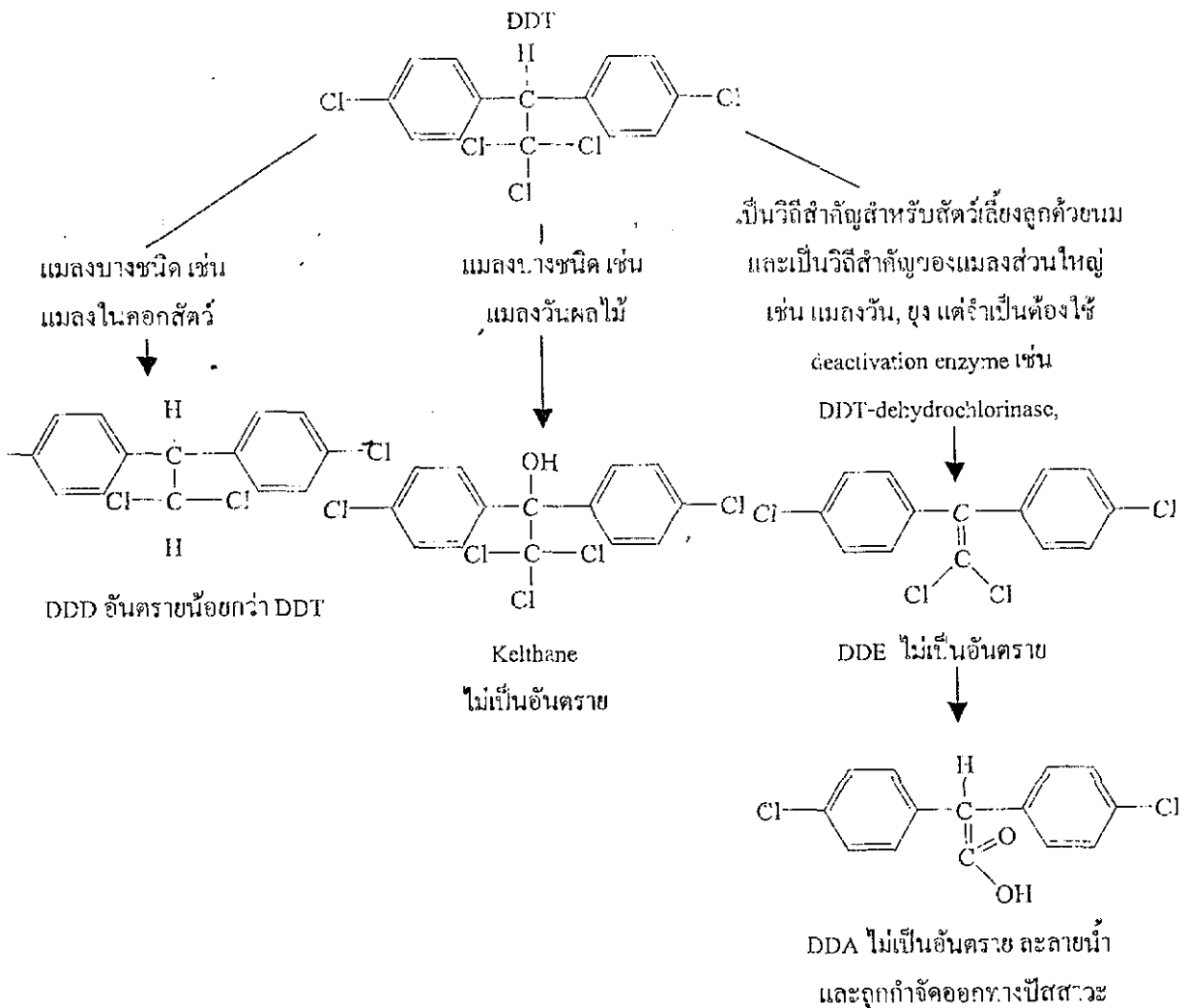
คำว่าเพสตีไซด์ (pesticide) หมายถึงสารที่มีความสามารถในการเลือกทำลายศัตรูของพืช แบ่งประเภทได้ตามลักษณะการใช้งานคืออินเซ็คติไซด์ (insecticides) ใช้ในการทำลายแมลง ฟังจิไซด์ (fungicides) ใช้ในการควบคุมเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคกับพืช เฮอร์บิไซด์ (herbicides) ใช้กำจัดวัชพืชหรือพืชอื่นๆ ที่ไม่เป็นที่ต้องการ โรเด็นติไซด์ (rodenticides) จะทำลายสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังที่เป็นศัตรูพืช เช่น หนู กระจอก เจอร์มิไซด์ (germicides) ทำลายพวกเชื้อโรค เป็นต้น

### 1. กรณีศึกษา : ดีดีที (DDT)

เรื่องราวของ DDT เป็นกรณีตัวอย่างที่รู้จักกันดี จากการที่มนุษย์นำสารเคมีตัวนี้มาใช้ในการควบคุมแมลง แล้วปรากฏว่าในที่สุดแล้ว แมลงสามารถพัฒนาความต้านทานต่อ DDT ได้ และ DDT ยังสะสมตกค้างอยู่ในสภาพแวดล้อม เป็นเวลายาวนาน จนทำให้เกิดปัญหาต่อมนุษย์เอง

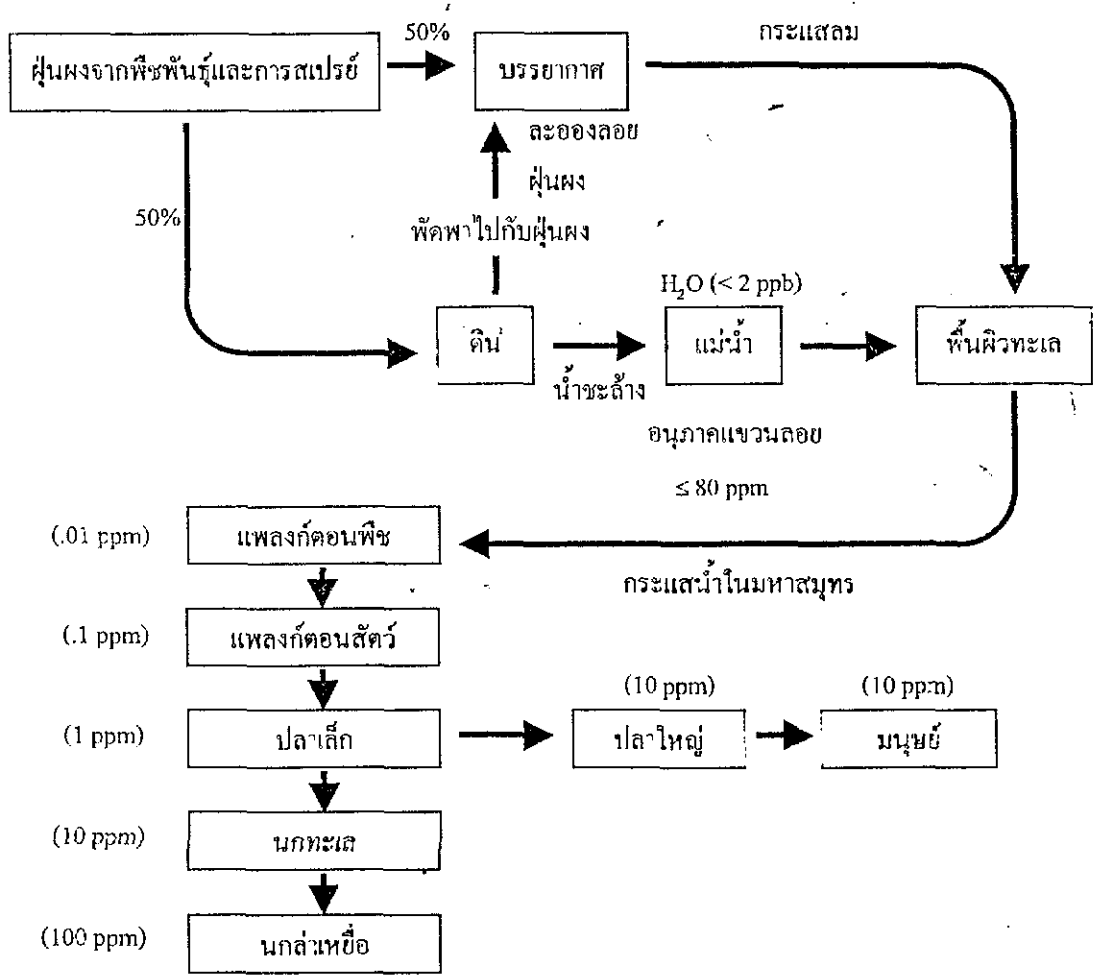
DDT เป็นชื่อย่อของไดคลอโรไดฟีนิลไตรคลอโรเอเทน (dichlorodiphenyl trichloroethane) ซึ่งเป็นสารเคมีในกลุ่มออร์แกโนคลอรีน หรือสารอินทรีย์ซึ่งมีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ สารชนิดนี้ละลายได้ในไขมัน จึงไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันของสัตว์ได้ นอกจากนี้สารออร์แกโนคลอรีนยังสลายตัวได้ยาก การตกค้างและการสะสมในสภาพแวดล้อมจึงทำให้เกิดปัญหาอย่างมาก

มีการสังเคราะห์ DDT ขึ้นในปี ค.ศ. 1874 แต่ไม่รู้ว่า DDT สามารถฆ่าแมลงได้ จนกระทั่ง ปี ค.ศ. 1939 DDT บริสุทธิ์ละลายน้ำได้น้อยมาก (1.2 ppb) แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด ถึงแม้ว่า DDT จะมีสมบัติในการทำลายแมลงได้ แต่ต่อมาไม่นานก็พบว่า แมลงหลายชนิดสามารถพัฒนาความต้านทานสารเคมีในกลุ่มออร์แกโนคลอรีนได้ แมลงในกลุ่มดังกล่าวเป็นพวกที่มี deactivation enzyme คือ เอนไซม์ที่สามารถเปลี่ยน DDT ให้เป็นอนุพันธ์ที่ไม่เป็นพิษได้ เมื่อมีการใช้ DDT ในการควบคุมแมลงศัตรูพืช แมลงพวกนี้จะอยู่รอด และเพียงไม่กี่ชั่วอายุ แมลงก็มีความต้านทานต่อ DDT ได้มากขึ้น กระบวนการเมแทบอลิซึมของแมลงจะเปลี่ยน DDT ไปเป็นอนุพันธ์ต่างๆ คือ ไดคลอโรโรไดฟีนิลไดคลอโรอีเทน (dichlorodiphenyldichloroethane, DDD), ไดคลอโรโรไดฟีนิล ไดคลอโรโรเอทิลีน (dichlorodiphenyldichloroethylene, DDE) และไดคลอโรโรไดฟีนิล แอซิติก แอซิด (dichlorodiphenyl acetic acid, DDA) ซึ่งไม่มีอันตรายต่อตัวมันได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงไว้ในภาพที่ 7.6 กระบวนการเมแทบอลิซึม DDT ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม จะเกิดซ้ำกว่าของแมลงมาก



ภาพที่ 7.6 กระบวนการเมแทบอลิซึม DDT โดยแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

กระบวนการเพิ่มปริมาณทางชีวภาพ (Biological magnification) ความสามารถของ DDT ในการระเหยจากพืชและดินสู่บรรยากาศโดยตรงและความสามารถในการเกาะติดไปกับละอองน้ำซึ่งถูกพัดพาไปทั่วสิ่งแวดล้อม ทำให้ DDT มีอันตรายต่อสัตว์ชั้นสูง การเคลื่อนที่ของ DDT ผนวกกับความต้านทานต่อการออกซิเดชัน การสลายตัวยาก และความสามารถละลายได้ในไขมัน ส่วนเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะอธิบายกลไกของการสะสมเพิ่มปริมาณของ DDT ในทางชีวภาพ เนื่องจาก DDT ไม่ละลายน้ำ ส่วนที่ตกค้างจึงเกาะติดอยู่กับอนุภาคต่างๆ แล้วจึงถูกพาไปด้วยฝุ่นผงและของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังนั้นถึงแม้ว่าความเข้มข้นของ DDT ในสิ่งแวดล้อมทั่วไปจะมีค่าต่ำมาก สิ่งมีชีวิตที่มีไขมันหรือน้ำมันอยู่ในปริมาณสูง จะดูดซึม DDT ที่มีอยู่ได้ทันที เมื่อพืชและสิ่งมีชีวิตเล็กๆ พวกนี้ถูกกินด้วยสมาชิกลำดับถัดไปในโซ่อาหาร ความเข้มข้นของ DDT อาจเพิ่มขึ้นได้เป็น 10,000 เท่าของความเข้มข้นเดิม ภาพที่ 7.7 แสดงการเพิ่มปริมาณของ DDT ทางชีวภาพตามที่ได้กล่าวถึงนี้



ภาพที่ 7.7 การเคลื่อนย้าย DDT และการเพิ่มปริมาณทางชีวภาพของ DDT ในสิ่งแวดล้อม

ผลอย่างหนึ่งของการสะสมเพิ่มปริมาณ DDT ทางชีวภาพ คือทำให้ระบบสืบพันธุ์ของนกกล้าเหยื่อหลายชนิดล้มเหลว อาทิเช่น นกกระทง เที้ยวเพอร์กิน เที้ยวออสเปรย์ และนกอินทรีวัลด์ก็เกิดนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าปริมาณ DDT ที่พบค่อนข้างสูงในไขมันของนกกล้าเหยื่อพวกนี้ เป็นตัวการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมเมแทบอลิซึมของแคลเซียม ผลก็คือเปลือกไข่ของนกจะบางและไม่แข็งแรง เมื่อนกพยายามจะฟักไข่เปลือกไข่จะแตก จึงทำให้การขยายพันธุ์ล้มเหลว

นอกจากผลกระทบต่อขยายพันธุ์ของนกกล้าเหยื่อแล้ว DDT ยังมีผลกระทบอื่นๆ ต่อสิ่งแวดล้อมอีก DDT เข้มข้นเพียงไม่กี่ ppb ในน้ำ จะไปลดปริมาณการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนในทะเล โดยเฉพาะบริเวณอ่าวที่รับน้ำทิ้งจากการเกษตร ซึ่งจะมีผลต่อส่วนอื่นๆ ของโซ่อาหารด้วย เพราะแพลงก์ตอนเป็นผู้ผลิตลำดับแรกในโซ่อาหาร DDT จะทำให้ตัวอ่อนของปูปลาตายเพราะปริมาณ DDT ที่สะสมในไข่มีปริมาณสูงพอที่จะทำให้ตัวอ่อนตายได้ DDT มีค่า  $LD_{50}$  ต่อลูกน้ำเท่ากับ 0.070 ppm ค่า  $LD_{50}$  หรือ Lethal dose 50 หมายถึงปริมาณของสารที่ทำให้สัตว์ที่ทดสอบตายไป 50% ดังนั้นถ้า  $LD_{50}$  มีค่าน้อยก็แสดงว่าสารนั้นมีอันตรายสูงมาก ในปัจจุบันพบว่า DDT ตกค้างอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม มีรายงานว่าพบ DDT ในตัวของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบริเวณขั้วโลกซึ่งอยู่ห่างจากชุมชนนับพัน ไมล์ และยังพบแม้กระทั่งในน้ำนมมารดา

สำหรับอันตรายของ DDT ต่อมนุษย์นั้น ถึงแม้ความเป็นพิษเฉียบพลันจะค่อนข้างต่ำ แต่ยังไม่สามารถประเมินได้ถึงผลที่จะเกิดขึ้นจากการได้รับ DDT ปริมาณต่ำแต่เป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามหลักฐานทางการแพทย์ที่ยืนยันถึงความสัมพันธ์ระหว่าง DDT ปริมาณสูงกับอาการเลือดออกในสมอง, ตับแข็ง, การเป็นหมัน และมะเร็งหลายชนิด ปัจจุบันสหรัฐอเมริกาควบคุมการใช้ DDT ในประเทศอย่างเข้มงวด แต่การผลิตในประเทศสหรัฐฯ ยังมีอยู่เพื่อการส่งออกไปยังประเทศต่างๆ ที่ไม่มีกฎหมายห้ามใช้ DDT และยังมีการใช้ DDT ในการควบคุมโรคมาเลเรียกันอยู่ในประเทศด้อยพัฒนา

## 2. สารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นๆ

นอกเหนือจากการใช้สารออร์แกโนคลอรีน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อมแล้ว ปัจจุบันยังมีสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอีก 2 ประเภท คือ สารออร์แกโนฟอสเฟตและสารคาร์บาเมต สารออร์แกโนฟอสเฟตส่วนมากมีความเป็นพิษสูงกว่า DDT แต่สลายตัวได้ง่ายกว่า ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ได้แก่ พาราไทออน (parathion) มีค่า  $LD_{50}$  ต่อหนู 6 mg/kg เป็นสารตัวที่ใช้กันมาก กำจัดแมลงได้หลายชนิด แต่มีพิษอย่างมากต่อสัตว์เลือดอุ่น, มาลาไทออน (malathion)  $LD_{50}$  ต่อหนู 1500 mg/kg สารตัวนี้ใช้กำจัดแมลงที่รบกวนพืชผัก ผลไม้แล้วยังใช้กำจัดยุง แมลงวันในบ้านเรือนด้วย มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นน้อยกว่าพาราไทออน, เทปป์ (TEPP)  $LD_{50}$  ต่อหนู 1 mg/kg สารตัวนี้สลายตัวได้เร็วมาก จึงใช้ได้กับผลิตผลทางการเกษตรก่อนการเก็บเกี่ยว สารออร์แกโนฟอสเฟต

จะออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทส่วนกลาง ส่วนคาร์บาเมต ตัวที่คุ้นเคยกันดีคือไบคอน (Baygon) มีค่า LD<sub>50</sub> ต่อกัน 100 mg/kg ใช้กำจัดยุง แมลงวัน แมลงสาบและมด ใช้ในโปรแกรมการควบคุมโรค มาเลเรีย ส่วนเทมิก (Temik) ซึ่งมี LD<sub>50</sub> ต่อกัน 1 mg/kg เป็นสารเคมีที่ใช้คลุกเมล็ดพืชก่อนปลูก หรือผสมดินที่ใช้ปลูกพืช สารกลุ่มคาร์บาเมตนี้ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทส่วนกลาง เช่นเดียวกับสาร ออร์แกโนฟอสเฟต ภาพที่ 7.8 แสดงโครงสร้างของสารในกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต บางตัว

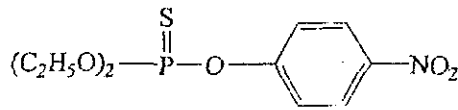
สารประกอบ

ชื่อสามัญและชื่อทางเคมี

โครงสร้าง

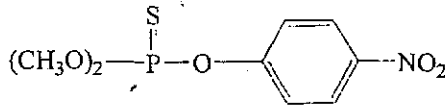
Parathion

O,O-diethyl O-p-nitrophenyl phosphorothionate



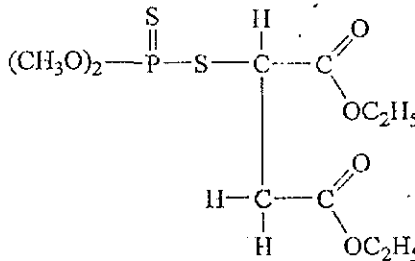
Methyl parathion

O,O-dimethyl O-p-nitrophenyl phosphorothionate



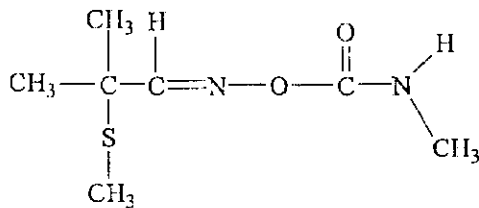
Malathion

O,O-dimethyl S-(1,2-dicarboxy ethyl) phosphorodithioate



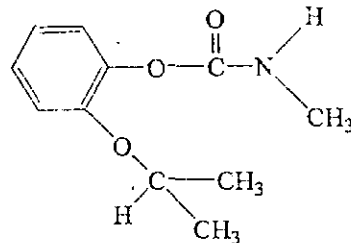
Temik

2-methyl-2-(methylthio)-propionaldehyde O-(methylcarbamoyl)-oxime



Baygon

2-isopropoxyphenyl N-methyl carbamate



ภาพที่ 7.8 ตัวอย่างสารกำจัดศัตรูพืชประเภทออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต

### 3. ทางเลือกอื่นในการควบคุมแมลงศัตรูพืช

สารกำจัดศัตรูพืชที่สมบูรณ์แบบ จะต้องควบคุมศัตรูพืชเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ และมีผลต่อศัตรูเป้าหมายเท่านั้น นอกจากนี้ ควรจะไม่ตกค้างสะสมในสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ และสลายตัวได้ โดยกระบวนการทางชีวภาพ (biodegradable) ราคาไม่แพง จนไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม ทางเลือกอื่นนอกเหนือไปจากสารเคมีสังเคราะห์อาจจะไม่มีสมบัติครบตามที่กล่าวมา จากผลของงานวิจัยที่มีมากขึ้น พบว่าวิธีที่ประสบความสำเร็จนั้นมาจากลักษณะเฉพาะบางอย่างของวัฏจักรเชิงนิเวศทางธรรมชาติของแมลงนั้นนั่นเอง

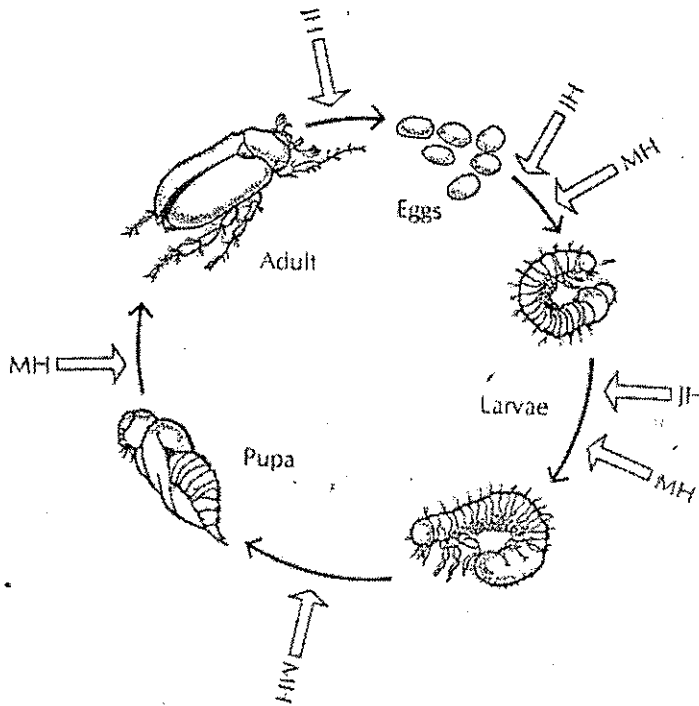
การใช้เชื้อโรค (Pathogens) ตัวเบียน (Parasites) และตัวทำ (Predator) แมลงศัตรูพืชจำนวนมากถูกกำจัดได้โดยใช้พลังตามธรรมชาติของโรคของแมลง ตัวเบียน และตัวทำ เช่น อาจใช้เชื้อราแบคทีเรีย และไวรัส ทำให้แมลงเกิดโรค ถ้ามีความรู้เพียงพอว่าตัวก่อโรคที่ใช้มีผลกระทบต่อแมลงชนิดอื่นๆ หรือไม่ วิธีการใช้ตัวเบียนและตัวทำ โดยการนำเข้าเป็นจำนวนมากๆ ก็เป็นวิธีที่มีประโยชน์เช่นกัน โดยเฉพาะถ้าแมลงศัตรูพืช เกิดบังเอิญระบาดขึ้นในพื้นที่ที่มันไม่มีศัตรูโดยธรรมชาติอยู่ด้วย เจ้าของสวนขนาดเล็กตามบ้านเรือนสามารถใช้แมลงเต่าทอง หรือแมลงนักล่าพวกด้กัแตนดำขาว ในการควบคุมเพลี้ยได้ค่อนข้างดี

การทำให้แมลงเป็นหมัน เป็นยุทธศาสตร์ที่ใช้แมลงมาทำลายแมลงด้วยกันเอง โดยการนำแมลงศัตรูพืชมาเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ทำให้เป็นหมันโดยการฉายรังสี แล้วปล่อยออกไปในธรรมชาติในช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อไปแข่งขันกับแมลงปกติในธรรมชาติในการผสมพันธุ์ วิธีนี้จะได้ผลดีถ้ามีการปล่อยแมลงที่เป็นหมันออกไปในจำนวนที่มากกว่าแมลงปกติ และมีการระบาดของแมลงศัตรูพืชไม่มากนัก สำหรับปัญหาของวิธีการนี้คือ การเพาะเลี้ยงแมลงที่เป็นหมันที่แข็งแรงให้มีจำนวนมากเพียงพอต่อการแข่งขัน แต่ถ้าใช้ร่วมกับวิธีการควบคุมอื่นๆ ด้วยก็จะได้ผลดีมากขึ้น

การใช้ฮอร์โมนของแมลง หรือฟีโรโมน (Pheromone) นักวิจัยได้พบว่าสามารถใช้ฮอร์โมนของแมลงในการควบคุมแมลงศัตรูพืชได้ สารกลุ่มหนึ่งที่มีประโยชน์ คือ สารฟีโรโมน ซึ่งเป็นสารเคมีที่แมลงใช้ในการสื่อสารซึ่งกันและกัน ใช้ในการส่งสัญญาณเตือนอันตราย ใช้บอกเส้นทางเดิน และเพื่อดึงดูดเพศตรงข้าม นักวิทยาศาสตร์ได้สังเคราะห์ฟีโรโมนของแมลงบางชนิดได้ และนำมาทำกับดักแมลงตัวผู้ ทำให้ลดจำนวนแมลงในอนาคตลงไปได้ หรือในบางกรณี ใช้เทคนิคที่เรียกว่า “confusion technique” คือการทำให้แมลงตัวผู้สับสน โดยใช้กระดาษท่อน้ำแต่สลายตัวในธรรมชาติ ได้ดูดซับฟีโรโมนไว้แล้วนำไปโปรยไว้ในพื้นที่ที่มีแมลงศัตรูพืชระบาด ในช่วงเวลาที่เหมาะสมและโดยจำนวนที่มากพอ จะทำให้แมลงตัวผู้หาตัวเมียจริงๆ ไม่พบ

การใช้ฮอร์โมนวัยเยาว์ (Juvenile Hormone) เราสามารถใช้ฮอร์โมนเพื่อขัดขวางวัฏจักรการเจริญเติบโตตามธรรมชาติได้ โดยหลักการที่แตกต่างไปจากการใช้ฟีโรโมน ฮอร์โมนตัวที่ใช้ได้แก่ฮอร์โมนวัยเยาว์ และฮอร์โมนสำหรับการลอกคราบ (Molting hormone) หรือ เอคดีโซน

(ecdysones) ความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้ได้มาจากการศึกษาตัวหนอนไหม วัฏจักรชีวิตของแมลงประเภทนี้จะถูกควบคุมด้วยฮอร์โมน เราสามารถเปลี่ยนแปลงพัฒนาการตามปกติของแมลงได้ โดยการใช้ฮอร์โมนที่สังเคราะห์ขึ้นในช่วงเวลาที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น แมลงจะมีการลอกคราบเป็นระยะๆ ในระหว่างการเติบโต ในการลอกคราบแมลงจะต้องใช้ฮอร์โมนเอคดิโซน เพื่อทำให้เปลือกเก่าหลุดไปและสร้างเปลือกใหม่ขึ้นแทน ส่วนฮอร์โมนวัยเยาว์จะต้องมีอยู่ในระยะแรกๆ เพื่อป้องกันการเป็นตัวเต็มวัยเร็วไป แต่ฮอร์โมนวัยเยาว์จะมีอยู่ในระยะหลังไม่ได้ เพราะแมลงจะเติบโตอย่างผิดปกติ กลายเป็นตัวอ่อนยักษ์ และกลายเป็นตัวเต็มวัยที่ไม่สมบูรณ์และจะตายไปในเวลาอันสั้น ภาพที่ 7.9 แสดงวัฏจักรชีวิตและฮอร์โมนที่จำเป็นในแต่ละระยะของการพัฒนาของแมลง



ภาพที่ 7.9 ฮอร์โมนที่ใช้ในการควบคุมการเจริญเติบโต, พัฒนาการ และการสืบพันธุ์ของแมลง, MH = molting hormone, JH = juvenile hormone

จากวัฏจักรชีวิตของแมลงนำมาสู่การวางแผนในการควบคุม การให้ฮอร์โมนเข้าไปในช่วงที่ไม่ควรจะมีในวัฏจักรชีวิตของแมลง อาจทำให้มีการยืดระยะของช่วงการเติบโต และอาจทำให้ได้ตัวเต็มวัยที่ผิดปกติ ซึ่งแมลงพวกนี้ก็จะตายเร็วขึ้น แต่การจะใช้ฮอร์โมนวัยเยาว์ให้ได้ผลนั้นจะต้องศึกษาวัฏจักรชีวิตของแมลงที่ต้องการกำจัดอย่างระมัดระวัง จะต้องรู้ว่าแมลงในขั้นตอนใดทำอันตรายพืชได้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น ถ้าในขณะที่เป็นตัวหนอน แมลงทำความเสียหายให้กับพืชมากที่สุด แล้วให้ฮอร์โมนวัยเยาว์เข้าไปก็จะทำให้ช่วงเวลาของการเป็นตัวหนอนยาวนานขึ้น ก็จะได้ประโยชน์อะไรถึงแม้จะทำให้แมลงตายไปก่อนจะได้ขยายพันธุ์ก็ตาม สำหรับปัญหาที่อาจเกิดได้ในวิธีการนี้คือ ฮอร์โมนที่สังเคราะห์ขึ้น มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับฮอร์โมนธรรมชาติของแมลงมาก นัก

วิทยาศาสตร์จึงเชื่อว่า แมลงอาจพัฒนาความต้านทานต่อฮอร์โมนที่ได้รับมากเกินไปได้ในอนาคต ซึ่งถ้าสภาพการณ์นั้นเกิดขึ้น ประโยชน์ของการใช้ฮอร์โมนเฮาเวอ์วีย์ในการควบคุมแมลงศัตรูพืชก็จะลดน้อยลง

การตัดต่อจีโนม การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม เช่น การคัดเลือกสายพันธุ์ของพืชที่ทนทานต่อแมลง หรือการเพาะพันธุ์แมลงที่ถูกทำลายได้ง่าย เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการควบคุมแมลง แต่เทคนิคทางพันธุวิศวกรรมนี้ ต้องการงานวิจัยที่ใช้เวลานาน ปัจจุบันการตัดแปลงพันธุกรรมของพืชประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากงานวิจัยยังไม่มี ความชัดเจนเกี่ยวกับความปลอดภัยของพืชที่ตัดต่อจีโนม ทำให้ผู้คนยังไม่ยอมรับพืชที่มีการตัดแปลงพันธุกรรม หรือที่เรียกว่าพืช GMO (genetically modified organism) กันมากนัก ส่วนการตัดแปลงพันธุกรรมของแมลงนั้น จะทำให้แมลงไม่สามารถพัฒนากลไกในการต้านทานต่อสารกำจัดศัตรูพืชได้ แต่ก็ต้องเพาะพันธุ์แมลงดัดแปลงพันธุกรรมนี้ให้มีจำนวนมากเพื่อจะได้แข่งขันได้กับแมลงปกติในธรรมชาติ

สารธรรมชาติที่ใช้กำจัดศัตรูพืช คงสังเกตเห็นกันว่า มีพืชหลายชนิดที่แมลงไม่แตะต้อง แสดงว่าในพืชเหล่านี้ คงจะมีสารเคมีบางอย่างที่แมลงไม่ชอบ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบแล้วหลายชนิด และคงจะมีอีกมากที่ยังรอการศึกษาวิจัยอยู่ การใช้สารสกัดจากพืชในการควบคุมแมลงศัตรูพืช ใช่ว่าจะไร้ปัญหาเสียทีเดียว ตัวอย่างเช่น นิโคติน เป็นสารที่มีพิษต่อมนุษย์ด้วย นอกจากนี้สารสกัดจากพืชยังมีราคาแพงและไม่มีความเฉพาะเจาะจงต่อแมลงศัตรูพืช และแมลงเองอาจสามารถพัฒนากลไกเพื่อต้านทานสารเหล่านี้ได้เช่นกัน สารสกัดจากพืชที่รู้จักกันดี ได้แก่ โรตินอยด์ (rotenoid) สารแอลคาลอยด์จากยาสูบ เช่น นิโคตินซัลเฟต แม้แต่น้ำมันจากกระเทียม ก็มีผลในการทำลายลูกน้ำยุงแมลงวัน เป็นต้น สารสกัดจากธรรมชาติกลุ่มแรกที่มีมนุษย์รู้จักและนำมาใช้คือสารที่เรียกว่าไพเรทรินส์ (pyrethrins)

ไพเรทรินส์ เป็นสารสกัดจากดอกไพเรทรัม (Pyrethrum) ซึ่งมีลักษณะคล้ายดอกเดซี่ อยู่ในตระกูลโครแซนทีมัม (Chrysanthemum) วิธีการใช้คือ นำดอกมาตากแห้ง บดให้ละเอียด แล้วจึงสกัดเอาไพเรทรินส์ออกมา ไพเรทรินส์มีสารเคมีที่มีสมบัติในการทำลายแมลงได้ 6 ชนิดด้วยกัน เป็นสารประเภทไซโคลโพรเพน เอสเทอร์ (cyclopropene ester) ของกรดอินทรีย์

ไพเรทรินส์ จะทำให้แมลงเป็นอัมพาต อาจจะเพราะไปขัดขวางการส่งสัญญาณประสาท สารไพเรทรินส์นี้จะมีเฉพาะเจาะจงกับแมลงเท่านั้น และมีความเป็นพิษต่อกุ้ง และสัตว์เลื้อยคลาน น้อยมาก เช่น LD<sub>50</sub> ต่อหนูจะอยู่ในราว 200 mg/kg แต่ความเป็นพิษของสารนี้จะสูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับสารเคมีตัวอื่น (synergist) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.8 และทำให้แมลงพัฒนากลไกเพื่อต้านทานสารเคมีได้ยากขึ้นอีกด้วย

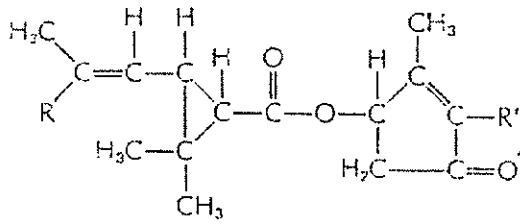


ตารางที่ 7.8 เปรียบเทียบความเป็นพิษของไพเรทรินส์ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ กัน

Pyrethrin	LD <sub>50</sub> mg/fly, female, Topical
Pyrethrin I	0.548
Pyrethrin II	0.942
Cinerin I	2.168
Cinerin II	2.345
Cinerin I + synergist*	0.036
Cinerin II + synergist	0.106

\*Synergist = sesamex

Basic structure



Name	R =	R' =
Pyrethrin I	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH=CHCH=CH <sub>2</sub>
Pyrethrin II		-CH <sub>2</sub> CH=CHCH=CH <sub>2</sub>
Cinerin I	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>3</sub>
Cinerin II		-CH <sub>2</sub> CH=CHCH <sub>3</sub>
Jasmolin I	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH=CHCHCH <sub>3</sub>
Jasmolin II		-CH <sub>2</sub> CH=CHCHCH <sub>3</sub>

ภาพที่ 7.10 โครงสร้างของสารสกัดไพเรทรินส์ที่มีสมบัติในการทำลายแมลง

# ตอนที่ 7.5

## เรื่องน่าสนใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม

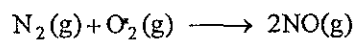
มีปรากฏการณ์หลายอย่างที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะมลพิษของสิ่งแวดล้อมและเป็นเรื่องที่น่ารู้ เพราะมีผลกระทบต่อมวลมนุษย์โดยรวม

### 1. ปฏิกิริยาเคมีบนฟากฟ้า - การเกิดโฟโตเคมีคัลสม็อก (Photochemical Smog)

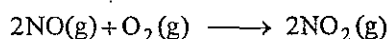
บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ที่เราอาศัยอยู่ ทำหน้าที่เหมือนเป็นภาชนะใหญ่ที่มีปฏิกิริยาเคมีซับซ้อนเกิดขึ้น โดยมีแสงแดดเป็นผู้ช่วย อันตรกิริยาระหว่างไฮโดรคาร์บอน, ออกไซด์ของไนโตรเจน, ออกซิเจน เมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ตอยู่ด้วยจะทำให้เกิดโฟโตเคมีคัลสม็อกขึ้น สม็อกในกรณีนี้แตกต่างจากสม็อกที่เกิดขึ้นในกรุงลอนดอนเมื่อปี ค.ศ. 1950 ที่ในครั้งนั้น สม็อกเกิดจากอนุภาคแขวนลอยในอากาศกับแก๊ส  $\text{SO}_2$  เท่านั้น แต่โฟโตเคมีคัลสม็อกจะประกอบด้วยสารมลพิษต่างๆ มากมาย และยังมีผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาที่มีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปัจจุบันคำว่า “โฟโตเคมีคัล สม็อก” หมายถึงกลุ่มหมอกควันซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารต่างๆ ในไอเสียของรถยนต์เมื่อมีแสงแดดอยู่ด้วย ในไอเสียรถยนต์จะมีสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่ยังเผาไหม้ไม่หมด แต่ที่มีมากที่สุดคือ  $\text{NO}$  และ  $\text{CO}$  แก๊สเหล่านี้ เรียกว่า สารมลพิษปฐมภูมิ (primary pollutants) เพราะเมื่อทำปฏิกิริยากันและมีแสงแดดอยู่ด้วย จะเกิดสารมลพิษทุติยภูมิ (secondary pollutants) อีกหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $\text{NO}_2$  และ  $\text{O}_3$  ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดสม็อก

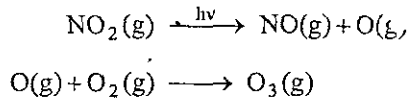
$\text{NO}$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาของ  $\text{N}_2$  และ  $\text{O}_2$  ในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูงภายในเครื่องยนต์



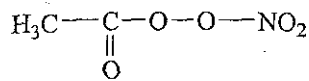
เมื่อ  $\text{NO}$  เข้าสู่บรรยากาศจะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วเป็น  $\text{NO}_2$



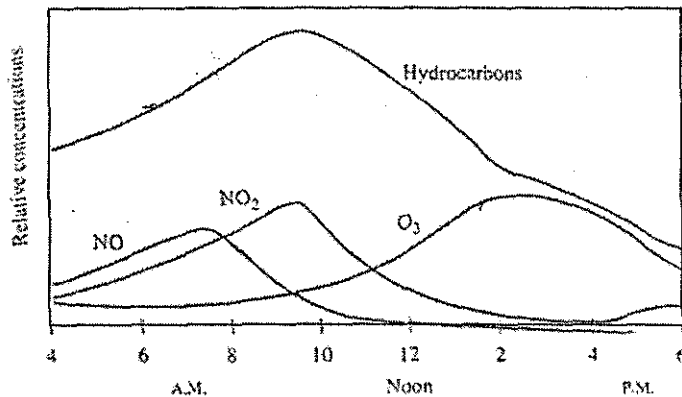
แสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่า 400 nm จะเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ  $\text{NO}_2$  ไปเป็น  $\text{NO}$  และ  $\text{O}$  ซึ่งจะตอมออกซิเจนนี้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จะเป็นตัวเริ่มต้นทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ได้อีก โดยเฉพาะปฏิกิริยาการเกิดโอโซน



โอโซนที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนได้ และทำให้เนื้อเยื่อปอดเสียหาย และยังทำลายสารชีวภาพอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด แอลดีไฮด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และออกซิเจน ยังทำให้เกิดโอโซนได้เช่นกัน ผลิตภัณฑ์อีกตัวหนึ่งของปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวคือ เพอร์ออกซีแอเซทิลไนเตรท (peroxyacetyl nitrate, PAN) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ดวงตาระคายเคือง และทำให้เกิดปัญหาต่อระบบหายใจ



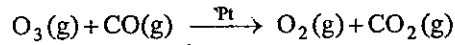
ภาพที่ 7.11 นั้น จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของวันกับปริมาณของสารมลพิษปฐมภูมิ และสารมลพิษทุติยภูมิ นักศึกษาสามารถอธิบายรูปดังกล่าวได้หรือไม่



ภาพที่ 7.11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศกับเวลาในวันที่มี smog เกิดขึ้น

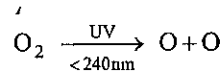
การออกซิไดซ์ไฮโดรคาร์บอน จะทำให้ได้สารอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นสารมัธยันตร์ เช่น แอลกอฮอล์ และกรดคาร์บอกซีลิก ซึ่งระเหยได้น้อยกว่าสารไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้น จึงเกิดการควบแน่นเป็นละอองลอยของเหลว ซึ่งกระเจิงแสงจากดวงอาทิตย์ได้และทำให้ทัศนวิสัยลดลง และยังทำให้อากาศดูขุ่นมัวด้วย

เทคโนโลยีเครื่องยนต์สมัยใหม่เพื่อลดปริมาณโฟโตเคมีคัลสม็อก ทำได้โดยการลดปริมาณ  $O_3$  และ  $NO$  โดยใช้โลหะแพลทินัม (Pt) ฉาบหม้อน้ำและคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศในรถยนต์ Pt จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัด  $O_3$  และ  $CO$

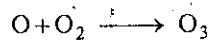


## 2. ช่องโหว่โอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์

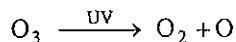
โอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ เกิดมาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของออกซิเจน โดยมีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้อะตอมออกซิเจนซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา



และจะรวมกับโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็นโอโซนขึ้น โดยเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และจะมีโมเลกุลของสารเฉื่อย เช่น  $N_2$  เป็นตัวรับพลังงานความร้อนที่ได้ออกมาและป้องกันมิให้  $O_3$  ที่เกิด



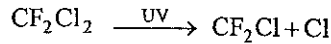
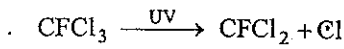
ขึ้นสลายตัวในทันที โดยที่  $N_2$  จะคายความร้อนออกมาในภายหลัง ตัวโอโซนเองก็สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 200 – 300 nm แล้วเกิดการสลายตัวได้เช่นกัน กระบวนการจะเกิดไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อ  $O$  รวมตัวกับ  $O_2$  เกิดเป็นโอโซนขึ้นใหม่ ซึ่งทำให้บรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ถึงแม้ว่าโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่ก็มีความสามารถรองรับสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วง 200 – 300 nm ได้เป็นอย่างดี ตามปฏิกิริยาที่ได้กล่าวมาแล้ว



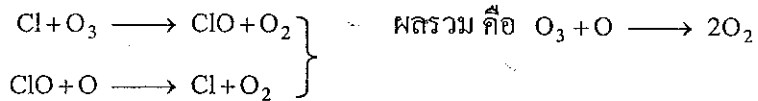
กระบวนการในธรรมชาติในการสร้างและการทำลายโอโซนเป็นกระบวนการสมดุลพลวัตที่ทำให้ปริมาณโอโซนในสตราโทสเฟียร์มีอยู่ค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งในช่วงกลางทศวรรษ 1970 ที่นักวิทยาศาสตร์เริ่มตระหนักถึงผลกระทบของสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbons, CFCs) บางชนิดที่มีต่อชั้นของโอโซนในบรรยากาศ CFCs มีชื่อทางการค้าว่า ฟรีออน (Freons) ตัวที่ใช้กันมากคือ  $CFCl_3$  (Freon 11),  $CF_2Cl_2$  (Freon 12),  $C_2F_5Cl_3$  (Freon 113) และ  $C_3F_4Cl_2$  (Freon 114) เนื่องจากฟรีออนเป็นสารที่เฉื่อย ไม่มีพิษ ทำให้เป็นของเหลวได้ง่าย ไม่ติดไฟ และกลายเป็น

โอไดงาย จึงใช้เป็นสารทำความเย็นของตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ ใช้ในการทำโฟม ใช้เป็นแก๊สตัวพาในสเปรย์ต่างๆ และใช้ทำความสะอาดบอร์ดวงจรไฟฟ้า

ฟริออน ที่ผลิตขึ้นมาทั้งหมด สุดท้ายจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และเนื่องจากเป็นสารที่เฉื่อย CFCs จะคงอยู่ในบรรยากาศ และจะค่อยๆ แพร่ขึ้นไปยังบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์โดยไม่เปลี่ยนแปลง รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วง 175-220 nm จะทำให้ CFCs สลายตัวได้อะตอมคลอรีน

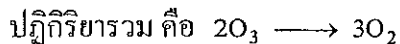
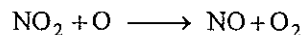
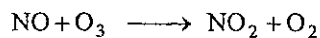
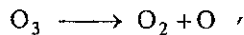


อะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้น มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และจะทำลายโอโซนได้ตามปฏิกิริยานี้

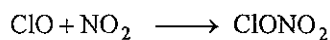


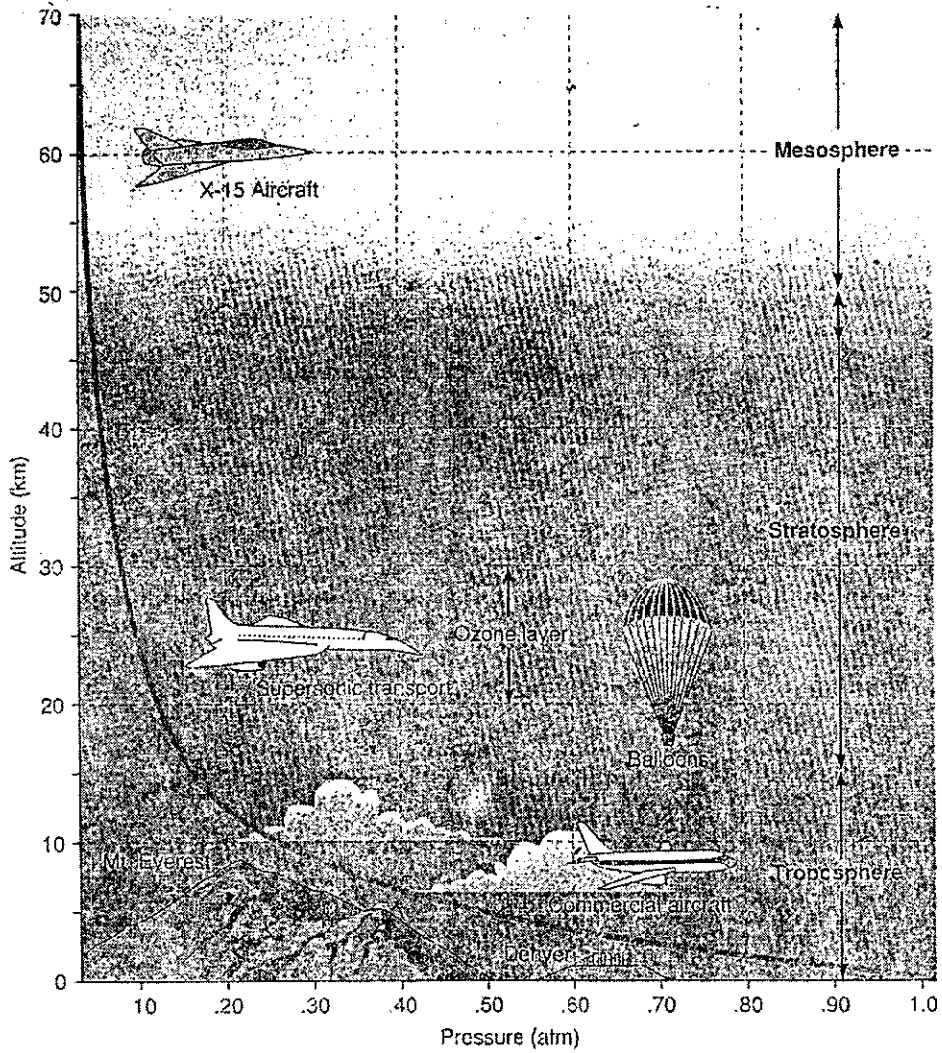
ซึ่งในภาพรวม คือ อะตอมคลอรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของโอโซน ส่วนอะตอมออกซิเจนได้มาจากปฏิกิริยาการสลายตัวของโมเลกุลออกซิเจนโดยรังสี UV ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว อะตอมคลอรีน 1 อะตอม จะทำลายโอโซนได้ถึง 100,000 โมเลกุล

สารประกอบที่ทำลายโอโซนได้อีกตัวหนึ่งคือ NO<sub>x</sub> ซึ่งเกิดขึ้นจากไอเสียของเครื่องบินเจ็ทที่มีความเร็วเหนือเสียงและจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ พลังงานจากดวงอาทิตย์ยังสามารถทำให้ NO<sub>x</sub> สลายตัวเป็น NO ซึ่งจะมีส่วนร่วมในกระบวนการทำลายโอโซนตามปฏิกิริยาข้างล่างนี้



นอกจากนี้ NO<sub>2</sub> ยังทำปฏิกิริยากับคลอรีนมอนอกไซด์ (chlorine monoxide, ClO) เกิดเป็นคลอรีนไนเตรท (chlorine nitrate, ClONO<sub>2</sub>) ซึ่งค่อนข้างจะเสถียร และเป็นตัวรวบรวมคลอรีนซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำลายโอโซนบริเวณขั้วโลก



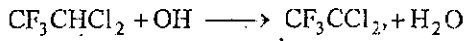


ภาพที่ 7.12 บรรยากาศชั้นต่างๆ

ทุกๆ 1% ของการลดลงของโอโซน อัตราการเป็นมะเร็งผิวหนังจะเพิ่มขึ้น 2-10% และพบว่า ประชากรของประเทศออสเตรเลียมีเปอร์เซ็นต์ของการเป็นมะเร็งผิวหนังค่อนข้างสูง กล่าวคือ ออสเตรเลียมีประชากรเพียง 0.3% ของประชากรโลก แต่มีผู้เป็นมะเร็งผิวหนังชนิดอันตรายสูงถึง 6% นอกจากนี้ผู้ที่ไปเยือนประเทศชิลี ซึ่งอยู่ใกล้ขั้วโลกใต้ ที่เมือง Punta Arenas ถ้าไม่ปกป้องผิวหนังให้ดีจะเกิดอาการผิวหนังไหม้จากแสงแดด (sunburn) ภายใน 7 นาทีเท่านั้น นักศึกษาทราบหรือไม่ว่าเป็นเพราะเหตุใด

หลังจากที่นานาชาติเข้าใจผลกระทบของการเกิดช่องโหว่โอโซนบริเวณขั้วโลกแล้ว ก็ได้มีความพยายามร่วมมือกันในการลดปริมาณการใช้ CFCs ลง หรือพยายามใช้วิธีไรเซิลนากลับมาใช้ใหม่ และพยายามหาสารที่มาใช้ทดแทน CFCs สารกลุ่มหนึ่งที่น่าจะนำมาใช้แทนได้ก็คือสารไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน-123 (hydrochlorofluorocarbon-123) หรือ HCFC-123 (CF<sub>3</sub>CHCl<sub>2</sub>) อะตอมไฮโดรเจนที่มีอยู่ทำให้สารตัวนี้ถูกออกซิไดซ์ในบรรยากาศชั้นล่าง คือ

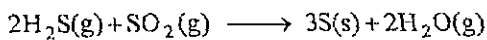
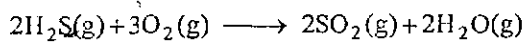
โทรฟอสเฟียร์ จึงไม่ขึ้นไปถึงชั้นสตราโทสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคไฮดรอกซิลในชั้นโทรฟอสเฟียร์



และ  $CF_3CCl_2$  จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนต่อและสลายตัวเป็น  $CO_2$ ,  $H_2O$  และไฮโดรเจนแฮไลด์ ในที่สุด และจะถูกชะล้างลงมาโดยน้ำฝน แต่ HCFC-123 มีความว่องไวทางชีวภาพ และพบว่าทำให้หนูทดลองเป็นเนื้องอกได้ สารอีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้แทน CFCs ได้คือ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbons, HFCs) สารกลุ่มนี้ไม่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ จึงไม่ทำลายโอโซนเมื่อแพร่ขึ้นไปถึงชั้นสตราโทสเฟียร์ สารกลุ่มนี้ได้แก่  $CF_3CFH_2$ ,  $CF_3CF_2H$ ,  $CF_3CH_3$ ,  $CF_2HCH_3$  และในปัจจุบันได้เริ่มใช้สารพวกนี้แล้ว โดยเฉพาะ  $CF_3CFH_2$

### 3. ภูเขาไฟกับภาวะมลพิษ

ภูเขาไฟที่ยังแอกทีฟอยู่ จะปล่อยทั้งแก๊ส ของเหลว และของแข็งออกสู่บรรยากาศ แก๊สส่วนใหญ่ ได้แก่  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $H_2S$  และไอน้ำ ภูเขาไฟเป็นต้นเหตุของซัลเฟอร์ถึง 2 ใน 3 ของซัลเฟอร์ที่มีในอากาศทั้งหมด แก๊ส  $H_2S$  จากภูเขาไฟจะถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงได้เป็น  $SO_2$  ซึ่งบางส่วนอาจถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นซัลเฟอร์ไดไซด์



ส่วน  $SO_2$  ที่เหลือถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศและจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นฝนกรด แรงระเบิดของภูเขาไฟจะทำให้แก๊สจำนวนมากขึ้นไปยังบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ ในบรรยากาศชั้นนี้  $SO_2$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $SO_3$  ซึ่งจะถูกลำเลียงต่อไปเป็นละอองลอยของกรดซัลฟิวริก ซึ่งนอกจากจะทำลายโอโซนในชั้นสตราโทสเฟียร์แล้ว ละอองลอยพวกนี้ยังมีผลกระทบต่อสภาพอากาศด้วย โดยเฉพาะบริเวณที่มีการระเบิดของภูเขาไฟ เพราะว่าบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์จะไม่มีลมแปรปรวนเหมือนบรรยากาศชั้นล่าง กลุ่มเมฆละอองลอยที่เกิดขึ้นจึงคงอยู่ได้นานมากกว่า 1 ปี และจะดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิพื้นโลกรบริเวณนั้นลดต่ำลงได้

#### 4. ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

ถึงแม้ว่า CO<sub>2</sub> จะมีปริมาณเพียง 0.033% ของบรรยากาศของโลกแต่กลับมีบทบาทสำคัญยิ่งในการควบคุมสภาพอากาศ ปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก หมายถึงการที่แก๊สในบรรยากาศใกล้พื้นโลกโดยเฉพาะแก๊ส CO<sub>2</sub> ได้กักเก็บความร้อนเอาไว้ ลักษณะเดียวกับเรือนกระจกที่จะส่งผ่านแสงในช่วงวิสิเบิลกลับออกไปได้แต่จะดูดซับเอาแสงในช่วงอินฟราเรดเอาไว้ จึงกักเก็บความร้อนไว้ภายในเรือนกระจก CO<sub>2</sub> จะทำหน้าที่คล้ายๆ เรือนกระจกดังกล่าว จากการคำนวณได้พบว่าถ้าในบรรยากาศไม่มีแก๊ส CO<sub>2</sub> อุณหภูมิของโลกจะลดลงถึง 30 °C

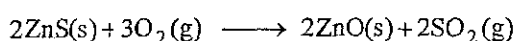
จากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลพวกปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติและถ่านหิน ทำให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นทุกปี โดยมีอัตราการเพิ่มประมาณ 1 ppm โดยปริมาตรต่อปี หรือประมาณ 9×11<sup>9</sup> ตัน และนอกเหนือจาก CO<sub>2</sub> แล้ว ยังมีแก๊สเรือนกระจกหลายตัวที่มีส่วนในการทำให้โลกของเราอุ่นขึ้น (global warming) ได้แก่ แก๊ส CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> และ CFCs นักอุตุนิยมวิทยาได้ทำนายไว้ว่า ถ้าอัตราการเพิ่มปริมาณของแก๊สเรือนกระจกยังคงเป็นไปในลักษณะนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจะเพิ่มขึ้น 1-3 °C ในศตวรรษที่ 21 ตัวเลข 1-3 °C ดูเหมือนไม่มากนัก แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยระดับนี้ จะมีผลกระทบต่อสภาพสมดุลของอุณหภูมิโลก และอาจทำให้ภูเขาน้ำแข็งและน้ำแข็งขั้วโลกละลาย ซึ่งมีผลต่อไปทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น และเมืองชายฝั่งอาจโดนน้ำท่วมได้ แต่การทำนายที่ถูกต้องเกี่ยวกับโลกร้อนอาจไม่แน่นอน เพราะมีแฟกเตอร์อื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ถ้ามีการระเบิดขนาดใหญ่ของภูเขาไฟ ละอองเถ้าต่างๆ อาจล่องลอยอยู่ในบรรยากาศเป็นเวลาหลายปี และสามารถสะท้อนแสงอาทิตย์ออกไป ทำให้เกิดปรากฏการณ์อุณหภูมิโลกลดลงได้เป็นต้น

จากความวิตกเกี่ยวกับปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่ประเทศอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ปล่อยออกมาสู่บรรยากาศของโลก หน่วยงานขององค์การสหประชาชาติได้จัดประชุมขึ้นที่กรุงเกียวโตประเทศญี่ปุ่น เมื่อเดือนธันวาคม ค.ศ. 1997 มี 38 ประเทศที่ลงนามในข้อตกลงเกียวโต ที่จะลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกลดลง 5% เมื่อเทียบกับปริมาณที่เคยปล่อยในปี ค.ศ. 1990 สหรัฐฯ โดยรัฐบาลคลินตัน ได้ตกลงที่จะลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกลง 7% ภายในปี ค.ศ. 2012 สหภาพยุโรปจะลดลง 8% ในเวลาเดียวกัน ส่วนญี่ปุ่นจะพยายามลดลงให้ได้ 6% ในช่วงปี ค.ศ. 2008-2012 แต่ปรากฏว่าเมื่อสหรัฐฯ เปลี่ยนประธานาธิบดีเป็นนายจอร์จ บุช สหรัฐฯ ได้ถอนตัวจากข้อตกลงเกียวโตทั้งๆ ที่สหรัฐฯ เป็นประเทศที่ปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่บรรยากาศมากที่สุดในโลกเพราะสหรัฐฯ เห็นแก่ประโยชน์ของประเทศตัวเองมากกว่าผลประโยชน์ของโลกโดยรวม เพราะการยอมรับในสนธิสัญญาเกียวโต ย่อมหมายถึงค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มขึ้นของภาคอุตสาหกรรมนั่นเอง

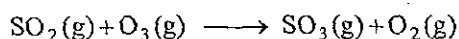


## 5. ฝนกรด

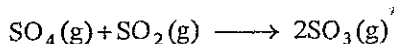
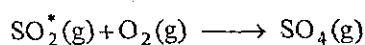
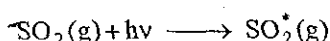
ตามปกติน้ำฝนในธรรมชาติมีสภาพเป็นกรดอ่อนอยู่แล้ว เมื่อ  $\text{CO}_2$  ละลายในน้ำฝนกลายเป็น  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ซึ่งทำให้น้ำฝนมีค่า pH ประมาณ 4.3 แต่ในปัจจุบันน้ำฝนในหลายพื้นที่ทั่วโลกมีสภาพเป็นกรดที่แรงขึ้น คือมีค่า pH ลงไปต่ำกว่า 3 เนื่องมาจากสารมลพิษทางอากาศพวกออกไซด์ของซัลเฟอร์ และออกไซด์ของไนโตรเจนที่มีอยู่ปริมาณสูงในอากาศ ฝนกรดเหล่านี้ได้ทำลายอาคารบ้านเรือน พืชพรรณป่าไม้ และบางกรณีได้ทำลายประชากรปลาทั้งหมดในแหล่งน้ำ ออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด เช่น  $\text{SO}_2$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นกรดขึ้น  $\text{SO}_2$  ในบรรยากาศมาจากหลายแหล่ง ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่น มาจากการระเบิดของภูเขาไฟ การถลุงโลหะจากแร่ซัลไฟด์ เช่น



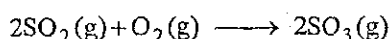
แต่แหล่งใหญ่ของ  $\text{SO}_2$  มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของโรงงานไฟฟ้า ถ่านหินจะมีซัลเฟอร์เป็นสิ่งเจือปนอยู่ด้วยประมาณ 0.5-5% โดยมวล แม้แต่น้ำมันก็มีซัลเฟอร์อยู่เช่นกัน นอกจากนี้ในเชื้อเพลิงประเภทนี้ยังมีสารซึ่งมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยถึงแม้จะไม่มากนัก ในแต่ละปี  $\text{SO}_2$  จำนวนมากถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ บางส่วนจะถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{SO}_3$  เช่น ถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์



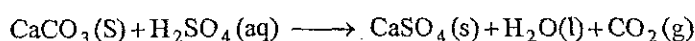
หรือถูกกระตุ้นด้วยแสงของดวงอาทิตย์



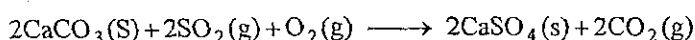
และบางครั้งอนุภาคของแข็งในอากาศยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของปฏิกิริยานี้



$\text{SO}_3$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำฝนกลายเป็น  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งจะกัดกร่อนพวกหินอ่อนและหินปูนได้



หรือ  $\text{SO}_2$  อาจทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaCO}_3$  ได้โดยตรงดังนี้



## Reference ของหน่วยที่ 7

1. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/1252556.stm>
2. [http://www.geocities.com/klity\\_creek/feature\\_in\\_thai/sarakadee1.htm](http://www.geocities.com/klity_creek/feature_in_thai/sarakadee1.htm)
3. [http://www.geocities.com/klity\\_creek/health.htm](http://www.geocities.com/klity_creek/health.htm)
4. <http://www.pcd.go.th/Information/saveearth/rubbish.html>
5. Karen Arms (1990) Environmental science : Saunders College Publishing
6. Lucy T.Pryde. (1973). **Environmental Chemistry** California : Cummings Publishing Company
7. มติชนสุดสัปดาห์ (2546) ปีที่ 23 ฉบับที่ 1204