

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 13

หน่วยที่ 6 เคมีนิวเคลียร์และเคมีสิ่งแวดลอม
บทเรียนที่ 6.1 เคมีนิวเคลียร์

จำนวนชั่วโมง 3

จุดประสงค์การสอน (จุดประสงค์ทั่วไป)

1. เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเคมีนิวเคลียร์

ผลการเรียนรู้ (จุดประสงค์เฉพาะ)

1. บอกสมบัติและเสถียรภาพของนิวเคลียส
2. อธิบายธาตุกัมมันตรังสี
3. อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์
4. บอกประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยาย และอภิปราย
2. กิจกรรมกลุ่มในชั้นเรียน (Work@class)

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. เอกสารคำสอน วิชาเคมี 2
2. เอกสาร powerpoint
3. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=11425
4. <https://www.facebook.com/chemographics>
5. <https://www.slideshare.net/woravith>

การวัดผล

1. ประเมินจากกิจกรรมในชั้นเรียน
2. ประเมินจากกิจกรรมแบบฝึกหัด หรืองานที่มอบหมาย
3. ประเมินจากการสรุปประเด็นสำคัญ หรือการนำเสนอผลของการสืบค้นที่ได้รับมอบหมาย
4. ประเมินจากการสอบย่อยรายหน่วยเรียน

หน่วยที่ 6 เคมีนิวเคลียร์และเคมีสิ่งแวดล้อม

บทเรียนที่ 6.1 เคมีนิวเคลียร์

ธาตุกัมมันตรังสีค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1896 เบคเคอเรล (Antoine Henri Becquerel) จากความบังเอิญที่เขานำฟิล์มถ่ายรูปวางไว้ใกล้เกลือโพแทสเซียมยูเรนิลซัลเฟต ในแร่พิชเบลนด์ (Pitchblende) ซึ่งสร้างรอยดำบนแผ่นฟิล์มเหมือนการถูกแสงผ่านเข้าไป เขาจึงเชื่อว่ามีรังสีพลังงานสูงบางชนิดปลดปล่อยออกมาจากเกลือยูเรเนียม ทำให้กระจกหรือฟิล์มถ่ายรูปเปลี่ยนเป็นสีดำ และเรืองแสงได้ในที่มืด และเรียกธาตุยูเรเนียม (U) นอกจากนี้ เขาทำการทดลองกับสารประกอบของยูเรเนียมชนิดอื่น ต่างให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยหลังจากการค้นพบของเบคเคอเรล 2 ปี มารีคูรี (Marie Curie) และปีแอร์ คูรี (Pierre Curie) นักเคมีเชื้อสายโปแลนด์ ทำการทดลองกับธาตุหลายชนิดและพบว่าธาตุทอเรียม (Thorium) เรเดียม (Radium) และพอลอเนียม (Polonium) ต่างสามารถแผ่รังสีได้เช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้เกิดข้อสรุปร่วมกันที่ว่า ธาตุบางชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมสูง มีความสามารถในการแผ่รังสีออกมาได้เองอย่างต่อเนื่อง โดยปรากฏการณ์การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ขณะที่ธาตุที่แผ่รังสีได้นั้นเรียกว่า ธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element)

6.1.1 สมบัติและสเกลียรภาพของนิวเคลียส

1) สมบัติของนิวเคลียส

จากทฤษฎีโครงสร้างอะตอม ทำให้เราได้รู้แล้วว่า นิวเคลียสอยู่ใจกลางของอะตอม ประกอบด้วยอนุภาคนิวตรอน (n, ไม่มีประจุ) และโปรตอน (p, ประจุบวก) รวมอยู่ด้วยกันด้วยแรงดึงดูดทางนิวเคลียร์ และมีอิเล็กตรอน (electron; e) ซึ่งมีประจุลบโคจรรอบนิวเคลียส โดยสมบัติพื้นฐานของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอมแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม

อนุภาค	สัญลักษณ์	มวล		ประจุ	ประจุไฟฟ้า (C)
		หน่วยกรัม	หน่วย amu		
อิเล็กตรอน	e	9.1095×10^{-28}	0.000548	-1	1.6022×10^{-19}
โปรตอน	p	1.6726×10^{-24}	1.007276	+1	1.6022×10^{-19}
นิวตรอน	n	1.6749×10^{-24}	1.008665	0	0

จากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอม ดังนั้นจึงต้องทราบถึงจำนวนโปรตอนและนิวตรอนที่มีอยู่ โดยจะเรียกอะตอมที่ระบุจำนวนโปรตอนและนิวตรอนนี้ว่า นิวไคลด์ (nuclide) สัญลักษณ์นิวเคลียร์ (nuclear symbol) ของธาตุเขียนได้คือ



เมื่อ X = สัญลักษณ์ของธาตุ

A = น้ำหนักอะตอม (atomic weight) หรือมวลเชิงอะตอม (atomic mass) หรือเลขมวล (mass number)

Z = เลขเชิงอะตอม (atomic number)

อะตอมของธาตุต่าง ๆ ประกอบด้วยอนุภาคมูลฐาน 3 ชนิด คืออิเล็กตรอน (ประจุลบ) โปรตอน (ประจุบวก) และนิวตรอน (ประจุเป็นกลาง) จำนวนของอนุภาคมูลฐานของอะตอมสามารถบอกถึงสัญลักษณ์นิวเคลียร์ของธาตุ ดังนี้

(1) เลขเชิงอะตอม (atomic number, Z) คือตัวเลขที่แสดงจำนวนโปรตอนในนิวเคลียส เลขเชิงอะตอมจึงเป็นค่าเฉพาะของธาตุใดธาตุหนึ่งเท่านั้น สภาวะที่อะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้าจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน ดังนั้นเลขเชิงอะตอมจึงสามารถบอกจำนวนของอิเล็กตรอนของธาตุได้ ธาตุชนิดเดียวกันจะมีเลขเชิงอะตอมเท่ากันเสมอ เลขเชิงอะตอมจึงเป็นสมบัติเบื้องต้นของอะตอมและเป็นสิ่งกำหนดสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของอะตอมนั้น ๆ

(2) มวลเชิงอะตอม (atomic mass, A) หรือ เลขมวล (mass number) คือตัวเลขที่แสดงจำนวนผลรวมระหว่างจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอน โดยทั่วไปแล้วมวลเชิงอะตอมหาได้ดังนี้

$$\text{มวลเชิงอะตอม (A)} = \text{จำนวนโปรตอน (p)} + \text{จำนวนนิวตรอน (n)}$$

จำนวนนิวตรอนในอะตอมจึงเท่ากับผลต่างระหว่างมวลเชิงอะตอมกับเลขเชิงอะตอม

$$\text{จำนวนนิวตรอน (n)} = \text{มวลเชิงอะตอม (A)} - \text{เลขเชิงอะตอม (Z)}$$

สัญลักษณ์นิวเคลียร์บอกจำนวนอนุภาคมูลฐานของอะตอมได้ และสามารถบอกจำนวนเลขเชิงอะตอมและมวลเชิงอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 เลขเชิงอะตอมและมวลเชิงอะตอมของธาตุบางชนิด

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อธาตุ	เลขเชิงอะตอม	มวลเชิงอะตอม	นิวตรอน	อิเล็กตรอน
${}^{12}_6\text{C}$	คาร์บอน	6	12	6	6
${}^{16}_8\text{O}$	ออกซิเจน	8	16	8	8
${}^{14}_7\text{N}$	ไนโตรเจน	7	14	7	7
${}^{35}_{17}\text{Cl}$	คลอรีน	17	35	18	17
${}^{59}_{27}\text{Co}$	โคบอลต์	27	59	32	27
${}^{60}_{27}\text{Co}$	โคบอลต์	27	60	33	27

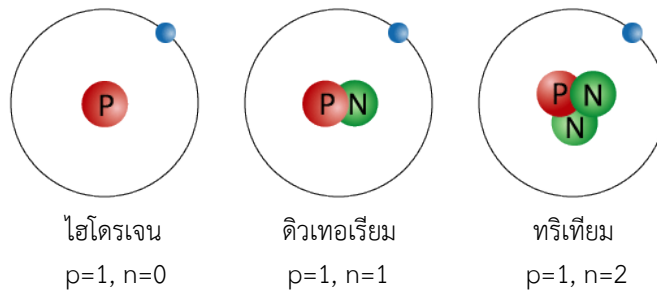
บางครั้งอาจเรียกอนุภาคภายในนิวเคลียส (โปรตอนและนิวตรอน) ว่านิวคลีออน (nucleon) ดังนั้นมวลเชิงอะตอมจึงบอกถึงจำนวนนิวคลีออนด้วย เช่น ${}^{13}_6\text{C}$ เป็นนิวไคลด์ของธาตุคาร์บอน มีจำนวนโปรตอน 6 ตัว จำนวนนิวคลีออนคือ 13 ดังนั้นจำนวนนิวตรอนเท่ากับ $13-6$ เท่ากับ 7 กลุ่มของนิวไคลด์อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

(1) ไอโซโทป (isotope) คือธาตุชนิดเดียวกัน แต่มีมวลเชิงอะตอมไม่เท่ากัน เช่นอะตอม H มี 3 ไอโซโทป (ภาพที่ 6.1) คือ

${}^1_1\text{H}$ มีโปรตอน 1 ตัวและไม่มีนิวตรอน เรียกว่า ไฮโดรเจน (hydrogen) หรือโปรตอน (proton)

${}^2_1\text{H}$ มีโปรตอน 1 ตัวและมีนิวตรอน 1 ตัว เรียกว่า ดิวเทอเรียม (deuterium)

${}^3_1\text{H}$ มีโปรตอน 1 และมีนิวตรอน 2 ตัว เรียกว่า ทริเทียม (tritium)



ภาพที่ 6.1 ชนิดของไอโซโทปอะตอมไฮโดรเจน

สมบัติทางเคมีของธาตุถูกกำหนดด้วยจำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอนในอะตอม ส่วนนิวตรอนไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ดังนั้น ไอโซโทปของธาตุเดียวกันจึงมีสมบัติทางเคมีเหมือนกันเกิดสารประกอบประเภทเดียวกันและมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีทำนองเดียวกัน ไอโซโทปของธาตุแต่ละชนิดปรากฏในธรรมชาติที่ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ไอโซโทปของธาตุบางชนิดและร้อยละที่มีอยู่ในธรรมชาติ

ธาตุ	ไอโซโทป	ร้อยละที่มีอยู่ในธรรมชาติ
คาร์บอน	${}^{12}\text{C}$	98.892
	${}^{13}\text{C}$	1.108
	${}^{14}\text{C}$	น้อยมาก
ไฮโดรเจน	${}^1\text{H}$	99.985
	${}^2\text{H}$	0.015
	${}^3\text{H}$	$< 10^{-16}$
ออกซิเจน	${}^{16}\text{O}$	99.763
	${}^{17}\text{O}$	0.037
	${}^{18}\text{O}$	0.02

(2) ไอโซโทน (isotone) คือธาตุต่างชนิดกันที่มีจำนวนนิวตรอนเท่ากันแต่มีมวลเชิงอะตอมไม่เท่ากัน เช่น ${}^{18}_8\text{O}$ กับ ${}^{19}_9\text{F}$ เป็นไอโซโทนกัน มีนิวตรอนเท่ากันคือ 10 จะเห็นได้ว่าเฉพาะนิวตรอนเท่านั้นที่เท่ากัน แต่มวลเชิงอะตอมไม่เท่ากัน

(3) ไอโซบาร์ (isobar) คือธาตุต่างชนิดกันที่มีมวลเชิงอะตอมเท่ากันแต่มีจำนวนนิวตรอนไม่เท่ากัน เช่น $^{30}_{15}\text{P}$ กับ $^{30}_{14}\text{Si}$ มีเลขมวลเท่ากันคือ 30 จะเห็นได้ว่าเฉพาะมวลเชิงอะตอมเท่านั้นที่เท่ากันแต่นิวตรอนไม่เท่ากัน

2) เสถียรภาพของนิวเคลียส

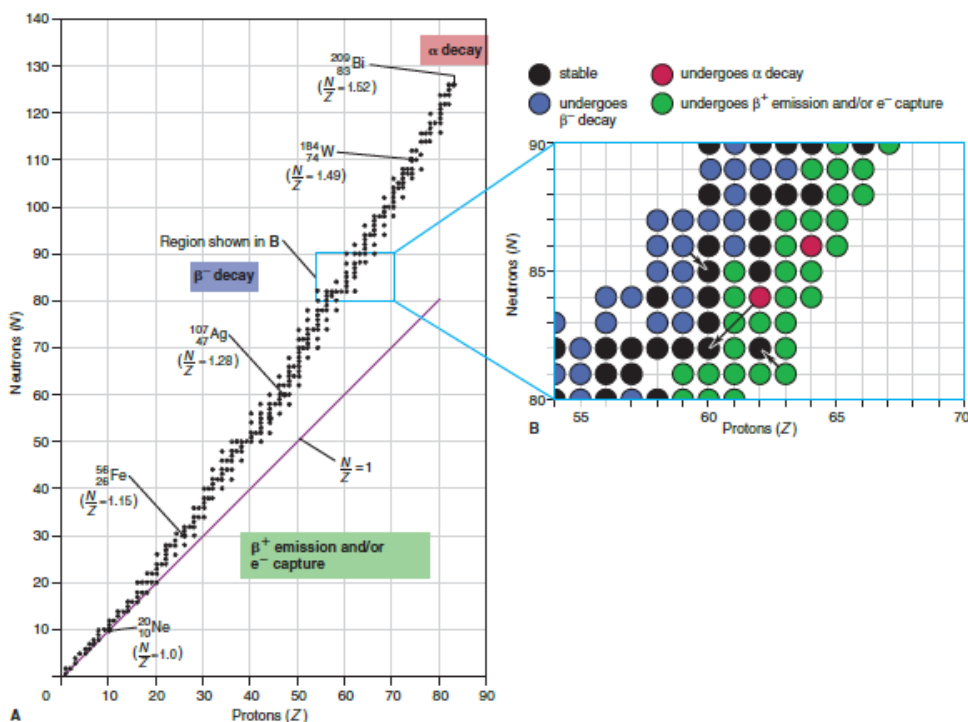
ไอโซโทปเป็นอะตอมของธาตุที่มีจำนวนนิวตรอนไม่เท่ากัน แต่มีจำนวนโปรตอนเท่ากัน บางไอโซโทปของอะตอมจะเสถียร บางชนิดไม่เสถียรและให้กัมมันตภาพรังสีออกมา การพิจารณาถึงความเสถียรของไอโซโทปของธาตุต่าง ๆ ได้จากเงื่อนไขต่อไปนี้

(1) เลขมหัศจรรย์ นิวเคลียสของอะตอมที่มีจำนวนโปรตอนหรือจำนวนนิวตรอนเท่ากับ 2, 8, 20, 50, 82 หรือ 126 ซึ่งเรียกว่าเลขมหัศจรรย์จะเป็นนิวเคลียสที่เสถียร เช่น ^4_2He หรือ $^{40}_{20}\text{Ca}$ จะไม่เกิดการสลายตัวใด ๆ

(2) จำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเลขคู่ ธาตุที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเลขคู่จะมีความเสถียรมากกว่าเลขคี่

(3) ธาตุที่เลขเชิงอะตอม (Z) น้อยกว่า 83 พบว่าธาตุที่มีจำนวนโปรตอนน้อยกว่า 83 จะมีไอโซโทปที่เสถียร (อย่างน้อยหนึ่งตัว) เสมอ

(4) แถบเสถียรภาพ (band of stability) นิวเคลียสของธาตุที่เสถียรจะมีอัตราส่วนจำนวนนิวตรอนต่อโปรตอน (n/p) ในแนวเส้นเสถียรภาพ ดังภาพที่ 6.2

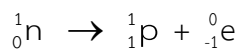


ภาพที่ 6.2 เส้นเสถียรภาพของนิวเคลียส. จาก *Chemistry for Engineering Students* (p. 769), by L.S. Brown & T.A. Holme, 2018, Thomson Brook Cole.

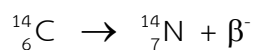
จากภาพที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่าธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมเท่ากับ 20 หรือน้อยกว่า 20 จะมีนิวไคลด์ที่มีความเสถียรเมื่ออัตราส่วน (n/p) เท่ากับหนึ่ง (เส้นทึบ) ซึ่งเป็นเส้นตรง แต่สำหรับธาตุที่มีเลขเชิง

อะตอมมากกว่า 20 จำนวนนิวตรอนจะมีมากกว่าโปรตอนทำให้แนวเสถียรจะค่อย ๆ เบี่ยงจากเส้นตรงจนถึงตอนปลายของเส้นโค้งที่เบี่ยงจากเส้นตรงที่เลขเชิงอะตอมเท่ากับ 83 ซึ่งเป็น $^{209}_{83}\text{Bi}$ ที่มีอัตราส่วนจำนวน n/p เท่ากับ 1.5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่านิวเคลียสของธาตุใด ๆ ที่มีเลขเชิงอะตอมน้อยกว่า 84 ที่อยู่แนวเสถียรจะมีอัตราส่วน n/p เท่ากับ 1-1.5 โดยนิวเคลียสเหล่านี้จะไม่ให้กัมมันตภาพรังสี แต่ถ้านิวเคลียสของธาตุมีอัตราส่วน n/p ไม่เป็นไปตามนี้ จัดเป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี นิวเคลียสพวกนี้จะพยายามปรับตัวให้เข้าใกล้เส้นเสถียรภาพ ความพยายามในการปรับอัตรา n/p ของนิวเคลียสดังกล่าว นี้จะก่อให้เกิดการสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีได้หลายแบบโดยขึ้นกับเงื่อนไขของอัตราส่วน n/p ของนิวเคลียสดังนี้

(1) กรณี n/p มีค่าสูงกว่าค่าแนวเสถียร ($n > p$) พิจารณาจากภาพที่ 6.2 จะเป็นนิวเคลียสที่มี n/p ใต้แถบเส้นเสถียรภาพ เช่น $^{14}_6\text{C}$ ($p=6$ และ $n=8$) อัตราส่วน n/p จะมากกว่า 1 เนื่องจากนิวตรอนมากไปหรือโปรตอนน้อยไป วิธีการที่จะปรับให้ $n/p = 1$ ให้ได้โดยการเปลี่ยนนิวตรอนเป็นโปรตอนแล้วได้ธาตุเสถียรขึ้น โดยการให้อนุภาคบีตา (β^-) ดังสมการ

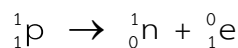


ถ้าแทน ${}_{-1}^0e$ ด้วย (β^-) จะได้สมการการสลายตัว เช่น

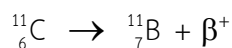


(2) กรณี n/p มีค่าต่ำกว่าแนวเสถียร ($p > n$) จากภาพที่ 6.2 จะเป็นนิวเคลียสที่มี n/p อยู่เหนือแถบเส้นเสถียรภาพ เช่น $^{11}_6\text{C}$ ($p=6$ และ $n=5$) อัตราส่วน n/p จะน้อยกว่า 1 เพื่อปรับ n/p ให้เท่ากับ 1 นิวเคลียสอาจใช้วิธีการปรับค่านี้นี้ได้ 2 แบบ

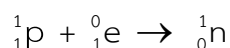
2.1) เปลี่ยนโปรตอนให้เป็นนิวตรอนแล้วให้อนุภาคโพสิตรอน (β^+) ดัง สมการ



ถ้าแทน ${}_{+1}^0e$ ด้วย (β^+) จะได้สมการการสลายตัว เช่น



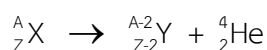
2.2) เปลี่ยนโปรตอนเป็นนิวตรอนโดยการดึงอิเล็กตรอนจาก 1s ออร์บิทัล (ใกล้นิวเคลียส) อาจเรียกการสลายตัวแบบนี้ว่า electron capture (E.C.) ดังสมการ



เช่น ${}^{40}_{19}\text{K} + {}_1^0e \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar}$

กรณีนี้จะมีรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นด้วยเนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดจาก 1s ออร์บิทัลจะเคลื่อนเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่ถูกจับเข้าไปอยู่ในนิวเคลียส

สำหรับธาตุที่เลขเชิงอะตอมมากกว่า 83 ก็เกิดการสลายตัวในแบบอื่น เช่น การให้อนุภาคแอลฟา โดยนิวเคลียสจะมีเลขเชิงอะตอมลดไป 2 และเลขมวลลดไป 4 ดังสมการ



เช่น ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$

6.1.2 ธาตุกัมมันตรังสี

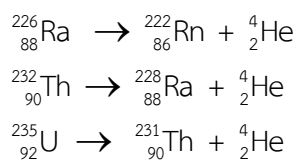
1) สมบัติและอนุภาคของรังสี

จากสมบัติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีนิวเคลียร์ออกมา (รังสีเหล่านี้ อาจมีสมบัติได้ทั้งอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา นิวตรอน รวมทั้งรังสีเอกซ์ ซึ่งแม้ว่าจะไม่ได้ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส แต่ก็ยังเป็นผลที่ได้จากการสลายตัว ก็ถือว่าเป็นรังสีนิวเคลียร์เช่นกัน (จะไม่กล่าวถึงในที่นี้) ซึ่งรังสีนิวเคลียร์แต่ละประเภท แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 สมบัติของอนุภาคและรังสีต่าง ๆ ที่ปล่อยจากธาตุกัมมันตรังสี

ชนิดการสลายตัว	สัญลักษณ์	ประจุ	ประเภท
แอลฟา (α)	${}^4_2\text{He}$	+2	อนุภาค
บีตา (β)	${}^0_{-1}\text{e}$	-1	อนุภาค
แกมมา (γ)	${}^0_0\gamma$	0	รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า
นิวตรอน	${}^1_0\text{n}$	0	อนุภาค
โพสิตรอน	${}^0_1\text{e}$	+1	อนุภาค
โปรตอน	${}^1_1\text{H}$	+1	อนุภาค

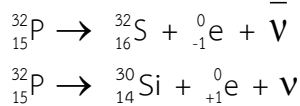
(1) รังสีแอลฟา (alpha-rays; α) ประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาคและนิวตรอน 2 อนุภาค ซึ่งก็คือนิวไคลด์ของธาตุฮีเลียม สัญลักษณ์ของรังสีแอลฟา คือ ${}^4_2\text{He}$ (บางครั้งเรียกว่าอนุภาคแอลฟา จากสมบัติความเป็นคลื่นและอนุภาค) มีประจุเท่ากับ +2e มีมวลเท่ากับ 4.001516 amu อนุภาคชนิดนี้มักจะถูกปลดปล่อยออกจากนิวไคลด์ที่มีมวลมาก ๆ ที่มีเลขมวลตั้งแต่ 83 ขึ้นไป เช่น ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$ ดังสมการ



นิวไคลด์ที่สลายตัวให้รังสีแอลฟาจะเปลี่ยนเป็นนิวไคลด์ใหม่ ซึ่งมีเลขมวล ลดลง 4 หน่วยและ เลขเชิงอะตอมลดลง 2 หน่วย พลังงานที่ได้จากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจลน์ของรังสีแอลฟานั้น และเนื่องจากมีมวลและมีประจุ จึงทำให้รังสีแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ เพียงกระดาษแผ่นบาง ๆ หรือผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์สามารถกั้นรังสีแอลฟาได้

(2) รังสีบีตา (beta-rays; β) คือ อนุภาคของอิเล็กตรอน มีมวลเท่ากับ 0.000548 amu แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อนุภาคบีตาลบ (negative beta; β^-) ใช้สัญลักษณ์ ${}^0_{-1}\text{e}$ มีประจุ -1e และ อนุภาคบีตาบวก (positive beta; β^+) ใช้สัญลักษณ์ ${}^0_1\text{e}$ มีประจุ +1e การสลายตัวให้อนุภาคบีตา มักจะเกิดขึ้นกับนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนน้อยหรือมากเกินไป เช่น นิวไคลด์ ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{32}_{15}\text{P}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$ เป็นนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากเกินไปจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ ส่วนนิวไคลด์ ${}^{13}_7\text{N}$, ${}^{18}_8\text{O}$, ${}^{30}_{15}\text{P}$ เป็นนิวไคลด์ที่มีโปรตอนมากเกินไปจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาบวก นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่

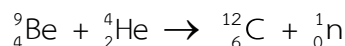
สลายตัวให้อนุภาคบีตาแล้วจะเปลี่ยนเป็นนิวไคลด์ที่มีเลขมวลคงเดิม แต่เลขเชิงอะตอมจะเปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยหากเป็นการสลายตัวให้อนุภาคบีตาบวก นิวไคลด์ที่ได้จะมีเลขเชิงอะตอมลดลง 1 หน่วย แต่หากเป็นการสลายตัวให้อนุภาคบีตาลบ นิวไคลด์ที่ได้จะมีเลขเชิงอะตอมเพิ่มขึ้น 1 หน่วย นอกจากนี้พร้อม ๆ กับการสลายตัวให้อนุภาคบีตาก็จะมีอนุภาคนิวตริโน (neutrino) ใช้สัญลักษณ์ $\bar{\nu}$ และแอนตินิวตริโน (anti-neutrino) ใช้สัญลักษณ์ ν ปล่อยออกมาด้วย ดังนี้



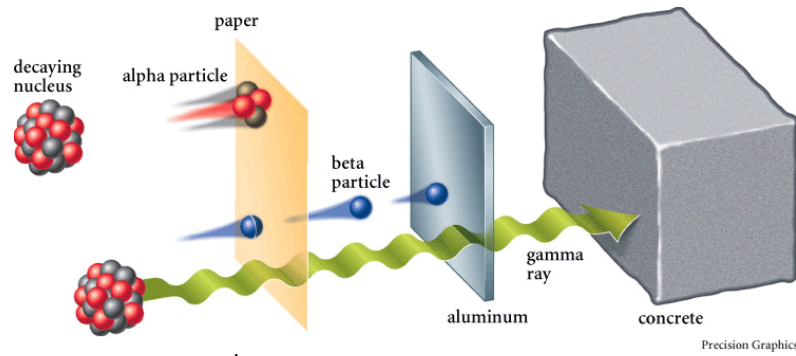
พลังงานที่ได้จากการสลายตัวให้รังสีบีตาจะอยู่ในรูปของพลังงานของอนุภาคบีตาและพลังงานของแอนตินิวตริโนและนิวตริโน โดยแบ่งกันในอัตราส่วนที่ไม่แน่นอน และหลังจากการสลายตัวแล้วหากนิวไคลด์ยังอยู่ในสถานะกระตุ้นก็อาจจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาได้อีก เนื่องจากมีมวลน้อยและมีประจุน้อย อนุภาคบีตาจึงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ดีกว่ารังสีแอลฟา เมื่อเทียบต่อหน่วยพลังงานที่เท่า ๆ กัน

(3) รังสีแกมมา (γ ; gamma-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ไม่มีมวล ไม่มีประจุ จึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง เกิดจากการปล่อยพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีชนิดอื่นแล้วยังมีพลังงานเหลืออยู่ จึงปล่อยพลังงานนั้นออกมาในรูปของรังสีแกมมา โดยเปลี่ยนจากสถานะกระตุ้น (excited state) ไปเป็นสถานะพื้น (ground state) พลังงานของรังสีแกมมาจึงเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองสถานะ ดังนั้น การสลายตัวให้รังสีแกมมาจึงไม่ทำให้เกิดนิวไคลด์ชนิดใหม่ เพียงแต่มีการปลดปล่อยพลังงาน นิวไคลด์ก่อนและหลังการสลายตัว จึงมีเลขมวลและเลขเชิงอะตอมเท่าเดิม รังสีแกมมามีพลังงานสูงมาก (อยู่ในช่วง 10^3 - 10^6 eV) จึงทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง และเป็นอันตรายมากกว่ารังสีแอลฟาและรังสีบีตา

(4) นิวตรอน (neutron) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์ ${}_0^1\text{n}$ ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อให้อนุภาคแอลฟาชนกับ ${}_4^9\text{Be}$ ดังนี้



นิวตรอนแตกต่างจากรังสีนิวเคลียร์อื่น ๆ เพราะไม่ได้เกิดขึ้นจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี แต่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เครื่องกำเนิดนิวตรอน หรือแหล่งกำเนิดนิวตรอน เช่น ปฏิกิริยาในเครื่องกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ดิวเทอรอน (${}_1^2\text{H}$) และโปรตอน (${}_1^1\text{H}$) เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ จึงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับรังสีประเภทอื่น ทำให้นิวตรอนมีอันตรายมากกว่ารังสีทุกประเภท

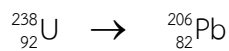


ภาพที่ 6.3 อำนาจทะลุทะลวงของรังสีนิวเคลียร์

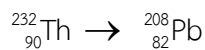
2) การสลายตัวของกัมมันตรังสี

ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมมากกว่า 83 มักเป็นธาตุกัมมันตรังสีและสลายตัวตามธรรมชาติ โดยจะให้รังสีจนเป็นนิวไคลด์ที่เสถียรเรียกการสลายตัวแต่ละแบบว่าอนุกรมการสลายตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 อนุกรม ดังภาพที่ 6.4 ซึ่งประกอบด้วย

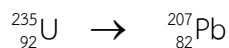
(1) อนุกรมยูเรเนียม (Uranium series) นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 2 จึงอาจเรียกว่า อนุกรม $4n+2$ เริ่มจาก U-238 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb-206 ดังภาพที่ 6.4(ก) การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดจะให้ β 6 ครั้ง และ α 8 ครั้ง

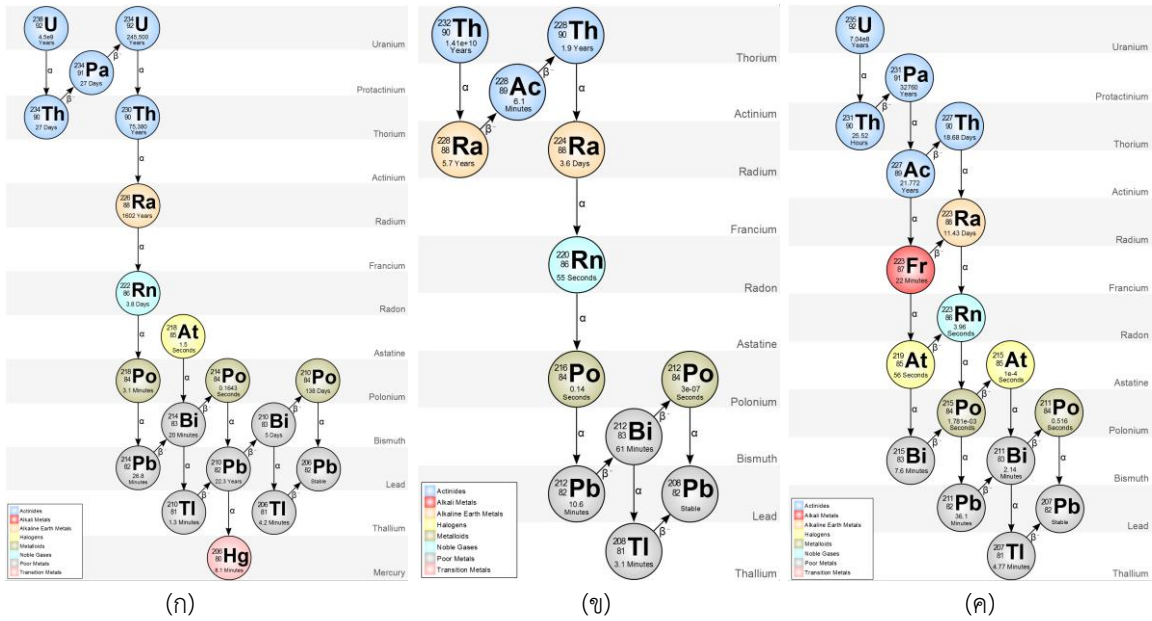


(2) อนุกรมทอเรียม (Thorium series) นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 ลงตัว จึงอาจเรียกว่าอนุกรม $4n$ เริ่มจาก Th-232 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb-208 ดังภาพที่ 6.4(ข) มีขั้นสลายตัว 10 ขั้น การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดจะให้ β 4 ครั้ง และ α 6 ครั้ง



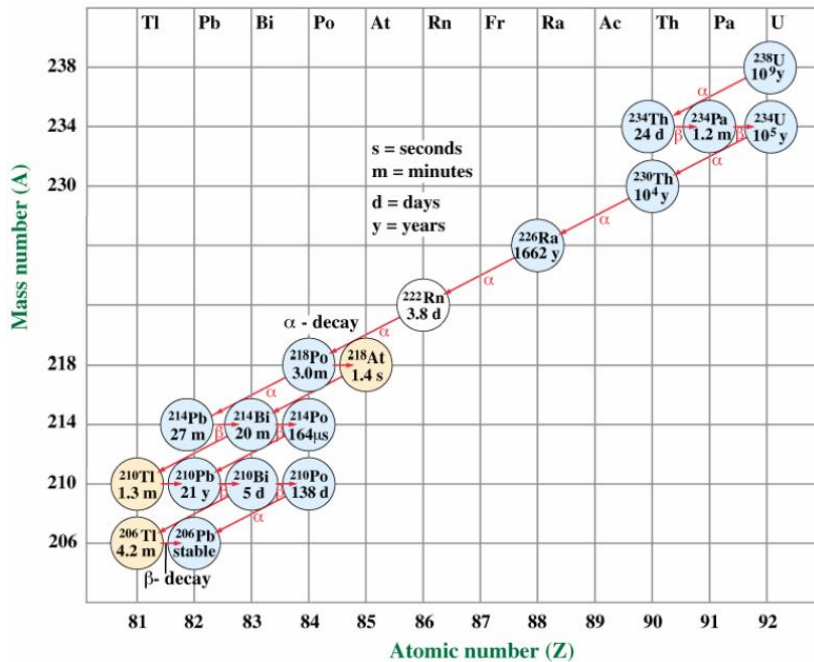
(3) อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium series) หรืออนุกรมแอกทิโน-ยูเรเนียม นิวไคลด์ทุกตัวมีเลขมวลที่หารด้วย 4 แล้วเหลือเศษ 3 จึงอาจเรียกว่าอนุกรม $4n+3$ เริ่มจาก U-235 สลายตัวอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียรคือ Pb-207 ดังภาพที่ 6.4(ค) การสลายตัวตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุด จะให้ β 6 ครั้ง และ α 6 ครั้ง





ภาพที่ 6.4 การสลายตัวของธาตุ (ก) อนุกรมยูเรเนียม (ข) อนุกรมทอเรียม และ (ค) อนุกรมแอกทิเนียม. ที่มาจาก <https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>

การสลายตัวของนิวไคลด์ของทั้งสามอนุกรม พบว่ามีการสลายตัวต่อเนื่องกันไปเฉพาะอนุกรม ไม่มีการโยกข้ามอนุกรม ดังนั้นนิวไคลด์ในอนุกรมใดอนุกรมหนึ่งจะไม่มีสลายตัวข้ามไปเป็นนิวไคลด์ของอนุกรมอื่น ดังภาพที่ 6.5 แสดงอนุกรมการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียมและครึ่งชีวิต



ภาพที่ 6.5 อนุกรมการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม. ดัดแปลงจาก *General Chemistry* (p. 691), by D.D. Ebbing & S.D. Gammon, 2017, Cengage Learning

3) ครึ่งชีวิต

การสลายตัวยังเกี่ยวข้องกับครึ่งชีวิต (half-life; $t_{1/2}$) คือระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวจนเหลือจำนวนอะตอมครึ่งหนึ่งของตอนเริ่มต้น ธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตยาวนานจะมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ แต่หากธาตุกัมมันตรังสีชนิดใดมีครึ่งชีวิตสั้นจะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์เริ่มต้นของทั้งสามอนุกรม ได้แก่ U-238, U-235 และ Th-232 มีค่าเท่ากับ 4.5×10^9 , 7.0×10^8 และ 1.4×10^{10} ปี ตามลำดับ ดังภาพที่ 6.6

²³⁸ U decay chain			²³⁵ U decay chain			²³² Th decay chain		
Nuclide	Half-life	Ref.	Nuclide	Half-life	Ref.	Nuclide	Half-life	Ref.
²³⁸ U α	4.4683 ± 0.0048 Byrs	1	²³⁵ U α	0.70381 ± 0.00096 Byrs	1	²³² Th α	14.0100 Byrs	4
²³⁴ Th β	24.1 days	2	²³¹ Th β	1.063 days	2	²²⁸ Ra β	5.75 ± 0.03 yrs	4
²³⁴ Pa β	6.69 hours	2	²³¹ Pa α	32,760 ± 220 yrs	5	²²⁸ Ac β	6.15 hours	2
²³⁴ U α	245,250 ± 490 yrs	3	²²⁷ Ac α,β	21.77 ± 0.02 yrs	4	²²⁸ Th α	1.912 ± 0.002 yrs	4
²³⁰ Th α	75,690 ± 230 yrs	3	²²⁷ Th α	18.72 days	2	²²⁴ Ra α	3.66 days	2
²²⁶ Ra α	1599 ± 4 yrs	4	²²³ Fr α,β	22 min.	2	²²⁰ Rn α	55.6 sec	2
²²² Rn α	3.823 ± 0.004 days	4	²²³ Ra α	11.435 days	2	²¹⁶ Po α	0.145 sec	2
²¹⁸ Po α,β	3.04 min	2	²¹⁹ At α,β	50 sec	2	²¹² Pb β	10.64 hours	2
²¹⁸ At α,β	1.6 sec	2	²¹⁹ Rn α	3.96 sec	2	²¹² Bi α,β	1.009 hours	2
²¹⁸ Rn α	35 msec	2	²¹⁵ Bi β	7.7 min	2	²¹² Po β	0.298 μsec	2
²¹⁴ Pb β	26.9 min	2	²¹⁵ Po α,β	1.78 msec	2	²⁰⁸ Tl β	3.053 min	2
²¹⁴ Bi α,β	19.7 min	2	²¹⁵ At α	0.1 msec	2	²⁰⁸ Pb	stable	
²¹⁴ Po α	0.1637 msec	2	²¹⁴ Pb β	36.1 min	2			
²¹⁰ Tl β	1.3 min	2	²¹⁴ Bi α,β	2.14 min	2			
²¹⁰ Pb α,β	22.6 ± 0.1 yrs	4	²¹⁴ Po α	0.516 sec	2			
²¹⁰ Bi α,β	5.01 days	2	²⁰⁷ Tl β	4.77 min	2			
²¹⁰ Po α	138.4 ± 0.1 days	4	²⁰⁷ Pb	stable				
²⁰⁶ Hg β	8.2 min	2						
²⁰⁶ Tl β	4.2 min	2						
²⁰⁶ Pb	stable							

*References: 1. Jaffey et al. (1971); 2. Lide (1998); 3. Cheng et al. (2000); 4. Holden (1990); 5. Robert et al. (1969)

ภาพที่ 6.6 อนุกรมการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม อนุกรมทอเรียม และอนุกรมแอกทิเนียม. ที่มาจาก *Introduction to U-series Geochemistry* (p. 14), by B. Bernard et al., 2003. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, <https://doi.org/10.2113/0520001>

4) อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัวและแผ่รังสีตลอดเวลา โดยไม่สามารถทำนายได้ว่าอะตอมกัมมันตรังสี (นิวไคลด์) อะตอมใดจะสลายตัวเมื่อใด เนื่องจากการสลายตัวเกิดขึ้นแบบสุ่ม อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณได้ว่ามีกี่นิวไคลด์ที่สลายตัวต่อเวลา หรือมีนิวไคลด์ที่ยังเหลืออยู่ที่เวลาใด ๆ โดยอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี หรือเรียกว่า กัมมันตภาพ (activity; A) แปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมกัมมันตรังสี (N) ที่ปรากฏอยู่ ณ เวลานั้น ๆ ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์อัตราการสลายตัวได้ดังนี้

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{.....(6.1)}$$

จัดรูปสมการ

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \text{.....(6.2)}$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_{t_0}^t -\lambda dt \quad \text{.....(6.3)}$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad \text{.....(6.4)}$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสี ณ เวลาเริ่มต้น ($t=0$)
 N = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสี ณ เวลา t ใด ๆ
 λ = ค่าคงที่ของการสลายตัว

จากสมการ (6.4) สามารถเป็นความสัมพันธ์ของกัมมันตภาพ (A) ได้ดังนี้

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -\lambda t \quad \text{.....(6.5)}$$

เมื่อ A_0 = กัมมันตภาพของสาร ณ เวลาเริ่มต้น ($t=0$)
 A = กัมมันตภาพของสาร ณ เวลา t ใด ๆ

เมื่อจำนวนอะตอมแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักอะตอม

$$\ln\left(\frac{W}{W_0}\right) = -\lambda t \quad \text{.....(6.6)}$$

เมื่อ W_0 = น้ำหนักของกัมมันตรังสี ณ เวลาเริ่มต้น ($t=0$)
 W = น้ำหนักของกัมมันตรังสี ณ เวลา t ใด ๆ

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของสารวัดเป็นปริมาณอะตอมที่สลายในหนึ่งหน่วยเวลา เช่น วัดการสลายตัวต่อวินาที (disintegration per second; dps) นอกจากนี้ยังมีหน่วยเบคเคอเรล (becquerel; Bq) และคูรี (curie; Ci) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

จากสมการ (6.4) เราสามารถคำนวณครึ่งชีวิต เมื่อแทนค่า $N = N_0/2$ ที่เวลา $t_{1/2}$ จะได้

$$\ln\left(\frac{N_0/2}{N_0}\right) = -\lambda t_{1/2} \quad \text{.....(6.7)}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \text{.....(6.8)}$$

สมการ (6.8) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) กับค่าคงที่การสลายตัว (λ) ซึ่งหากทราบค่าใดค่าหนึ่งก็สามารถหาค่าหนึ่งได้ การคำนวณเกี่ยวกับอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีมักจะเกี่ยวข้องกับครึ่งชีวิต

ตัวอย่าง 6.1 ธาตุ P-32 มีครึ่งชีวิต 14.3 วัน ถ้ามีธาตุ P-32 อยู่ 1 มิลลิกรัม หลังจากผ่านไป 10 วัน จะมีธาตุนี้เหลืออยู่กี่กรัม

วิธีคิด จากสมการ (6.8) $t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{14.3} = 0.0485 \text{ วัน}^{-1}$$

จากสมการ (6.6) $\ln \frac{W}{W_0} = -\lambda t$

$$\ln \frac{W}{1.0 \times 10^{-3} \text{ g}} = (-0.0485 \text{ วัน}^{-1})(10 \text{ วัน})$$

$$\ln W - \ln (1.0 \times 10^{-3}) = -0.485$$

$$\ln W - (-6.908) = -0.485$$

$$\ln W = -0.485 + (-6.908)$$

$$= -7.393$$

$$W = 6.155 \times 10^{-4} \text{ g}$$

5) หน่วยวัดทางรังสี

ในกรณีที่ร่างกายได้รับรังสีนิวเคลียร์ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย ปริมาณของพลังงานต่อน้ำหนักที่อวัยวะหรือเนื้อเยื่อของร่างกายดูดกลืนไว้ เรียกว่า absorbed dose มีหน่วยเป็นเกรย์ (gray; Gy) ปริมาณรังสี (dose) 1 เกรย์เทียบเท่ากับพลังงาน ของรังสี 1 จูล (joule) ที่อวัยวะหรือเนื้อเยื่อของร่างกายน้ำหนัก 1 กิโลกรัมดูดกลืนเอาไว้

หน่วยวัด rad เป็นหน่วยเก่าของ absorbed dose ที่ยังคงมีการใช้อยู่ (ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับ 1 เกรย์ เทียบเท่ากับ 100 rads หรือ 1 Gy = 100 rads นอกจากนี้ในการอ้างอิงถึงผลกระทบที่เกิดกับร่างกายมนุษย์

นักวิทยาศาสตร์จะใช้หน่วย Sv (sievert) หรือ rem (roentgen equivalent in man) เป็นหลัก (โดย 1 Sv = 100 rem) เพราะรังสีแต่ละชนิดมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตไม่เหมือนกัน แม้ว่าจะมีในปริมาณเท่ากันก็ตาม เช่น รังสีแอลฟามีอนุภาคทำลายเซลล์ได้มากกว่ารังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา เป็นต้น และเนื้อเยื่อแต่ละชนิดก็ได้รับผลกระทบไม่เท่ากัน ดังนั้นการรายงานเพียงแต่ปริมาณพลังงานที่วัดดูก่อนหนึ่งดูดซับเข้าไปเป็น gray จึงไม่ได้ชี้ให้เห็นข้อมูลในทางชีววิทยา ดังนั้นจำเป็นต้องเทียบค่าถ่วงน้ำหนักตามผลกระทบเป็น sievert หรือ rem

สำหรับร่างกายมนุษย์ที่ได้รับรังสีชนิดต่าง ๆ มีข้อมูลที่สำคัญดังนี้

(1) การดูดซับรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมา 1 rad = 1 rem = 10 mSv (millisievert)

(2) การดูดซับนิวตรอน 1 rad = 5-20 rem = 50-200 mSv (ขึ้นอยู่กับ พลังงาน)

(3) การดูดซับรังสีแกมมา 1 rad = 20 rem = 200 mSv ตามข้อแนะนำของ TLV (Threshold Limit Value) มนุษย์ร่างกายปกติที่มีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม สามารถได้รับรังสีเฉลี่ย 0.05 Sv (50 mSv) ต่อปี ซึ่งถือว่าปริมาณรังสี 1 Sv เป็นระดับที่สูงมาก การได้รับรังสีปริมาณมากในครั้งเดียว (acute exposure) จะมีผลกระทบขึ้นกับปริมาณของรังสี ดังนี้

10 Sv มีความเสี่ยงที่จะเสียชีวิตในเวลาเป็นวันหรือสัปดาห์ 1 Sv มีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในภายหลัง (5 คน ใน 100 คน)

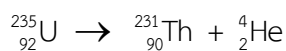
100 mSv มีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในภายหลัง (5 คน ใน 1000 คน)

50 mSv ปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีของผู้ที่ปฏิบัติงานทางรังสีตาม TLV

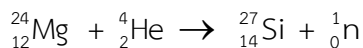
20 mSv ปริมาณรังสีที่ได้รับเฉลี่ยต่อปี หรือโดยเฉลี่ยในเวลา 5 ปี ตาม TLV

6.1.3 ปฏิกิริยานิวเคลียร์

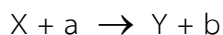
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของนิวเคลียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของนิวไคลด์กัมมันตรังสีและให้พลังงานออกมา



นอกจากนี้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการยิงอนุภาคชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น โปรตอน นิวตรอน แอลฟา เป็นต้น เข้าไปในนิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้า ซึ่งผลที่ได้จะมีการปล่อยอนุภาคอีกชนิดหนึ่งออกมา ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น การยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปยังนิวเคลียสของโลหะแมกนีเซียม แล้วปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา



โดยทั่วไปปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการชนกันระหว่างนิวเคลียสกับอนุภาค เช่น ปฏิกิริยา



เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ย่อ X(a,b)Y เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยา (a, b) ของนิวเคลียส X”

เมื่อ X คือ นิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้า

a คือ อนุภาคที่วิ่งมาชนเป้า

b คือ อนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ (ปล่อยออกมา)

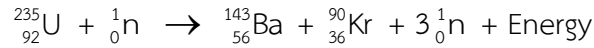
Y คือ นิวเคลียสของธาตุที่เกิดขึ้นใหม่

ดังนั้นจากปฏิกิริยาของ ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ ข้างต้น เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้เป็น ${}_{12}^{24}\text{Mg}(\alpha, n) {}_{14}^{27}\text{Si}$ ในทุกสมการนิวเคลียร์ผลบวกของเลขเชิงอะตอมทั้งก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องเท่ากัน แสดงว่าประจุไฟฟ้ารวมมีค่าคงตัว และผลบวกของเลขมวลก่อนและหลังปฏิกิริยาต้องเท่ากันด้วย ซึ่งแสดงว่าจำนวนนิวคลีออนรวมก่อนและหลังปฏิกิริยาจะต้องคงตัว

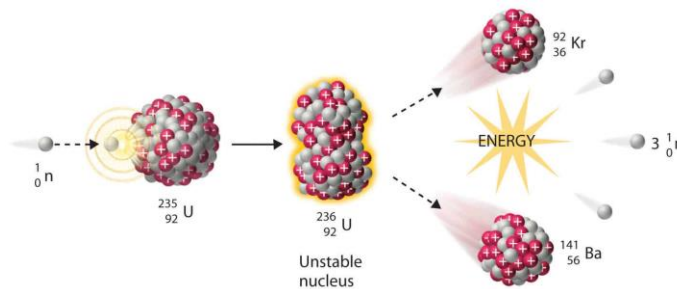
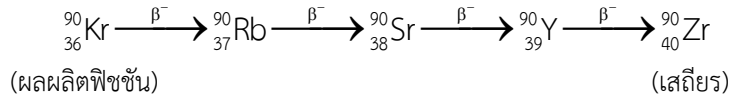
(1) ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction)

กระบวนการของนิวเคลียร์ฟิชชันค้นพบในปี ค.ศ.1939 โดยฮันน์ (Otto Hahn) และคณะ โดยการยิงนิวตรอนช้าเข้าชนนิวเคลียสของยูเรเนียม ทำให้นิวเคลียสของยูเรเนียมแตกออกเป็นสองส่วนที่เบากว่ายูเรเนียม (เรียกว่า ผลผลิตฟิชชัน) และเกิดนิวตรอนใหม่ขึ้น มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมาและรังสีชนิดอื่น ๆ นิวตรอนใหม่จะเข้าชนนิวเคลียสทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่เป็นกระบวนการนิวเคลียร์ฟิชชันที่ต่อเนื่อง

ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นช้า ๆ และเกิดอย่างต่อเนื่อง เช่น นิวตรอนที่มีพลังงาน 1 eV วิ่งชน U-235 จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันดังนี้



ดังนั้นหาก U-235 จำนวน 1 กรัมทำปฏิกิริยาฟิชชันจะให้พลังงานสูงเทียบเท่ากับพลังงานที่เกิดจากการเผาถ่านหินถึง 3 ตัน ถ้าผลผลิตฟิชชันที่ได้เป็นนิวไคลด์ไม่เสถียร (ธาตุกัมมันตรังสี) จะเกิดการแผ่รังสีต่อไปจนได้นิวไคลด์เสถียรที่มีเสถียรภาพ เช่น



ภาพที่ 6.7 กระบวนการของนิวเคลียร์ฟิชชัน

จากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 ข้างต้น เราสามารถคำนวณพลังงาน (E) ที่ปล่อยออกมาได้โดยพิจารณาจากมวลที่หายไป ที่เรียกว่า มวลพร่อง (mass defect) โดยมวลนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่จะมีมวลน้อยกว่าผลรวมของมวลนิวคลีออนอิสระก่อนรวม

การคำนวณหามวลพร่องของนิวเคลียส ดังนี้

$$\Delta m = [Z(m_p + m_e) + (A-Z)m_n] - m_{\text{atom}} \quad \dots(6.1)$$

เมื่อ Δm = มวลพร่อง (amu)

m_p = มวลโปรตอน (1.007826 amu)

m_n = มวลนิวตรอน (1.008665 amu)

m_e = มวลอิเล็กตรอน (0.000548597 amu)

m_{atom} = มวลนิวไคลด์ (amu)

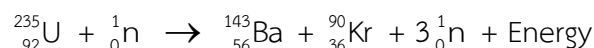
Z = เลขเชิงอะตอม (จำนวนโปรตอน)

A = มวลเชิงอะตอม (มวลนิวคลีออน)

เช่นการคำนวณหามวลพร่องของ ${}^7_3\text{Li}$ เมื่อมวลเชิงอะตอมของ ${}^7_3\text{Li}$ เท่ากับ 7.016003 จากสมการ (6.1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta m &= [3(1.007826 \text{ amu}) + 0.000548597 \text{ amu} + (7-3) 1.008665 \text{ amu}] - 7.016003 \\ &= 0.042133 \text{ amu} \end{aligned}$$

จากปฏิกิริยาฟิชชันของ U-235 เราสามารถคำนวณพลังงานที่ปล่อยออกมาได้โดยอาศัยมวลพร่อง และสมการ $E = mc^2$ ดังนี้



จาก มวลของ $^{235}\text{U} = 235.0439 \text{ amu}$

มวลของ $^{143}\text{Ba} = 143.9200 \text{ amu}$

มวลของ $^{89}\text{Kr} = 89.91660 \text{ amu}$

มวลของ $^1_0\text{n} = 1.00867 \text{ amu}$

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m(^{235}_{92}\text{U}) + m(^1_0\text{n})] - [m(^{143}_{56}\text{Ba}) + m(^{90}_{36}\text{Kr}) + 3m(^1_0\text{n})] \\ &= [235.0439 + 1.0087] - [143.9200 + 89.91660 + (3 \times 1.00867)] \\ &= 0.19000 \text{ amu}\end{aligned}$$

จาก $1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ เปลี่ยน amu เป็น kg ดังนี้

ดังนั้น $0.19000 \text{ amu} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 3.154 \times 10^{-28} \text{ kg/amu}$

$$\begin{aligned}\text{จากสมการ } E &= mc^2 \\ &= 3.154 \times 10^{-28} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 2.8386 \times 10^{-11} \text{ J}\end{aligned}$$

จาก $1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$ เปลี่ยนหน่วย J เป็น eV ได้ดังนี้

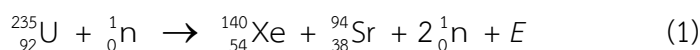
$$\begin{aligned}E &= 2.8386 \times 10^{-11} \text{ J} \\ &= 1.7718 \times 10^8 \text{ eV}\end{aligned}$$

ทั้งนี้ในการคำนวณ สามารถใช้ $1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$ ได้

$$E = 0.19000 \text{ amu} \times 931 \text{ MeV/u} = 176.985 \text{ MeV}$$

ปฏิกิริยาฟิชชันนี้มีนิวตรอนเกิดขึ้นใหม่และมีจำนวนมากกว่านิวตรอนที่ใช้อย่าง นิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถวิ่งชนนิวเคลียสของธาตุหนักอะตอมอื่น ๆ ได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้อย่างต่อเนื่อง และได้จำนวนนิวตรอนเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อย ๆ เรียกปฏิกิริยาในลักษณะนี้ว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

ตัวอย่าง 6.2 คำนวณเปรียบเทียบพลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน



กำหนด มวลของ $^{235}\text{U} = 235.0439 \text{ amu}$

มวลของ $^{140}\text{Xe} = 139.9216 \text{ amu}$

มวลของ $^{94}\text{Sr} = 93.9154 \text{ amu}$

มวลของ $^{140}\text{Cs} = 139.9171 \text{ amu}$

มวลของ $^{92}\text{Rb} = 91.9191 \text{ amu}$

มวลของ $^1_0\text{n} = 1.00867 \text{ amu}$

$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

$1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$

วิธีคิด

$$\Delta m_{(1)} = [(^{235}_{92}\text{U}) + m(^1_0\text{n})] - [m(^{140}_{54}\text{Xe}) + m(^{94}_{38}\text{Sr}) + 2m(^1_0\text{n})]$$

$$\begin{aligned}
 &= [235.0439 + 1.0087] - [139.9216 + 93.9154 + (2 \times 1.00867)] = 0.19823 \text{ amu} \\
 &= 0.19823 \text{ amu} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\
 &= 3.02906 \times 10^{-28} \text{ kg/amu}
 \end{aligned}$$

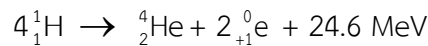
$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 \\
 &= 3.02906 \times 10^{-28} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\
 &= 2.96 \times 10^{-11} \text{ J} \text{ หรือ } 184.5521 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta m_{(2)} &= [m(^{235}_{92}\text{U}) + m(^1_0\text{n})] - [m(^{140}_{55}\text{Cs}) + m(^{92}_{37}\text{Rb}) + 4m(^1_0\text{n})] \\
 &= [235.0439 + 1.0087] - [139.9171 + 91.9191 + (4 \times 1.00867)] = 0.18169 \text{ amu} \\
 &= 0.18169 \text{ amu} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\
 &= 3.0160 \times 10^{-28} \text{ kg/amu}
 \end{aligned}$$

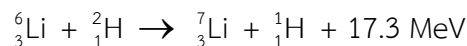
$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 \\
 &= 3.0160 \times 10^{-28} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\
 &= 2.71 \times 10^{-10} \text{ J} \text{ หรือ } 169.1534 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

(2) ปฏิกิริยาฟิวชัน (fusion reaction)

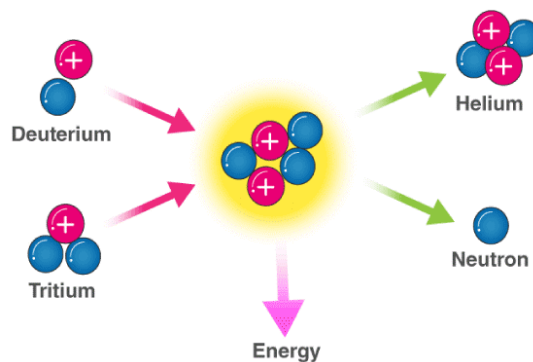
ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวเคลียสของธาตุเบาสองชนิดหลอมรวมกันเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า ทำให้มีพลังงานยึดเหนี่ยวเพิ่มและนิวเคลียสมีเสถียรภาพมากขึ้น พร้อมกับคายพลังงานมหาศาล โดยพลังงานที่คายออกมามีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาฟิวชันของนิวเคลียสที่มีจำนวนเท่ากัน เช่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์เป็นปฏิกิริยาฟิวชันของโปรตอน 4 ตัวที่อุณหภูมิสูงดังนี้



หรือปฏิกิริยา

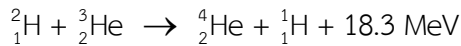
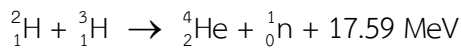
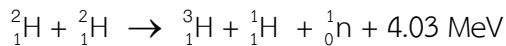
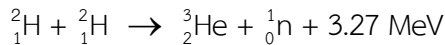


ปฏิกิริยาฟิวชันเกิดขึ้นได้ยาก เพราะนิวเคลียสสองนิวเคลียสต่างก็ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก ทำให้ผลักกัน ดังนั้นเพื่อที่จะให้เกิดการหลอมรวมกันของนิวเคลียสจะต้องอาศัยอุณหภูมิที่สูงมากอาจถึงล้านเคลวิน อนุภาครวมกันที่อุณหภูมิสูงมากนี้เรียกว่า พลาสมา (plasma)

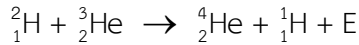


ภาพที่ 6.8 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน

ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน และพลังงานที่ปล่อยออกมาเมื่อเกิดการรวมตัว



ตัวอย่าง 6.3 คำนวณพลังงานที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาฟิวชัน



กำหนด มวลของ ${}^1_1\text{H} = 1.0078 \text{ amu}$

มวลของ ${}^2_1\text{H} = 2.0141 \text{ amu}$

มวลของ ${}^3_2\text{He} = 3.0160 \text{ amu}$

มวลของ ${}^4_2\text{He} = 4.0026 \text{ amu}$

$1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$

วิธีคิด

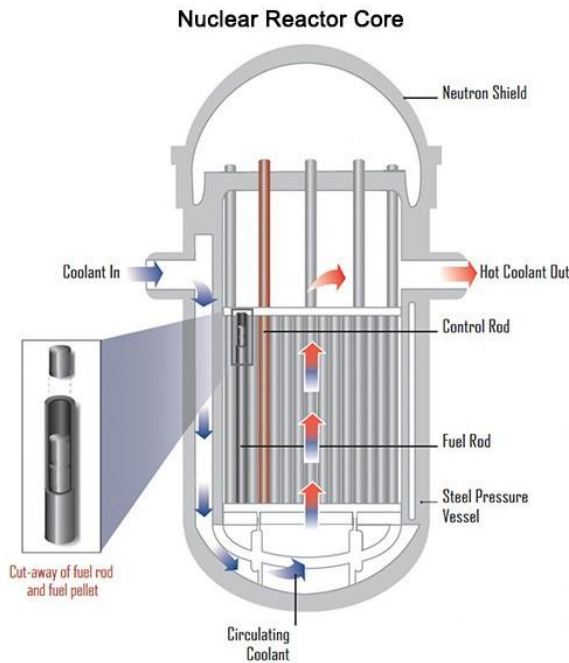
$$\begin{aligned} \Delta m &= [m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_2\text{He})] - [m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_1\text{H})] \\ &= [2.0141 + 3.0160] - [4.0026 + 1.0078] = 0.00197 \text{ amu} \\ &= 0.00197 \text{ amu} \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 3.2702 \times 10^{-29} \text{ kg/amu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= 3.2702 \times 10^{-29} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 2.94 \times 10^{-12} \text{ J} \text{ หรือ } 1.834 \text{ MeV} \end{aligned}$$

6.1.4 ประโยชน์ของเคมีนิวเคลียร์และกัมมันตภาพรังสี

1) เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เป็นเครื่องมือสำหรับควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ของปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ซึ่งในปี ค.ศ.1942 แฟร์มี (Enrico Fermi, ชาวอิตาลี) และทีมวิจัยได้ติดตั้งเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ Chicago Pile-1 ที่เมืองชิคาโก ถือได้ว่าประสบความสำเร็จในการสร้างปฏิกิริยาลูกโซ่เป็นครั้งแรก แฟร์มีได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ.1938 และรางวัลอื่น ๆ อีกจำนวนมาก จึงตั้งชื่อธาตุที่มีเลขเชิงอะตอม 100 เป็น Fermium (Fm) เพื่อเป็นเกียรติให้แก่แฟร์มี หลังจากนั้นไม่นาน โลกก็ก้าวเข้าสู่ยุคแห่งพลังงานนิวเคลียร์อย่างเป็นทางการ ถึงปัจจุบันกว่า 70 ปีแล้วที่พลังงานนิวเคลียร์อยู่เคียงคู่กับมนุษยชาติและถูกพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งมาโดยตลอด เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีทั้งแบบที่ใช้ในการทำวิจัยเรียกว่า เตาปฏิกรณ์วิจัย (research reactor) และแบบที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเรียกว่า เตาปฏิกรณ์กำลัง (power reactor) โดยเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีส่วนประกอบ ดังภาพที่ 6.9 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 6.9 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์

(1) แกนปฏิกรณ์ (reactor core) เปรียบเสมือนหัวใจของเตาปฏิกรณ์ เพราะมีแท่งเชื้อเพลิง (fuel rod) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนที่ถูกยิงเข้ามา โดยแท่งเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะทำจากไอโซโทปของธาตุยูเรเนียม U-235 หรือ U-238 ร่วมกับ U-235 (โดยบรรจุยูเรเนียมในกล่องอลูมิเนียม) เชื้อเพลิงชนิดอื่น คือ Pu-239 สำหรับเชื้อเพลิง U นั้น พบว่าในธรรมชาติจะเป็นไอโซโทป U-238 99.28 % ผสมกับ U-235 0.72 % ดังนั้น การจะใช้ U-235 จะต้องผ่านกรรมวิธีที่จะเพิ่มความเข้มข้นของ U-235 จากสารตั้งต้นด้วย

(2) สารหน่วง (moderator) ทำหน้าที่เป็นตัวลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนให้เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ โดยให้ชนกับสารหน่วงเพื่อถ่ายเทพลังงาน โดยสารหน่วงที่นิยมใช้มักจะเป็นวัสดุที่มีมวลต่ำ เช่น น้ำ หรือแกรไฟต์ โดยสมบัติของตัวลดความเร็วต้องไม่ดูดนิวตรอนเลยและมีน้ำหนักใกล้เคียงนิวตรอน

(3) แท่งควบคุมปฏิกิริยา (control rod) ทำหน้าที่ควบคุมปฏิกิริยาฟิชชันของเชื้อเพลิงปริมาณให้เกิดมากขึ้นหรือน้อยลง ด้วยการควบคุมจำนวนนิวตรอนซึ่งเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา แท่งควบคุมทำจากวัสดุที่จับนิวตรอนได้ดี เช่น ธาตุโบรอน (B) ธาตุแคดเมียม (Cd) และไอเดียม โดยจัดเรียงแท่งควบคุมให้กระจายอยู่กับแท่งเชื้อเพลิง

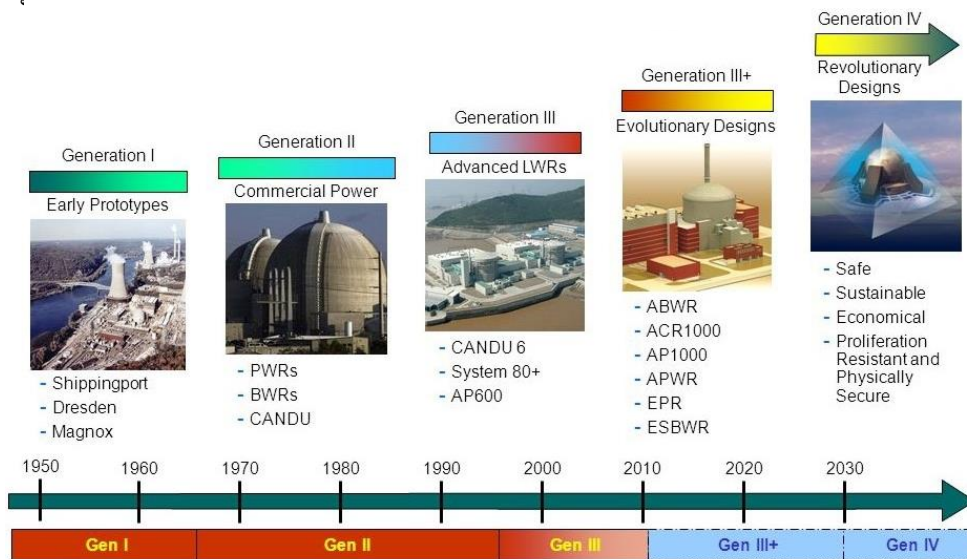
(4) ตัวระบายความร้อน (coolant) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชันไปยังระบบผลิตไอน้ำ และคอยป้องกันไม่ให้แท่งเชื้อเพลิงเกิดการหลอมเหลว ถ้าใช้น้ำหล่อเย็นจะได้ไอน้ำร้อนที่สามารถนำไปใช้หมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ สารหล่อเย็นที่นิยมใช้มีทั้งน้ำธรรมดา น้ำมวลหนัก (D₂O) โซเดียมเหลว แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และฮีเลียม

(5) ส่วนคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำบังรังสี ป้องกันกัมมันตภาพรังสี (shielding) ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน ทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก และคอนกรีต โดยทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้มีอนุภาคหรือรังสี ชนิดใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกสู่ภายนอก

ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้จะอยู่ในถังทนความดัน (vessel) ซึ่งอยู่ภายในอาคารคลุมปฏิกรณ์ (containment) อีกทีหนึ่ง เมื่อเตาปฏิกรณ์ถูกประกอบเข้ากับระบบผลิตไอน้ำ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า และระบบหล่อเย็น ทั้งหมดนี้จะถูกเรียกว่า โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ตั้งแต่อดีตได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายรุ่นของการพัฒนา ดังภาพที่ 6.10 ดังนี้

- เครื่องปฏิกรณ์รุ่นที่ 1 พัฒนาขึ้นในช่วงปี 1950-1960 โดยยังมีบางเครื่องที่ยังเดินเครื่องอยู่ในปัจจุบัน เครื่องปฏิกรณ์รุ่นนี้เกือบทั้งหมดใช้เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติและใช้แกรไฟต์เป็นสารหน่วง
- เครื่องปฏิกรณ์รุ่นที่ 2 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่แสดงถึงยุคการขยายตัวทางนิวเคลียร์ของสหรัฐอเมริกา และส่วนใหญ่ยังเดินเครื่องอยู่ในปัจจุบัน เชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนมากเป็น enriched uranium โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นและสารหน่วง
- เครื่องปฏิกรณ์รุ่นที่ 3 เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบก้ำวหน้า โดย 3 เครื่องแรกอยู่ในญี่ปุ่น ส่วนของประเทศอื่นยังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง หรือรอการเดินเครื่อง มีการพัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์รุ่นที่ 2 โดยเพิ่มระบบความปลอดภัยให้สูงขึ้น
- เครื่องปฏิกรณ์รุ่นที่ 4 ยังอยู่ในระยะของการออกแบบและยังไม่มีเครื่องเดินเครื่อง โดยจะหยุดการใช้เชื้อเพลิงใหม่ แต่จะนำ actinide ที่มีอายุยาวนานจากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้วกลับมาใช้ ซึ่งจะทำให้ผลิตฟิชชัน จะมีแต่เพียงกากนิวเคลียร์รังสีสูงที่มีอายุสั้น เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ส่วนใหญ่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นิวตรอนเร็ว (fast neutron reactors)

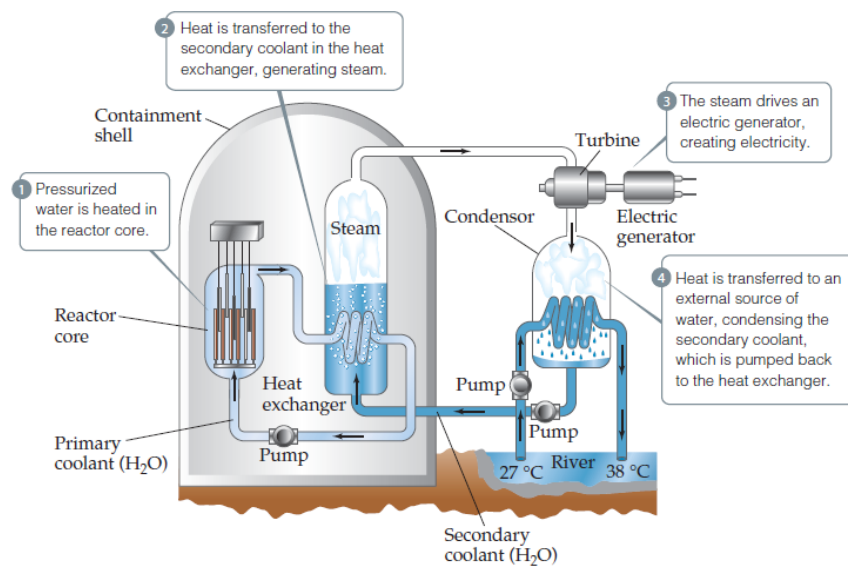


ภาพที่ 6.10 แนวทางการพัฒนาเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในแต่ละยุค

2) การใช้พลังงานนิวเคลียร์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

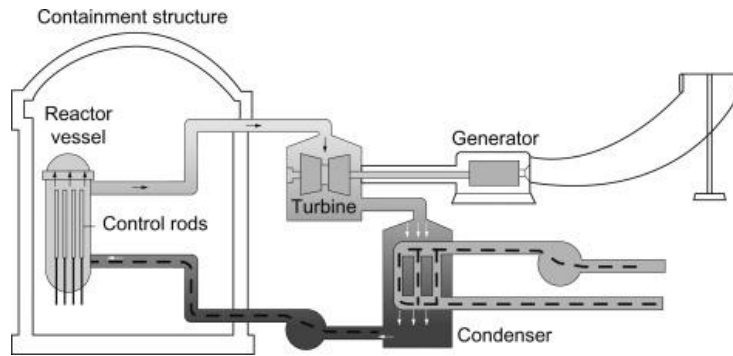
พลังงานนิวเคลียร์ที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้ามาจากปฏิกิริยาฟิชชัน เพราะควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาฟิวชัน ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยสามารถควบคุมปฏิกิริยาและเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากฟิชชันที่มีปริมาณมหาศาลไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบ่งเป็นประเภท ได้ดังนี้

1) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง (pressurized water reactor; PWR) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีการใช้งานมากที่สุด เริ่มแรกเป็นการออกแบบสำหรับใช้ในเรือดำน้ำ โดยใช้น้ำธรรมดาเป็นทั้งสารหล่อเย็นและสารหล่อเย็น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ PWR ใช้แท่งเชื้อเพลิงประมาณ 200-300 แท่งต่อหนึ่งมัด จัดเรียงในแนวตั้งอยู่ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ จุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้คือ การมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายใต้ความดันสูง (150 เท่าของความดันบรรยากาศ) น้ำจึงจะไม่เดือด ไหลผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์เป็นวงจรแรก และทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นด้วย และมีระบบระบายความร้อนวงจรที่สอง มีความดันต่ำกว่าจึงทำให้น้ำเดือด และทำให้ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นส่วนผลิตไอน้ำ (steam generator) ไอน้ำจะไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นจะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำ เพื่อส่งกลับเข้าสู่ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบแรก (ภาพที่ 6.11)



ภาพที่ 6.11 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใช้น้ำความดันสูง. ที่มาจาก *Chemistry: The Central Science* (p. 926), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

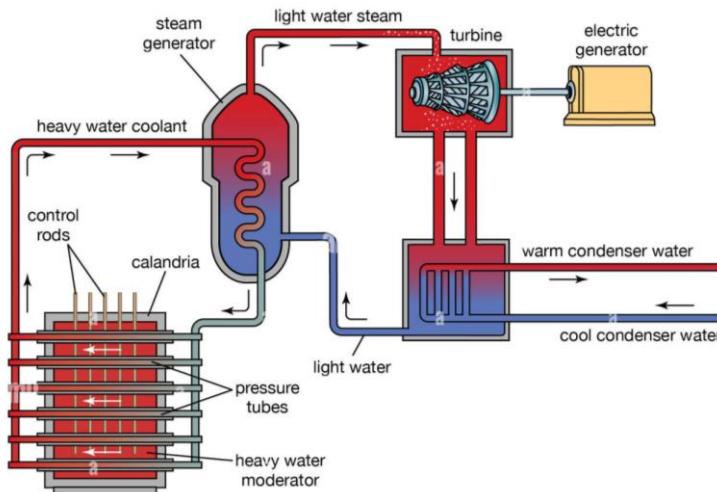
2) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด (boiling water reactor; BWR) การออกแบบที่คล้ายกับ PWR ในหลายจุดต่างกันที่ระบบหล่อเย็นมีระบบเดียว ซึ่งใช้น้ำที่มีความดันต่ำกว่า โดยมีความดันประมาณ 75 เท่าของความดันบรรยากาศ ทำให้มีสภาพเป็นน้ำเดือด โดยมีอุณหภูมิประมาณ 285°C เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์ ขณะที่เดินเครื่องอยู่ เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะมีน้ำอยู่ในสถานะของไอน้ำอยู่เหนือแกนเครื่องปฏิกรณ์ ประมาณ 12-15% เนื่องจากการห้วงนิวตรอนของไอน้ำน้อยกว่าน้ำ จึงทำให้ BWR มีประสิทธิภาพน้อยกว่า PWR เนื่องจากน้ำที่อยู่รอบแกนเครื่องปฏิกรณ์มีการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีอยู่ ดังนั้นบริเวณกังหันจึงต้องมีระบบป้องกันรังสีและต้องมีการรักษาความปลอดภัยทางรังสี



ภาพที่ 6.12 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบน้ำเดือด
(ที่มาภาพ : <https://www.linquip.com/blog/boiling-water-reactor>)

โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบน้ำเดือดรุ่นใหม่ คือ advanced boiling water reactor (ABWR) เพื่อเพิ่มความปลอดภัย โดยมีหลักการพัฒนาที่ให้ความสูงของอาคารเครื่องปฏิกรณ์ให้ต่ำลง เพื่อให้มีการทรงตัวที่ดีขึ้นในการป้องกันแผ่นดินไหว ก่อสร้างผนังอาคารเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในด้วยคอนกรีตบุ แผ่นเหล็กเป็นเนื้อเดียวกันทั้งอาคารแทนการแยกส่วน

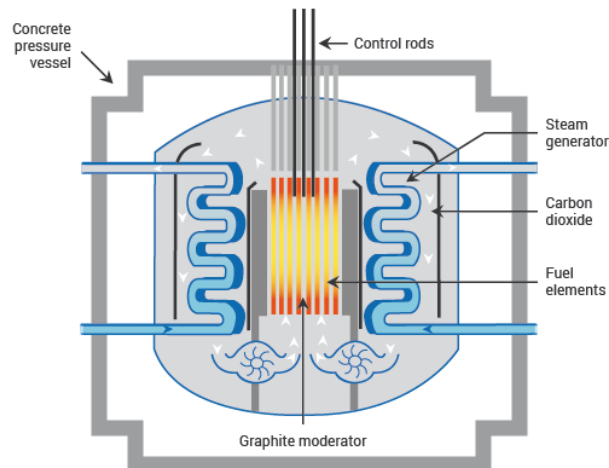
3) โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบใช้น้ำมวลหนัก (pressurized heavy water reactor; PHWR) หรือ Canadian uranium deuterium (CANDU) มีเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ UO_2 ให้ความร้อนโดยมีน้ำมวลหนัก (deuterium; D_2O) ภายใต้ความดันที่สูงกว่าความดันอิมตัว เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมวลหนักเดือดเป็นตัวนำความร้อนไปถ่ายให้กับเครื่องผลิตไฟฟ้าจากไอน้ำ (steam generator) เช่นเดียวกับระบบ PWR ความแตกต่างโดยที่เครื่องปฏิกรณ์วางในแนวนอน ซึ่งเป็นข้อดีของ CANDU ที่ง่ายต่อการเปลี่ยนเชื้อเพลิงโดยไม่ต้องหยุดเดินเครื่อง แหล่งพลังงานนิวเคลียร์ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่มาจาก U นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น Th-232 และ Pu-239 เป็นต้น



ภาพที่ 6.13 โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบใช้น้ำมวลหนัก

4) เครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แก๊ส (advanced gas-cooled reactor; AGR) เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ เป็นเครื่องปฏิกรณ์ใช้แก๊สรุ่นที่สองของอังกฤษ ซึ่งใช้แกรไฟต์เป็นสารหน่วงและใช้ CO_2 เป็นสารหล่อเย็น เชื้อเพลิงเป็นเม็ดยูเรเนียมออกไซด์ 2.5-3.5% อยู่ในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)

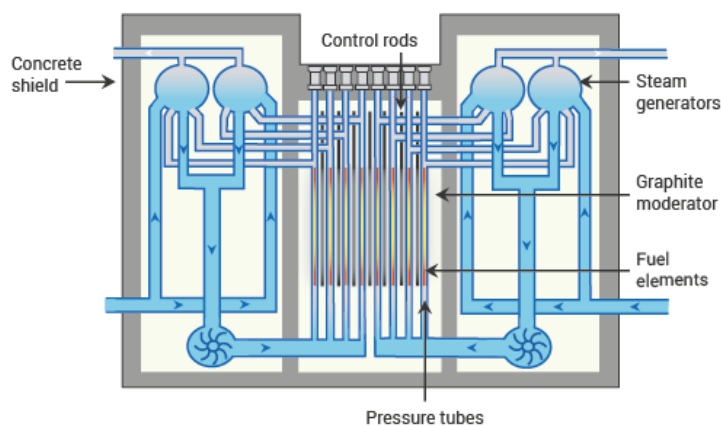
คาร์บอนไดออกไซด์ที่หมุนเวียนผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิประมาณ 650°C ซึ่งจะถูกส่งไปยังส่วนผลิตไอน้ำภายนอกแกนเครื่องปฏิกรณ์ แต่ยังคงอยู่ภายในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ pressure vessel แท่งควบคุมจะส่งเข้าไปในสารหล่อเย็น ส่วนระบบดับเครื่องระบบที่สอง ใช้การส่งไนโตรเจนเข้าไปในสารหล่อเย็น เครื่องปฏิกรณ์แบบ AGR พัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์ Magnox ซึ่งใช้แกรไฟต์ในการหล่อเย็นและใช้ CO_2 เป็นสารหล่อเย็นเช่นกัน เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ยังมีการใช้งานอยู่หลายเครื่องในอังกฤษ โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติในรูปของโลหะ



ภาพที่ 6.14 เครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แก๊ส

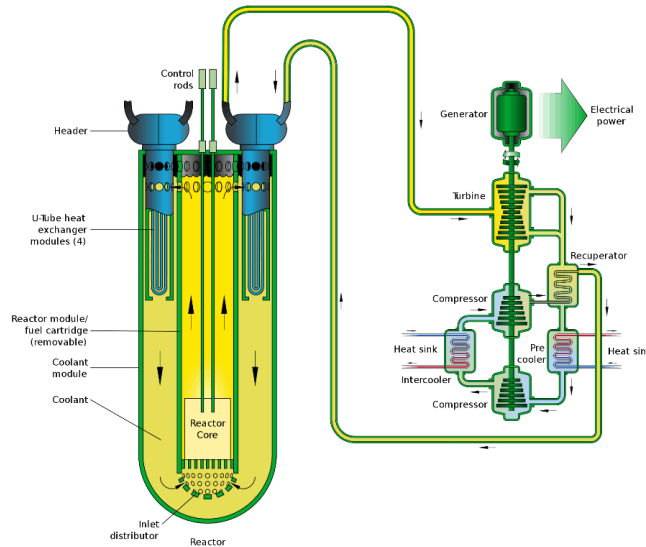
5) เครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบาและแกรไฟต์เป็นสารหล่อเย็น (Light water graphite-moderated reactor; LWGR) เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ออกแบบโดยสหภาพโซเวียต ในช่วง ค.ศ. 1964-1966 ซึ่งพัฒนามาจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตพลูโตเนียม ใช้ pressure tube แนวตั้งแบบยาว (7 เมตร) ใช้แกรไฟต์เป็น moderator และใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น โดยทำให้เดือดเมื่อผ่านแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 290°C ซึ่งใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ BWR ใช้เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมออกไซด์แบบ low-enrich ขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงความยาว 3.5 เมตร จากการใช้แกรไฟต์ทำให้เกิดการหน่วงได้ดี จึงสามารถปล่อยให้เกิดการเดือดได้มาก โดยการดูดกลืนนิวตรอนไม่ไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน

A Light Water Graphite-moderated Reactor (LWGR/RBMK)



ภาพที่ 6.15 เครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำมวลเบาและแกรไฟต์เป็นสารหล่อเย็น

6) เครื่องปฏิกรณ์แบบนิวตรอนเร็ว (fast neutron reactors; FNR) เครื่องปฏิกรณ์บางแบบใช้นิวตรอนเร็วโดยไม่ได้ใช้สารหน่วงผลิตไฟฟ้าจากพลูโตเนียมที่เกิดขึ้นจากไอโซโทป U-238 ที่อยู่ในแท่งเชื้อเพลิงหรืออยู่รอบแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะให้พลังงานออกมามากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไป ที่ใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงกว่า 60 เท่า เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ มีค่าก่อสร้างสูง และต้องใช้เวลาในการรอให้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นในแกนเครื่องปฏิกรณ์



ภาพที่ 6.16 เครื่องปฏิกรณ์แบบนิวตรอนเร็ว

3) การใช้ธาตุกัมมันตรังสีในการหาอายุของวัตถุโบราณ

ธาตุกัมมันตรังสีมีปะปนอยู่ในสินแร่ ดิน และทรายตามธรรมชาติ (ปริมาณน้อย) ซึ่งในสมัยโบราณนิยมนำดินและทรายเหล่านี้มาขึ้นรูปและเขียนสีเป็นเครื่องใช้ในการดำรงชีวิตต่าง ๆ ดังนั้นจากความรู้เกี่ยวกับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี สามารถนำมาใช้หาอายุของแร่หรือวัตถุโบราณ เช่น การวิเคราะห์สินแร่ที่มี U-238 เป็นองค์ประกอบ ซึ่ง U-238 มีครึ่งชีวิตประมาณ 4,500 ล้านปี สามารถนำมาใช้คำนวณหาอายุของหินและเปลือกโลกได้ โดยวัดปริมาณรังสีจากพื้นผิวของหินหรือดินในบริเวณสำรวจ จนทำให้เราได้รู้ว่าโลกที่เราอาศัยอยู่มีอายุประมาณ 4,600 ล้านปี

การหาอายุของสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นไม้และกระดูกสัตว์ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจะตรวจสอบด้วยการวัดปริมาณ C-14 ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติมี C-14 อยู่ในปริมาณเล็กน้อย เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต สัตว์กินพืชจะได้รับสารประกอบที่มี C-14 ต่อไป ซึ่งโดยปกติ C-14 ในสิ่งมีชีวิตจะสลายตัวไปเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันก็มีการรับ C-14 เข้ามาเพิ่ม กัมมันตภาพรังสีของ C-14 ของสิ่งมีชีวิตในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่จะมีค่า 15.3 ครั้งของการสลายตัวต่อนาที (disintegration per minute; dpm) ต่อกรัม หมายความว่า C-14 1 กรัม มีกัมมันตภาพ 15.3 dpm เมื่อสิ่งมีชีวิตนั้นตาย จะไม่ได้รับ C-14 เข้ามาเพิ่ม และ C-14 ที่เหลืออยู่ในซากสิ่งมีชีวิตนั้นจะสลายตัวตามเวลา ทำให้อัตราส่วนระหว่าง C-14/C-12 ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อคำนวณโดยอาศัยครึ่งชีวิตของการสลายตัวของ C-14 มีค่า 5,770 ปี จะสามารถหาเวลาตั้งแต่สิ่งมีชีวิตนั้นตายลงได้

4) การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านอาหาร

การฉายรังสีร่วมกับกรรมวิธีในการถนอมอาหารสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดไว้ได้ การฉายรังสี เช่น การฉายรังสีแกมมาปริมาณต่ำสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และสามารถหยุดยั้งการเจริญเติบโตของพยาธิใบไม้ในเนื้อหมู และฆ่าพยาธิใบไม้ในตับที่มีในปลาดิบ เมื่อให้ปริมาณรังสีสูงขึ้นสามารถฆ่าเชื้อซัลโมเนลลาในแฮม กุ้งแช่แข็ง และในเนื้อไก่ โดยไม่ทำให้คุณลักษณะของอาหารเปลี่ยนแปลง ซึ่งการฉายรังสีดังกล่าวอยู่ภายใต้กฎข้อบังคับขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO) ไม่ให้ฉายรังสีในอาหารในปริมาณมากกว่า 10 กิโลเกรย์ อาหารฉายรังสีต้องติดฉลากด้วยสัญลักษณ์ดอกไม้ฉายรังสี (radura) ดังภาพที่ 6.17 และมีข้อความแสดงว่าผ่านการฉายรังสีแล้ว พร้อมทั้งระบุวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี ชื่อและสถานที่ตั้งของผู้ผลิตอาหารและผู้ฉายรังสี พร้อมวันเดือนปีที่ทำการฉายรังสี เพื่อให้ผู้บริโภคได้ทราบและมีโอกาสเลือกซื้อ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6.17 รังสีด้านอาหาร (ก) สัญลักษณ์ดอกไม้ฉายรังสี และ (ข) ตัวอย่างอาหารที่ฉายรังสี

5) การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านการเกษตร

เมล็ดพืชบางชนิดหลังการฉายรังสีแกมมาสามารถควบคุมการงอกและยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้ นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาปริมาณไม่เกิน 1 กิโลเกรย์ สามารถทำลายไข่แมลงบางชนิด และควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงที่อาจติดมากับเมล็ดพืช เช่น ข้าว ถั่วเขียว ถั่วเหลือง เมล็ดกาแฟ อินทผลัม เมล็ดโกโก้ และมะพร้าวแห้ง เป็นการลดสารพิษตกค้าง (จากการรมด้วยสารเคมี) อย่างไม่ได้ผล การฉายรังสีเพื่อให้แมลงเป็นหมันเป็นการควบคุมและกำจัดแมลง โดยใช้แมลงชนิดเดียวกันควบคุมและจำกัดประชากรด้วยตัวมันเอง ด้วยการฉายรังสีให้แมลงตัวผู้เป็นหมัน แล้วปล่อยให้ไปผสมพันธุ์กับแมลงตัวเมียตามธรรมชาติ ทำให้ตัวเมียที่ได้รับการผสมพันธุ์แล้ว ไม่สามารถให้ลูกหลานต่อไปได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่มีการใช้ยาฆ่าแมลง จึงไม่มีผลกระทบต่อแมลงที่มีประโยชน์ เช่น ผึ้ง

การฉายรังสีในการปรับปรุงพันธุ์พืช โดยรังสีจะทำให้พืชเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม ซึ่งหากมีการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นอย่างดี จะทำให้ได้พืชที่รอดตาย แล้วเก็บเกี่ยวเมล็ดหรือส่วนของพืชไว้ปลูกในรุ่นต่อไป ซึ่งจะทำให้ได้พืชที่มีผลผลิตสูง ทนโรคและแมลงศัตรูพืช มีคุณค่าทางโภชนาการหรือมีรสชาติดีขึ้น โดยปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืช คือปริมาณรังสีที่ใช้พืชตายร้อยละ 30-50 เช่น ปริมาณรังสีที่ใช้กับถั่วเขียวควรอยู่ในช่วง 400-750 เกรย์ ถั่วเหลือง 100-200 เกรย์ และ ข้าวโพด 150-300 เกรย์

การใช้ความรู้ด้านไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุ N, P, K, Mg, และ S ซึ่งเป็น ธาตุอาหารจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชมาตรวจสอบและติดตามการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหาร กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช ทำให้ทราบความสัมพันธ์ในการเจริญเติบโตและหน้าที่ของธาตุอาหารนั้น ๆ หลังการดูดซึมน้ำในต้นพืช อีกทั้งยังใช้ศึกษากระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช ศึกษาการเปลี่ยนแปลงและปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในดิน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน เป็นต้น

6) การใช้ประโยชน์ของรังสีด้านการแพทย์

ธาตุกัมมันตรังสีบางชนิดมีส่วนช่วยในการตรวจและวินิจฉัยโรค โดยให้ผู้ป่วยรับสารกัมมันตรังสีปริมาณไม่สูงมากนักไว้ในร่างกาย โดยการดื่มน้ำหรือฉีด เมื่อเข้าไปอยู่ในร่างกายก็สามารถติดตามได้ว่าธาตุนั้นไปสะสมอยู่ที่ใด การตรวจวัดธาตุกัมมันตรังสีทำนอกร่างกาย จึงต้องเลือกใช้ธาตุกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา เพราะสามารถทะลุผ่านร่างกายออกมาได้ จนสามารถใช้กล้องตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อประมวลผลการทำงานของ อวัยวะที่ธาตุนั้นไปสะสมได้ ในการรักษาโรคนอกจากจะใช้ยา สารเคมี หรือการผ่าตัดแล้ว บางครั้งอาจใช้รังสีร่วมด้วยเช่นการรักษาโรคมะเร็งด้วยการฉายรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ไปที่เซลล์มะเร็งให้เซลล์มะเร็งฝ่อและธาตุกัมมันตรังสียังสามารถใช้รักษาโรคได้ เช่น ต่อมไทรอยด์เป็นพิษ เนื่องจากผลิตฮอร์โมนมากกว่าปกติ คนไข้จะได้รับ I-131 ซึ่งจะไปสะสมที่ต่อมไทรอยด์ และสลายตัวให้รังสีบีตาไปทำลายเซลล์ของต่อมไทรอยด์ ทำให้ผลิตฮอร์โมนลดลงสู่ระดับปกติ นอกจากนี้ยังสามารถใช้รังสีในการทำสภาพที่ปลอดภัยสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น เข็มฉีดยา กระจกฉีดยา ชุดให้เลือด สำลี ภาชนะบรรจุยาและเครื่องมือใช้ในห้องปฏิบัติการ และยังสามารถใช้รังสีเพื่อการปลอดเชื้อในเนื้อเยื่อจากส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เพื่อใช้สำหรับการรักษาบาดแผลและการปลูกถ่ายอวัยวะต่าง ๆ เช่น กระจก เอ็น เยื่อหุ้มสมอง และผิวหนัง

ตารางที่ 6.5 ไอโซโทปของกัมมันตรังสีทางการแพทย์

ไอโซโทป	ครึ่งชีวิต	การประยุกต์ทางการแพทย์
¹¹ F	1.8 ชั่วโมง	Brain imaging, bone scan
²⁴ Na	15 ชั่วโมง	Monitoring blood circulation
³² P	14.3 วัน	Location of ocular, brain, and skin tumors
⁴³ K	22.4 วัน	Myocardial scan
⁴⁷ Ca	4.5 วัน	Study of calcium metabolism
⁵¹ Cr	17.8 วัน	Determine red blood cell volume, spleen imaging, placenta localization
⁶⁰ Co	5.3 ปี	Sterilization of medical equipment, cancer treatment
⁹⁹ Tc	6 วัน	Imaging of various organs, bones, placenta location
¹²⁵ I	60 วัน	Study of pancreatic function, thyroid imaging, liver function
¹³¹ I	8 วัน	Brain imaging, liver function, thyroid activity

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก *Chemistry* (p. 892), by J. Overby & R. Chang, 2022, McGraw-Hill.

สรุปท้ายบทเรียน

เคมีนิวเคลียร์เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของอะตอม ทั้งใน ส่วนของการปลดปล่อยพลังงานออกมา เรียกว่า พลังงานนิวเคลียร์ และการแปรสภาพของนิวเคลียส จากอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งไปเป็นอะตอมของธาตุอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของอะตอม เรียกว่า นิวไคลด์ คือประกอบด้วยอนุภาคโปรตอน และนิวตรอน โดยมีพลังงานยึดเหนี่ยวดึงดูดอนุภาคทั้งหมดไว้ในนิวเคลียส นิวไคลด์ที่ไม่เสถียรคือมี สัดส่วนระหว่างโปรตอนและนิวตรอนมากหรือน้อยเกินไป จะสามารถปลดปล่อยรังสีออกมาได้ เช่น รังสี แอลฟา รังสีบีตา นิวตรอน และรังสีแกมมา พร้อมกับเปลี่ยนไปเป็นนิวไคลด์ของธาตุขนาดเล็กที่เสถียร มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งในธรรมชาติมีกลุ่มธาตุกัมมันตรังสีที่มีการ ลดลงของเลขมวลเป็นอนุกรมยูเรเนียม อนุกรม ทอเรียม และอนุกรมแอกทิเนียม ที่เริ่มต้นด้วยธาตุ U-238, Th-232 , และ U-235 ตามลำดับ นิวตรอนซึ่งมักจะเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยายังสามารถวิ่งชน นิวไคลด์กัมมันตรังสี ทำให้ปฏิกิริยาฟิชชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง จึงเรียกว่าปฏิกิริยาลูกโซ่ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่นิวเคลียสได้ด้วยการหลอมรวมนิวไคลด์กัมมันตรังสีขนาดเล็กเป็น ธาตุที่มีนิวเคลียสขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยาฟิวชัน ทั้งปฏิกิริยาฟิชชันและฟิวชันเป็นปฏิกิริยาที่คาย พลังงาน โดยจะมีค่าผลรวมของพลังงานยึดเหนี่ยวหลังปฏิกิริยามากกว่าผลรวมของพลังงาน ยึดเหนี่ยว ก่อนปฏิกิริยาเสมอ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ของอนุภาคหรือรังสีที่ เกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า การเกษตร อาหาร การแพทย์ และ อุตสาหกรรม

กิจกรรม

ขั้นตอน	วิธีการ
แนะนำโจทย์ปัญหา (P)	แจกใบกิจกรรม 6.1
ไตร่ตรองทางแก้ไขเฉพาะตน (E)	แต่ละคนบอกวิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา (10 นาที)
ระดมสมองโดยกลุ่ม (T)	ให้รวมกลุ่ม มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่มระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการร่วมแสดงความคิดเห็น (10 นาที)
สื่อสารทางออก (C)	ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย (10 นาที)
ถอดรหัสปรับใช้ (D)	ผู้สอนสรุป ความถูกต้องและความผิดพลาด โดยเพิ่มเติมประเด็นที่เกี่ยวข้องให้สมบูรณ์

แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

1. ปฏิกิริยาฟิชชันของธาตุหนึ่ง ให้มวลรวมของธาตุหลังเกิดปฏิกิริยาลดลง 0.025 amu จงคำนวณหาว่า จะต้องเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกี่ครั้งต่อวินาที จึงจะให้ได้กำลังงาน 931 วัตต์
2. นิวเคลียสของ U-235 92 เกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะให้พลังงาน 200 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ถ้าต้องการกำลัง 8 จิกะวัตต์ จงหาว่าในแต่ละวินาทีจะต้องเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกี่ครั้ง
3. ปฏิกิริยาฟิวชันในดวงอาทิตย์เป็นการเปลี่ยนมวลไฮโดรเจนให้เป็นพลังงาน ถ้าแต่ละวินาที ดวงอาทิตย์แผ่พลังงานออกมา 3.9×10^{26} จูล มวลของดวงอาทิตย์จะลดลงวินาทีละเท่าใด
4. สารกัมมันตรังสีชนิดหนึ่งมีค่าคงที่การสลายตัว 0.077 ต่อปี จะต้องใช้เวลานานเท่าใด จึงจะทำให้สารกัมมันตรังสีชนิดนี้มีมวลลดลงจาก 40 กรัม เหลือเพียง 2.5 กรัม
5. มัมมี่ชาวอียิปต์ที่ขุดค้นพบ เมื่อนำส่วนหนึ่งของร่างกายของมัมมี่ชาวอียิปต์มาเผาจะได้ถ่านหนัก 1.3 กรัม เมื่อนำมาวัดรังสีปรากฏว่านับได้ครั้งในเวลา 40 นาที จงหาว่าชาวอียิปต์คนนี้เสียชีวิตแล้วกี่ปี เมื่อครั้งชีวิตของ C-14 เท่ากับ 5770 ปี
6. แบตเตอรี่ที่อยู่ในนาฬิกาสลายตัวให้อนุภาคบีตาจากแหล่งพลังงานปฐมภูมิ Pm-147 ถ้าครึ่งชีวิตเท่ากับ 2.62 ปี จงคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อัตราการสลายตัวของ แบตเตอรี่ให้อนุภาคบีตาลดลงเหลือร้อยละ 10 ของค่าเริ่มต้น 9. นำคาร์บอนบริสุทธิ์หนัก 100 มิลลิกรัม มาจากถ่านหินพบว่าอัตราการสลายตัวเป็น 0.25 counts/min จงคำนวณหาอายุของถ่านหิน เมื่อครั้งชีวิตของ C-14 6 เท่ากับ 5770 ปี
7. ในกระดูกไดโนเสาร์พบว่ามีกัมมันตภาพของ C-14 เท่ากับ 2.8 dpm/g carbon จงคำนวณหาอายุของไดโนเสาร์ เมื่อครั้งชีวิตของ C-14 เท่ากับ 5770 ปี

เอกสารอ้างอิง

- เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบกำลัง. (ม.ป.ป.). สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย.
<https://www.nst.or.th/article/article493/article493014.html>
- นิวเคลียร์ฟิชชัน. (ม.ป.ป.). สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย.
<https://www.nst.or.th/article/article493/article49302.html>
- รังสีปริมาณและหน่วยวัดรังสี. (ม.ป.ป.). สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย.
<https://www.nst.or.th/article/article493/article493020.html>
- พลังงานนิวเคลียร์. (2016, September 25). สถาบันวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
<http://www.eei-ku.com/wordpress/?p=10603>
- สมาธิ ธรรมศร. (2019, April 19). เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก คลื่นลูกใหม่ของเทคโนโลยีพลังงาน.
 สมาคมฟิสิกส์ไทย. <http://www.thaiphysoc.org/article/93/>
- Amos, J. (2022, February 9). *Major Breakthrough on Nuclear Fusion Energy*.
<https://www.bbc.com/news/science-environment-60312633>
- Bourdon, B. Turner, S., Henderson, G.M. & Lundstrom, C.C. (2003). Introduction to U-series geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 52(1), 1-21.
- Brown, L.S., & Holme, T.A. (2018). *Chemistry for Engineering Students* (4th ed.). Thomson Brook Cole.
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J., Woodward, P.M. & Stoltzfus, M.W. (2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson Education, Inc.
- Ebbing, D.D., & Gammon, S.D. (2017). *General Chemistry* (11th ed.). Cengage Learning.
- Jespersen, N.D., Brady, J.E., & Hyslop, A. (2012). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc
- Nuclear Power Reactors*. (2022, October). <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- Overby, J. & Chang, R., (2022). *Chemistry* (14th ed.). McGraw-Hill.
- Petrucci, R.H., Geoffrey H.F., Madura, J.D. & Bissonnette, C. (2016). *General Chemistry: Principles and Modern Applications* (11th ed.). Pearson.
- Silberberg, M.S. & Amateis, P.G. (2021). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (9th ed.). McGraw-Hill Publishing Company.
- Veerendra. (2020, November 28). *What is Nuclear Energy?*
<https://www.aplustopper.com/nuclear-energy/>
- What is Boiling Water Reactor? Advantages, and Disadvantages*. (2021, August 25).
 Linqip Technews. <https://www.linqip.com/blog/boiling-water-reactor/>

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 14

หน่วยที่ 6 เคมีนิวเคลียร์และเคมีสิ่งแวดล้อม
บทเรียนที่ 6.2 เคมีสิ่งแวดล้อม

จำนวนชั่วโมง 3

จุดประสงค์การสอน (จุดประสงค์ทั่วไป)

1. เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเคมีสิ่งแวดล้อม

ผลการเรียนรู้ (จุดประสงค์เฉพาะ)

1. อธิบายเคมีของบรรยากาศ
2. อธิบายเคมีของน้ำ
3. อธิบายเคมีของดิน

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยาย และอภิปราย
2. กิจกรรมกลุ่มในชั้นเรียน (Work@class)

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. เอกสารคำสอน วิชาเคมี 2
2. เอกสาร powerpoint
3. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=11425
4. <https://www.facebook.com/chemographics>
5. <https://www.slideshare.net/woravith>

การวัดผล

1. ประเมินจากกิจกรรมในชั้นเรียน
2. ประเมินจากกิจกรรมแบบฝึกหัด หรืองานที่มอบหมาย
3. ประเมินจากการสรุปประเด็นสำคัญ หรือการนำเสนอผลของการสืบค้นที่ได้รับมอบหมาย
4. ประเมินจากการสอบย่อยรายหน่วยเรียน

บทเรียนที่ 6.2 เคมีสิ่งแวดล้อม

สิ่งแวดล้อม (environment) หมายถึง สิ่งต่าง ๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพและชีวภาพที่อยู่รอบตัวมนุษย์ซึ่งเกิดขึ้นโดยธรรมชาติและสิ่งที่มีมนุษย์ได้ทำขึ้น กล่าวคือทุกสิ่งทุกอย่างที่อยู่รอบตัวมนุษย์รวมทั้งสิ่งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต สิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและสิ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้น ทั้งสิ่งที่เป็นรูปธรรมและสิ่งที่เป็นนามธรรม มีอิทธิพลเกี่ยวโยงถึงกัน เป็นปัจจัยในการเกื้อกูลซึ่งกันและกัน ผลกระทบจากปัจจัยหนึ่งมีส่วนเสริมสร้างหรือทำลายปัจจัยอื่นอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ เป็นวงจรหรือวัฏจักรที่เกี่ยวข้องกันทั้งระบบ ดังคำกล่าวเปรียบเปรยที่ว่า เต็ดดอกหญ้าสะเทือนถึงดวงดาว

ระบบนิเวศ (ecosystem) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มสิ่งมีชีวิตกับสิ่งแวดล้อมที่อยู่ร่วมกันอย่างเป็นระบบ โดยมีการปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติให้มีความสมดุล โดยกระบวนการที่สำคัญของระบบนิเวศสองประการคือ การไหลของพลังงานที่เป็นการส่งผ่านของพลังงานในองค์ประกอบของระบบนิเวศและการหมุนเวียนของสารเคมี ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์และนำกลับมาใช้ใหม่ของแร่ธาตุภายในระบบนิเวศ

6.2.1 เคมีของอากาศ

1) บรรยากาศ

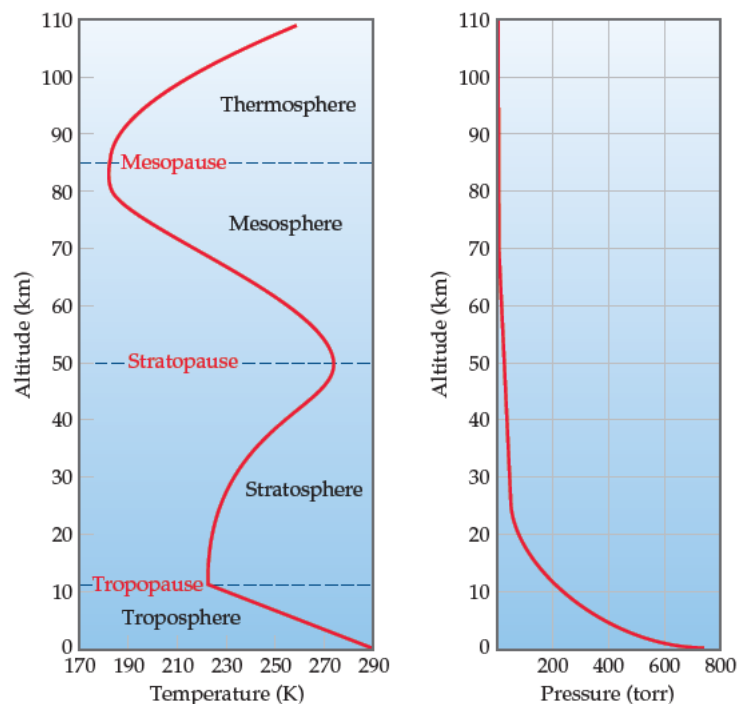
บรรยากาศ (atmosphere) คือชั้นของอากาศ (แก๊ส) ที่ห่อหุ้มโลกตั้งแต่พื้นโลกเอาไว้ด้วยแรงโน้มถ่วง จนกระทั่งระดับความสูงหลายร้อยกิโลเมตรจากผิวโลก โดยอากาศจะมีความหนาแน่นมากในระดับที่อยู่ใกล้ผิวโลก และค่อย ๆ เบาบางลงเรื่อย ๆ เมื่ออยู่ห่างจากพื้นดินมากขึ้น โลกมีแรงดึงดูดต่อบรรยากาศทำให้บรรยากาศมีการเคลื่อนตัวตามการหมุนของโลกไปพร้อมกับพื้นโลก องค์ประกอบของบรรยากาศประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจน (78%) แก๊สออกซิเจน (21%) อาร์กอน (0.9 %) นอกจากนั้นเป็นไอน้ำและแก๊สอื่น ๆ จำนวนเล็กน้อย (ตารางที่ 6.6)

อากาศมีหน้าที่สำคัญหลายอย่าง เช่น เป็นแหล่งแก๊สออกซิเจนที่สิ่งมีชีวิตสำหรับใช้หายใจ เป็นแหล่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการสังเคราะห์แสงของพืช แบคทีเรียบางชนิดตรึงไนโตรเจนจากอากาศให้พืชใช้เป็นสารอาหาร ไอน้ำจากมหาสมุทรควบแน่นในบรรยากาศเป็นฝนตกกลับคืนสู่โลก นอกจากนี้บรรยากาศยังทำหน้าที่ปกป้องอันตรายจากรังสีและวัตถุต่าง ๆ จากนอกโลก และยังช่วยรักษาอุณหภูมิของโลกให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต นักวิทยาศาสตร์แบ่งโครงสร้างของบรรยากาศตามแนวตั้ง (ตั้งฉากกับผิวโลก) ออกเป็นชั้น ๆ เรียกว่า ชั้นบรรยากาศ ในการศึกษาด้านอุตุนิยมวิทยามีการแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความสูง ประกอบด้วยชั้นโทรโปสเฟียร์ (troposphere) ชั้นสตราโตสเฟียร์ (stratosphere) ชั้นมีโซสเฟียร์ (mesosphere) และชั้นเทอร์โมสเฟียร์ (thermosphere) ดังภาพที่ 6.18

ตารางที่ 6.6 องค์ประกอบของบรรยากาศในศตวรรษที่ 21

องค์ประกอบ	ปริมาณ (% โดยปริมาตร)
ไนโตรเจน (N ₂)	78.0818
ออกซิเจน (O ₂)	20.9435 (20.9406)
อาร์กอน (Ar)	0.9332
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.0385 (0.0414)
นีออน (Ne)	0.001818
ฮีเลียม (He)	0.000524
มีเทน (CH ₄)	0.00015
คริปทอน (Kr)	0.000114
ไฮโดรเจน (H ₂)	0.00005
ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)	0.00003
ซีนอน (Xe)	0.0000087
แก๊สอื่น ๆ (CO, O ₃ , SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , และ H ₂ O)	0.0003053

หมายเหตุ. จาก *Composition of the Earth's Atmosphere. Encyclopedia of Geology* (p. 187-197), by D.L. Pinti, 2021, Academic Press.



ภาพที่ 6.18 การแบ่งชั้นบรรยากาศตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกตามแนวตั้ง. ที่มาจก *Chemistry: The Central Science* (p. 768), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

(1) ชั้นโทรโปสเฟียร์

ชั้นโทรโปสเฟียร์เป็นบรรยากาศชั้นล่างสุดที่ติดกับผิวโลก มีความสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 10-15 km จากผิวโลก ลักษณะของบรรยากาศชั้นนี้จะมีมวลอากาศอยู่หนาแน่นมากที่สุดถึง 80% ของทั้งหมด กระแสอากาศมีการคลุกเคล้าทั้งในแนวตั้งและแนวนอนตลอดเวลา ทำให้บรรยากาศ

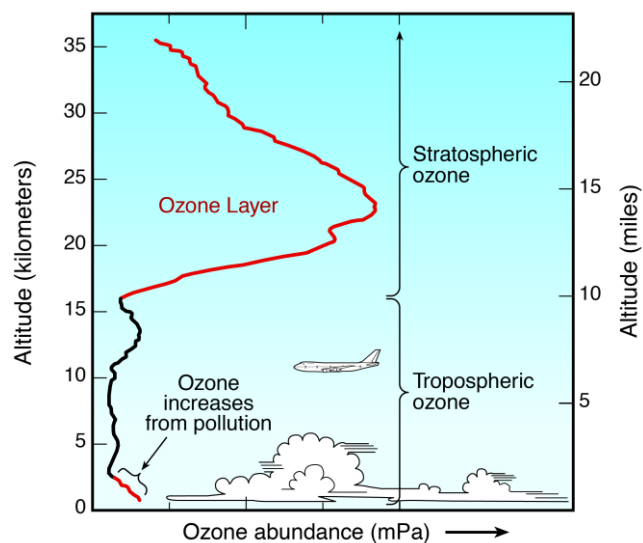
ชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงของลมฟ้าอากาศ เนื่องจากมีไอน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิของอากาศในชั้นนี้จะลดลงตามความสูง โดยทุก ๆ ความสูง 1 km จะมีอุณหภูมิลดลงประมาณ 6.5°C จนกระทั่งถึงระยะสูงประมาณ 12 km อุณหภูมิจะคงที่ประมาณ -60°C สาเหตุที่อุณหภูมิลดลงตามความสูงเนื่องจากอากาศและละอองน้ำที่มีอยู่มากบริเวณผิวโลกดูดกลืนคลื่นแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ จากดวงอาทิตย์ ทำให้บริเวณผิวโลกอบอุ่น และอุณหภูมิจึงค่อย ๆ เย็นลงเมื่อสูงขึ้นไป เพราะอากาศและละอองน้ำเบาบางลงตามลำดับ บริเวณรอยต่อระหว่างบนสุดของชั้นโทรโปสเฟียร์และล่างสุดก่อนถึงชั้นสตราโตสเฟียร์ เรียกว่า โทรโปพอส (tropopause) ซึ่งบริเวณนี้อุณหภูมิจึงคงที่

เนื่องจากชั้นโทรโปสเฟียร์มีแก๊สเรือนกระจก เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน อยู่ประมาณ 1% ทำให้โลกมีความอบอุ่น กลางวันและกลางคืนมีอุณหภูมิไม่แตกต่างกันเกินไป ทำให้เกิดวัฏจักรน้ำ น้ำบนพื้นผิวโลกจึงมีครบทั้งสามสถานะ นอกจากนั้นแล้วบรรยากาศโลกยังโปร่งใสต่อคลื่นไมโครเวฟและคลื่นวิทยุบางความถี่ มนุษย์สามารถประโยชน์คลื่นทั้งสองชนิดในการติดต่อสื่อสาร

(2) ชั้นสตราโตสเฟียร์

ชั้นสตราโตสเฟียร์เป็นชั้นที่อยู่ถัดขึ้นไปจากชั้นโทรโปสเฟียร์ มวลอากาศในชั้นนี้มีร้อยละ 19.9 ของมวลอากาศทั้งหมด และเหนือระดับโทรโปพอสขึ้นไป อุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 2°C ต่อ 1 km จนกระทั่งประมาณ 0 K เนื่องจากบรรยากาศชั้นนี้มีโอโซนหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 90 ของโอโซนทั้งหมด (Wuebbles, 2022) ที่เกิดจากแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศชั้นนี้ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ยูวี) จากดวงอาทิตย์ แยกตัวเป็นออกซิเจนโมเลกุลเดี่ยว (O) แล้วรวมตัวกับออกซิเจนโมเลกุลคู่ (O_2) กลายเป็นแก๊สโอโซน (O_3) ซึ่งปริมาณโอโซนมีมากที่สุดในช่วงความสูง 15-30 km บริเวณรอยต่อของชั้นสตราโตสเฟียร์และมีโซสเฟียร์ เรียกว่า สตราโตพอส (stratopause)

ชั้นสตราโตสเฟียร์เป็นชั้นที่มีโอโซนทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรดจากดวงอาทิตย์ สามารถกรองแสงอัลตราไวโอเล็ตให้ผ่านเข้าสู่ชั้นโทรโปสเฟียร์ได้น้อยลง จึงเป็นการป้องกันสิ่งมีชีวิตไม่ได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตมากเกินไป



ภาพที่ 6.19 ปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศ

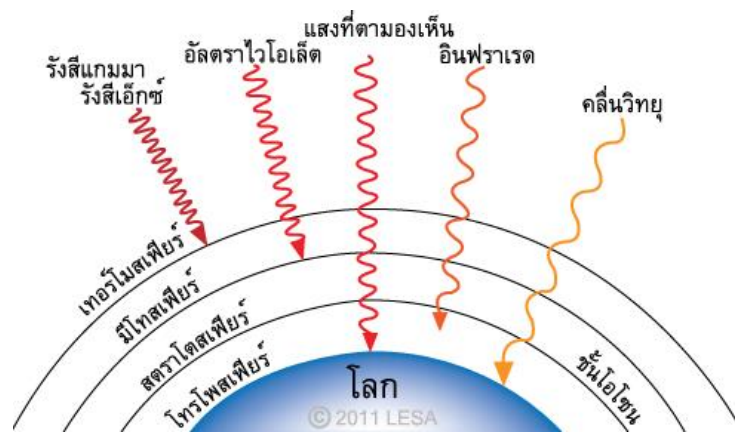
(3) ชั้นมีโซสเฟียร์

เหนือบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ขึ้นไป อุณหภูมิลดต่ำลงอีกครั้งจนเกือบถึง -90°C ที่ระยะสูงประมาณ 80 กิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากห่างจากแหล่งความร้อนในชั้นโอโซนออกไป มวลอากาศในชั้นมีโซสเฟียร์นี้มีไม่ถึงร้อยละ 0.1 ของมวลอากาศทั้งหมด ในชั้นนี้จะเริ่มพบไอออนของแก๊สชนิดต่าง ๆ เช่นแก๊ส O และ NO เป็นต้น บริเวณรอยต่อของชั้นมีโซสเฟียร์และเทอร์โมสเฟียร์ เรียกว่า มีโซพอส (mesopause) บรรยากาศชั้นกลางมีความหนาแน่นของอากาศพอที่จะสร้างแรงเสียดทานให้กับอุกกาบาตที่ตกลงสู่โลก จนเกิดการลุกไหม้ทำให้เรามองเห็นเป็นดาวตก

(4) ชั้นเทอร์โมสเฟียร์

เป็นชั้นบรรยากาศนอกสุด เหนือระดับความสูง 80 km ขึ้นไป อุณหภูมิกลับสูงขึ้นอีก ที่ระดับความสูง 200 km จากผิวโลกจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 500°C และเมื่อสูงขึ้นไปถึง 700-800 km จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C เนื่องจากมวลอากาศในชั้นเทอร์โมสเฟียร์จะอยู่ในสถานะพลาสมา (plasma) ซึ่งเกิดจากอะตอมไนโตรเจนและออกซิเจนในบรรยากาศชั้นบนได้รับรังสีคลื่นสั้น (รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์) จากดวงอาทิตย์จนทำให้อะตอมของแก๊สมีอุณหภูมิสูงมากจนแตกตัวและสูญเสียอิเล็กตรอน กลายเป็นประจุ (ion) จึงเรียกชั้นว่า ไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere)

บรรยากาศชั้นนอกสุดทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันรังสีแกมมาจากอวกาศ และรังสีเอ็กซ์จากดวงอาทิตย์ ไอออนที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศนี้มีสมบัติในการสะท้อนคลื่นวิทยุในช่วงความถี่สูง สามารถเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ดังนั้นชั้นบรรยากาศนี้จึงมีประโยชน์ในด้านการติดต่อสื่อสารระหว่างดาวเทียมและสถานีภาคพื้นดินและการกระจายสัญญาณวิทยุ AM นอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีประจุเหล่านี้พบกับสนามแม่เหล็กโลกที่มีความเข้มสูงที่ขั้วโลกเหนือและใต้เป็นเหตุให้เกิดแสงสว่างหลากสีกระเพื่อมไหวบนท้องฟ้า ที่เรียกว่า แสงเหนือ (aurora borealis) และแสงใต้ (aurora australis)

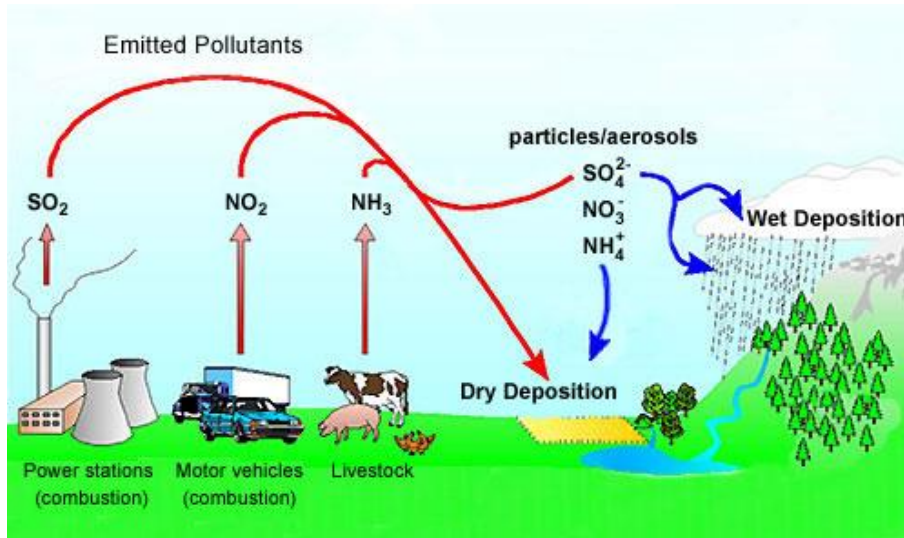


ภาพที่ 6.20 การป้องกันรังสีต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศ. ที่มาจาก <http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/benefits-of-atmosphere/>

ส่วนบรรยากาศที่เหนือชั้นไอโอโนสเฟียร์ขึ้นไป ไม่มีขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างบรรยากาศและอวกาศ เรียกเขตติดต่อระหว่างบรรยากาศและอวกาศที่ระดับความสูง 400-1000 km ว่า เอ็กโซสเฟียร์ (exosphere)

2) มลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศเกิดขึ้นที่ชั้นโทรโปสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศล่างสุดที่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตบนผิวโลกใช้ออกซิเจนดำรงชีวิตและใช้ประโยชน์ ดังนั้น การปนเปื้อนจากสารพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ (ภาพที่ 6.21) โดยสาเหตุสำคัญของมลภาวะทางอากาศ สรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 6.21 แหล่งมลพิษทางอากาศ. ที่มาจาก *Air Pollution: Consequences and Treatments*, by G. Kumar, 2018.

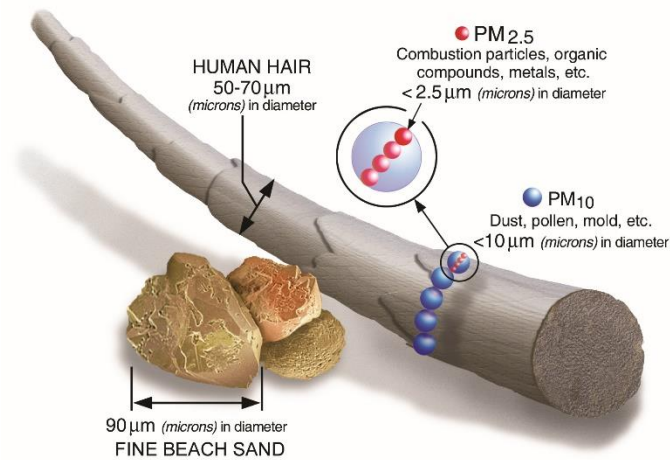
(1) ควัน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ อาทิ น้ำมัน ถ่านหิน ไม้ หญ้าแห้ง บุหรี่ และยาสูบ เป็นต้น โดยมักจะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ควันจึงประกอบด้วยฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น ถ่าน ซี๊ไฉ่ ซึ่งลอยฟุ้งกระจายได้ในบรรยากาศ และแก๊สพิษ เช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นต้น

(2) ฝุ่นละออง (suspended particulate matter) คือ อนุภาคของแข็งขนาดเล็กหรือละอองของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ในบรรยากาศรอบ ๆ ตัวเรา มีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมครอน (เป็นกลุ่มของโมเลกุลที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน) ไปจนถึงฝุ่นที่ขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน (ฝุ่นที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีขนาดตั้งแต่ 50 ไมครอนขึ้นไป) ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานจะเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 10 ไมครอน) เนื่องจากมีความเร็วในการตกตัวต่ำและจะแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม เป็นต้น ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมครอน) อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2-3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะ ขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นปี เราจำแนกประเภทของฝุ่นละอองตามขนาด ดังนี้

2.1) ฝุ่นรวม (total suspended particulate) เป็นฝุ่นขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา

2.2) ฝุ่นหยาบ (course particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5–10 ไมครอน (PM10) มีแหล่งกำเนิดจากการจราจรบนถนนจากการขนส่งวัสดุ การสัญจร และฝุ่นจากกิจกรรมบด

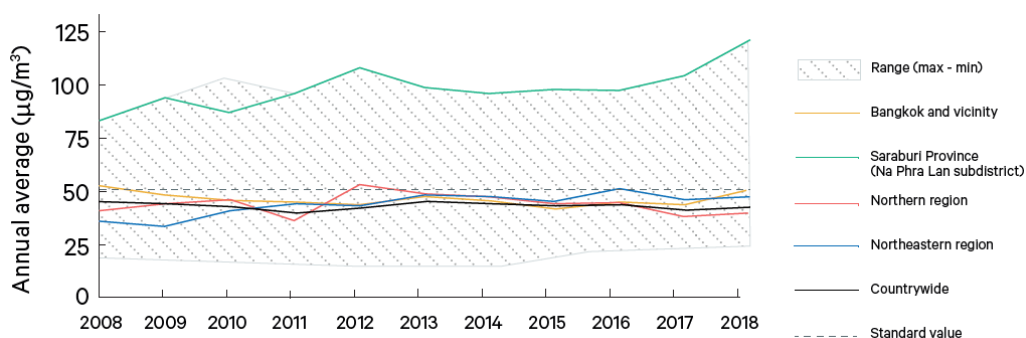
ย่อยหิน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพเนื่องจากสามารถเข้าไปสะสมในระบบทางเดินหายใจ ภาพที่ 6.22 แสดงเปรียบเทียบขนาดฝุ่น PM10 และ PM2.5 กับขนาดเส้นผมมนุษย์



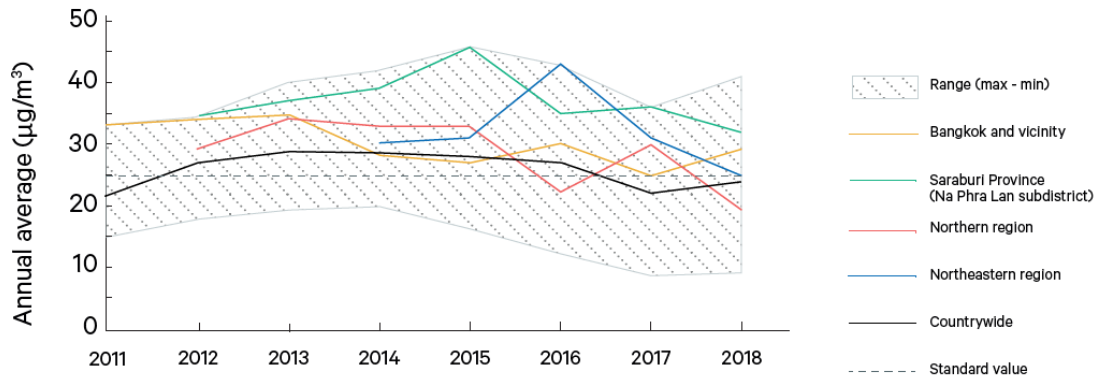
ภาพที่ 6.22 ขนาดฝุ่น PM10 และ PM2.5. (ที่มาภาพ U.S.EPA)

2.3) ฝุ่นละเอียด (fine particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) มีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม ควันที่เกิดจากหุงต้มอาหารโดยใช้ ฟืน นอกจากนี้แก๊ส SO_2 , NO_x และสาร VOC (สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย) จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดเป็นฝุ่นละเอียดได้ โดยฝุ่น PM2.5 สามารถเข้าไปถึงถุงลมในปอด เป็นผลทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจและโรคปอดต่าง ๆ หากได้รับในปริมาณมากหรือเป็นเวลานานจะสะสมในเนื้อเยื่อปอด ทำให้การทำงานของปอดเสื่อมประสิทธิภาพลง ทำให้หอบเหนื่อย อักเสบ มีอาการหอบหืด

กรมควบคุมมลพิษ ติดตามระดับฝุ่น PM10 และ PM2.5 ใน 10 จังหวัด ตั้งแต่ปี 2554-2561 (Nikam, et al., 2021) ดังภาพที่ 6.23 และ 6.24 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าระดับฝุ่น PM2.5 อยู่ในช่วง $9-41 \text{ mg/m}^3$ โดยค่าเฉลี่ยมาตรฐานอยู่ที่ 25 mg/m^3

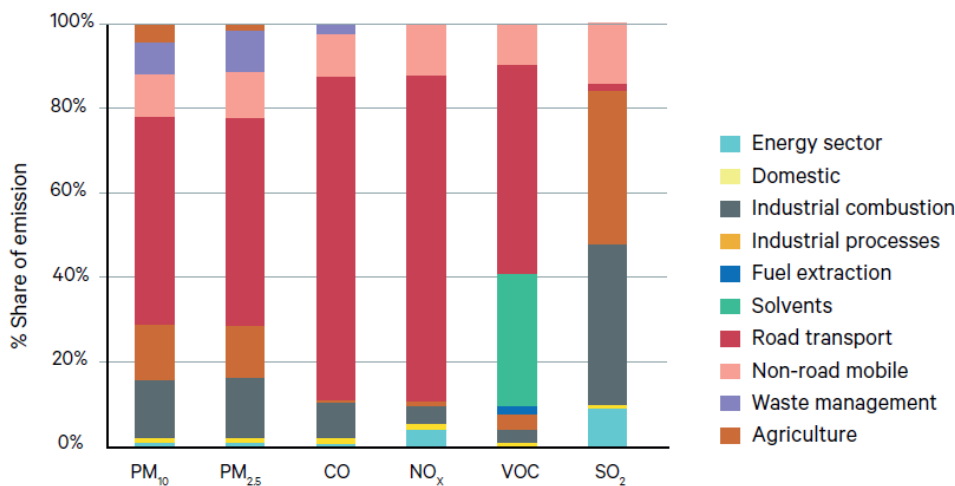


ภาพที่ 6.23 ระดับฝุ่น PM10 ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2561



ภาพที่ 6.24 ระดับฝุ่น PM2.5 ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2561

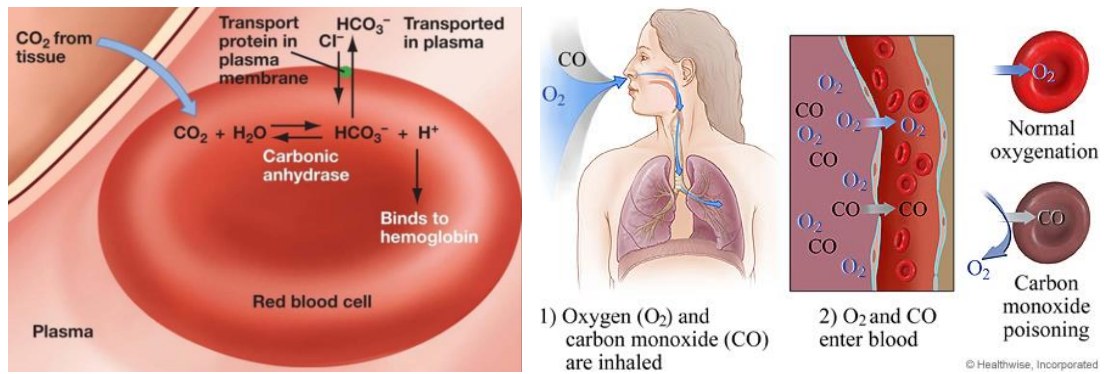
จากรายงานฉบับเดียวกันได้ระบุถึงสาเหตุของมลพิษทางอากาศในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปี พ.ศ.2561 สาเหตุหลักของมลภาวะทางอากาศมาจากการจราจรทางถนน นอกจากเป็นสาเหตุสำคัญของฝุ่นละอองและยังเป็นแหล่งมลพิษของแก๊สพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น (Nikam, et al., 2021)



ภาพที่ 6.25 สาเหตุของมลพิษทางอากาศในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปี พ.ศ. 2561

(3) แก๊สพิษ คือ แก๊สที่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีหลายชนิดดังนี้

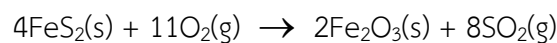
3.1) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดจากการเผาไหม้สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนน้อย ๆ แก๊สชนิดนี้ไม่มีพิษต่อพืช แต่มีพิษต่อมนุษย์และสัตว์อย่างรุนแรง เพราะสารฮีโมโกลบิน ซึ่งเป็นโปรตีนสำคัญที่อยู่ในเม็ดเลือดแดง ทำหน้าที่นำออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์สามารถจับกับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เร็วกว่าออกซิเจนถึง 250 เท่า โดยในเม็ดเลือดแดงจะเกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งจะไปขัดขวางการลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย เพราะเม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับออกซิเจนไว้ได้ตามปกติ ทำให้เกิดอาการเวียนศีรษะ หายใจขัด คลื่นไส้ อาเจียนและอาจเสียชีวิตได้หากได้รับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมาก



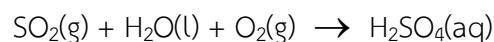
ภาพที่ 6.26 สารฮีโมโกลบินจับกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น ฟอสซิล การเผาถ่าน เต่าเผาไฟไหม้ เครื่องยนต์ สารเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีบางชนิดในบรรยากาศที่เราหายใจอยู่นั้นอาจมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ปริมาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น บรรยากาศปกติอาจจะมีประมาณ 0.1 ppm จนกระทั่งถึง 5 ppm

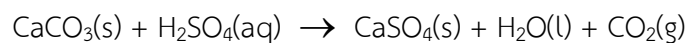
3.2) แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx) เป็นสารประกอบออกไซด์ของกำมะถัน ได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) โดยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกพบได้มากกว่า ซึ่งแก๊สชนิดนี้ไม่มีสี แต่มีกลิ่นกรด เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหินและน้ำมันดีเซล ในกรณีของถ่านหิน กำมะถันจะอยู่ในรูปสารประกอบไพไรต์ (FeS₂) เมื่อถูกเผาในสภาวะมีอากาศจะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนี้



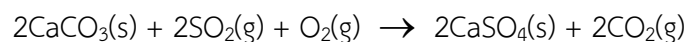
นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี มักจะใช้กรดซัลฟิวริกในการสกัดแร่พร้อม ๆ กับให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 70 องศาเซลเซียสทำให้มีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระเหยออกมาพร้อมกับไอกรด และแพร่กระจายออกสู่บรรยากาศได้ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สัมผัสกับความชื้น (หรือน้ำฝน) และอากาศจะรวมตัวกันกลายเป็นกรดซัลฟิวริก



กรดซัลฟิวริกที่ตกลงมาพร้อมกับน้ำฝนจะมีฤทธิ์กัดกร่อน เรียกว่า ฝนกรด (acid rain) โดยเฉพาะกับอาคารบ้านเรือนที่สร้างมาจากหินอ่อนหรือหินปูน (CaCO₃) จะเกิดปฏิกิริยากับฝนกรด ดังนี้



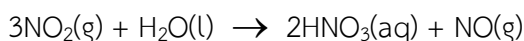
นอกจากนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตได้โดยตรง ดังนี้



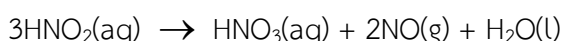
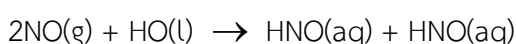
ผลของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อร่างกายมนุษย์ คือจะทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยเรื้อรัง โลหิตจาง เกิดอาการแสบจมูกและคอ เกิดปัญหาต่อระบบทางเดินหายใจ ถ้าได้รับปริมาณมาก ๆ จะทำให้ปอดอักเสบ หลอดลมตีตัน เช่น ชาวบ้านที่อยู่ใกล้เหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ได้รับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทุกวันเป็นเวลานาน จนมีอาการป่วยด้วยโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง นอกจากนี้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังมีผลต่อพืชโดยจะพอกจางสีของใบไม้ จนพืชสังเคราะห์แสงไม่ได้

และตายในที่สุด อีกทั้งยังทำให้อาคารบ้านเรือนผุกร่อนเสียหายและทำให้โบราณสถาน สถาปัตยกรรม และประติมากรรมสลักหินผุกร่อนและเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ

3.3) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เป็นสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เป็น แก๊สสีน้ำตาลแกมเหลืองหรือแดง เมื่อรวมตัวกับความชื้นในอากาศหรือน้ำฝนจะกลายเป็นกรดไนตริก กับแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ ได้ตั้งสมการ



นอกจากนี้กรดไนตริก (HNO₃) ยังสามารถเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กับกรดไนตริก และสลายตัวต่อไป จนได้แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ ดังสมการ



กรดไนตริกและกรดไนตริกเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฝนกรด เมื่อร่างกายมนุษย์ได้รับแก๊ส ไนโตรเจนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เข้าไปจะเกิดการอักเสบจุก แสบคอ อันเนื่องมาจากเกิดกรดไนตริกและกรดไนตริกภายในระบบทางเดินหายใจ ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายเยื่อจุก หลอดลมและปอด

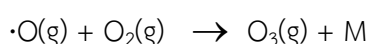
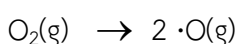
3.4) แก๊สไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ มีเทน (CH₄) บิวเทน (C₄H₁₀) โพรเพน (C₃H₈) และ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ตัวทำละลายอินทรีย์ และสารระเหยจากยางมะ ตอย สารเหล่านี้มาจากการระเหยสู่บรรยากาศโดยตรง และอาจจะมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบไม่ สมบูรณ์ ทำให้มีสารไฮโดรคาร์บอนหลงเหลือออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรคาร์บอนเฮไลด์ เช่น สารในกลุ่มคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluoro carbon; CFC) ซึ่งเป็นสารระเหยง่าย นิยมใช้ เป็นสารทำความเย็นในตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ สารชนิดนี้เมื่อรั่วไหลออกสู่บรรยากาศจะทำลาย โอโซนซึ่งมีมากในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนและปรากฏการณ์เรือนกระจก สารไฮโดรคาร์บอนทุกชนิดมีพิษต่อร่างกาย โดยทำให้ระบบทางเดินหายใจอักเสบ มีอาการแสบจุก แสบคอ เป็นอันตรายต่อเยื่อเยื่อตา และเป็นสารก่อมะเร็ง

3) ปรากฏการณ์ที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ

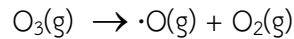
สารพิษต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา นอกจากจะทำให้ชั้นบรรยากาศสกปรก จนเกิดพิษภัย และมีผลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์แล้ว ยังทำให้เกิดปรากฏการณ์ในธรรมชาติทางด้านลบ ซึ่งส่งผล เสียต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ได้อีก ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่

(1) การสูญเสียโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์

โอโซนในชั้นนี้เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนโดยรังสีจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่น 240 nm ได้ออกซิเจนเรดิคัล (·O) ซึ่งเป็นสารที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก จึงทำ ปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลออกซิเจน โดยมีโมเลกุลที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (M) เช่น แก๊สไนโตรเจน ทำหน้าที่ ดูดกลืนพลังงานที่คายออก เพื่อไม่ให้โอโซนแตกตัวกลับไปเป็นเรดิคัลอีก พลังงานส่วนที่ M ไม่ได้ ดูดกลืนจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน และในขณะเดียวกัน M ก็คายความร้อนส่วนที่รับมาสู่สิ่งแวดล้อม ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



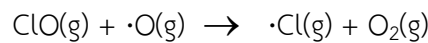
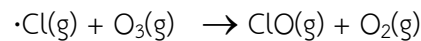
เมื่อโอโซนดูดกลืนรังสี UV (ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200 ถึง 300 nm) แล้วกลายเป็น O กับ O₂ ได้อีก ดังสมการ



การเกิดขึ้นและการสลายตัวของโอโซนตามธรรมชาติเกิดขึ้นอย่างสมดุล โดยรักษาระดับความเข้มข้นของโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ให้คงที่ได้ แต่ในปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา มนุษย์เพิ่งจะได้ตระหนักจากข้อมูลที่ทราบว่าสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เช่น CFCl₃ (ฟรีออน 11), CF₂Cl₂ (ฟรีออน 12), C₂F₃Cl₃ (ฟรีออน 113), และ C₂F₄Cl₂ (ฟรีออน 114) ที่นิยมใช้เป็นสารทำความเย็นในขณะนั้นสามารถทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศได้ ด้วยคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาของสาร CFC เมื่อลอยสู่ชั้นบรรยากาศจะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารใด ๆ จนเมื่อลอยสู่ชั้นสตราโตสเฟียร์ ซึ่งมีแก๊สโอโซนอยู่เป็นจำนวนมาก และได้รับรังสี UV ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 175 ถึง 220 nm จะสลายตัวเป็นเรดิคัลดังสมการ



คลอรีนเรดิคัล ($\cdot\text{Cl}$) เป็นสารที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา จึงเกิดปฏิกิริยาต่อกับโอโซนดังสมการ

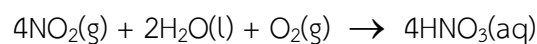
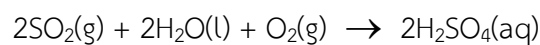


การที่ชั้นโอโซนถูกทำลายจะส่งผลให้รังสี UV ผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่ผิวโลกมากขึ้น มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ จะได้รับรังสี UV เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง เกิดความร้อนสะสมที่ผิวโลก และหากสิ่งมีชีวิตชนิดใดปรับตัวไม่ได้ก็จะสูญพันธุ์ไปในที่สุด

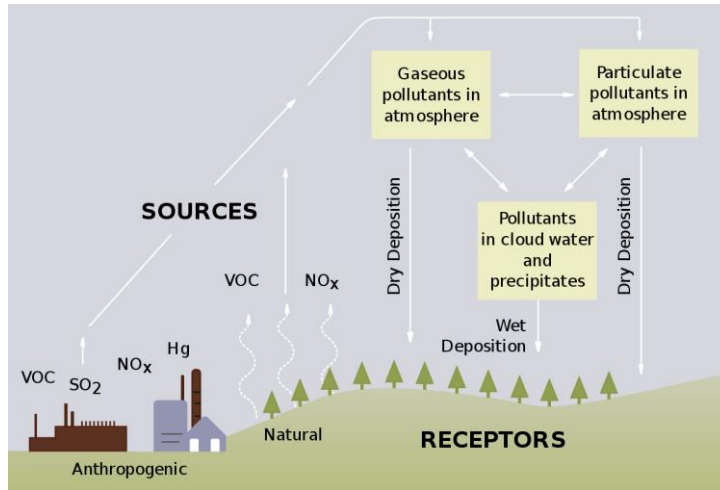
ปัจจุบันนักเคมีได้พยายามสังเคราะห์สารเพื่อนำมาใช้แทนสารในกลุ่ม CFC เช่น สาร CF₃CHCl₂ หรือเรียกว่า HCFC-123 ซึ่งพบว่าการมีไฮโดรเจนในโครงสร้างจะทำให้สารประกอบนี้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศชั้นล่างได้ง่ายขึ้น จึงแพร่ไปไม่ถึงชั้นสตราโตสเฟียร์

(2) ฝนกรด

ฝนกรดเป็นผลมาจากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ แก๊สทั้งสองชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำและสารเคมีอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกดังสมการ และเรียกว่ากรดเหล่านี้ที่ตกลงมาพร้อมกับน้ำฝนว่า ฝนกรด (acid rain)



ฝนกรดจะละลายปุ๋ยในดิน ทำให้พืชเติบโตช้า เมื่อไหลลงแหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำนั้น ๆ ไม่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต หรือแม้แต่ในชุมชนเมือง ฝนกรดจะกัดกร่อนสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ หรืออาจจะจับตัวรวมกับหมอกก่อให้เกิดหมอกควันพิษ (smog) ที่ทำอันตรายกับระบบทางเดินหายใจได้



ภาพที่ 6.27 แหล่งการเกิดฝนกรด



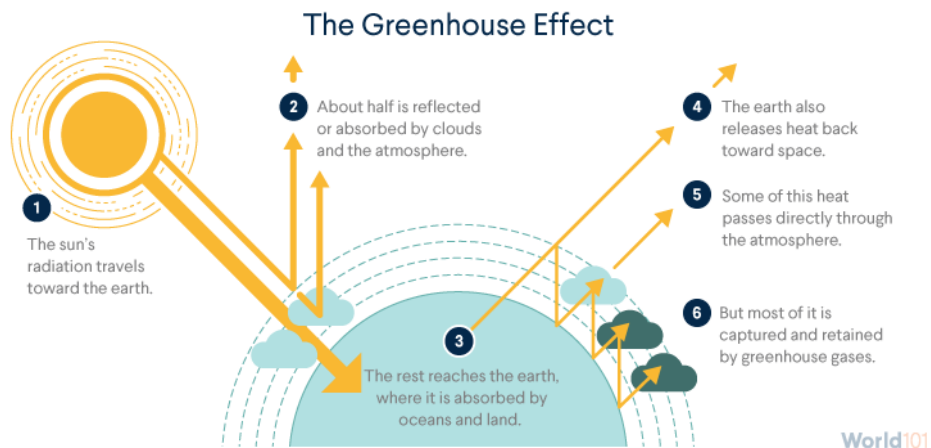
ภาพที่ 6.28 ผลกระทบของกรด

(3) ปรากฏการณ์เรือนกระจก

คำว่า เรือนกระจก (greenhouse) หมายถึง อาณาบริเวณที่ปิดล้อมด้วยกระจก หรือวัสดุอื่นซึ่งมีผลในการเก็บกักความร้อนไว้ภายใน ในประเทศเขตนานานิยมใช้เรือนกระจกในการเพาะปลูกต้นไม้ เพราะพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผ่านเข้าไปภายในได้ แต่ความร้อนที่อยู่ภายในจะถูกเก็บกักโดยกระจกไม่ให้อากาศหรือแก๊สออกสู่ภายนอก ทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในอบอุ่นและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชแตกต่างจากภายนอกที่ยังหนาวเย็น จึงมีการเปรียบเทียบปรากฏการณ์ที่ความร้อนภายในโลกถูกกักเอาไว้ไม่ให้อากาศหรือแก๊สออกสู่ภายนอกโลก เรียกว่า ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ดังภาพที่ 6.29

ปรากฏการณ์ที่โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สบางชนิดที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดได้ดี ที่เรียกว่า แก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) แก๊สไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) แก๊สเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) แก๊สไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF₃) เป็นต้น ในภาวะธรรมชาติ แก๊สเหล่านี้ในบรรยากาศจะดูดซับความร้อนไว้และถ้ามีปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยรักษาอุณหภูมิโลกให้พอเหมาะอบอุ่นสบาย แต่เมื่อใดที่แก๊สเหล่านี้มีปริมาณมากเกินไป

จะส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีการกักเก็บรังสีความร้อนไว้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อนมากขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ เมื่อโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้มีพลังงานสูงขึ้นจะมีการถ่ายเทพลังงานซึ่งกันและกัน ทำให้โมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศโดยรวม เกิดการสั่นและการเคลื่อนไหว จนในที่สุดทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในชั้นบรรยากาศใกล้ผิวโลกและน้ำในมหาสมุทรสูงขึ้น เราเรียกระบบโลกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ว่า ภาวะโลกร้อน (global warming)



ภาพที่ 6.29 ปฏิกิริยาเรือนกระจก

(4) หมอกควันเคมี

หมอกควัน (smog) เป็นลักษณะของมลพิษทางอากาศชนิดหนึ่ง โดยคำว่า หมอก มาจากคำว่า smoke แปลว่า ควัน กับคำว่า ฟ็อก (fog แปลว่า หมอก) ในอดีตหมอกควันเกิดขึ้นมาจากการผสมระหว่างควันไฟกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ถ่านหิน ส่วนหมอกควันในปัจจุบันมักจะมีมาจกควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และควันจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำปฏิกิริยากับแสงแดด จึงเรียกว่า หมอกควันแบบโฟโตเคมี (photochemical smog) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า หมอกควันเคมี หรือ หมอกพิษ สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

(1) หมอกควันแบบซัลฟิวรัส (sulfurous smog) หรือที่เรียกว่า ลอนดอน/คลาสสิก สมีอก (London/Classical smog) คือ กลุ่มของหมอกควันสีเทาที่พบมากที่สุดในเมืองอุตสาหกรรมทั้งหลาย มหานครที่มีสภาพอากาศหนาวเย็นและมีความชื้นสูง เช่น นิวยอร์ก และลอนดอน เป็นหมอกควันที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้ของถ่านหิน หมอกควันแบบซัลฟิวรัสก่อให้เกิดกลุ่มควันที่มีส่วนผสมของทั้งอนุภาค เช่น ฝุ่นละออง ไข่เถ้า เขม่า และก๊าซชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งกลายเป็นอันตรายอย่างยิ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำหรือหมอกในอากาศ เกิดเป็นกรดซัลฟิวริกในสถานะของเหลวที่สามารถกัดกร่อนและสร้างความเสียหายต่อวัตถุต่าง ๆ ได้

(2) หมอกควันแบบโฟโตเคมี หรือที่เรียกว่า หมอกสีน้ำตาล (brown-air smog) คือ กลุ่มของหมอกควันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีแสงแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สในกลุ่มออกไซด์ของไนโตรเจน สารอินทรีย์ระเหย รวมถึงไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ซึ่งเป็นแก๊สจากไอเสียของรถยนต์และ

โรงงานอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยถูกเร่งปฏิกิริยาจากแสงอาทิตย์ นำไปสู่การก่อตัวของโอโซนภาคพื้นดิน ที่เป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งมีชีวิตและสิ่งก่อสร้างทั้งหลาย

หมอกควันเคมีเกิดจากปฏิกิริยาในชั้นบรรยากาศ โดยรังสี UV จากดวงอาทิตย์ ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไนโตรเจนออกไซด์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ซึ่งโมเลกุลแก๊สออกซิเจนจะออกซิไดส์สารต่าง ๆ ในอากาศไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถออกซิไดส์ต่อไปได้อีก จนได้สารประกอบในกลุ่มเปอร์ออกซีอะซิทิลไนเตรต (peroxyacetyl nitrates; PANs) แอลดีไฮด์และคีโตน หมอกพิษ มีส่วนผสมขององค์ประกอบมากมายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีจากควันโรงงานและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและแก๊ส ควันจากท่อไอเสียของรถยนต์ตามท้องถนน หรือแม้แต่ฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงธรรมชาติ

ดังแสดงภาพที่ 6.30 ในสภาวะที่อากาศสามารถเคลื่อนที่ได้ปกติ หมอกควันที่เกิดขึ้นจะลอยตามอากาศไปเคลื่อนออกจากกำเนิด แต่ในวันที่อุณหภูมิบริเวณภาคพื้นดินต่ำกว่าชั้นบรรยากาศด้านบน โดยเฉพาะในฤดูหนาว จะก่อให้เกิดภาวะที่เรียกว่า ชั้นบรรยากาศเกิดแนวผกผัน (inversion layer) หรือ สภาวะอุณหภูมิผกผัน (temperature inversion) ที่ทำให้หมอกควันเหล่านี้ถูกกดทับให้ลอยตัวต่ำ โดยไม่ถูกพัดพาไปตามการเคลื่อนที่ของกระแสลมตามปกติ กลายเป็นการสะสมสารพิษในอากาศที่หนาแน่น เข้มข้น และฟุ้งกระจายอยู่เช่นนั้น



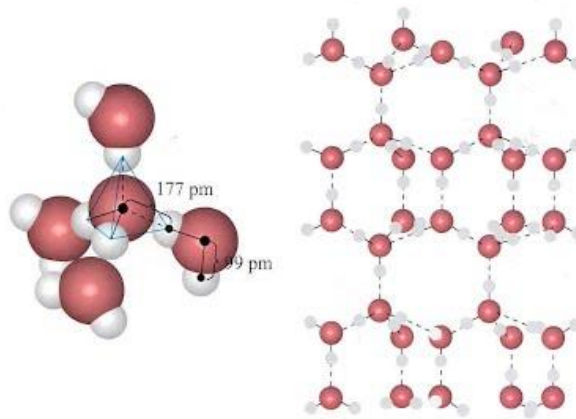
ภาพที่ 6.30 การเกิดหมอกควันเคมี. ที่มาจาก หมอกควันหรือหมอกพิษ (Smog) โดย คัดคนธุ์ ชีววงศ์อรุณ, 2020.

6.2.2 เคมีของน้ำ

น้ำ (water) เป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ มนุษย์ใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค การเกษตร การคมนาคม และกิจกรรมสันทนาการ น้ำมีวัฏจักรหมุนเวียน โดยน้ำจะระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ แล้วควบแน่นและตกลงพื้นโลกในรูปของฝน หิมะ ลูกเห็บ และน้ำค้าง ซึ่งน้ำบนโลกร้อยละ 97 อยู่ในมหาสมุทรและเป็นน้ำเค็ม ร้อยละ 2 เป็นน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก และร้อยละ 1 เป็นน้ำจืด น้ำในธรรมชาติ ได้แก่ น้ำตก น้ำคลอง น้ำบ่อ น้ำบาดาล น้ำทะเล ล้วนมีสิ่งเจือปนมากมาย เช่น สารแขวนลอย และไอออนต่าง ๆ ทำให้น้ำในแต่ละประเภทและแต่ละสถานที่ที่มีสมบัติทางเคมี กายภาพ และชีวภาพแตกต่างกันออกไป

1) สมบัติของน้ำ

จากที่เราทราบกันแล้วว่าน้ำ (H_2O) 1 โมเลกุล ประกอบด้วย ไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ มีระยะห่าง 99 pm และแต่ละโมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (มีระยะห่าง 177 pm) เรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างเตตระฮีดรัล (tetrahedral) ดังภาพที่ 6.31 ทำให้น้ำต้องใช้ที่ว่างมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ดังนั้นเมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งจะมีความหนาแน่นน้อยลง เมื่อเพิ่มความร้อนให้กับน้ำแข็งพันธะไฮโดรเจน จะถูกทำลาย ทำให้น้ำแข็งละลายเป็นของเหลว และเมื่อโครงสร้างผลึกยุบตัวลงน้ำในสถานะของเหลว จึงใช้เนื้อที่น้อยกว่าของแข็ง นี่คือสาเหตุว่าทำไมน้ำแข็งจึงมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ

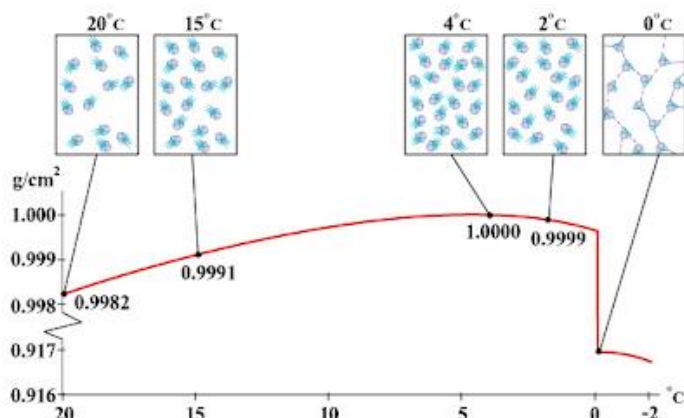


ภาพที่ 6.31 พันธะไฮโดรเจนและพันธะโคเวเลนต์ของโมเลกุลน้ำ

จากการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของเหลว แรงตึงผิวเป็นการแสดงสมบัติของน้ำที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่าหยดน้ำบนพื้นหรือบนใบบัวมีรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายเลนส์นูน หรือเวลาที่เติมน้ำเต็มแก้ว ผิวน้ำจะพูนโค้งสูงเหนือปากแก้วเล็กน้อย

ภายใต้ความกดอากาศ ณ ระดับน้ำทะเลปานกลาง น้ำมีสถานะเป็นของเหลว น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส (ไอน้ำ) เมื่อมีอุณหภูมิสูงถึงจุดเดือดที่อุณหภูมิ 100°C และเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิลดต่ำถึงจุดเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 0°C การเปลี่ยนสถานะของน้ำมีการดูดกลืนหรือการคายความร้อน โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เรียกว่า ความร้อนแฝง (latent heat) ความร้อนแฝงมีหน่วยเป็นแคลอรี (calorie) โดยที่ 1 แคลอรี คือปริมาณความร้อนซึ่งทำให้น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1°C (ดังนั้นหากเราเพิ่มความร้อน 10 แคลอรี ให้กับน้ำ 1 กรัม น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น 10°C)

ที่อุณหภูมิ 0°C น้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ภาพที่ 6.32 น้ำมีความหนาแน่นสูงสุดที่อุณหภูมิ 4°C และมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 0°C น้ำจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 9 โดยเราจะเห็นได้ว่า เมื่อใส่น้ำเต็มแก้วแล้วนำไปแช่ห้องแข็ง น้ำแข็งจะล้นออกนอกแก้วหรือดันให้แก้วแตก ในทำนองเดียวกันเมื่อน้ำในชอกหินแข็งตัว มันจะขยายตัวจนทำให้หินแตกเกิดกระบวนการผุพังของหิน ซึ่งทำให้เกิดตะกอน



ภาพที่ 6.32 ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 6.7 สมบัติกายภาพของน้ำ และน้ำมวลหนัก

Property	H ₂ O	D ₂ O	T ₂ O
Molecular weight	18.015	22.028	22.0312
Melting point (K)	273.0	276.8	277.5
Boiling point (K)	373.0	374.4	374.5
Temperature of maximum density (K)	277.0	284.2	286.4
Maximum density (g/cm ³)	1.000	1.106	1.215
Density (g/cm ³)	0.997	1.104	1.214
Vapour pressure (mm Hg)	23.75	20.51	19.80
Viscosity (cP)	0.890	1.107	---
Dielectric constant	78.39	78.06	---
Enthalpy of formation (kJ/mol)	- 285.9	- 294.6	---
Enthalpy of vaporization (kJ/mol)	40.66	41.61	---

คุณลักษณะทั่วไปของน้ำอาจจำแนกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้เกณฑ์ของสมบัติใดในการจำแนก ตาในที่นี้จะสรุปเป็นคุณลักษณะที่พอเข้าใจได้ง่าย ดังนี้

1) น้ำบริสุทธิ์ มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่นำไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม น้ำสะอาดมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 5-30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ แต่น้ำที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น น้ำที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่านี้มาก

2) น้ำอ่อน (soft water) คือน้ำในสภาพปกติทั่วไป มีแคลเซียม และแมกนีเซียมเจือปนอยู่ในน้ำปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 มิลลิกรัม/ลิตร เช่น น้ำฝน น้ำกลั่น

3) น้ำกระด้าง (hard water) คือน้ำที่มีมีแคลเซียมและแมกนีเซียมปนอยู่ตั้งแต่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร (ppm) ขึ้นไป น้ำมีความกระด้างเกิดจากการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศหรือเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์บนชั้นผิวหน้าดินโดยแบคทีเรียแล้วรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งเป็นกรดอ่อน เมื่อไหลซึมไปสัมผัสกับชั้นหินที่เป็นด่าง โดยเฉพาะชั้นหินปูนซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก จะละลายหินปูนมากับน้ำทำให้มีปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} มากขึ้น ส่งผลให้ความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้น

3.1) ความกระด้างชั่วคราว (temporary hardness) เกิดจากสารละลาย แคลเซียมหรือแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต เมื่อถูกความร้อนจะตกตะกอนเป็นหินปูน

3.2) ความกระด้างถาวร (permanent hardness) เป็นความกระด้างที่ไม่ใช่ เกิดจากเกลือคาร์บอเนต (non-carbonate hardness) ซึ่งเกิดจากไอออนอื่น ได้แก่ ซัลเฟตไอออน คลอไรด์ไอออน ซึ่งอยู่ในรูปเกลือ ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมคลอไรด์ หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ ละลายอยู่ ความกระด้างประเภทนี้ไม่สามารถถูกกำจัดได้ด้วยการต้ม น้ำให้เดือด จะต้องทำให้ไอออนที่มีอยู่ตกตะกอน แล้วอาจแยกออกด้วยการกรอง โดยสารเคมีที่เติมเพื่อ แก้อาการความกระด้างถาวร เช่น ปูนขาว สารส้ม และสารคลีเลต (EDTA) เป็นต้น

4) ความเป็นกรด-เบสของน้ำ โดยน้ำบริสุทธิ์มีค่าเป็นกลางอยู่ที่ pH 7 หมายถึง น้ำ 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 25°C มีประจุไฮโดรเจนและประจุไฮดรอกไซด์ อยู่จำนวนเท่ากันคือ 1×10^{-7} โมล สิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนมากอาศัยอยู่ในน้ำที่มีค่า pH 6.5–9 โดยปกติน้ำฝนตามธรรมชาติมีความเป็นกรด เล็กน้อย เนื่องจากการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ แต่อยู่ในเขตอุตสาหกรรมที่มีการปล่อย แก๊สเสียออกมา จะทำให้เกิดสภาวะฝนกรด น้ำฝนที่สะสมอยู่ในแหล่งน้ำทำให้ค่า pH ต่ำลง เมื่อ pH ต่ำ กว่า 5.5 ปลาจะตาย เมื่อ pH ต่ำกว่า 4 สิ่งมีชีวิตในน้ำจะไม่สามารถทนทานได้เลย การศึกษาความเป็น กรด-เบสของน้ำ จึงมีความสำคัญมากต่อการประมงและการเกษตร

นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางเคมีและชีววิทยาของน้ำ ที่จะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับสมบัติทาง กายภาพ ว่าน้ำมีคุณภาพเหมาะแก่การอุปโภคบริโภคหรือไม่ ซึ่งได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ ค่า ความกระด้าง โลหะหนัก และเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค

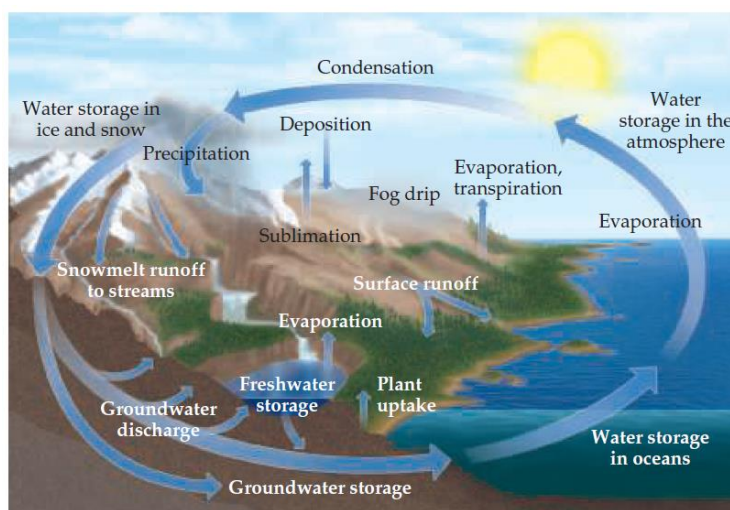
คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดที่ เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลม สูงสุด
ทางกายภาพ	1. สี (color)	แพลทินัม- โคบอลต์	5	15
	2. ความขุ่น (turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20
	3. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.0-8.5	6.5-9.2
ทางเคมี	4. เหล็ก (Fe)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.5	1.0
	5. แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5
	6. ทองแดง (Cu)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5
	7. สังกะสี (Zn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 5.0	15.0
	8. ซัลเฟต (SO_4^{2-})	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
	9. คลอไรด์ (Cl^-)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 250	600
	10. ฟลูออไรด์ (F^-)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.7	1.0
	11. ไนเตรท (NO_3^-)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 45	45
	12. ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 300	500
	13. ความกระด้างถาวร	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
	14. ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 600	1,200
สารพิษ	15. สารหนู (As)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	16. ไซยาไนต์ (CN)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.1

	17. ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	18. ปรอท (Hg)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.001
	19. แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
	20. ซีลีเนียม (Se)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
ทางแบคทีเรีย	21. แบคทีเรียที่ตรวจพบโดยวิธี standard plate count	โคโลนีต่อ ลบ.ซม.	ไม่เกินกว่า 500	-
	22. แบคทีเรียที่ตรวจพบโดยวิธี most probable number (MPN)	เอ็ม.พี.เอ็น ต่อ 100 ลบ.ซม.	น้อยกว่า 2.2	-
	23. อี.โคไล (E.coli)	-	ต้องไม่มีเลย	-

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนพิเศษ 85 ง ลงวันที่ 21 พฤษภาคม 2552

2) วัฏจักรน้ำ

แม้ว่าพื้นผิวโลกส่วนใหญ่จะปกคลุมไปด้วยน้ำ แต่ถ้าเปรียบเทียบมวลของน้ำกับมวลของโลก น้ำมีมวลเพียงร้อยละ 0.2 ของมวลโลก อย่างไรก็ตามการหมุนเวียนของน้ำเป็นวัฏจักรที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีมายังพื้นผิวโลกจะให้น้ำบนพื้นผิวโลกระเหยเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สคือ ไอน้ำลอยขึ้นสู่บรรยากาศ อุณหภูมิของไอน้ำลดลงเมื่อลอยตัวสูงขึ้นจนเกิดความชื้นสัมพัทธ์อย่างสมบูรณ์ ไอน้ำจะควบแน่นเป็นละอองน้ำเล็ก ๆ ซึ่งมองเห็นเป็นเมฆ เมื่อยหยดน้ำเล็ก ๆ ในเมฆรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักพอที่จะตกลงมากลายเป็นฝน หรือหิมะ หิมะที่ตกค้างอยู่บนยอดเขาปกคลุมกันเป็นธารน้ำแข็ง น้ำฝนที่ตกลงถึงพื้นรวมตัวเป็นลำธาร ห้วยหนอง คลอง บึง หรือไหลบ่ารวมกันเป็นแม่น้ำ เมื่อธารน้ำแข็งละลายก็จะเพิ่มปริมาณน้ำให้แก่แม่น้ำ น้ำบนพื้นผิวโลกบางส่วนแทรกซึมตามรอยแตกของหิน ทำให้เกิดน้ำใต้ดิน และไหลไปรวมกันในท้องมหาสมุทร เป็นอันครบรอบวัฏจักรตามภาพที่ 6.33



ภาพที่ 6.33 วัฏจักรของน้ำ. ที่มาจาก *Chemistry: The Central Science* (p. 784), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

วัฏจักรน้ำ ไม่ว่าจะเป็นส่วนที่อยู่ในบรรยากาศ บนพื้นผิว หรือใต้ดิน ล้วนเป็นกลไกที่สำคัญของระบบโลก ไอน้ำที่ระเหยออกจากน้ำในมหาสมุทร ทั้งประจุแร่ธาตุต่าง ๆ ทำให้มหาสมุทรมีความเค็ม ไอน้ำที่ระเหยขึ้นไปเป็นน้ำจืดบริสุทธิ์ แต่เมื่อไอน้ำควบแน่นเป็นหยดน้ำและตกลงมาเป็นฝน น้ำฝนละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ จึงมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิกอ่อน ๆ เมื่อตกลงสู่พื้นผิวโลกจะทำปฏิกิริยากับหินปูนซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดหน้าผาแหลม โพรงถ้ำ และน้ำกระด้าง

เนื่องจากน้ำเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นไปตามอุณหภูมิ การขยายตัวของน้ำในชอกหินทำให้หินแตก น้ำเป็นตัวละลายที่ดีจึงนำพาแร่ธาตุสารอาหารไปกระจายตามส่วนต่าง ๆ ของพื้นผิวโลก และสะสมแร่ธาตุในดิน ทำให้พืชพรรณอุดมสมบูรณ์และเป็นแหล่งอาหารของสรรพสัตว์ ต้นไม้สังเคราะห์แสงเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอาหารและปล่อยออกซิเจนสู่บรรยากาศ ปริมาณสัตว์ควบคุมปริมาณพืช คายน้ำกลับคืนสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดความชื้นบนผิวดิน น้ำไหลจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ จึงชะล้างประจุของแร่ธาตุทั้งหลายไปสะสมกันในท้องทะเล และเกิดเป็นตะกอนที่พื้นมหาสมุทร สิ่งมีชีวิตในมหาสมุทรจึงใช้แร่ธาตุเหล่านี้เป็นอาหารและสร้างร่างกาย มหาสมุทรจึงเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของโลก นอกจากนั้นแล้วการที่น้ำมีความจุกความร้อน และเป็นตัวพาความร้อนที่ดี กระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำจึงเป็นสมดุลพลังงานของโลก ซึ่งมีอิทธิพลต่อระบบภูมิอากาศของโลกอีกด้วย

3) มลพิษทางน้ำ

มลพิษทางน้ำ (water pollution) หมายถึง สภาวะที่น้ำธรรมชาติถูกปนเปื้อนด้วยสิ่งแปลกปลอมและทำให้คุณภาพของน้ำเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เลวลงหรือคุณภาพเสื่อมโทรมลง เน่าเหม็น จนไม่มีสิ่งมีชีวิตชนิดใดสามารถดำรงชีพ และใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ ความเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำมีสาเหตุมาจากการระบายน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่าง ๆ โดยไม่มีการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำ โดยปกติแล้วแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะสามารถรักษาสมดุลไม่ให้เกิดปัญหาน้ำเสียได้ ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในน้ำจะทำลายการย่อยสลายของ สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนโดยอาศัยออกซิเจนที่ละลายในน้ำเป็นแหล่งพลังงานในการสันดาป แต่ที่เกิปัญหาน้ำเน่าเสียในปัจจุบันเป็นผลมาจากแหล่งน้ำได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกเกินความสามารถที่ธรรมชาติจะรักษาสมดุลไว้ได้ น้ำทิ้งที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียมีแหล่งสำคัญ ดังนี้

(1) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เกิดจากน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์แล้ว ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เช่น

- น้ำหล่อเย็น (cooling water) เป็นน้ำที่เกิดจากการระบายความร้อนจากเครื่องจักร และ อุปกรณ์ต่าง ๆ ส่วนมากจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40-60°C
- น้ำล้าง (wash water) ได้แก่ น้ำที่เกิดจากการใช้ล้างเครื่องจักร อุปกรณ์การผลิต ตลอดจน พื้นโรงงาน ซึ่งน้ำทิ้งประเภทนี้จะมีสิ่งเจือปนมากทั้งสารอินทรีย์ สารเคมีและสารแขวนลอยชนิดต่าง ๆ
- น้ำจากกระบวนการผลิต (process wastewater) เป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิต เช่น ใช้เป็นตัวทำละลายหรือการฟอกวัตถุดิบให้สะอาด ได้แก่ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานน้ำตาล โรงงานแปงมันสำปะหลัง เป็นต้น

2) น้ำเสียจากชุมชน ได้แก่ อาคารบ้านเรือน ที่พักอาศัย โดยมีการปล่อยน้ำทิ้งจากการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น การชำระล้างร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบอาหาร เป็นต้น นอกจากนั้นน้ำทิ้งจากชุมชน ยังรวมถึงน้ำที่ชะล้างสิ่งสกปรกจากขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ จากกิจกรรมชุมชน อาจจะมีเชื้อโรคและพยาธิปนอยู่ด้วย

3) น้ำเสียจากการเกษตรกรรม เกิดจากกระบวนการเพาะปลูก มีการใช้ปุ๋ยและสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้อย่างขาดความระมัดระวังทำให้สารเคมีแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำ โดยในระหว่างการฉีดพ่นสาร การชะล้างโดยฝน การล้างภาชนะที่บรรจุหรืออุปกรณ์การฉีดพ่นในแหล่งน้ำ

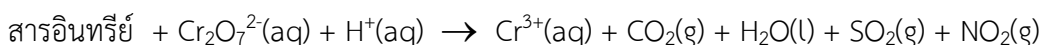
4) น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจาก การเลี้ยงหมู ไก่ โค กระบือและบ่อปลา เศษอาหารที่เหลือจะถูกชำระล้างระบายลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำสกปรกแล้วยังเป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคอีก

5) น้ำเสียจากกิจกรรมเหมืองแร่ น้ำเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกิจกรรมเหมืองแร่ เช่น เหมืองฉีดยาใช้น้ำในการทำงานเป็นจำนวนมาก น้ำที่ใช้ในกระบวนการนี้จะไหลพัดพาเอาตะกอน ทรายนแร่ ซึ่งเป็นสารแขวนลอยลงสู่แหล่งน้ำ จนอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและการอุปโภคบริโภคของมนุษย์

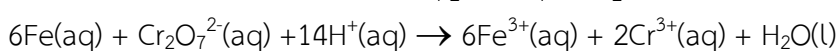
6) น้ำเสียจากการคมนาคมทางเรือ เช่น น้ำมันของเรือ การเกิดอุบัติเหตุของเรือขนส่งน้ำมัน และการขับถ่ายสิ่งปฏิกูลของผู้ที่อาศัยอยู่บนเรือเหล่านั้น เป็นต้น

ทั้งนี้เราอาจจำแนกชนิดของสารปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ดังนี้

1) สารอินทรีย์ ได้แก่ ซากพืชซากสัตว์ สารอินทรีย์สังเคราะห์ คราบน้ำมัน สารเหล่านี้เมื่อเจือปนอยู่ในน้ำจะทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (dissolved oxygen; DO) มีปริมาณลดลง ทั้งนี้จุลินทรีย์ในน้ำใช้แก๊สออกซิเจนเพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวตามธรรมชาติ โดยปกติค่า DO ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีค่าอยู่ในช่วง 4-6 มิลลิกรัม/ลิตร (ppm) การวัดคุณภาพน้ำด้วยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือ วัดปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยจุลินทรีย์ (biochemical oxygen demand; BOD) ซึ่งจะแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ในน้ำต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะมีอากาศ ในการวัดค่า BOD จะหาค่า DO ในน้ำตัวอย่างก่อน จากนั้นเก็บน้ำไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้วหาค่า DO อีกครั้ง ซึ่งผลต่างของค่า DO ทั้งสองค่าคือค่า BOD ถ้าค่า BOD สูงแสดงว่าในน้ำมีสารอินทรีย์อยู่มาก จุลินทรีย์จึงต้องใช้แก๊สออกซิเจนในการย่อยสลายปริมาณมาก โดยมีเกณฑ์ของค่า BOD คือถ้ามีค่า BOD มากกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร ถือว่าเป็นน้ำเสีย วิธีที่สองคือวัดปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยสารเคมี (chemical oxygen demand; COD) วิธีนี้จะใช้สารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดส์ได้ดี เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ดังนี้



หลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว จึงหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียมไอรอน (II) ซัลเฟต $((NH_4)_2Fe(SO_4)_4 \cdot 6H_2O)$ ดังสมการ



โดยปกติค่า COD จะสูงกว่าค่า BOD เพราะค่า COD คือปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งหมด ทั้งที่แบคทีเรียย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ แต่ค่า BOD คิดเฉพาะสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้เท่านั้น

2) สารอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือไนเตรต เกลือฟอสเฟต กรดแอมโมเนียม ฟลูออไรด์ สารประกอบโลหะ และเกลืออนินทรีย์อื่น ๆ สารเหล่านี้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยของเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัด และสารซักล้างจากอาคารบ้านเรือนทำให้แหล่งน้ำอุดมไปด้วยสารอาหารจำพวกฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ส่งผลให้สาหร่ายและพืชน้ำในแหล่งน้ำนั้นเจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็วจนออกซิเจนที่ละลายในน้ำถูกใช้จนหมดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) สิ่งที่มาคือสิ่งมีชีวิตในน้ำอื่น ๆ จะตายเป็นจำนวนมาก อีกทั้งพืชที่หนาแน่นยังไปกั้นแสงอาทิตย์ไม่ให้ส่องลงไปถึงใต้น้ำทำให้พืชที่อยู่ใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้และตายในที่สุด

3) ดินตะกอน เกิดจากการกัดกร่อนของดินและหินโดยลมพายุ น้ำไหลบ่าจากภูเขา การเกษตร และการก่อสร้าง ขนาดของดินตะกอนมีตั้งแต่ก้อนกรวดที่ใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดอนุภาคคอลลอยด์ ดินตะกอนเป็นปัญหามลพิษสำหรับแหล่งน้ำผิวดิน โดยจะไปทับถมพืชใต้น้ำทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ชัดขวางวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เป็นแหล่งรวมของโลหะหนักต่าง ๆ เช่น Ca, Cu, Mo, Ni, Co, และ Mn ซึ่งจะทำให้คุณภาพของน้ำลดลง

4) สารกัมมันตรังสี เกิดจากการทำเหมือง กระบวนการแปรรูปแร่ การใช้อาวุธนิวเคลียร์ การระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และกากกัมมันตรังสีทางการแพทย์ เป็นต้น เมื่อฝนตกหรือน้ำป่าไหลหลากจะชะเอาสารกัมมันตรังสีลงสู่แหล่งน้ำได้

5) ความร้อน ได้แก่ ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากน้ำในกระบวนการผลิตและน้ำหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำ เช่น น้ำร้อนจากโรงไฟฟ้าถ่านหินซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิของแหล่งน้ำสูงขึ้นและปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มีประกาศเรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม เป็นมาตรการเกี่ยวกับการควบคุมการระบายน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้กระทรวงอุตสาหกรรมมีประกาศกระทรวง เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ.2560 โดยกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 6.9 ตามประกาศได้กำหนดวิธีวิเคราะห์ รวมถึงเก็บตัวอย่างไว้ด้วย

ตารางที่ 6.9 เกณฑ์มาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐาน
1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5-9.0
2. อุณหภูมิ	C	40
3. สี (Color)	ADMI	300
4. ของแข็งละลายทั้งหมด	มก./ล.	3,000
5. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	มก./ล.	50
6. บีโอดี	มก./ล.	20
7. ซีโอดี	มก./ล.	120
8. ซัลไฟด์	มก./ล.	1
9. ไซยาไนต์	มก./ล.	0.2

10. น้ำมันและไขมัน	มก./ล.	5
11. ฟอรั่มลดีไฮด์	มก./ล.	1
12. สารประกอบฟีนอล	มก./ล.	1
13. คลอรีนอิสระ	มก./ล.	1
14. ยาฆ่าศัตรูพืชและสัตว์	มก./ล.	ต้องไม่พบ
15. ทีเคเอ็น	มก./ล.	100
16. โลหะหนัก		
1) สังกะสี (Zn)	มก./ล.	5
2) โครเมียม (IV)	มก./ล.	0.25
3) โครเมียม (III)	มก./ล.	0.75
4) สารหนู (As)	มก./ล.	0.25
5) ทองแดง (Cu)	มก./ล.	2.0
6)ปรอท (Hg)	มก./ล.	0.005
7) แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	0.03
8) แบเรียม (Ba)	มก./ล.	1
9) ซีลีเนียม (Se)	มก./ล.	0.02
10) ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.2
11) นิกเกิล (Ni)	มก./ล.	1
12) แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	5

6.2.3 เคมีของดิน

1) องค์ประกอบของดิน

ดิน (soil) หมายถึงวัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสลายตัวของร่างกายภาพ และทางเคมีของหินและแร่ร่วมกับสารอินทรีย์ ที่เกิดจากการสลายตัวของซากพืชซากสัตว์เป็นผิวชั้นบนที่หุ้มห่อโลก ในด้านทางเคมี ดินจึงหมายถึงของผสมชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากการสลายตัวของหินต้นกำเนิด (parent rock) หรือวัตถุดินต้นกำเนิด (parent material) โดยกระบวนการผุพังสลายตัว (weathering) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางชีวภาพ และทางเคมี จึงทำให้สมบัติของดินที่เกิดขึ้นต่างไปจากวัตถุดินต้นกำเนิด

ดังนั้น ดินจึงมีลักษณะและคุณสมบัติต่างกันไปในที่ต่าง ๆ ตามสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ วัตถุดินต้นกำเนิด สิ่งมีชีวิตและระยะเวลาการสร้างตัวของดิน (กรมทรัพยากรธรณี) โดยทั่วไป ดินมีองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

1) สารอินทรีย์ หรืออินทรีย์วัตถุ (organic matter) ได้จากการสลายตัวของสิ่งมีชีวิตที่เน่าเปื่อยผุพังสลายตัวทับถมอยู่ในดินของซากพืช ซากสัตว์ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น ไล้เดือน แมลง จุลินทรีย์ สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ช่วยให้ดินมีลักษณะร่วนซุย มีสีดำหรือสีน้ำตาล ที่เรียกว่า ฮิวมัส (humus)

2) สารอนินทรีย์ หรืออนินทรีย์วัตถุ (inorganic matter) ได้จากการสลายตัวของวัตถุดินต้นกำเนิดโดยตรงหรือเปลี่ยนรูปมาจากวัตถุดินต้นกำเนิดในระหว่างกระบวนการผุพังสลายตัว ชนิดของวัตถุดินต้นกำเนิดและหินต้นกำเนิด เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการกำหนดสมบัติต่าง ๆ และความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยทั่วไป หินและแร่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน และอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ มีเหล็ก

แคลเซียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ปนบ้างเล็กน้อย หากเราพิจารณาจากประเภทของหิน จำแนกได้ 3 ชนิด ดังนี้

2.1) หินอัคนี (igneous rock) หมายถึงหินที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวของลาวาหรือ แมกมาโดยตรง สมบัติและแร่ที่เป็นองค์ประกอบในหินชนิดนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและความเร็ว ในการเย็นตัวของลาวาหรือแมกมา หินอัคนีสามารถจำแนกออกเป็น 9 ชนิด ตามความเข้มข้นของ SiO_2 และความลึกในการเกิด (ความเร็วในการเย็นตัว) ดังนี้

2.2) หินตะกอน (sedimentary rock) หมายถึงหินที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมโดยการกระทำของน้ำ ลม กระบวนการทางเคมีและชีวภาพ แล้วจับตัวเป็นหินแข็ง ลักษณะเด่นของหิน ตะกอน คือมักพบรอยเส้น (strata) ในแนวขนานกับระนาบที่วัตถุต้นกำเนิด หินตะกอนจำแนกตามลักษณะการเกิดออกเป็น 3 ประเภท คือ

- หินตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนเชิงกลจากการกระทำของน้ำและลม ได้แก่ หินดินดาน (shale) หินโคลน (mudstone) และหินทราย (sandstone) เป็นต้น
- หินตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนโดยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ เกลือหิน (rock salt) ยิปซัม และหินปูน (limestone) เป็นต้น
- หินตะกอนที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ หินปูน ถ่านหิน เป็นต้น

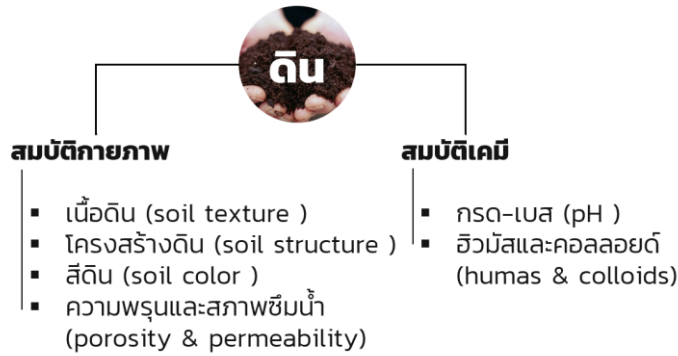
2.3) หินแปร (metamorphic rock) หมายถึงหินที่แปรสภาพมาจากหินอัคนีหรือหินตะกอนโดย อิทธิพลของความดันหรือความร้อนภายใต้ผิวโลกหินชนิดนี้ ได้แก่

- หินชีสต์ (schist) เป็นหินที่แปรสภาพมาจากหินหลายชนิด
- หินไนส์ (gneiss) เป็นหินที่แปรสภาพมาจากหินหลายชนิด ส่วนใหญ่แปรสภาพมาจากหินแกรนิต
- หินฟิลไลต์ (phyllite) เป็นหินที่แปรสภาพมาจากหินชนวน (slate) มีเนื้อละเอียด
- หินควอร์ตไซต์ (quartzite) เป็นหินที่แปรสภาพมาจากหินทราย มีเนื้อแน่นและสลายตัวได้ยาก
- หินอ่อน (marble) เป็นหินที่แปรสภาพมาจากหินปูน ถ้าบริสุทธิ์จะมีสีขาว

3) อากาศ แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน มีแก๊สคาร์บอนมอนไดออกไซด์ สูงกว่าอากาศบนผิวดิน ดินที่โปร่งมีรูพรุนมาก จะมีการระบายอากาศได้ดี ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็น ต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิตในดิน

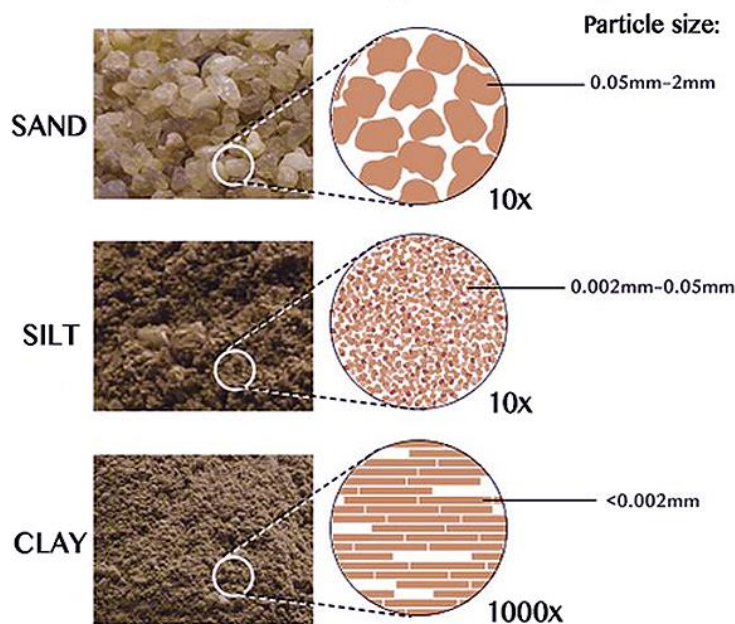
4) น้ำ แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน น้ำในดินจะช่วยละลายแร่ธาตุต่าง ๆ ทำให้รากพืชสามารถดูดธาตุอาหารขึ้นไปใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์แสงได้

เราอาจจำแนกสมบัติของดินออกเป็นสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ดังแสดงภาพที่



ภาพที่ 6.34 สมบัติของดินออกเป็นสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี

(1) เนื้อดิน หมายถึง องค์ประกอบเชิงกายภาพของดิน ดินในแต่ละสถานที่ที่มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากดินประกอบขึ้นจากของอนุภาคตะกอนหลายขนาด โดยขนาดอนุภาคแบ่งเป็นอนุภาคทราย (sand) มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.05-2 มม. อนุภาคทรายแป้ง (silt) มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.002-0.05 มม. และอนุภาคดินเหนียว (clay) มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.002 มม. ดังภาพที่ 6.35



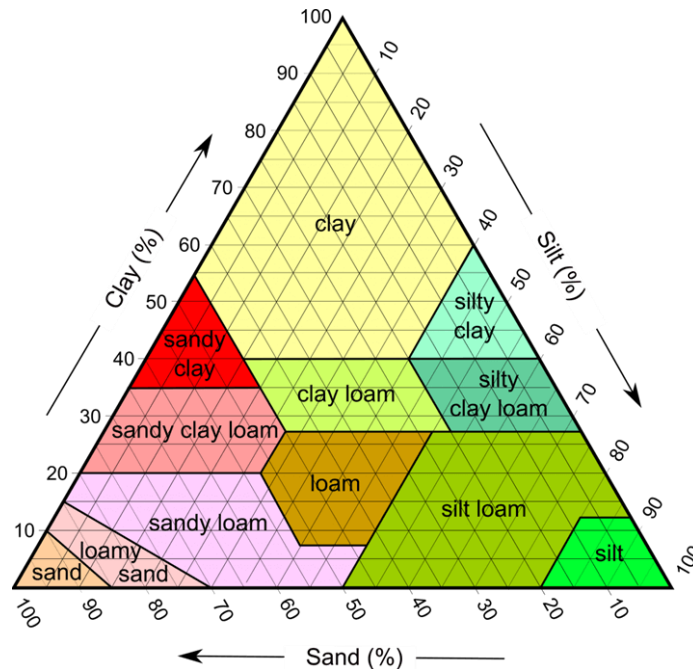
ภาพที่ 6.35 ขนาดอนุภาคของดิน

(ที่มาจาก https://www.bio.miami.edu/dana/330/330F19_8.html)

เนื่องจากดินมีส่วนผสมที่เป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ดินจึงมีหลายชนิด นักปฐพีวิทยาได้แบ่งดินออกเป็น 12 ชนิด ตามสัดส่วนการกระจายอนุภาคของดิน เช่น ดินทราย ดินร่วน (loam) ดินเหนียว ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของตะกอนที่ผสมกันเป็นดิน ดังภาพที่ 6.36 ตัวอย่างเช่น

- ดินทรายร่วน (sandy loam) ประกอบด้วยอนุภาคทรายร้อยละ 80 อนุภาคทรายแป้งร้อยละ 10 อนุภาคดินเหนียวร้อยละ 10

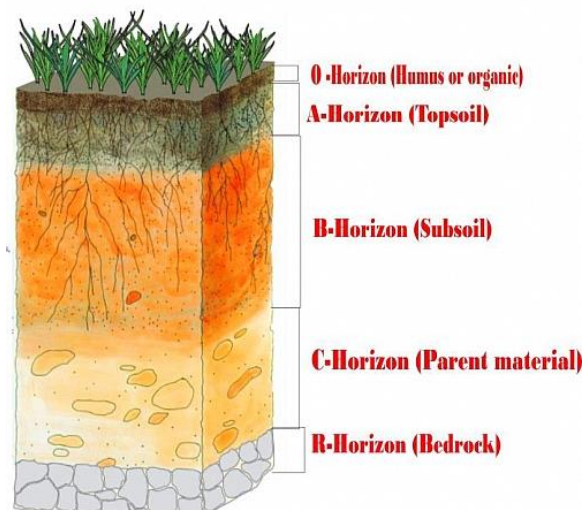
- ดินร่วน ประกอบด้วยอนุภาคทรายร้อยละ 40 อนุภาคทรายแป้งร้อยละ 40 อนุภาคดินเหนียวร้อยละ 20
- ดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคทรายร้อยละ 20 อนุภาคทรายแป้งร้อยละ 20 และอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 60



ภาพที่ 6.36 สัดส่วนการกระจายอนุภาคของดิน
(<https://lotusarise.com/properties-of-soil-upsc>)

การจำแนกดินช่วยให้เราเข้าใจถึงคุณสมบัติของดินประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ความสามารถในการกักเก็บน้ำ และการถ่ายเทพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมและวิศวกรรม เป็นต้น

(2) โครงสร้างดิน หมายถึงรูปแบบของการยึดและการเรียงตัวของอนุภาคเดี่ยวของดินเป็นเม็ดดินในหน้าตัดดิน เม็ดดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งด้านขนาดและรูปร่าง การแบ่งชั้นดินอาศัยการสังเกตจากพื้นที่หน้าตัดด้านข้างของดิน (soil profile) ประกอบด้วยดินที่ทับถมกันเป็นชั้นที่เรียกว่า ชั้นดิน (soil horizon) แบ่งออกเป็น 5 ชั้น ดังภาพที่ 6.37 ดินแต่ละชั้นมีลักษณะแตกต่างกันเนื่องจากสมบัติทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ และลักษณะอื่น ๆ เช่น สี โครงสร้าง เนื้อดิน การยึดตัว และความเป็นกรดเป็นด่างของดินแตกต่างกัน



ภาพที่ 6.37 การแบ่งชั้นดิน

ชั้นโอ (O-horizon) คือ ดินชั้นบนสุดที่เกิดจากการสะสมตัวของอินทรีย์วัตถุทั้งจากพืชและสัตว์ ประกอบด้วยเศษใบไม้ กิ่งไม้ เศษหญ้า หรือซากสัตว์ที่ทยอยสลายและยังไม่ย่อยสลาย จึงอาจเรียกว่า ชั้นดินอินทรีย์ ในชั้นนี้มักมีสีเทาหรือเทาดำ ค่อนข้างคล้ำ มีความอุดมสมบูรณ์สูง สามารถพบเห็นรากพืชแผ่กระจายอยู่โดยทั่วไป

ชั้นเอ (A-horizon) หรือ ชั้นดินบน (top soil) เป็นชั้นที่อินทรีย์วัตถุถูกย่อยสลายโดยสมบูรณ์ และผสมคลุกเคล้าร่วมกับแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นชั้นดินที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่จำนวนมาก ขณะที่ส่วนล่างของชั้นเอหรือที่เรียกว่า ชั้นอี เป็นเขตการซึมชะ (leaching zone) ซึ่งมีการซึมผ่านของน้ำจากดินชั้นบน ก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำและแร่ธาตุภายในดิน ก่อนซึมผ่านลงไปสะสมตัวในชั้นต่อไป ทำให้ดินชั้นเอมีสีค่อนข้างจางและมีเนื้อหยาบ

ชั้นบี (B-horizon) หรือ ชั้นดินล่าง (subsoil) เป็นชั้นที่สะสมส่วนที่ถูกชะล้าง (zone of accumulation) และเกิดการตกตะกอนของแร่ธาตุและสารละลายต่าง ๆ จากชั้นดินด้านบน เนื้อดินในชั้นบีมักมีความหนาแน่นและความชื้นสูง มีจุดประ (mottle) สีส้มแดงกระจายอยู่ทั่วไป ส่งผลให้ดินชั้นนี้มีสีของแร่ธาตุชัดเจน มักมีสีแดง หรือน้ำตาลแดงตามสีแร่ที่มาสะสมตัวอยู่ อีกทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงหรือปฏิกิริยาทางเคมีค่อนข้างสูง

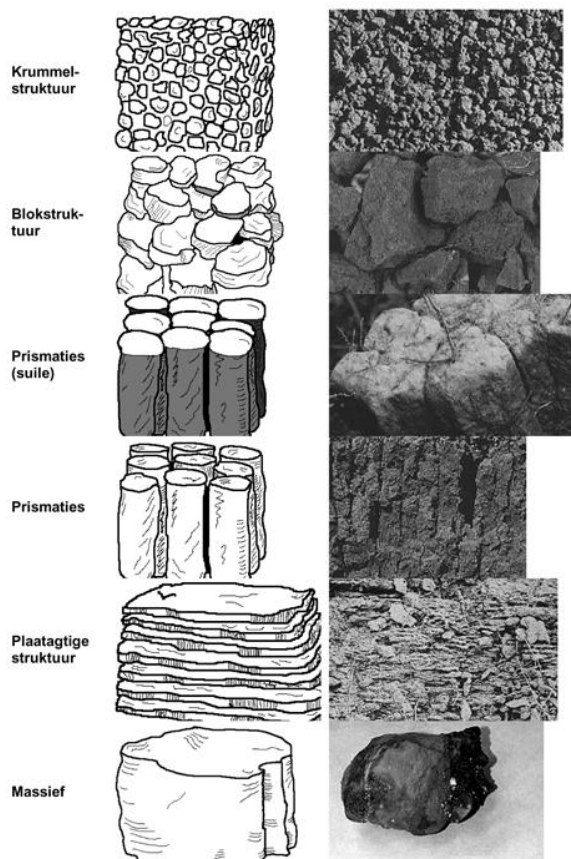
ชั้นซี (C-horizon) หรือ ชั้นการผุพังของหิน เป็นชั้นของหินกำเนิดดินที่กำลังผุพังและสลายตัว ไม่มีการตกตะกอนจากการชะล้าง ไม่มีการสะสมของอินทรีย์วัตถุ เป็นชั้นหินผุที่หินบางส่วนผุพังกลายเป็นดินปะปนกับเศษหินที่แตกหัก

ชั้นอาร์ (R-horizon) หรือชั้นหินแข็ง เป็นชั้นหินที่ยังไม่ผุพังสลายตัว อาจปรากฏหรือไม่ปรากฏในหน้าตัดดิน ชั้นอาร์นับเป็นชั้นของวัตถุต้นกำเนิดดินที่เรียกว่า หินพื้น (bedrock) เป็นชั้นหินดินดาน

โครงสร้างดินแบ่งออกเป็น 7 แบบ ดังนี้

- แบบก้อนกลม (granular) มีรูปร่างคล้ายทรงกลม เม็ดดินมีขนาดเล็กประมาณ 1 – 10 มิลลิเมตร มักพบในดินชั้น A มีรากพืชปนอยู่มาก เนื้อดินมีความพรุนมาก จึงระบายน้ำและอากาศได้ดี

- แบบก้อนเหลี่ยม (blocky) มีรูปร่างคล้ายกล่อง เม็ดดินมีขนาดประมาณ 1 – 5 เซนติเมตร มักพบในดินชั้น B มีการกระจายของรากพืชปานกลาง น้ำและอากาศซึมผ่านได้
- แบบแผ่น (platy) ก้อนดินแบนวางตัวในแนวราบ และซ้อนเหลื่อมกันเป็นชั้น ขัดขวางรากพืช น้ำและอากาศซึมผ่านได้ยาก มักเป็นดินชั้น A ที่ถูกบีบอัดจากการบดไถของเครื่องจักรกลการเกษตร
- แบบแท่งหัวเหลี่ยม (prismatic) ก้อนดินแต่ละก้อนมีผิวหน้าแบบและเรียบ เกาะตัวกันเป็นแท่งหัวเหลี่ยมคล้ายปริซึม ก้อนดินมีลักษณะยาวในแนวตั้ง ส่วนบนของปลายแท่งมักมีรูปร่างแบน เม็ดดินมีขนาด 1 – 10 เซนติเมตร มักพบในดินชั้น B น้ำและอากาศซึมได้ปานกลาง
- แบบแท่งหัวมน (columnar) มีการจับตัวคล้ายคลึงกับแบบแท่งหัวเหลี่ยม แต่ส่วนบนของปลายแท่งมีลักษณะกลมมน ปกคลุมด้วยเกลือ เม็ดดินมีขนาด 1 – 10 เซนติเมตร มักพบในดินชั้น B และเกิดในเขตแห้งแล้ง น้ำและอากาศซึมผ่านได้น้อย และมีการสะสมของโซเดียมสูง
- แบบก้อนทึบ (massive) เป็นดินเนื้อละเอียดยึดตัวติดกันเป็นก้อนใหญ่ ขนาดประมาณ 30 เซนติเมตร ดินไม่แตกตัวเป็นเม็ด จึงทำให้น้ำและอากาศซึมผ่านได้ยาก
- แบบอนุภาคเดี่ยว (single grained) ไม่มีการยึดตัวติดกันเป็นก้อน มักพบในดินทราย ซึ่งน้ำและอากาศซึมผ่านได้ดี



ภาพที่ 6.38 ประเภทโครงสร้างดินทั่วไป

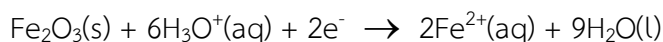
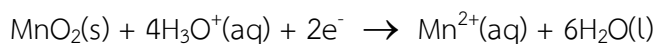
2) สมบัติทางเคมีของดิน

คุณสมบัติของดินซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่สามารถจะตรวจสอบได้ด้วยความรู้สึกรู้จักจากการเห็นด้วยตาและสัมผัสด้วยมือ แต่จะต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ หรือกระบวนการทางเคมีเป็นเครื่องชี้บอกสมบัติทางเคมีที่สำคัญของดิน ได้แก่ สภาพกรด-ด่าง ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน และความเค็มของดิน

(1) สภาพกรด-ด่าง

การบอกระดับปฏิกิริยาดิน นิยมใช้ค่า pH (พีเอช) เป็นเกณฑ์ ซึ่ง pH เป็นตัวเลขที่แสดงถึงความรุนแรงของสภาพกรดหรือด่างในดิน โดยถือว่าเมื่อ pH มีค่าเท่ากับ 7 ปฏิกิริยาดินเป็นกลาง หากต่ำกว่า 7 เป็นกรด และสูงกว่า 7 เป็นด่าง ค่า pH มีผลกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน โดยปกติกรดหรือด่างในดินมีได้ทำอันตรายต่อพืชโดยตรงแต่มีผลทางอ้อมต่อพืชคือ เมื่อ pH ลดลงหรือเพิ่มขึ้น จะทำให้ระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กล่าวคือ เมื่อดินเป็นกรดหรือด่างเกินไป ธาตุบางธาตุจะละลายได้น้อยส่งผลให้พืชดูดมาใช้ได้น้อยด้วย เป็นเหตุให้พืชขาดแคลนธาตุเหล่านั้น เมื่อดินเป็นกรดจัด พืชมีแนวโน้มที่จะขาดธาตุฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม และโมลิบดีนัม แต่เมื่อดินเป็นด่างจัด พืชมีโอกาสขาดธาตุฟอสฟอรัส เหล็ก ทองแดง แมงกานีส สังกะสี และโบรอน

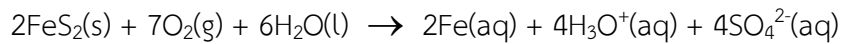
สภาพความเป็นกรด-เบสของดินโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 3.0-9.0 ดินจึงอาจมีสภาพเป็นได้ทั้ง กรด เบส หรือกลาง ความเป็นกรด-เบสของดินมีผลทั้งโดยตรงและโดยอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกอยู่ในดิน ในดินที่มีสภาพเป็นกรดจะมีไฮโดรเนียมไอออนซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญทางเคมีของดิน เช่น ทำให้มีการละลายตัวของธาตุหรือสารต่าง ๆ ในดินออกมา ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์หรือก่อให้เกิดผลเสียต่อพืชได้ เช่น ในดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 สารอินทรีย์ในดินจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้ $MnO_2(s)$ และ $Fe_2O_3(s)$ ถูกรีดิวซ์เป็น Mn และ Fe ดังนี้



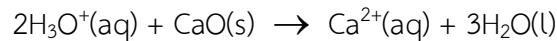
แมงกานีสและเหล็ก แม้จะเป็นธาตุอาหารพืชที่สำคัญ แต่พืชต้องการในปริมาณน้อย ถ้ามีสะสมอยู่ในดินมากจนเกินไปก็จะเกิดเป็นพิษขึ้นกับพืชได้ธาตุอาหารต่าง ๆ ในดินที่พืชสามารถดึงดูดเอามาใช้ประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพ pH ของดิน โดยธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในดินจะคงสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและมีปริมาณมากที่ pH ช่วงหนึ่ง ถ้าดินมี pH สูงหรือต่ำกว่าช่วงนั้น ๆ ก็เปลี่ยนสภาพเป็นสภาพที่ยากที่พืชจะดึงดูดเอาไปใช้เป็นประโยชน์ได้ เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต (ในรูป $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-}) ที่ใส่ลงไปดินจะอยู่ในรูปของสารละลายที่พืชดึงดูดไปใช้ได้ง่าย เมื่อดินมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0-7.0 ถ้าดินมี pH สูงหรือต่ำกว่าช่วงนี้ ความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดินก็ลดน้อยลงเพราะไปทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดิน เช่น Al^{3+} และ Fe^{3+} ได้สารประกอบที่ละลายน้ำยาก พืชจึงดึงดูดไปใช้ไม่ได้ ส่วนธาตุอาหารรองของพืช เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส โบรอน เป็นต้น จะละลายออกมาอยู่ในสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และมีอยู่ในดินอย่างพอเพียงกับความต้องการของพืช เมื่อดินมี pH เป็นกรดอย่างอ่อน แต่ในทางตรงกันข้ามธาตุอาหารโมลิบดีนัม จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดีขึ้น ถ้าดินมีค่า pH เป็นกลางถึงเบสอย่างอ่อน อย่างไรก็ตามโดยสรุปดินที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืชควรมี pH อยู่ในช่วง 6.0-7.0 ความสำคัญของค่า pH ของดินยังเกี่ยวข้องกับการทำงานที่เป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในดิน ซึ่งโดยปกติสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ในดินจะเน่าเปื่อยผุพังได้ด้วยการย่อย

สลายโดยจุลินทรีย์ ขณะที่สารอินทรีย์เหล่านี้กำลังสลายตัวจะปลดปล่อยธาตุอาหารต่าง ๆ ออกมาซึ่งรากพืชสามารถดึงดูดไปใช้ได้ ดังนั้นเมื่อใส่ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยพืชสดลงไปบนดินแล้วทำให้พืชงอกงามดีขึ้น แต่ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเนื่องจากจุลินทรีย์จะต้องเข้าย่อยและทำให้ปุ๋ยเหล่านี้สลายตัว และปลดปล่อยธาตุอาหารออกมา ซึ่งแตกต่างจากปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำแล้วพืชก็สามารถดึงดูดเอาธาตุอาหารไปใช้ได้ทันที โดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่เข้าย่อยสลายปุ๋ยคอกและสารอินทรีย์ ตลอดจนฮิวมัสในดินนั้นจะทำงานได้เต็มที่และมีประสิทธิภาพ เมื่อค่า pH ของดินอยู่ระหว่าง 6.0-7.0 ถ้าดินเป็นกรดหรือเบสรุนแรง จะทำให้จุลินทรีย์ในดินจะทำงานได้ช้าลง ปุ๋ยคอกและสารอินทรีย์ในดินจะสลายตัวช้าและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ช้า

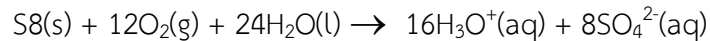
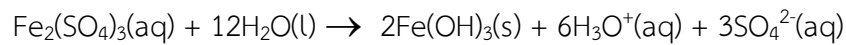
ดินเปรี้ยว (acidic soil) เป็นดินที่มีกรดรุนแรง เช่น ดินที่ประกอบด้วยแร่ไพไรต์ (FeS_2) ปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นกรดในดิน ดังสมการ



พืชที่ปลูกในดินเปรี้ยวจะไม่เจริญเติบโตและงอกงามเท่าที่ควร แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมปูนขาว (CaO) หรือหินปูนที่บดละเอียด (CaCO_3) สารประกอบเหล่านี้เมื่อใส่ลงไปในดินจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรด ทำให้ความเป็นกรดในดินลดน้อยลง ดังสมการ



พื้นที่แห้งแล้งและฝนตกน้อยมักจะมีดินที่มีสภาพเป็นเบส (basic soil) หรือในดินที่มีเกลือ Na_2CO_3 ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการเติมสารเคมี เช่น เติมหิวมัส (S_8) หรือ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นในดินให้ H_3O^+ แล้วสะเทินกับดินเบสได้ ดังสมการ



ปฏิกิริยาสะเทิน : $2\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Na}_2\text{CO}_3(\text{aq}) \rightarrow 2\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

(2) ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (cation exchange capacity; CEC) เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัสในดินมีประจุลบจึงสามารถดูดซับแคตไอออน เช่น โพแทสเซียม ไอออน แคลเซียมไอออน และ แมกนีเซียมไอออนซึ่งมีประจุบวกไว้ที่ผิว ทำให้แคตไอออนที่อนุภาคดินดูดซับไว้นี้ยังคงเป็นประโยชน์ต่อพืช และยังช่วยดูดซับให้อิออนดังกล่าวคงอยู่กับดินไม่ถูกน้ำชะล้างเมื่อฝนตกหรือมีการรดน้ำ

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินแตกต่างกันตามเนื้อดินและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน กล่าวคือ ดินเนื้อละเอียดมีดินเหนียวมากจึงมีประจุลบที่ผิวมาก ทำให้ดูดซับแคตไอออนได้มากกว่าดินเนื้อหยาบซึ่งมีปริมาณดินเหนียวน้อยกว่า แต่ถ้าดินมีเนื้อดินแบบเดียวกัน ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงกว่าก็สามารถดูดซับแคตไอออนได้มากกว่าด้วย เนื่องจากในอินทรีย์วัตถุมีฮิวมัสมากและที่ผิวของฮิวมัสมีประจุลบมากเป็นพิเศษ

(3) ความเค็มของดิน

ความเค็มของดินเกิดขึ้นเมื่อดินนั้นสะสมเกลือที่ละลายได้ง่ายใน ปริมาณที่สูงเกินไป เกลือที่มักสะสมในดิน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และ

โซเดียมซัลเฟต ดินเค็มคือดินซึ่งมีเกลือที่ละลายอยู่มากจนเป็นอันตรายต่อพืช สำหรับประเทศไทยเกลือที่พบในดินเค็มส่วนใหญ่คือ โซเดียมคลอไรด์

วิธีวัดค่าความเค็มมีหลายวิธี แต่ที่นิยมกันโดยทั่วไป ดูจากความเข้มข้นของความเค็มที่วัดได้ ซึ่งมักจะใช้การนำไฟฟ้าของดิน มีหน่วยความเข้มข้นเป็น dS/m ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สกัดได้จากดินวัดจากการละลายขณะที่อิมตัวด้วยน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้าจะบ่งบอกถึงระดับความเค็มของดินดังตารางที่ 6.10 เพื่อมาใช้ประเมินปริมาณเกลือและอิทธิพลของเกลือในดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ถ้าดินที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า 4 dS/m จัดเป็นดินเค็ม

ตารางที่ 6.10 ระดับความเค็มของดินและผลต่อพืช

ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ระดับความเค็มของดิน	ผลต่อพืช
0 - 2	ไม่เค็ม	พืชส่วนมากปกติ
มากกว่า 2 - 4	เค็มน้อย	พืชที่ไม่ทนเค็ม จะโตช้า
มากกว่า 4 - 8	เค็ม	พืชที่ไม่ทนเค็ม จะชะงักการเติบโตหรือตาย
มากกว่า 8 - 16	เค็มมาก	พืชที่ทนเค็มเท่านั้นที่เติบโตได้
มากกว่า 16	เค็มมากที่สุด	พืชที่ทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เติบโตได้

3) มลพิษทางดิน

มลพิษดิน (sol pollution) หมายถึง ดินที่เสื่อมค่าจากเดิมและหรือมีสารพิษเกินขีดจำกัดจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพและพลาณามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์ พืชและสัตว์ ทั้งโดยตรงและทางอ้อม โดยสาเหตุที่ทำให้ดินเสียสรุปลดดังนี้

(1) เกิดจากสภาพธรรมชาติ ส่วนใหญ่เกิดจากหินต้นกำเนิดดินที่มีแร่ธาตุบางชนิดอยู่มาก เมื่อสลายตัวจึงให้ดินที่ไม่เหมาะสมในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ได้แก่

- ดินเปรี้ยว เป็นดินที่เป็นกรดจัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีสารประกอบของกรดซัลฟิวริก
- ดินเค็ม หมายถึง ดินที่มีปริมาณเกลือมากกว่าปกติ โดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของเกลือ คลอไรด์ และเกลือซัลเฟตของ Na Ca และ Mg
- ดินที่มีสารกัมมันตภาพรังสี เป็นดินที่เกิดจากแร่ที่มีส่วนผสมของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม เรเดียม
- ดินปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก ดินประเภทนี้เกิดจากหินที่มีสารประกอบของปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม สังกะสี ผสมอยู่
- ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ ได้แก่ ดินที่มีอนุภาคบางอย่างผสมอยู่มากเกินไป เช่น ดินทราย มีทรายปะปนมากเกินไป ดินเหนียวที่จับตัวกันแข็งเกินไป หรือดินที่มีหินโผล่ปะปนมากจนไม่สามารถทำการเกษตรได้ดี

(2) เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ส่วนมากจะเกิดจากความรู้เท่าไม่ถึงการณ์มุ่งแต่จะตัดแปลงธรรมชาติเพื่อหวังผลประโยชน์อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยไม่คำนึงถึงผลเสียที่เกิดขึ้นในภายหลัง ตัวอย่างเช่น

- การใช้ปุ๋ยเคมี การใช้ปุ๋ยเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้มีอาหารเพียงพอสำหรับประชากรที่เพิ่มขึ้น เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต จะทำให้มีฟอสเฟตตกค้างในดินมาก ปุ๋ยยู

เรีย ทำให้ดินเป็นกรดมากขึ้น ปุ๋ยแอมโมเนีย ทำให้ดินเป็นด่างมากขึ้น ปุ๋ยที่มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ จะทำให้สมบัติทางกายภาพของดินเลวลง แก้ไขยาก

- การใช้วัตถุมีพิษในการเกษตร ได้แก่ การใช้ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืชและยาฆ่ารา สารเคมี เหล่านี้บางชนิดไม่สะสมในดิน เพราะแบคทีเรียในดินทำลายได้ บางชนิดคงทนในดิน เพราะแทรกในตะกอนหรือ ดินเหนียวได้ดี ทำให้แบคทีเรียทำลายได้ยากจึงสะสมเพิ่มปริมาณในห่วงโซ่อาหารตามลำดับชั้นมากขึ้น

- การปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะของเสียที่มีโลหะหนักปะปนทำให้ดินบริเวณนั้นมีโลหะ หนักสะสมอยู่มาก เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม ทำให้ดินบริเวณนั้นเกิดสภาพเป็นพิษ เกิดอันตรายต่อพืชและผู้บริโภคต่อไปในวงจรอาหาร

- การทิ้งของเสียจากชุมชน ของเสียจากชุมชนที่ก่อให้เกิดมลและขยะมูลฝอย เช่น พลาสติก ขี้เถ้า น้ำเสียจากห้องสุขา เศษอาหาร เศษกระดาษ เศษผ้า ถุงพลาสติก

จากการสำรวจข้อมูลปริมาณโลหะหนักในพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจหลัก 5 ชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และสับปะรด ในดินพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศ โดยศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี เพื่อต้องการทราบค่าโลหะหนักที่มีอยู่ในดินทั่วไปหรือค่าพื้นฐานของโลหะหนัก โดยมีการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 3,186 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในรูปทั้งหมดในดิน พบปริมาณสารหนูอยู่ในช่วง <math><0.001 - 46.0 \text{ mg/kg}</math> แคดเมียมอยู่ในช่วง <math><0.001 - 7.4 \text{ mg/kg}</math> ทองแดงอยู่ในช่วง <math><0.01 - 53.1 \text{ mg/kg}</math> ตะกั่ว (Pb) อยู่ในช่วง <math><0.005 - 191.8 \text{ mg/kg}</math> และสังกะสีอยู่ในช่วง <math><0.04 - 117.9 \text{ mg/kg}</math> ดังตารางที่ 6.11 โดยสามารถกำหนดค่าพื้นฐานในดินเกษตรกรรม ได้ดังนี้ สารหนูเท่ากับ 26 mg/kg แคดเมียมเท่ากับ 1.7 mg/kg ทองแดงเท่ากับ 41 mg/kg ตะกั่วเท่ากับ 55 mg/kg และสังกะสีเท่ากับ 90 mg/kg (กรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 6.11 ปริมาณโลหะหนักในดินเกษตรกรรมของประเทศไทยในพื้นที่ที่ศึกษา

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
	ค่าพิสัย	ค่าเฉลี่ย	ค่าพื้นฐาน
อาร์เซนิก (สารหนู)	<math><0.001-46.0</math>	6.8	26
แคดเมียม	<math><0.001-7.4</math>	0.3	1.7
ทองแดง	<math><0.01-53.1</math>	12.6	41
ตะกั่ว	<math><0.005-191.8</math>	13.4	55
สังกะสี	<math><0.04-117.9</math>	29.4	90

หากมาพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่า ดินในประเทศไทยยังมีค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานที่อ้างอิงในดินต่างประเทศ ทั้งในยุโรป อเมริกา และเอเชียกำหนด อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนโลหะหนักที่เกินจากค่าพื้นฐานอาจเกิดได้จากการปนเปื้อนในน้ำที่ใช้ในระบบชลประทานจากกิจกรรมมนุษย์ เช่น การทิ้งกากสารอันตราย มลพิษจากอุตสาหกรรม การใช้ปุ๋ยเคมี รวมทั้งกิจกรรมที่รบกวนชั้นดินทำให้เกิดการปลดปล่อยโลหะหนักออกจากชั้นธรณีวิทยา เช่น กิจกรรมเหมืองแร่ และกิจกรรมที่

เกี่ยวข้อง เป็นต้น ซึ่งจากการสำรวจและจัดทำค่าพื้นฐาน ทำให้ประเทศไทยสามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนเบื้องต้นในพื้นที่ ถ้ามีการปนเปื้อนเกินค่าพื้นฐานดังกล่าว อาจส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดมลพิษในพื้นที่ จะต้องมีการตรวจสอบการปนเปื้อนอย่างละเอียด มีการจัดการเพื่อลดสาเหตุของปัญหา เปลี่ยนชนิดพืชที่เพาะปลูก และตัดวงจรการปนเปื้อนสู่ห่วงโซ่อาหาร

ปัจจุบันได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพดิน โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1) เพื่ออยู่อาศัยและเกษตรกรรม 2) เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ประกาศโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ดิพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547 ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างดินมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามตรวจสอบคุณภาพดินเบื้องต้น กรณีจำเป็นต้องมีการพิสูจน์สภาพการปนเปื้อนเพื่อการฟื้นฟู ให้มีการประเมินความเสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและคุณภาพสิ่งแวดล้อมในลำดับต่อไป

สรุปท้ายบทเรียน

เคมีสิ่งแวดล้อมเป็นการศึกษาปรากฏการณ์ทางเคมีในสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศ น้ำและดิน รวมทั้งการศึกษาปัจจัยและผลกระทบจากการปนเปื้อนจากมลพิษทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ เกิดเป็นมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อสรรพสิ่งบนโลก ซึ่งปัจจุบันมนุษย์ได้เผชิญกับการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศอย่างรุนแรง สาเหตุของมลพิษทางอากาศโดยส่วนใหญ่จะเป็นควัน ฝุ่นละออง และแก๊สพิษ ซึ่งเป็นผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรงและยังส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ เช่น ชั้นโอโซนถูกทำลายจะส่งผลให้รังสี UV ผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่ผิวโลกมากขึ้น ก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง และเกิดความร้อนสะสมที่ผิวโลกมากขึ้น การเกิดฝนกรด การเกิดเรือนกระจก และหมอกควันทางเคมี มลพิษทางน้ำโดยส่วนใหญ่เกิดจากน้ำทิ้งและสิ่งปฏิกูลจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และพื้นที่ทำการเกษตร ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากมลภาวะทางน้ำ เช่น กระทบต่อวงจรชีวิตของสัตว์น้ำ เป็นแหล่งแพร่ระบาดของเชื้อโรค กระทบต่อการเพาะปลูก กระทบต่อทัศนียภาพ เป็นต้น มลพิษดินเกิดจากดินที่เสื่อมค่าจากเดิม และหรือมีสารพิษเกินขีดจำกัด จนเป็นอันตราย ต่อสุขภาพและพละานามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์ พืชและสัตว์ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม สาเหตุที่ทำให้ดินเสื่อมอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ เช่น ดินเปรี้ยว ดินเค็ม ดินที่มีสารกัมมันตภาพรังสี ดินปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ การใช้ปุ๋ยเคมี การทิ้งกากสารอันตราย มลพิษจากอุตสาหกรรม การใช้ปุ๋ยเคมี รวมทั้งกิจกรรมที่รบกวนชั้นดินทำให้เกิดการปลดปล่อยโลหะหนักออกจากชั้นธรณีวิทยา เช่น กิจกรรมเหมืองแร่ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

กิจกรรม

ขั้นตอน	วิธีการ
แนะนำโจทย์ปัญหา (P)	แจกใบกิจกรรม 6.2
ไตร่ตรองทางแก้ไขเฉพาะตน (E)	แต่ละคนบอกวิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา (10 นาที)
ระดมสมองโดยกลุ่ม (T)	ให้รวมกลุ่ม มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่มระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการร่วมแสดงความคิดเห็น (10 นาที)
สื่อสารทางออก (C)	ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย (10 นาที)
ถอดรหัสสลับใช้ (D)	ผู้สอนสรุป อภิปรายสรุป ความถูกต้องและความผิดพลาด โดยเพิ่มเติมประเด็นที่เกี่ยวข้องให้สมบูรณ์

แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

1. อธิบายชั้นบรรยากาศ
2. อธิบายการเกิดโอโซน
3. อธิบายการเกิดฝนกรด
4. อธิบายชั้นดิน

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (ม.ป.ป.). ข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ.
http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi_info.php
- คัตคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ. (20 พ.ย.2020). หมอกควัน หรือ หมอกพิษ (Smog).
<https://ngthai.com/science/31886/smog/>
- ชั้นบรรยากาศ. (ม.ป.ป.). ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์และดาราศาสตร์.
<http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/atm-structure>
- ดิน. (ม.ป.ป.). กรมทรัพยากรธรณี. <http://www.dmr.go.th>
- มลพิษทางอากาศ. (ม.ป.ป.). กรมส่งเสริมสุขภาพสิ่งแวดล้อม. <https://datacenter.deqp.go.th/>
- มลพิษสิ่งแวดล้อมและการจัดการ. (ม.ป.ป.). การอนุรักษ์ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในงานอาชีพ.
<https://sites.google.com/site/wichakarxnuraks/hnwy-thi-9-1>
- Basic Ozone Layer Science. (n.d.). <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science>.
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J., Woodward, P.M. & Stoltzfus, M.W. (2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson Education, Inc.
- Chae, Y., & An, Y.J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review, *Environmental Pollution*, 240, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>.
- Kumar, G. (2018). *Air Pollution: Consequences and Treatments*.
- Kumaragamage, D., Warren, J., & Spiers, G. (2021, November 26). *Soil Chemistry*. Libretexts Geoscience. https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Soil_Science
- LotusArise. (2021, January 4). *Properties of Soil: Physical, Chemical & Biological – UPSC*. <https://lotusarise.com/properties-of-soil-upsc>
- Mukherjee, S. (2022). Concepts of Soil Chemistry. *Current Topics in Soil Science*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92669-4_12
- Nikam, J., Archer, D., & Nopsert, C. (2021). *Air Quality in Thailand*. <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/02/210212c-killen-archer-air-quality-in-thailand-wp-2101e-final.pdf>
- Overby, J. & Chang, R., (2022). *Chemistry* (14th ed.). McGraw-Hill.
- Physical Properties of Soil – Structure* (2). (n.d.). <https://sagrainmag.co.za/2019/03/06/soil-the-producers-most-important-asset-oil-the-producers-most-important-asset-part-5-2-physical-properties-of-soil-structure/>
- Pinti, D.L. (2021). *Composition of the Earth's Atmosphere*, Editor(s): David Alderton, Scott A. Elias, *Encyclopedia of Geology* (Second Edition), p. 187-197, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00054-0>
- Soil*. (n.d.). https://www.bio.miami.edu/dana/330/330F19_8.html
- Soil Pollution*. (n.d.). <https://byjus.com/chemistry/soil-pollution/>

- Sparks, D.L. (2003). Environmental Soil Chemistry: An Overview. In D.L. Sparks (Eds), *Environmental Soil Chemistry* (2nd Ed.). pp. 1-42. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-012656446-4/50001-3>.
- Sukkhum, S., Lim, A., Ingviya, T., Saelim, R. (2022). Seasonal patterns and trends of air pollution in the upper northern Thailand from 2004 to 2018. *Aerosol Air Quality Research*, 22, 210318. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210318>
- Vichit-Vadakan, N., & Vajanapoom, N. (2011). Health impact from air pollution in Thailand: current and future challenges. *Environmental Health Perspectives*, 119(5), A197–A198. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103728>
- Wuebbles, D. (2022, September 7). *Ozone Layer*. Encyclopedia Britannica.
<https://www.britannica.com/science/ozone-layer>

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 15

หน่วยที่ 6 เคมีนิวเคลียร์และเคมีสิ่งแวดล้อม

บทเรียนที่ 6.3 เคมีสีเขียวและการจัดการมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

จำนวนชั่วโมง 3

จุดประสงค์การสอน (จุดประสงค์ทั่วไป)

1. เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเคมีสีเขียวและการจัดการมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

ผลการเรียนรู้ (จุดประสงค์เฉพาะ)

1. อธิบายเคมีสีเขียว
2. อธิบายการจัดการมลพิษทางอากาศ
3. อธิบายการบำบัดน้ำเสีย

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยาย และอภิปราย
2. กิจกรรมกลุ่มในชั้นเรียน (Work@class)

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. เอกสารคำสอน วิชาเคมี 2
2. เอกสาร powerpoint
3. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=11425
4. <https://www.facebook.com/chemographics>
5. <https://www.slideshare.net/woravith>

การวัดผล

1. ประเมินจากกิจกรรมในชั้นเรียน
2. ประเมินจากกิจกรรมแบบฝึกหัด หรืองานที่มอบหมาย
3. ประเมินจากการสรุปประเด็นสำคัญ หรือการนำเสนอผลของการสืบค้นที่ได้รับมอบหมาย
4. ประเมินจากการสอบย่อยรายหน่วยเรียน

บทเรียนที่ 6.3 เคมีสีเขียวและการจัดการมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

6.3.1 เคมีสีเขียว

1) ความหมาย

ในปี ค.ศ. 1991 Anastas และ Warner ได้เสนอการใช้คำว่า เคมีสีเขียว (green chemistry) เป็นครั้งแรกในโครงการพิเศษที่จัดทำขึ้นโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม สหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; EPA) กำหนดนิยามของเคมีสีเขียวไว้ดังนี้ Green chemistry is the design of chemical products and processes that reduce or eliminate the use or generation of hazardous substances. Green chemistry applies across the life cycle of a chemical product, including its design, manufacture, use, and ultimate disposal (EPA, 2022, May 27) ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเคมีสีเขียวมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการและเทคโนโลยีทางเคมีให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอันเป็นแนวทางพัฒนาแบบยั่งยืน โดยใช้หลักการและระเบียบวิธีทางเคมีเพื่อลดและป้องกันการเกิดมลพิษตั้งแต่แหล่งผลิต หลักการเปลี่ยนแปลงสมบัติภายในของผลิตภัณฑ์ทางเคมีหรือกระบวนการทางเคมีเพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมให้น้อยลง

เคมีสีเขียวเป็นแนวคิดของการนำหลักการพื้นฐานที่คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต รวมทั้งคำนึงถึงการป้องกันหรือลดการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการในการเลือกใช้วัตถุดิบการวางแผนและการออกแบบการผลิตและการใช้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม กล่าวได้ว่า เคมีสีเขียวจะให้ความสำคัญกับการป้องกันที่ต้นเหตุมากกว่าการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ (ณัฐรศุณิน ศุภเมธานนท์ และคณะ, 2559) ที่มีความแตกต่างจากเคมีสิ่งแวดล้อมที่ศึกษาถึงสาเหตุ แหล่งที่มา ปฏิกริยาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางอากาศ ดิน และน้ำ รวมถึงผลกระทบต่อกิจกรรมในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งเคมีสีเขียวจะมองลึกไปที่รากเหง้าอันเป็นบ่อเกิดและจุดเริ่มต้นของปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ถ้ามีการสังเคราะห์หรือผลิตสารเคมีตัวหนึ่งขึ้นมา โดยมีการใช้สารตั้งต้นหรือสารที่ใช้ในปฏิกิริยาตลอดจนกระทั่งตัวทำละลายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม การหาสารอื่นที่ไม่เป็นอันตรายทดแทนหรือการเปลี่ยนกระบวนการตลอดจนเลือกตัวทำละลายที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะจะเป็นสิ่งที่เคมีสีเขียวคำนึงถึงและเลือกใช้เป็นแนวทางทดแทนกระบวนการเดิมที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาถึงแนวคิดและหลักการสำคัญ จะเห็นได้ว่าเคมีสีเขียวสามารถสอดแทรกอยู่ได้ในเคมีพื้นฐานแขนงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น อินทรีย์เคมี อนินทรีย์เคมี ชีวเคมี เคมีชีวภาพ เคมีวิเคราะห์ และ เคมีเชิงฟิสิกส์ ตลอดจนมีการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้กระบวนการทางเคมีในแขนงต่างๆ เช่น ปิโตรเคมี โพลีเมอร์ นาโนเทคโนโลยี เป็นต้น ทั้งนี้ด้วยวัตถุประสงค์อันเป็นจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือการทำให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุด แต่เพิ่มประสิทธิผลและศักยภาพของกระบวนการผลิตและสังเคราะห์ ตลอดจนการนำไปใช้ประโยชน์

2) หลักสำคัญของเคมีสีเขียว

เคมีสีเขียวเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มีมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากจุดเริ่มต้น โดยมีหลักการ 12 ประการของเคมีเขียวที่ตีพิมพ์ในบทความโดย Anastas และ Warner (1998) สรุป

(1) ป้องกันการเกิดของเสีย (prevent waste) โดยการออกแบบกระบวนการทางสังเคราะห์ที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียเพื่อจะได้ไม่ต้องมีการกำจัดหรือบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นในภายหลัง

(2) ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้สารตั้งต้นถูกนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์มากที่สุด (atom economy) โดยการออกแบบกระบวนการที่ให้ผลผลิตอันเกิดจากการรวมตัวของมวลสารตั้งต้นสูงสุด และมีการสูญเสียมวลสารที่ใช้น้อยที่สุด เพื่อที่จะใช้วัตถุดิบทุกชนิดให้คุ้มค่า โดยไม่ให้เหลือมากเกินไปในทุกกระบวนการของการผลิตจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ขั้นตอนทางเคมีควรได้รับการออกแบบเพื่อลดการรวมตัวของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการลงในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายเป็นการวัดจำนวนอะตอมจากวัสดุเริ่มต้นที่มีอยู่ในรายการที่มีค่าจนถึงจุดสิ้นสุดของวัฏจักรสังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากปฏิกิริยาที่ไม่เป็นประโยชน์สามารถนำไปสู่การประหยัดอะตอมและของเสียน้อยลง

(3) ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นอันตรายหรือเป็นพิษน้อยหรือไม่มีพิษ (less hazardous chemical syntheses) หลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่ไม่ปลอดภัยเป็นขั้นตอนเริ่มต้น ควรพิจารณาตัวเลือกที่ปลอดภัยมากกว่า นอกจากนี้ การมีของเสียอันตรายจากวัฏจักรสารหรือปฏิกิริยาเคมีเป็นสิ่งที่เราต้องพิจารณาหลีกเลี่ยง เนื่องจากอาจทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด ดังนั้นขั้นตอนหรือวิธีการทางเคมีควรได้รับการออกแบบเพื่อใช้และสร้างสารที่มีความเป็นพิษน้อยหรือไม่มีพิษต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

(4) ออกแบบสารเคมีและผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ (designing safer chemicals and products) ผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ควรได้รับการออกแบบเพื่อรักษาประสิทธิภาพของการทำงานในขณะที่ลดความเป็นพิษ

(5) ใช้ตัวทำละลายและกระบวนการที่ปลอดภัย (use safer solvents and reaction conditions) ปฏิกิริยาเคมีหลายอย่างจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ เพื่อเร่งกระบวนการ นอกจากนี้ยังมาพร้อมกับความเสี่ยงที่หลากหลาย รวมถึงการติดไฟและความผันผวน แม้ว่าตัวทำละลายจะหลีกเลี่ยงไม่ได้ในกระบวนการส่วนใหญ่ แต่ควรเลือกตัวทำละลายที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (supercritical CO₂) และตัวทำละลายที่มีประจุ (ionic liquids) ในขณะที่ตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนมากไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ควรหลีกเลี่ยงใช้สถานะที่รุนแรง เป็นพิษ มีกรดหรือด่างรุนแรง

(6) เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน (design for energy efficiency) ด้านพลังงานควรได้รับการยอมรับสำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจและควรลดลง กระบวนการทางเคมีควรทำที่อุณหภูมิและความดันแวดล้อม ควรใช้พลังงานน้อยที่สุดในการผลิตผลิตภัณฑ์เคมีโดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันห้อง การกำจัดตัวทำละลายหรือวิธีการกำจัดสิ่งสกปรกอาจเพิ่มปริมาณพลังงานที่ต้องการและด้วยเหตุนี้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ

(7) ใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (use renewable feedstock)

(8) ลดการเกิดสารอนุพันธ์ (reduce derivatives) เช่นการใส่หมู่ป้องกัน (protecting group) ที่ต้องมีการเอาออกในภายหลัง ทั้งนี้ขั้นตอนการใส่หมู่ป้องกันและการเอาออก อาจจะเป็นการสร้างของเสียขึ้นมาได้

(9) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (use catalysts) ที่มีประสิทธิภาพ โดยหลีกเลี่ยงการใช้สารทำปฏิกิริยาในปริมาณมาก ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดของเสียในปริมาณที่น้อยและสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งในปฏิกิริยาแบบเดียวกัน

(10) ออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วมีการสลายตัวโดยไม่ก่ออันตราย (design for degradation)

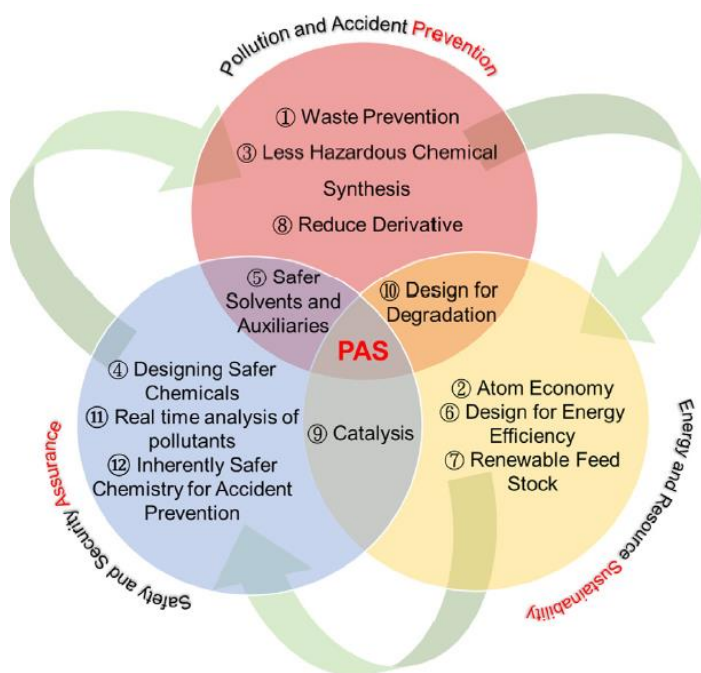
(11) มีการวิเคราะห์อย่างทันท่วงทีเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะ (real time analysis for pollution prevention) มีกระบวนการวิเคราะห์แบบทันทีของผลข้างเคียงจากปฏิกิริยา โดยการตรวจสอบและควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตจนเสร็จสิ้นเพื่อลดหรือกำจัดการเกิดผลข้างเคียง

(12) ใช้สารเคมีที่ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ (inherently safer chemistry for accident prevention) โดยการออกแบบและควบคุมปฏิกิริยาไม่ว่าอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เพื่อป้องกันมิให้เกิดการระเบิด ลูกติดไฟหรือถูกปลดปล่อยเข้าสู่ธรรมชาติ

เคมีพื้นฐานและเคมีประยุกต์แขนงต่าง ๆ ล้วน แล้วแต่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียว ถ้ามีวัตถุประสงค์อันเป็นจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากจุดเริ่มต้นโดยคำนึงถึงหลักทั้ง 12 ข้อ โดยสรุปหลักการทั้งหมดสามารถมองเห็นเป็นภาพกว้าง ๆ ครอบคลุมหัวใจหลักของเคมีสีเขียวได้ดังนี้

- 1) การออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้ได้ผลิตผลมากที่สุด
- 2) การเลือกใช้กระบวนการที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) การออกแบบและเลือกใช้กระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 4) สิ่งที่ดีที่สุดของการจัดการของเสียคือการไม่สร้างของเสีย

จากหลักสำคัญของเคมีสีเขียวข้างต้นเพื่อนำไปสู่เป้าหมายแห่งการพัฒนาที่ยั่งยืน สามารถกำหนดนิยามใหม่ของหลักของเคมีสีเขียวเป็น 3 กลุ่มคือ การป้องกันมลพิษและอุบัติเหตุ (pollution and accident prevention) การประกันความปลอดภัย (safety and security assurance) และพลังงานและความยั่งยืนของทรัพยากร (energy and resource sustainability) ดังภาพที่ 6.39 (Chen, et al., 2020)



ภาพที่ 6.39 แนวทางการนำไปใช้ของหลักการเคมีสีเขียวสู่เป้าหมายแห่งการพัฒนาที่ยั่งยืน

หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียวมุ่งเพื่อออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมีให้มีประสิทธิภาพ ใช้วัตถุดิบ สารเคมี ตัวทำละลาย สารช่วยและพลังงานอย่างคุ้มค่า เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ปกป้องรักษาสุขภาพของมนุษย์และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียว เมื่อนำอักษรตัวแรกสุดของแต่ละบรรทัดมาประกอบกันจะได้คำว่า PRODUCTIVELY ซึ่งหมายถึง ก่อให้เกิดผลอย่างมีประสิทธิภาพ (Tang, Smith & Poliakoff, 2005)

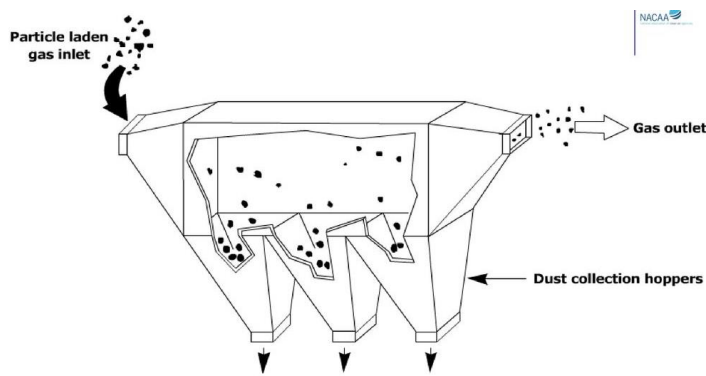
ตารางที่ 6.12 แนวคิดสำคัญของหลักการเคมีสีเขียว

หลักการ 12 ข้อ	แนวคิด
1. Prevent waste	ป้องกันไม่ให้เกิดของเสียจะดีกว่าการบำบัดหรือทำความสะอาดภายหลังเมื่อของเสียเกิดขึ้นแล้ว
2. Renewable materials	การใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งรวมถึงการใช้วัสดุเหลือใช้หรือทิ้งแล้วจากกระบวนการอื่นๆ
3. Omit derivatization steps	หลีกเลี่ยงการสร้างสารอนุพันธ์ การป้องกันและการถอนการป้องกัน การเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีโดยไม่จำเป็น
4. Degradable chemical products	ออกแบบผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่แน่ใจได้ว่าหลังจากการใช้งานแล้วจะไม่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมหรือจะสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ
5. Use safe synthetic methods	ออกแบบวิธีสังเคราะห์ที่ใช้หรือสร้างสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำหรือไม่เป็นพิษต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทุกครั้งที่สามารถทำได้
6. Catalytic reagents	ใช้สารทำปฏิกิริยาแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงสูงดีกว่าใช้สารทำปฏิกิริยาแบบปริมาณสัมพันธ์
7. Temperature, pressure ambient	คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ทุกครั้งที่ต้องใช้พลังงาน และควรใช้พลังงานให้น้อยที่สุด วิธีสังเคราะห์ต้องทำที่อุณหภูมิและความดันปกติ
8. In-process monitoring	พัฒนาวิธีวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าแบบเรียลไทม์ในขณะที่ผลิตและสามารถควบคุมได้ก่อนที่จะเกิดเป็นสารเคมีอันตราย
9. Very few auxiliary substances	หลีกเลี่ยงการใช้สารช่วยต่างๆ เช่น ตัวทำละลาย สารช่วยในการแยกและอื่น ๆ ถ้าจำเป็นต้องใช้จะต้องเลือกใช้สารที่ไม่เป็นพิษทุกครั้งที่สามารถทำได้
10. E-factor, maximize feed in product	ออกแบบวิธีสังเคราะห์ให้วัสดุทุกชนิดที่ใช้ในกระบวนการรวมเข้าไปอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายให้ได้มากที่สุด
11. Low toxicity of chemical products	ออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้มีผลในการใช้งานตามที่ต้องการในขณะที่ต้องทำให้ความเป็นพิษลดลง
12. Yes, it is safe	เลือกสารและรูปแบบของสารที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีที่ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุทางเคมี ได้แก่ การรั่วไหล การระเบิด และการเกิดเพลิงไหม้

6.3.2 การจัดการมลพิษทางอากาศ

ปัญหามลพิษทางอากาศของละอองฝุ่นขนาดเล็ก (particulate matter, PM) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน หรือ PM₁₀ ไปจนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน หรือ PM_{2.5} เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากในประเทศไทยในช่วงปีที่ผ่านมา ฝุ่นละอองเหล่านี้สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและส่งผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชน โดยเฉพาะโรคเรื้อรังในระบบทางเดินหายใจ เช่น หอบหืด ถุงลมโป่งพอง และโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง เป็นต้น แหล่งกำเนิดฝุ่นที่พบได้มากที่สุดในประเทศไทยแบ่งตามขนาดของละอองฝุ่น คือ ละอองฝุ่นขนาดเล็กที่พบได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในยานพาหนะ และการเผาไหม้ชีวมวล ส่วนละอองฝุ่นขนาดใหญ่มักพบได้จากการก่อสร้างอาคารและการพัดพาของดิน

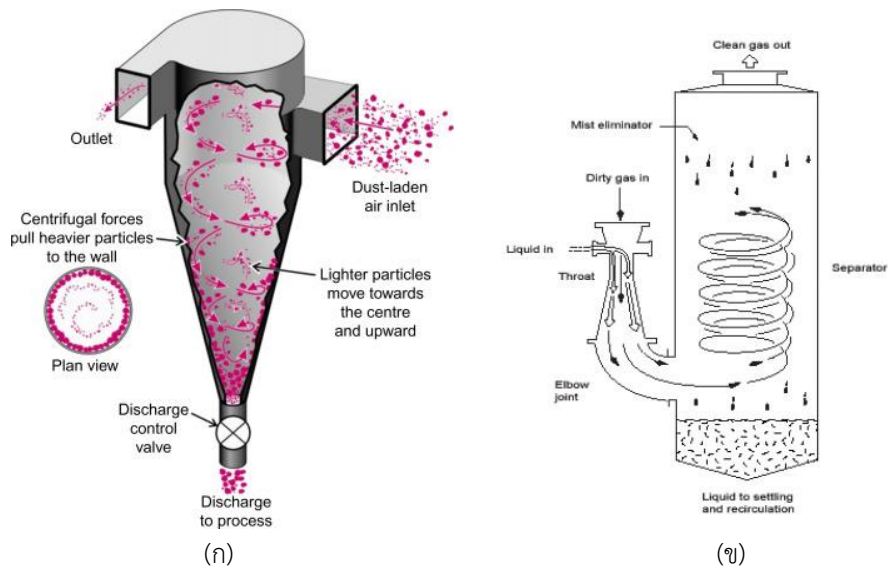
การกำจัดควันและฝุ่นละอองอาศัยการแยกฝุ่นละอองออกจากแก๊สของเสียที่ปล่อยออกมา ทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ในการเลือกใช้วิธีการรวมถึงอุปกรณ์ดักฝุ่นขึ้นกับขนาดอนุภาค และประสิทธิภาพที่ต้องการ เทคโนโลยีที่ง่ายที่สุดในการดักจับฝุ่นคืออาศัยการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ห้องดักฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity settling chamber) ซึ่งจะให้อากาศฝุ่นผ่านเข้าไปในห้องดักฝุ่น ดังภาพที่ 6.40 การออกแบบห้องดักฝุ่นจะทำให้ความเร็วของอากาศลดลงจนอนุภาคขนาดใหญ่ตกตะกอน และไม่ฟุ้งกระจายขึ้นมาอีก การดักจับฝุ่นด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (ประมาณ 50%) มักจะใช้ก่อนผ่านอากาศเข้าเครื่องเก็บฝุ่นชนิดอื่น และใช้ได้ดีกับฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 50 ไมครอน (μm) แต่ไม่นิยมใช้กำจัดอนุภาคที่ละเอียดมาก เพราะต้องใช้เวลาตกตะกอนนานขึ้น



ภาพที่ 6.40 ห้องดักฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วง

อุปกรณ์ดักฝุ่นอีกชนิดหนึ่งอาศัยการแยกโดยแรงเหวี่ยง เรียกว่า อุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ไชโคลน (cyclone) ดังภาพที่ 6.41(ก) ภายในอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้แก๊สหมุนวนเป็นเกลียว ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงให้ฝุ่นละอองไปกระทบกับผนังและตกลงไปกองอยู่ในกรวยตอนล่างเพื่อรอการกำจัดต่อไป ไชโคลนเหมาะสำหรับกำจัดอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนขึ้นไป ดังนั้นหากฝุ่นละอองมีอนุภาคขนาดใหญ่ควรผ่านห้องดักฝุ่นด้วยแรงโน้มถ่วงมาก่อนเข้าไชโคลน เพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกก่อนจะช่วยยืดอายุการใช้งานของไชโคลนได้ในการดักจับฝุ่นอาจมีการฉีดพ่นน้ำเป็นละอองฝอยเพื่อให้อนุภาคเปียก และตกลงไปพร้อม ๆ กับน้ำได้ เรียกว่า อุปกรณ์ลักษณะนี้ว่า เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก (wet scrubber) ดังภาพที่ 6.41(ข) ซึ่งใช้ได้ดีกับอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 0.1 ถึง 2 ไมครอน เพราะน้ำทำให้อนุภาคเล็ก ๆ รวมตัวใหญ่ขึ้น จึงลดการฟุ้งกระจายได้ดี แต่มีข้อเสียคือจะทำให้เกิดน้ำเสียที่ต้องไป

บำบัดต่อ โดยเฉพาะในกรณีที่มีอากาศฝุ่นมี SO_x และ NO_x เจือปน จะทำให้เกิดน้ำกรดกัดกร่อนเครื่องมือได้ (Birgit et al., 2010).



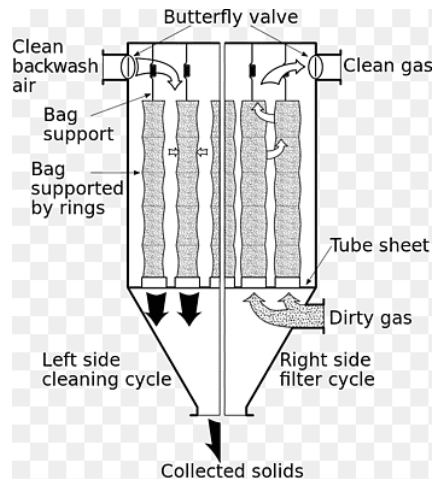
ภาพที่ 6.41 อุปกรณ์ดักฝุ่นชนิด (ก) ไซโคลน และ (ข) เครื่องเก็บฝุ่นแบบเปียก

ตารางที่ 6.13 ประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาคของอุปกรณ์ต่าง ๆ

อุปกรณ์	ช่วงขนาดอนุภาคในการคัดแยกที่เหมาะสม (ไมครอน)	ประสิทธิภาพในการคัดแยก (%)
แผ่นกรอง	0.1-2.0	80-99
เครื่องคัดแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต	0.2-10.0	55-99
เครื่องคัดแยกอนุภาคแบบเปียก	0.2-50.0	10-99
ไซโคลน	0.5-100.0	1-99

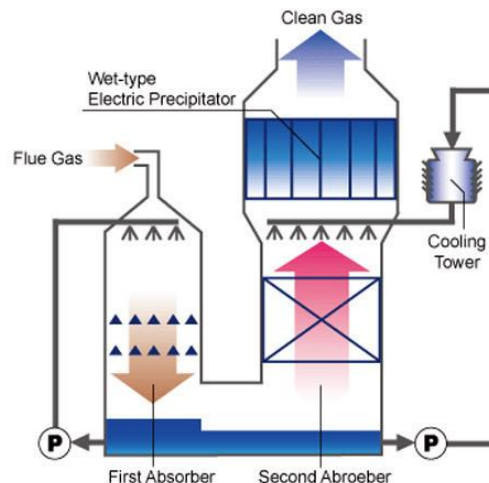
เนื่องจากไซโคลนมีการใช้พลังงานที่ต่ำ และเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน จึงทำให้ไซโคลนได้รับความนิยมในการติดตั้งเพื่อคัดแยกฝุ่น จากตารางที่ 6.13 จะเห็นได้ว่าไซโคลนสามารถใช้แยกฝุ่นได้ดีในช่วงกว้าง แต่ประสิทธิภาพในการแยกมีช่วงกว้างตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 99 ทั้งนี้ การเลือกใช้รูปแบบของไซโคลนรวมถึงภาวะดำเนินการของไซโคลนที่เหมาะสม จึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการคัดแยกที่ต้องการ

อุปกรณ์ดักจับฝุ่นโดยอาศัยการกรองทางกายภาพด้วยถุงกรอง คืออุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกรองใย (fabric filter) ดังภาพที่ 6.42 โดยจะให้อากาศฝุ่นผ่านเข้าไปในห้องแยก (bag house) ซึ่งมีถุงกรองหลายใบแขวนอยู่ เพื่อทำหน้าที่กรองฝุ่นออกจากอากาศ วัสดุที่ใช้ทำถุงอาจเป็นผ้าฝ้าย ผ้าป่าน ผ้าอาบน้ำยา โยสังเคราะห์ หรือกระดาษ ขึ้นกับอุณหภูมิของแก๊สและชนิดของอนุภาค เมื่อถุงสกปรกจะทำ ความสะอาดได้ด้วยการเขย่าหรือใช้ลมเป่า



ภาพที่ 6.42 เครื่องกรองใย

อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดักจับฝุ่น คือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) ดังภาพที่ 6.43 สามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน โดยจะให้อากาศฝุ่นผ่านเข้าสู่สนามไฟฟ้าแรงสูง ทำให้อนุภาคฝุ่นเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นและวิ่งเข้าหาแผ่นโลหะที่มีประจุตรงกัน ข้ามฝุ่นละอองจะตกจากขั้วไฟฟ้าได้เมื่อถูกเคาะ และตกลงสู่กรวยรองรับ



ภาพที่ 6.43 เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

6.3.3 การบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสารใด ๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็นและเชื้อโรคต่าง ๆ

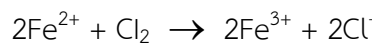
1) วิธีการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกัน จะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี

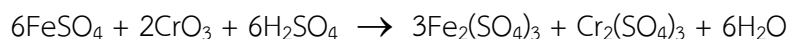
(1) กระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

(1.1) การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่าง ๆ อาทิ เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$)

(1.2) การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังสมการ



(1.3) การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ในสภาพที่เป็นกรด ดังสมการ



(1.4) การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH เท่ากับ 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH น้อยกว่า 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH มากกว่า 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

(2) กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) กระบวนการทางชีววิทยาเป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้

เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

(3) กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น

- การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย
- การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง
- การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย
- การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ
- การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

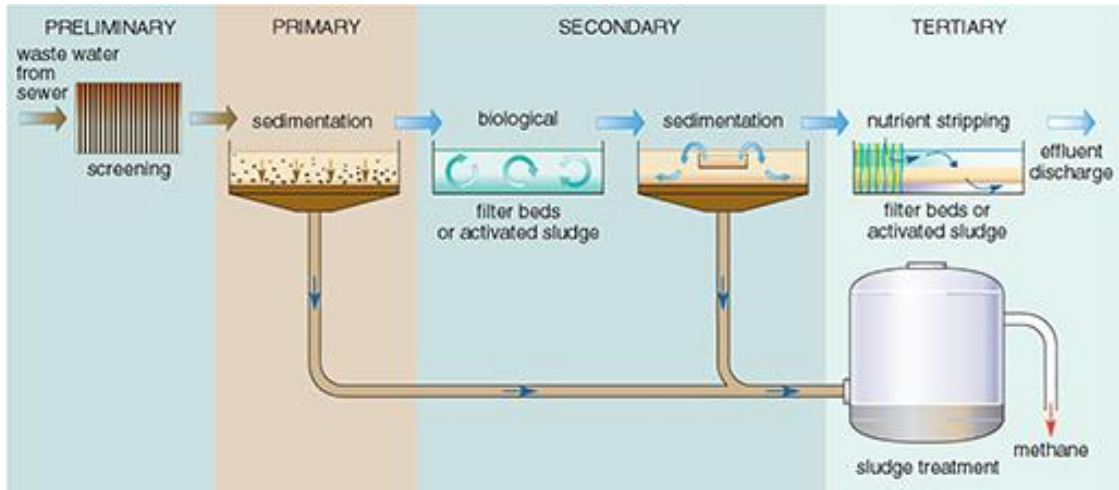
(4) กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process) เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

(4.1) การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

(4.2) การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียดับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

2) ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง แบ่งออกได้เป็นขั้นตอนตามแหล่งที่มาของน้ำเสียแตกต่างกัน ซึ่งทำให้น้ำเสียมีคุณสมบัติกายภาพ เคมีและชีวภาพ ไม่เหมือนกัน ขั้นตอนการบำบัดสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 6.44



ภาพที่ 6.44 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

ขั้นตอนที่ 1 คือ การบำบัดขั้นเตรียมการ (preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำ โดยเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยตะแกรงหยาบ (coarse screen) ตะแกรงละเอียด (fine screen) ถังตกกรวดทราย (grit chamber)

ขั้นตอนที่ 2 การบำบัดขั้นต้น (primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนที่ 1 แล้วจะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอนเบื้องต้น (primary sedimentation tank) และเครื่องกำจัดไขมัน (skimming devices) ซึ่งเรียกตะกอนที่ได้ว่า primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25-40% แล้วแต่คุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

ขั้นตอนที่ 3 การบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว แต่ยังคงมีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กและสารอินทรีย์ทั้งที่ละลายและไม่ละลายในน้ำเสียเหลือค้างอยู่ จะถูกนำไปสู่ถังเติมอากาศซึ่งจะมีการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียโดยใช้เครื่องเติมอากาศแบคทีเรียช่วยย่อยสลายและกำจัดสารอินทรีย์ เรียกขั้นตอนนี้ก็อย่างว่า การบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment) ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยงจุลินทรีย์ในระบบภายใต้สภาวะที่สามารถควบคุมได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกินสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แล้วจึงแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถังตกตะกอน น้ำในส่วนบนของถังตกตะกอนจะใสขึ้น ในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75-95% ซึ่งค่า BOD ของน้ำส่วนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นจึงผ่านเข้าระบบฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคปนเปื้อน ก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ การบำบัดน้ำเสียในขั้นนี้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80

ขั้นตอนที่ 4 การบำบัดขั้นที่สาม (tertiary treatment) เป็นกระบวนการกำจัดสารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) สี สารแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก และอื่น ๆ ซึ่งยังไม่ได้ถูกกำจัดโดยกระบวนการบำบัดขั้นที่สอง ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้นเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเติบโตผิดปกติของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำเน่า แก้ไขปัญหาความน่ารังเกียจของแหล่งน้ำอันเนื่องจากสี และแก้ไขปัญหาคืออื่น ๆ ที่ระบบบำบัดขั้นที่สองมิสามารถกำจัดได้ กระบวนการบำบัดขั้นนี้ ได้แก่

- การกำจัดฟอสฟอรัส ซึ่งมีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและแบบใช้กระบวนการทางชีวภาพ

- การกำจัดไนโตรเจน ซึ่งมีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและแบบใช้กระบวนการทางชีวภาพ โดยวิธีการทางชีวภาพนั้นจะมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนให้เป็นไนเตรต ที่เกิดขึ้นในสภาวะแบบใช้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และขั้นตอนการเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification)
- การกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนร่วมกันโดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้ทั้งกระบวนการแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศในการกำจัดไนโตรเจนโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและกระบวนการดีไนตริฟิเคชันร่วมกับกระบวนการจับใช้ฟอสฟอรัสอย่างพุ่มเพื่อย ซึ่งต้องมีการใช้กระบวนการแบบไม่ใช้อากาศต่อด้วยกระบวนการใช้อากาศด้วยเช่นกัน
- การกรอง (filtration) ซึ่งเป็นการกำจัดสารที่ไม่ต้องการโดยวิธีการทางกายภาพอันได้แก่ สารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก เป็นต้น
- การดูดติดผิว (adsorption) ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสียโดยการดูดติดบนพื้นผิวของของแข็ง รวมถึงการกำจัดกลิ่นหรือแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการเดียวกัน

ตารางที่ 6.14 ร้อยละการกำจัดน้ำเสีย

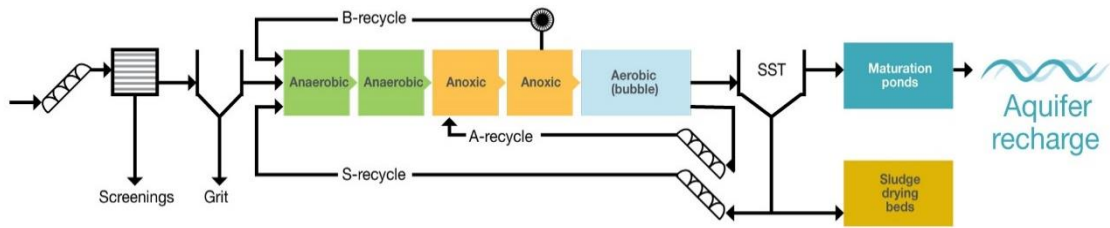
องค์ประกอบ	การบำบัดขั้นต้น	การบำบัดขั้นที่สอง	การบำบัดขั้นที่สาม
ของแข็งแขวนลอย	60-70	80-95	90-95
BOD	20-40	70-90	>95
ฟอสฟอรัส	10-30	20-40	85-97
ไนโตรเจน	10-20	20-40	20-40
แบคทีเรีย <i>E. coli</i>	60-90	90-99	>99
ไวรัส	30-70	90-99	>99
แคดเมียม และสังกะสี	5-20	20-40	40-60
ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม	40-60	70-90	80-89

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก <https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/environmental-studies/understanding-water-quality/content-section-5.1>

2.1) การบำบัดน้ำเสียจากชุมชน

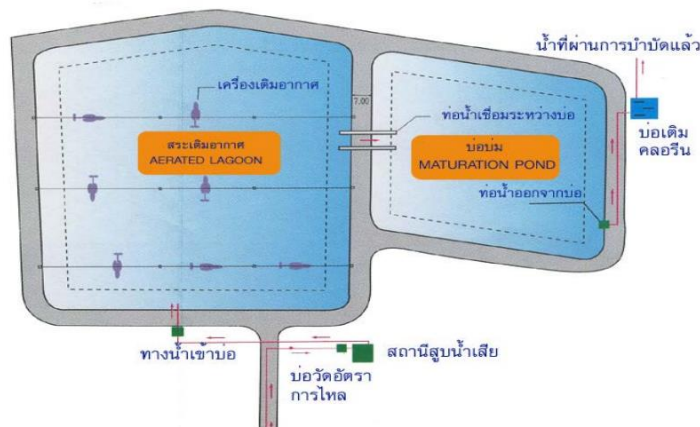
น้ำเสียจากชุมชนมักจะเป็นน้ำสกปรกที่มีสารอินทรีย์เจือปนและมีสารซักล้างปะปนอยู่ การบำบัดเริ่มจากการ แยกสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ออกโดยใช้ตะแกรง แล้วส่งเข้าเครื่องย่อย ทำหน้าที่ตัดสิ่งสกปรกให้มีขนาดเล็กลง เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกชิ้นใหญ่ ๆ ที่อาจหลุดรอดตะแกรงได้ไหลไปอุดตันท่อ ทางระบายน้ำ หรือเครื่องสูบน้ำ จากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่รางตกตะกอนเพื่อแยกเศษหิน ดินทรายให้ตกลงไปอยู่ด้านล่างของรางตกตะกอน ส่วนโคลนหรือสารแขวนลอยในน้ำจะถูกปล่อยให้ตกตะกอนในถังตกตะกอน น้ำใสที่ได้จะนำไปเติมเกลือคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อ ส่วนตะกอนที่ก้นถังจะถูกดึงออกจากถังเพื่อนำไปย่อยด้วยแบคทีเรีย (แบบไม่ใช้ออกซิเจน) ในถังย่อย โดยจะแยกโคลนและเมือกออกจากน้ำดี ซึ่งจะนำกลับไปถังตกตะกอนเพื่อทำให้น้ำใสอีกครั้ง ภาพที่ 6.45 ในกรณีที่ต้องการน้ำทิ้งที่สะอาด จนนำไปใช้อุปโภคบริโภคต่อไปได้จะต้องเพิ่มกระบวนการเติมอากาศ กระบวนการตกตะกอนด้วย

ปูนขาว การกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการกำจัดไอออนต่าง ๆ ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นขั้นตอนสุดท้าย



ภาพที่ 6.45 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน

ระบบบำบัดน้ำเสียอีกวิธีหนึ่งคือระบบบ่อเติมอากาศ ดังภาพที่ 6.46 โดยมีลักษณะเป็นบ่อดินหรือบ่อคอนกรีตที่มีความลึกประมาณ 0.5-2 เมตร น้ำเสียจะไหลเข้าและออกจากบ่อตลอดเวลา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอาศัยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการกำจัดสารอินทรีย์ ส่วนแก๊สออกซิเจนที่ละลายในน้ำมาจากการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ และระบบเติมอากาศ



ภาพที่ 6.46 ระบบบ่อเติมอากาศ

2.2) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีกระบวนการหรือแบบแผนที่แน่นอน โดยกระบวนการบำบัดขึ้นอยู่กับชนิดของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีไอออนของโลหะหนักเจือปนจะต้องใช้กระบวนการทางเคมีในการบำบัด ส่วนน้ำทิ้งจากโรงงานทำน้ำอัดลมส่วนใหญ่เป็นน้ำล้างขวดและน้ำอัดลมที่เหลือติดขวดที่มีน้ำตาลปนอยู่กับน้ำทิ้ง จะใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อควรคำนึงถึงเพิ่มเติมอีก ดังนี้

(1) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส จะต้องมีกรลดอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด ด้วยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

(2) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกรดหรือเบสเจือปนอยู่มาก จะต้องปรับสภาพ pH ให้เป็นกลาง

(3) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่ขาดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จะต้องเติมสารประกอบที่มีธาตุทั้งสองนี้ลงไปเพื่อเป็นอาหารเสริมสำหรับแบคทีเรียหากต้องการจะบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

(4) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า BOD สูงมาก การลดค่า BOD จนถึงค่าตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม (20 มิลลิกรัม/ลิตร) จะต้องใช้กระบวนการบำบัดที่มีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก

(5) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่กำจัดได้ยากปนอยู่ เช่น สีในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

โดยทั่วไปน้ำเสียที่มีค่า BOD สูงกว่า 3000 มิลลิกรัม/ลิตร จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนก่อน แล้วจึงนำมาบำบัดในขั้นต่อไปด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งสามารถลดค่า BOD

การควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถป้องกันการเน่าเสียของน้ำได้ โดยน้ำทิ้งจากโรงงานจะต้องมีค่าของสารแขวนลอยไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/ลิตร และมีค่า BOD ไม่เกิน 20 มิลลิกรัม/ลิตร จึงจะปล่อยสู่แหล่งน้ำได้ นอกจากนี้การทำให้ของเสียเจือจางด้วยน้ำมากเพียงพอเพื่อลดปริมาณความสกปรก เช่น การระบายน้ำเสียลงในแม่น้ำลำคลองต้องถึงปริมาณความสกปรกที่แหล่งน้ำนั้นจะสามารถรับได้ ซึ่งขึ้นกับปริมาตรของน้ำและอัตราการไหลของน้ำ โดยหากปล่อยน้ำเสียตามเกณฑ์มาตรฐาน แล้วถูกเจือจางด้วยน้ำจากแหล่งน้ำอย่างน้อย 8 เท่า จะทำให้ได้น้ำในลักษณะที่ถือว่าไม่เน่าเสียแล้ว การเวียนเอาน้ำที่ใช้แล้วน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอื่นที่ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำสะอาดมากนัก จะเป็นผลดีต่อโรงงานอุตสาหกรรม เพราะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต วิธีการเหล่านี้กระทำร่วมกับการกักเก็บและปล่อยของเสียลงแหล่งน้ำทีละน้อย และเปลี่ยนแปลงแหล่งรับของเสียใหม่ เพื่อหลีกเลี่ยงการทิ้งของเสียจำนวนมากเกินไปลงสู่แหล่งรับเดิม จนทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย จะเป็นวิธีการที่จะสามารถรักษาแหล่งน้ำให้มีความสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต และมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้อีกยาวนาน

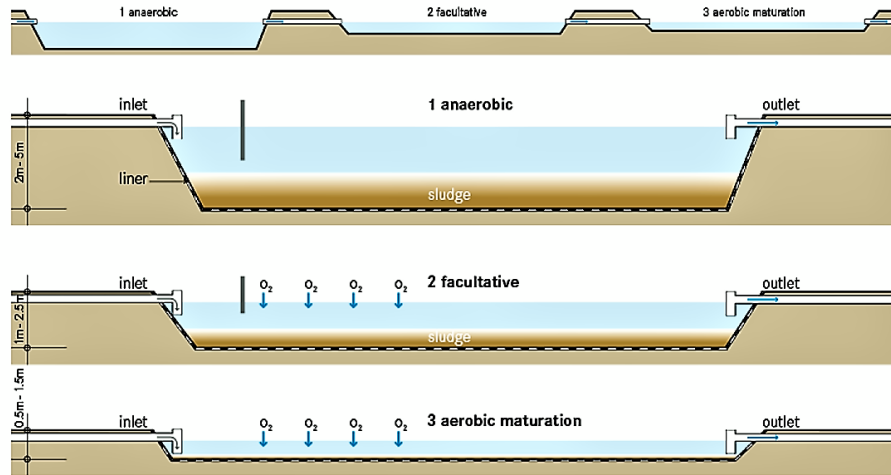
3) ระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม หรือเกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อยู่อาศัยในชุมชนหรือแหล่งที่อยู่อาศัยต่าง ๆ ให้หมดไป หรือมีปริมาณสิ่งปนเปื้อนในน้ำลดลงจนมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

(1) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 รูปแบบ คือ บ่อแอนแอโรบิก (anaerobic pond) บ่อแฟคคัลเททีฟ (facultative pond) บ่อแอโรบิก (aerobic pond) และหากมีบ่อหลายบ่อต่อเนื่องกัน บ่อสุดท้ายจะทำหน้าที่เป็นบ่อบ่ม (maturation pond) เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม บ่อปรับเสถียรสามารถบำบัดน้ำเสียจากชุมชน หรือโรงงานบางประเภท เช่น โรงงานผลิตอาหาร โรงฆ่า

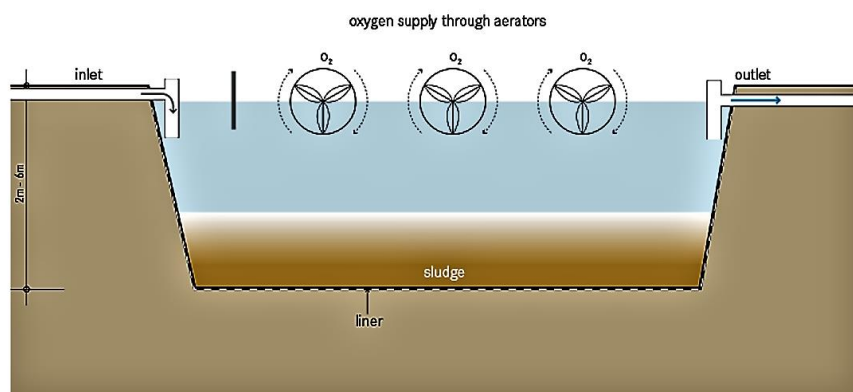
สัตว์ เป็นต้น และเป็นระบบที่มีค่าก่อสร้างและค่าดูแลรักษาต่ำ วิธีการเดินระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน ผู้ควบคุมระบบไม่ต้องมีความรู้สูง แต่ต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างมากจึงเป็นระบบที่เหมาะสมกับชุมชนที่มีพื้นที่เพียงพอและราคาไม่แพง ซึ่งโดยปกติระบบบ่อปรับเสถียรจะมีการต่อกันแบบอนุกรมอย่างน้อย 3 บ่อ ดังภาพที่ 6.47



ภาพที่ 6.47 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร

(2) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon หรือ AL)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศที่ติดตั้งแบบทุ่นลอยหรือยึดติดกับแท่นก็ได้ เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ได้ร้อยละ 80-95 โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน โดยมีเครื่องเติมอากาศซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อด้วย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงภายในบ่อ



ภาพที่ 6.48 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ

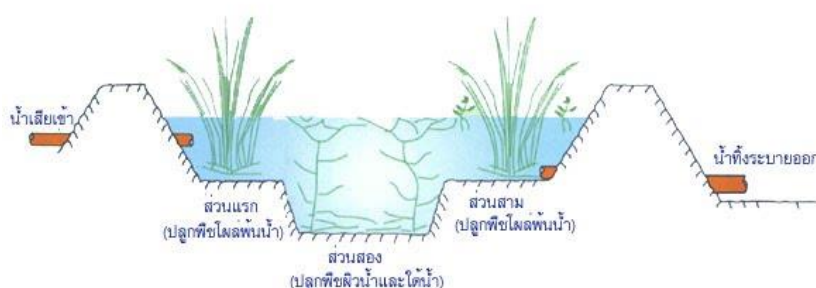
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งน้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่มีความสกปรกค่อนข้างมาก และน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยปกติจะออกแบบให้บ่อมีความลึกประมาณ

2-6 เมตร ระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในบ่อเติมอากาศประมาณ 3-10 วัน และเครื่องเติมอากาศจะต้อง ออกแบบให้มีประสิทธิภาพสามารถทำให้เกิดการผสมกันของตะกอนจุลินทรีย์ ออกซิเจนละลายในน้ำ และน้ำเสีย นอกจากนี้จะต้องมีบ่อปรับน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศเพื่อตกตะกอนและปรับสภาพน้ำทิ้ง ก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้จะต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำภายในบ่อปรับและระยะเวลาเก็บ กักให้เหมาะสมไม่ยาวนานเกินไป เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตเพิ่มปริมาณของสาหร่ายในบ่อปรับมาก เกินไป

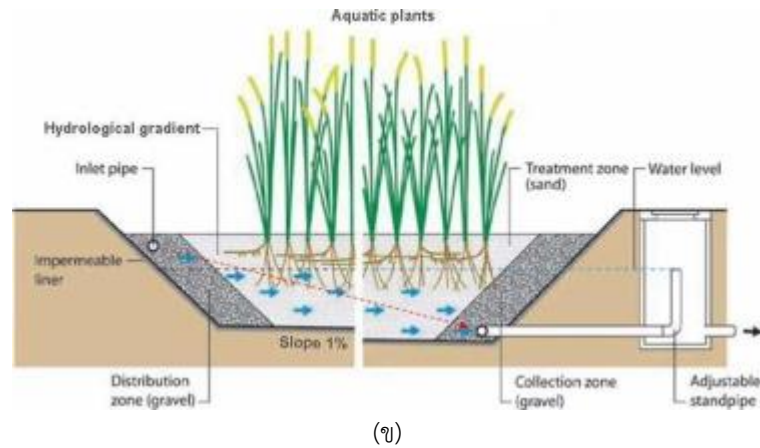
(3) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (constructed wetland)

บึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติกำลังเป็นที่ นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่ ต้องการลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสก่อนระบายออกสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้ง นอกจากนี้ระบบบึง ประดิษฐ์ก็ยังสามารถใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในชั้นที่ 2 สำหรับบำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้อีกด้วย ซึ่ง ข้อดีของระบบนี้ คือ ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง บึงประดิษฐ์ มี 2 ประเภทได้แก่ แบบ free water surface wetland (FWS) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับบึงธรรมชาติ และแบบ vegetated submerged bed system (VSB) ซึ่งจะมีชั้นดินปนทรายสำหรับปลูกพืชน้ำและชั้นหินรอง ก้นบ่อเพื่อเป็นตัวกรองน้ำเสีย

เมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในบึงประดิษฐ์ส่วนต้น สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมตัวลงสู่ก้นบึง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับพืช น้ำหรือชั้นหินและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระบบนี้จะได้รับออกซิเจนจากการแทรกซึมของอากาศ ผ่านผิวน้ำหรือชั้นหินลงมา ออกซิเจนบางส่วนจะได้ออกจากการสังเคราะห์แสงแต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองและจมตัวอยู่ในช่วงต้น ๆ ของระบบ การลดปริมาณไนโตรเจนจะ เป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ส่วนการลดปริมาณฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิด ที่ชั้นดินส่วนพื้นบ่อ และพืชน้ำจะช่วยดูดซับฟอสฟอรัสผ่านทางรากและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดโลหะหนักได้บางส่วนอีกด้วย



(ก)



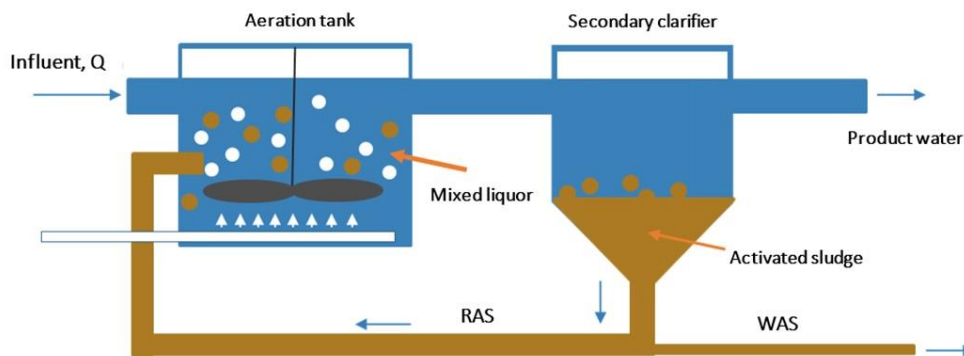
(ข)

ภาพที่ 6.49 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (ก) แบบ FWS และ (ข) แบบ VSB. (Wang et al., 2017)

(4) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge process)

เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยา โดยใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเดินระบบประเภทนี้จะมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ในปัจจุบันระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์มีการพัฒนาใช้งานหลายรูปแบบ เช่น ระบบแบบกวนสมบูรณ์ (completely mix) กระบวนการปรับเสถียรสัมผัส (contact stabilization process) ระบบคลองวนเวียน (oxidation ditch) หรือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (sequencing batch reactor) เป็นต้น

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ถังเติมอากาศ (aeration tank) และถังตกตะกอน (sedimentation tank) ดังภาพที่ 6.50 โดยน้ำเสียจะถูกส่งเข้าถังเติมอากาศ ซึ่งมีสลัดจ์อยู่เป็นจำนวนมากตามที่ยกแบบไว้ สภาวะภายในถังเติมอากาศจะมีสภาพที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบแอโรบิก จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ออกจากน้ำใส สลัดจ์ที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับเข้าไปในถังเติมอากาศใหม่เพื่อรักษาความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังเติมอากาศให้ได้ตามที่กำหนด และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นสลัดจ์ส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป สำหรับน้ำใสส่วนบนจะเป็นน้ำทิ้งที่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

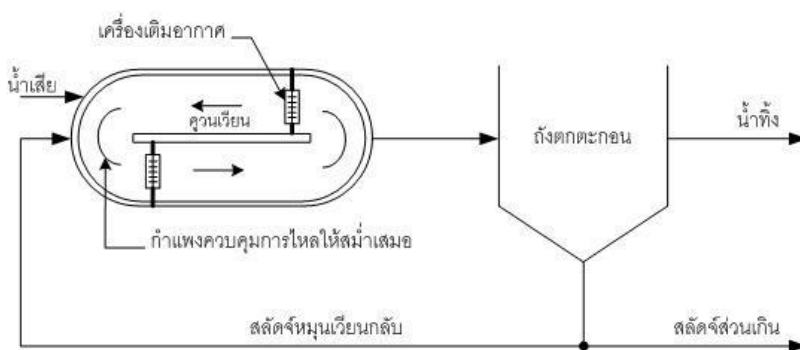


ภาพที่ 6.50 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์

(5) ระบบบำบัดน้ำเสียคลองวนเวียน (oxidation ditch)

เป็นระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ประเภทหนึ่งที่ใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และเจริญเติบโตเพิ่มจำนวน ก่อนที่จะถูกแยกออกจากน้ำทิ้ง โดยวิธีการตกตะกอน การเดินระบบบำบัดประเภทนี้มีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจาก จำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ให้เหมาะสมต่อการทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

การทำงานของระบบคลองวนเวียนจะเหมือนกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์โดยทั่วไป คือ อาศัยจุลินทรีย์มากมายหลายชนิด โดยจุลินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา และโปรโตซัว เป็นต้น ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะเป็นสภาวะแเอโรบิก โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ในระบบ จากนั้นจึงแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านบำบัดแล้ว โดยวิธีการตกตะกอนในถังตกตะกอน เพื่อให้ได้น้ำใสอยู่ส่วนบนของถังตกตะกอน ซึ่งมีคุณภาพน้ำดีขึ้น และสามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้



ภาพที่ 6.51 ระบบบำบัดน้ำเสียคลองวนเวียน

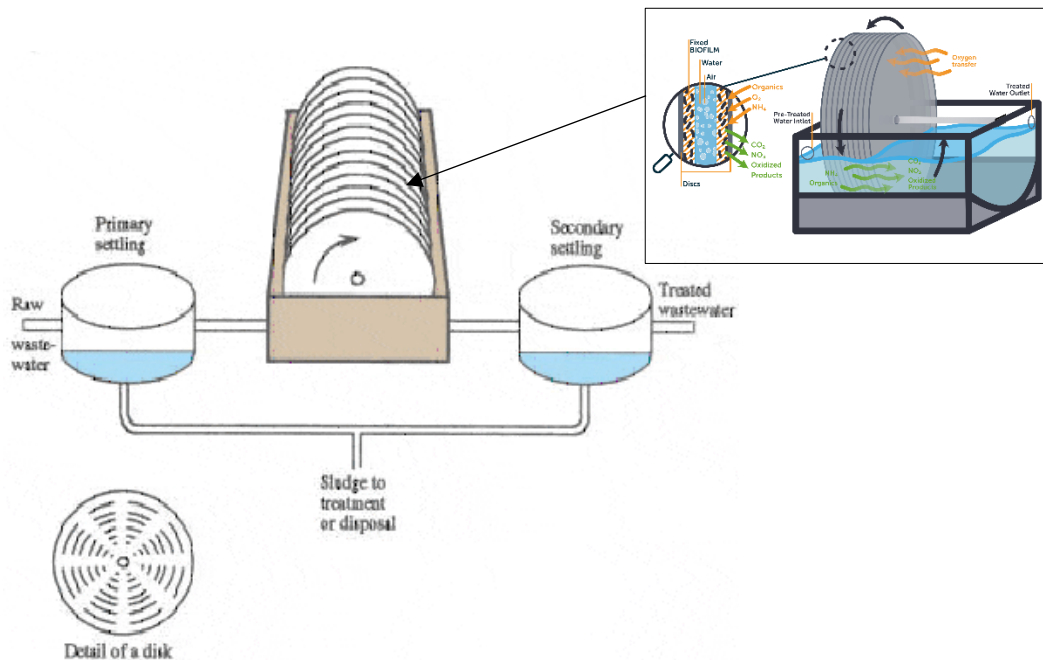
ระบบคลองวนเวียนจะมีลักษณะแตกต่างจากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่น คือ ถังเติมอากาศจะมีลักษณะเป็นวงกลมหรือวงรี ทำให้ระบบคลองวนเวียนจึงใช้พื้นที่มากกว่าระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบอื่น โดยรูปแบบของถังเติมอากาศแบบวงกลมหรือวงรี ทำให้น้ำไหลวนเวียนตามแนวยาวของถังเติมอากาศ และการกวนจะใช้เครื่องกลเติมอากาศ ซึ่งตีน้ำในแนวนอน ลักษณะการไหลแบบตามแนวยาวทำให้สภาวะในถังเติมอากาศแตกต่างไปจากระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ โดยค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ ในถังเติมอากาศจะลดลงเรื่อย ๆ ตามความยาวของถัง จนกระทั่ง

มีค่าเป็นศูนย์ เรียกว่าเขตแอน็อกซิก (anoxic zone) ซึ่งจะมีระยะเวลาไม่ชงนี้ไม่เกิน 10 นาที การที่ถังเติมอากาศมีสถานะเช่นนี้ทำให้เกิดไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันขึ้นในถังเดียวกัน ทำให้ระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ดีขึ้นด้วย

(6) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (rotating biological contactor; RBC)

ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางลักษณะทรงกระบอกซึ่งวางจุ่มอยู่ในถังบำบัด ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้า ๆ เมื่อหมุนขึ้นพ้นน้ำและสัมผัสอากาศ จุลินทรีย์ที่อาศัยติดอยู่กับตัวกลางจะใช้ออกซิเจนจากอากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่สัมผัสตัวกลางขึ้นมา และเมื่อหมุนจมลงก็จะนำน้ำเสียขึ้นมาบำบัดใหม่สลับกันเช่นนี้ตลอดเวลา

กลไกการทำงานของระบบในการบำบัดน้ำเสียอาศัยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศจำนวนมากที่ยึดเกาะติดบนแผ่นจานหมุนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยการหมุนแผ่นจานผ่านน้ำเสีย ซึ่งเมื่อแผ่นจานหมุนขึ้นมาสัมผัสกับอากาศก็จะพาเอาฟิล์มน้ำเสียขึ้นสู่อากาศด้วย ทำให้จุลินทรีย์ได้รับออกซิเจนจากอากาศ เพื่อใช้ในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเซลล์จุลินทรีย์ ต่อจากนั้นแผ่นจานจะหมุนลงไปสัมผัสกับน้ำเสียในถังปฏิบัติการอีกครั้ง ทำให้ออกซิเจนส่วนที่เหลือผสมกับน้ำเสีย ซึ่งเป็นการเติมออกซิเจนให้กับน้ำเสียอีกส่วนหนึ่ง สลับกันเช่นนี้ตลอดไปเป็นวัฏจักร แต่เมื่อมีจำนวนจุลินทรีย์ยึดเกาะแผ่นจานหมุนหนาเกินไป จะทำให้มีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วน หลุดออกจากแผ่นจานเนื่องจากแรงเฉือนของการหมุน ซึ่งจะรักษาความหนาของแผ่นฟิล์มให้ค่อนข้างคงที่โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์นี้ จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์และน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบนี้มีคุณภาพดีขึ้น



ภาพที่ 6.52 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ

ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพเป็นระบบบำบัดน้ำเสียอีกรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดขั้นที่สอง ซึ่งองค์ประกอบหลักของระบบประกอบด้วย ถังตกตะกอนขั้นต้น ทำหน้าที่ในการแยกของแข็งที่มากับน้ำเสีย ถึงปฏิบัติการที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และถังตกตะกอนขั้นที่สองทำหน้าที่ในการแยกตะกอนจุลินทรีย์และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยในส่วนของถังปฏิบัติการประกอบด้วยแผ่นจานพลาสติกจำนวนมากที่ทำจากพอลิเอทิลีน (PE) หรือพอลิเอทิลีนหนาแน่น (HDPE) วางเรียงขนานซ้อนกัน โดยติดตั้งฉากกับเพลานวนตรงจุดศูนย์กลางแผ่น ซึ่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะยึดเกาะติดบนแผ่นจานนี้เป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ หนาประมาณ 1-4 มิลลิเมตร ชุดแผ่นจานหมุนทั้งหมดวางติดตั้งในถังคอนกรีตเสริมเหล็ก ระดับของเพลางจะอยู่เหนือผิวน้ำเล็กน้อย ทำให้พื้นที่ผิวของแผ่นจานจมอยู่ในน้ำประมาณร้อยละ 35-40 ของพื้นที่แผ่นทั้งหมด และในการหมุนของแผ่นจานหมุนชีวภาพอาศัยชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเพลาลและเฟืองทดรอบ เพื่อหมุนแผ่นจานในอัตราประมาณ 1-3 รอบต่อนาที

สรุปท้ายบทเรียน

เคมีสีเขียวเป็นแนวคิดของการนำหลักการพื้นฐานที่คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต รวมทั้งคำนึงถึงการป้องกันหรือลดการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการในการเลือกใช้วัตถุดิบการวางแผนและการออกแบบการผลิตและการใช้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม กล่าวได้ว่า เคมีสีเขียวจะให้ความสำคัญกับการป้องกันที่ต้นเหตุมากกว่าการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียวมุ่งเพื่อออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมีให้มีประสิทธิภาพ ใช้วัตถุดิบ สารเคมี ตัวทำละลาย สารช่วยและพลังงานอย่างคุ้มค่า เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ปกป้องรักษาสุขภาพของมนุษย์และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด การบำบัดน้ำเสีย คือการกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน กระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี เช่น กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีววิทยา กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียเริ่มตั้งแต่ขั้นเตรียมการเป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำโดยใช้ตะแกรง ขั้นการบำบัดขั้นต้นเป็นการทำให้ตกตะกอนในถังตกตะกอนเบื้องต้น ขั้นการบำบัดขั้นที่สอง เป็นขั้นที่เรียกว่า การบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยงจุลินทรีย์ในระบบภายใต้สภาวะที่สามารถควบคุมได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกินสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และขั้นการบำบัดขั้นที่สามเป็นกระบวนการกำจัดสารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) สี สารแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก และอื่น ๆ

กิจกรรม

ขั้นตอน	วิธีการ
แนะนำโจทย์ปัญหา (P)	แจกใบกิจกรรม 6.3
ไตร่ตรองทางแก้ไขเฉพาะตน (E)	แต่ละคนบอกวิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา (10 นาที)
ระดมสมองโดยกลุ่ม (T)	ให้รวมกลุ่ม มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่มระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการร่วมแสดงความคิดเห็น (10 นาที)
สื่อสารทางออก (C)	ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย (10 นาที)
ถอดรหัสปรับใช้ (D)	ผู้สอนสรุป อภิปรายสรุป ความถูกต้องและความผิดพลาด โดยเพิ่มเติมประเด็นที่เกี่ยวข้องให้สมบูรณ์

แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

1. อธิบายนิยามเคมีสีเขียว
2. อธิบายหลักสำคัญของเคมีสีเขียว
3. อธิบายการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2545). *น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย*. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว
ชลทิศ อุไรฤกษ์กุล. (2019, September 23). Air Pollution (มลพิษทางอากาศ).
<http://doh.hpc.go.th/bs/topicDisplay.php?id=237>
- ณัฐกณิน ศุภเมฆานนท์ และคณะ. (2559). เคมีสีเขียว (Green Chemistry). *วารสารวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 18(3), 1-15.
- ณัฐกานต์ เกตุคุ้ม. (ม.ป.ป.). กลยุทธ์การจัดการสารเคมีด้วยเคมีสีเขียว. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์
บริการ*. หน้า 18-19.
- ทฤษฎีการบำบัดน้ำเสีย. (ม.ป.ป.). <https://www.greenwatertreat.com>
- รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง. (2563). ไฮโคลน เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม, *วารสาร
สิ่งแวดล้อม*, 24(4), 1-9.
- วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ. (2554). เคมีวิเคราะห์สีเขียว Green Analytical Chemistry. *วารสาร
วิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 20(2), 30-44.
- Anastas, P.T. (1994). *Benign by Design*. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-1994-0577.ch001>
- Anastas, P.T. (2018). *Origins and Early History of Green Chemistry*.
https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789813228115_0001
- Anastas, P.T. & Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford
University Press
- Anastas, P.T. & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: principles and practice. *Chemical
Society Reviews*, 39(1), 301-312.
- Basics of Green Chemistry*. (2022, May 27). EPA.
<https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J., Woodward, P.M. & Stoltzfus, M.W.
(2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson Education, Inc.
- Chen, T.L., Kim, H., Pan, S.Y., Tseng, P.C., Lin, Y.P., & Chiang, P.C. (2020).
Implementation of green chemistry principles in circular economy system
towards sustainable development goals: Challenges and perspectives, *Science of
The Total Environment*, 716,136998.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- Lim, S. (September 25, 2022). *The 12 Principles of Green Chemistry in Reaction Design*.
<https://ftloscience.com/green-chemistry-12-principles>
- Linthorst, J.A. (2010). An overview: origins and development of green chemistry.
Foundations of Chemistry. 12, 55-68. <https://doi.org/10.1007/s10698-009-9079-4>
- Musil-Schläffer, B., McCarry, A., Schmidl, C., & Haslinger, W. (2010). *European wood-
heating technology survey: An overview of combustion principles and the energy
and emissions performance characteristics of commercially available systems in*

Austria, Germany, Denmark, Norway and Sweden (Online ed.).

<https://www.nyserda.ny.gov>

Nathanson, J. A. (2019, December 24). *Air Pollution Control*. Encyclopedia Britannica.

<https://www.britannica.com/technology/air-pollution-control>

Nathanson, J. A. & Ambulkar, . A. (2022, September 5). *Wastewater Treatment*.

Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment>

Tang, S.L.Y., Smith R.L. & Poliakoff, M. (2005). Principles of green chemistry:

PRODUCTIVELY. *Green Chem.*,7, 761-762. <https://doi.org/10.1039/B513020B>

The 12 Principles of Green Chemistry. (n.d.). ACS Chemistry for Life.

<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>

Wang, M., Zhang, D.Q., Dong, J.W., & Tan, S.K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate - A review. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 293-311.

Sewage Treatment Processes. (n.d.). The Open University.

<https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/environmental-studies/understanding-water-quality/content-section-5.1>