

## บทที่ 6 มลพิษทางน้ำ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิต มนุษย์ใช้น้ำทั้งในการบริโภค อุปโภค การเกษตร คมนาคมและพักผ่อนหย่อนใจ การใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ในทางอุตสาหกรรมและการเกษตรฯ ทำให้เกิดความเสื่อมโทรมทางด้านคุณภาพของน้ำ ซึ่งเป็นผลเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหามลพิษ

คุณภาพของน้ำ (Water Quality) เป็นคำที่มีความหมายกว้างมากและใช้แตกต่างกันไปในแต่ละที่ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำอีกด้วย แต่เราจะกล่าวถึงลักษณะที่สำคัญโดยทั่ว ๆ ไปของน้ำซึ่งใช้ในการพิจารณาคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานการตรวจวิเคราะห์น้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค หรือใช้ในขบวนการอุตสาหกรรม

### 6.1 ลักษณะที่สำคัญของน้ำ

ในการพิจารณาคุณภาพน้ำ เราหมายถึงลักษณะของน้ำดังต่อไปนี้

- |                              |                                     |
|------------------------------|-------------------------------------|
| 1. pH                        | 13. DO                              |
| 2. อุณหภูมิ                  | 14. BOD & COD                       |
| 3. สี                        | 15. Permanganate Value (PV)         |
| 4. ความขุ่น (Turbidity)      | 16. Org. -N                         |
| 5. กลิ่นและรส                | 17. NH <sub>3</sub> -N              |
| 6. Total dissolved solid     | 18. NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N |
| 7. Suspended solid           | 19. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |
| 8. การนำไฟฟ้า (conductivity) | 20. Cl <sup>-</sup>                 |
| 9. สารกัมมันตรังสี           | 21. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>   |

CM 482

241

CM 482

241

- |                    |                                   |
|--------------------|-----------------------------------|
| 9. สารกัมมันตรังสี | 21. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
|--------------------|-----------------------------------|



- |                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| 10. ความเป็นด่าง (alkalinity) | 22. ผงซักฟอกสังเคราะห์ |
| 11. ความเป็นกรด (acidity)     | 23. โลหะหนัก           |
| 12. ความกระด้าง (hardness)    | 24. แบคทีเรีย          |

ลักษณะทั้งหมดดังกล่าวอาจจำแนกเป็น 2 ประเภทดังนี้

ก. ลักษณะทางกายภาพ

1. อุณหภูมิ มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเคมี ลดการละลายของออกซิเจนและมีผลต่อกลิ่นและรสของน้ำ
2. กลิ่นและรส ขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งปฏิภูลที่ละลายในน้ำ โดยมากเกิดจากสารอินทรีย์
3. สี น้ำบริสุทธิ์ก็ยังมีสีน้ำเงินจาง ๆ จึงจำเป็นต้องแยกว่าสีของน้ำเป็นสีที่เกิดสารแขวนลอยในน้ำ สีของน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาคุณภาพของน้ำดื่ม
4. ความขุ่น เกิดจากมีของแข็งลอยอยู่ในน้ำ ทำให้คุณภาพน้ำเสียไปหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากเป็นสารพิษ ความขุ่นในน้ำมักเกิดจากโคลนตม หรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือน้ำที่มีปริมาณแบคทีเรียอยู่มาก
5. ของแข็ง อาจอยู่ในน้ำในรูปสารแขวนลอยหรือสารละลายก็ได้ อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ TDS (Total dissolved solid) เกิดจากสารที่ละลายได้ในน้ำ ส่วน SS (suspended solid) ได้แก่สารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่อาจผ่านรูของกระดาษกรองได้
6. การนำไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ เช่น เกลือแร่ต่าง ๆ ที่ละลายอยู่สำหรับสารละลายที่เจือจาง การนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณรวมของของแข็งที่ละลายได้

$$K = \frac{\text{conductivity}}{\text{TDS}}$$

## คำถามท้ายบท

1. สิ่งปนเปื้อนในน้ำประเภทใดบ้างที่ลดปริมาณออกซิเจนในน้ำ
2. Oxygen sag curve หมายถึงอะไร
3. BOD<sub>5</sub> และ Ultimate BOD ต่างกันอย่างไร
4. เหตุใดในการวิเคราะห์น้ำจากแหล่งเดียวกันโดยเทคนิค COD และ BOD จึงพบว่าค่า COD มากกว่า BOD เสมอ
5. ความสัมพันธ์ของ BOD, COD และ TOC
6. จงยกตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสาร โดยใช้แบบจำลองผสมสำหรับสารในสิ่งแวดล้อมประเภทที่ไม่ย่อยสลาย (conservation)
7. Nonpoint sources คืออะไร
8. พีซีบี คืออะไรมีแหล่งจากที่ใด
9. ยกตัวอย่าง Dioxin ที่เกิดจาก PCBS
10. สารลดแรงตึงผิวหมายถึงอะไร
11. สารลดแรงตึงผิวประเภทใดที่ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด
12. การทำงานของสารเพิ่มความขาวในผงซักฟอกเกิดจากสารเคมีกลุ่มใด
13. STPP คืออะไร
14. องค์กรประกอบใดในน้ำมันปิโตรเลียมที่ย่อยสลายได้ในน้ำ
15. BTX หมายถึงอะไรและปนเปื้อนในน้ำได้ดินได้อย่างไร
16. เหตุใดน้ำมันปัจจุบันจึงนิยมใช้ MTBE เป็นสาร antinock
17. ปะรอทโครปที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด
18. เหตุใดยาฆ่าแมลงกลุ่ม Methoxychlor ซึ่งมีสูตรคล้าย DDT แต่ละลายตัวในสิ่งแวดล้อมได้มากกว่า
19. ชนิดของกัมมันตรังสีที่มีโอกาสจะปล่อยจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ได้แก่อะไรบ้าง
20. กัมมันตภาพรังสีใดในธรรมชาติที่มีโอกาสพบได้ในดิน

CM 482

375

CM 482

375

20. กัมมันตภาพรังสีใดในธรรมชาติที่มีโอกาสพบได้ในดิน

**ข. ลักษณะทางเคมี**

- |                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| - pH              | - ความเป็นด่าง        |
| - ความเป็นกรด     | - ความกระด้าง         |
| - ออกซิเจนละลาย   | - ความต้องการออกซิเจน |
| - ไนโตรเจน        | - ฟอสฟอรัส            |
| - สบู่และผงซักฟอก | - สารสังเคราะห์อื่น ๆ |

**6.2 สารมลพิษทางน้ำ (water pollutants)**

ชนิดของ water pollutants แบ่งได้เป็นหลายแบบ ในที่นี้จะแบ่งเป็น 10 ชนิด ดังนี้

6.2.1 สารที่ใช้ออกซิเจนในน้ำ

6.2.2 เชื้อโรค

6.2.3 ดินตะกอน

6.2.4 สารอาหารของพืช

6.2.5 ฟิซีบีและไดออกซิน

6.2.6 สบู่และผงซักฟอก

6.2.7 น้ำมัน

6.2.8 สารอินทรีย์และแร่ธาตุ

6.2.9 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์

6.2.10 รังสีและความร้อน

**6.2.1 สารที่ใช้ออกซิเจนในน้ำ (Oxygen demand Substances is water)**

**ความต้องการออกซิเจน (Oxygen demand)**

สารประกอบคือสิ่งที่ปนเปื้อนมากับน้ำมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่ไม่เสถียรจึงต้องอาศัยหรือใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำเพื่อให้สารเหล่านี้กลายเป็นสารที่อยู่ต่อหรือเสถียรมากขึ้น สิ่งปนเปื้อนที่ต้องใช้ออกซิเจนในน้ำแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

อาการหรือความเสียหาย ที่เกิดกรณีผู้รับรังสีเองจะเป็นมะเร็งในเม็ดเลือด และมีผลต่อเนื่องทางพันธุกรรมคือการเปลี่ยนแปลงของ gene และมีผลกับการเกิด mutation ในที่สุด

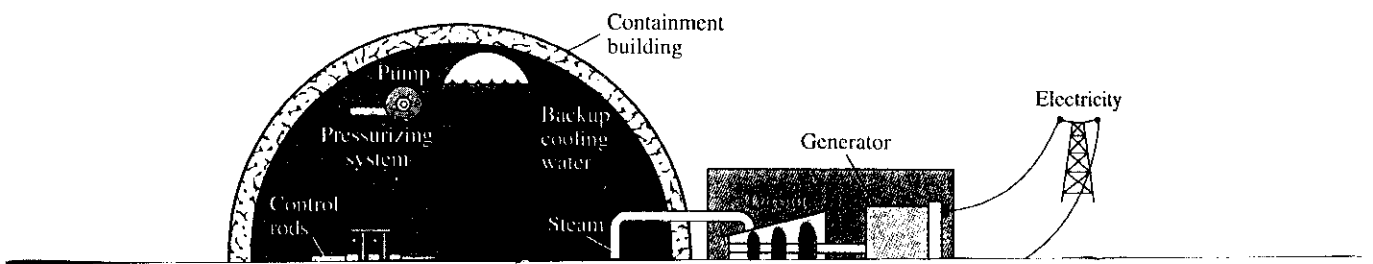
### การตรวจสอบรังสีในสิ่งแวดล้อม

เครื่องมือที่ใช้วัดได้แก่ geiger counter และ scintillation counter

โดยทั่วไปแล้วการตรวจวัดสิ่งแวดล้อมในแง่ของมลพิษจากรังสีจะตรวจวัดทั้งในน้ำ อากาศ ดิน และสิ่งมีชีวิตบริเวณที่คาดว่าจะได้ผลกระทบ

### มลพิษทางความร้อน

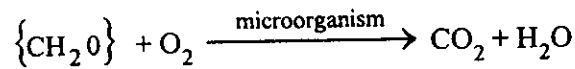
ความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับโรงงานไฟฟ้าจากกระบวนการต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 6.40



วิธีการป้องกันการเกิดอันตรายจากโรงงานไฟฟ้าปรมาณูแบบทั่ว ๆ ไป ได้แก่

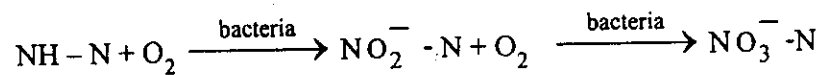
1. ตัวอาคาร จะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงพอที่จะกักเก็บสารกัมมันตภาพรังสีได้ ถ้ามีอุบัติเหตุเกิดขึ้น
2. มีระบบน้ำฉุกเฉิน เพื่อสามารถใช้ได้อย่างรีบด่วนในการหล่อแท่งเชื้อเพลิงไม่ให้หลอมได้เมื่อเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งจะเกิดการหลอมได้
3. บริเวณรอบ ๆ โรงไฟฟ้า ไม่ควรให้มีผู้คนอาศัยอยู่เพื่อป้องกันอันตรายอันจะเกิดขึ้นได้

1. สารอินทรีย์คาร์บอน ได้แก่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน น้ำมัน และไขมัน ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและใช้ออกซิเจนดังสมการการย่อยสลายที่เขียนทั่วไปของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต

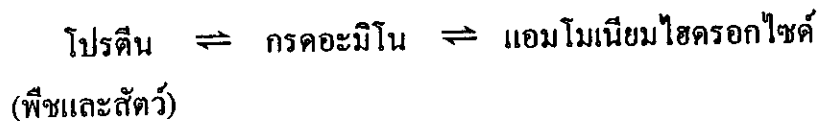


โดยพบว่าคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนนี้จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพวกน้ำมันและไขมัน สำหรับคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันในน้ำที่มีการปนเปื้อนทั่ว ๆ ไปนั้นมาจากพืชหรือสัตว์ที่ตายและสลายเป็นซากพืชและสัตว์ (detritus) ในแหล่งน้ำและต้องการออกซิเจนในการสลายตัวต่อไป

2. สารประกอบไนโตรเจน ในแหล่งน้ำจะมีสารประกอบไนโตรเจนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่โปรตีน และสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งมีในแหล่งน้ำได้แก่ไนเตรต ( $NO_3^-$ ) ไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) และแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) โดยพบว่าในสภาพของน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่มาก แอมโมเนียจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในสภาพที่มีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) กลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนไนเตรตไอออน นิยมเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Nitrification ซึ่งเกิดดังนี้



สารประกอบไนโตรเจนแอมโมเนียในแหล่งน้ำจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) พบว่าส่วนหนึ่งที่พบในแหล่งน้ำคือได้จากปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสของสารประกอบโปรตีนที่มีในทรากพืชและสัตว์ที่ตายในน้ำกลายเป็นกรดอะมิโน (amino acids) และสลายตัวเป็นสารประกอบแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ดังสรุปได้ดังนี้



อนุภาคแอลฟา และเบตานั้นพบว่าจะมีผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตได้มากเมื่อได้ถูกดูดซับเข้าไปในร่างกายของมนุษย์ เนื่องจากมีความสามารถในการไอโอไนเซชันได้สูง ส่วนรังสี  $\gamma$  นั้นจะมีผลกับการทำลายสิ่งมีชีวิตเมื่ออยู่ภายนอกร่างกาย

กัมมันตภาพรังสีให้โทษหรือเป็นอันตรายอาจเป็นแบบโดยตรงหรือแบบถ่ายทอดไปยังตัวคนต่อไปคือผลทางพันธุกรรม ความเสียหายของการรับนี้จะขึ้นกับพลังงานของกัมมันตรังสี อายุ เพศและปัจจัยอื่นๆ อันตรายรังสีอาจแบ่งกว้างๆ เป็น 2 ประเภท

1. **แบบฉับพลัน** ถ้าให้รังสีตลอดตัว 500 แรดต่อครั้งจะป่วยทันทีโดยมีอาการอ่อนเพลีย อาเจียน ปวดศีรษะ และตาย 5% ภายใน 2-3 วัน ผู้ที่รอดชีวิตก็จะเป็นคนไม่ปกติตลอดชีวิต เช่น ร่างกายอ่อนแอ ความต้านทานโรคอ่อนลง ฯลฯ

สำหรับพิษฉับพลันที่ปรากฏอาการตามปริมาณดังแสดงในตารางที่ 6.17

ตารางที่ 6.17 อาการฉับพลันที่เกิดขึ้นเมื่อมนุษย์รับรังสีเข้าร่างกาย

ปริมาณรังสีรับทันทีครั้งเดียว	อาการ
น้อยกว่า 25 แรด	ไม่ปรากฏผลเสียหาย
ประมาณ 25 แรด	ระดับต่ำสุดที่ปรากฏผลเสียหาย
ประมาณ 50 แรด	การเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของโลหิตเกิดขึ้นเล็กน้อย
ประมาณ 100 แรด	อาการคลื่นเหียน อ่อนเพลีย อาเจียน
200-250 แรด	ประมาณครึ่งหนึ่งของผู้ป่วยตายได้
ประมาณ 1000 แรด	ผู้ป่วยตายหมด

## 2. แบบเรื้อรัง

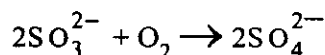
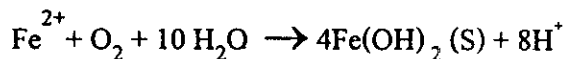
- สำหรับผู้มีอาชีพทางรังสี การรับรังสีต้องไม่มากกว่า 5 แรดต่อปี โดยเฉลี่ยหรือไม่มากกว่า 3 แรดต่อ 3 เดือน

- กรณีที่ไม่มีอาชีพทางรังสี ต้องไม่มากกว่า 0.5 ต่อปีโดยเฉลี่ย (รับจากธรรมชาติประมาณ 0.1 - 1.5 แรดต่อปี)



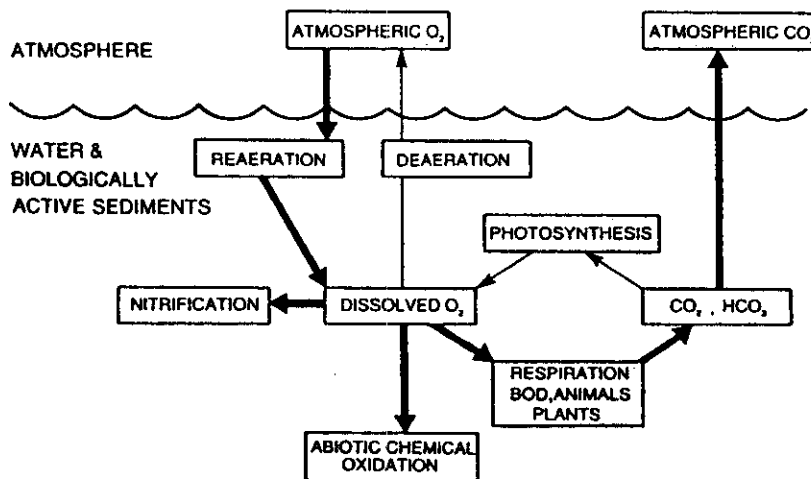
### 3. สารอนินทรีย์ในแหล่งน้ำที่อยู่ในรูปที่จะสามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่าย

เช่น เหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) และซัลไฟท์ ( $SO_3^{2-}$ ) ซึ่งจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนี้



ในกรณีนี้จะเกิดเฉพาะในเงื่อนไขที่มีออกซิเจนเพียงพอและมีจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่เรียกว่าสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic conditions)

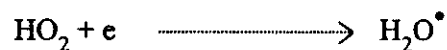
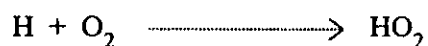
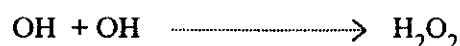
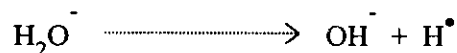
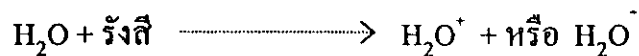
อิทธิพลของสารเคมีในแหล่งน้ำโดยเฉพาะ 3 ประเภทแรกมีผลต่อการลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำโดยตรง ดังสรุปในรูป 6.1



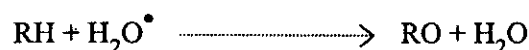
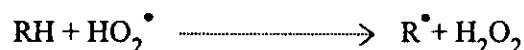
รูปที่ 6.1 การเปลี่ยนรูปของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

ในขณะที่มีการลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ ดังในรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในแหล่งน้ำจาก 2 แหล่งด้วยกันคือ ออกซิเจนในบรรยากาศ และจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งพบว่าเพื่อให้เกิดความสมดุลใน

ก. ปฏิกริยารังสีกับน้ำ



ข. ปฏิกริยาที่เกิดจากน้ำกับกลุ่มของสารเคมีในสิ่งมีชีวิต



ค. ปฏิกริยาของนิวตรอนกับธาตุที่แอกทีฟในสิ่งมีชีวิต

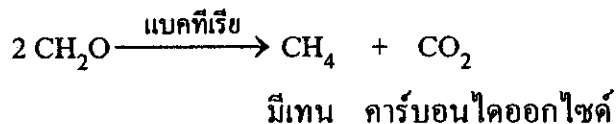


การไอโอไนเซชันของรังสีนิวเคลียร์จะเกิดขึ้นได้ในอะตอมและโมเลกุล แต่เนื่องจากองค์ประกอบหลักของสารในสิ่งมีชีวิตนั้นเป็นน้ำจึงมีโอกาสเกิดได้มากที่สุดดังอธิบายซึ่งจะให้สารที่เป็นตัวออกซิไดส์ในปฏิกริยา ข ที่จะเป็นฟรีแรดิคัลหรือไปออกซิไดส์โมเลกุลในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้พบว่ายังสามารถเกิดปฏิกริยาของสารกลุ่มนี้กับพันธะคู่พันธะไฮโดรเจน และกลุ่มซัลไฮดริล ส่วนในปฏิกริยา ค เป็นการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสโดยนิวตรอนเกิดเป็นสารที่จะไปทำลายกรดนิวคลีอิก

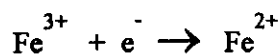
ผลที่เกิดดังกล่าวนี้ถ้าเกิดกับเอนไซม์และกรดนิวคลีอิกจะมีผลกับการผ่าเหล่า (mutation) เกิดขึ้น

ระบบนิเวศของน้ำออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในระบบการหายใจก็จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำและระเหยกลับสู่บรรยากาศได้บางส่วน อย่างไรก็ตามพบว่าการละลายของออกซิเจนในน้ำมีขีดจำกัดอันส่งผลสำคัญถึงปัญหาการเน่าเสียของแหล่งน้ำเมื่อมีสารใด ๆ ก็ตามที่ต้องออกซิเจนดังกล่าวแล้ว กล่าวคือ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วออกซิเจนจะละลายในแหล่งน้ำได้ประมาณ 6 ถึง 14 mgL<sup>-1</sup> เท่านั้น

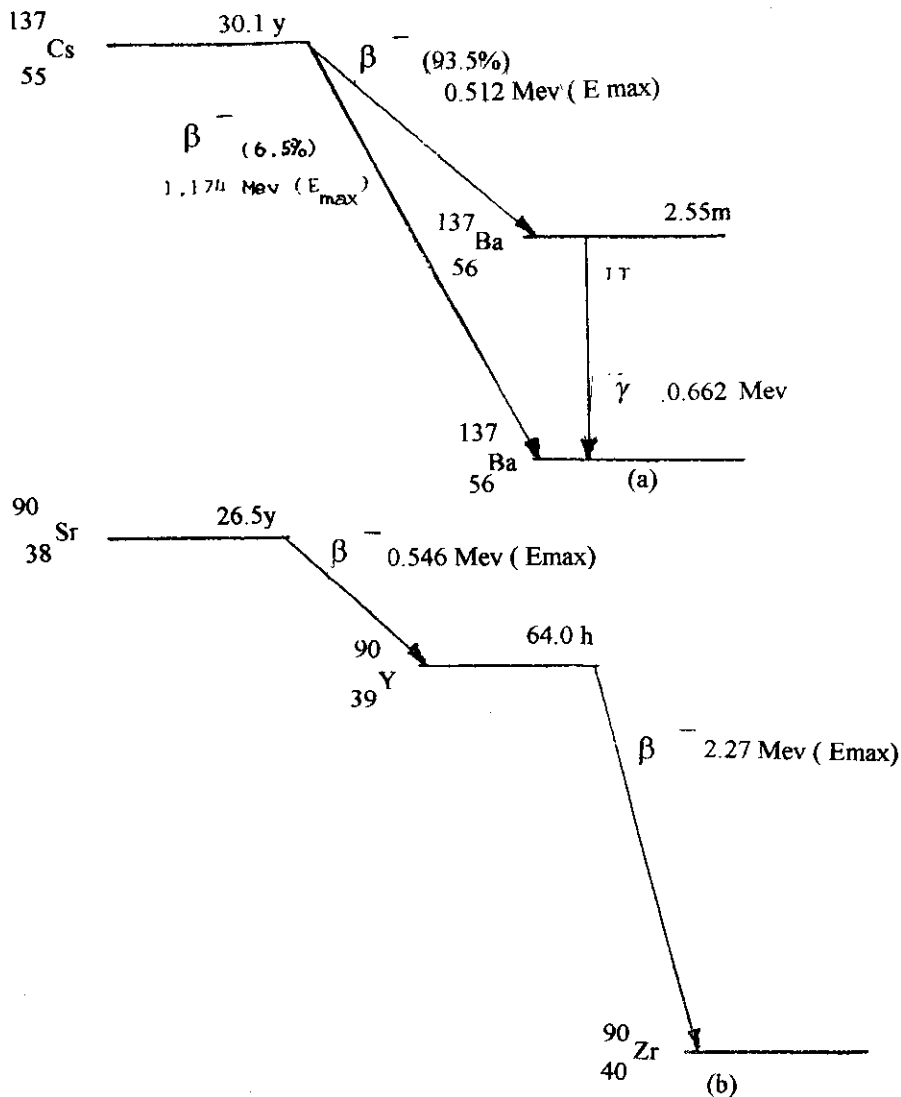
ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนละลายในน้ำตัวอย่างที่ชัดเจนเช่นที่ได้ที่ท้องทะเลสาปลึก ก็จะเป็นสภาวะที่เรียกว่าไร้ออกซิเจน (anaerobic conditions) โดยถ้ามีสารอินทรีย์ที่ละลายลงสู่แหล่งน้ำแบคทีเรียที่มีอยู่ในเงื่อนไขนี้ก็จะเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และในที่สุดจะถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนดังสมการ



และเนื่องจากมีเทนเป็นแก๊สที่ไม่ละลาย เมื่อเกิดขึ้นในน้ำก็จะกลายเป็นฟองแล้วโผล่ขึ้นมาที่ผิวน้ำอันก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นขึ้น ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนนี้ความหมายทางเคมีจะหมายถึงสภาวะที่เป็นรีดิวซิงค์ตัวอย่างเช่นกรณี Fe<sup>3+</sup> จะถูกรีดิวซ์เป็น Fe<sup>2+</sup> ดังสมการ



ปกติแล้วในท้องน้ำของทะเลสาปจะพบว่าในฤดูร้อนน้ำจะอยู่ในเงื่อนไขที่เป็นทั้งแบบมีและไร้ออกซิเจน กล่าวคือน้ำชั้นบนจะอุ่นกว่าและมีออกซิเจนมากกว่าจึงเป็นแบบมีออกซิเจน ส่วนชั้นล่างจะเย็นกว่าและมีออกซิเจนน้อยจึงเป็นสภาพไร้ออกซิเจน ดังนั้นสารเคมีอยู่ในทั้งสองชั้นจึงต่างกันดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.39 Decay schemes for (a)  $^{137}\text{Cs}$  and (b)  $^{90}\text{Sr}$   
 ผลของรังสีต่อสรีรวิทยา (Physiology Effects of Radiation)

รังสีนิวเคลียร์สามารถที่จะปล่อยพลังงานให้กับสสาร โดยอนุภาคนิวเคลียร์ที่มีประจุจะเข้าแทนที่อะตอม โดยการดึงหรือผลักซึ่งขึ้นกับประจุที่มีอยู่ และรังสีแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการกระตุ้นและหลุดออกจากอะตอมได้ จากผลทั้งสองนี้ทำให้อัตุเกิดเป็นอะตอมที่มีประจุบวก และมีอิเล็กตรอนอิสระขึ้น กรณีที่ระดับพลังงานสูง ๆ นิวเคลียสจะสามารถดูดรังสีแกมมา แล้วปล่อยนิวตรอนออกมา นิวตรอนจะคายพลังงานโดยการชนกันกับนิวเคลียสซึ่งจะทำให้เกิดการไอโอไนเซชันหรือเกิดนิวเคลียร์ที่ไม่เสถียร ดังตัวอย่างปฏิกิริยา

Aerobic conditions (warm water)	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe(OH) <sub>3</sub>
Anaerobic conditions (cold water)	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup> (aq)	

รูปที่ 6.2 แสดงชนิดของธาตุที่มีในทะเลสาบช่วงฤดูร้อน  
 สรุปรูปของธาตุที่อยู่ในแบบออกซิไดส์และรีดิวซ์จะสรุปได้ดังนี้

ชนิดของธาตุ	รูปออกซิไดส์	รูปรีดิวซ์
ธาตุคาร์บอน	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CH <sub>4</sub>
ธาตุกำมะถัน	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> S
ธาตุไนโตรเจน	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
ธาตุเหล็ก	Fe(OH) <sub>3</sub>	Fe <sup>2+</sup> (aq)

BOD (Biochemical oxygen Demand) คือปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรีย  
 ใช้อย่อยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน พลังงานที่แบคทีเรียได้จากการ  
 ย่อยสลายนั้นจะใช้ในการเจริญเติบโตและแบ่งตัว ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะขึ้นกับชนิด  
 ของสารอินทรีย์

การใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารในน้ำ แบ่งได้ 2 ระยะ  
 ซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BOD และเวลาดังรูป 6.3

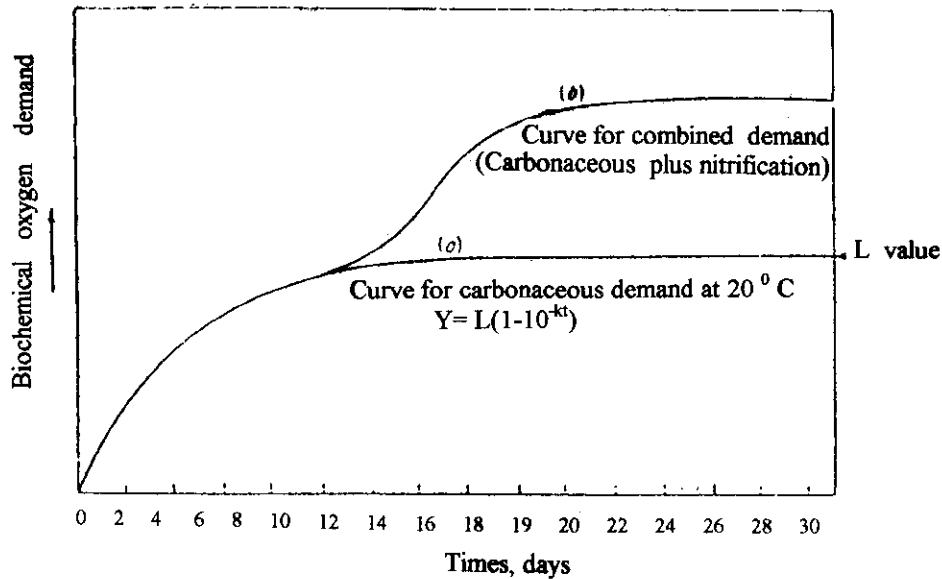
- ส่วนของกากซึ่งเป็น fission product ของ U ที่เป็นของแข็งที่ใช้หมดแล้ว ซึ่งสามารถจะให้ธาตุปล่อยในน้ำและอากาศ สารที่ถูกปล่อยจากกระบวนการนี้มากที่สุดคือ tritium (hydrogen-3) และ krypton-85 และผลิตภัณฑ์อีก 80 ชนิดที่เกิดระหว่างกระบวนการฟิชชันของ U-235 และ Plutonium-239 ใน nuclear power generator

กากของสารนี้ซึ่งใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้คือสิ่งที่จะก่อให้เกิดปัญหา เนื่องจากส่วนใหญ่จะมีไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตยาวนาน และไม่มีวิธีเร่งการสลายตัวจึงมีวิธีการกำจัดกากโดยเก็บในภาชนะที่มิดชิดเช่นแก้ว แล้วปล่อยให้สลายตัวเองในธรรมชาติ

ส่วนเชื้อเพลิงยูเรเนียมที่ใช้หมดจะมีการนำกลับมาใช้ใหม่อีก โดยการละลายด้วยกรด และทำปฏิกิริยาเคมีต่อจนได้ความบริสุทธิ์มากที่จะนำกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งขั้นตอนนี้ก็มีผลต่อการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีด้วย

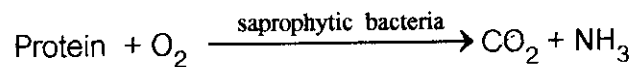
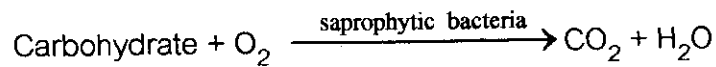
Schultz และ Whicker (1980) ได้รายงานว่าในตัวเชื้อเพลิงเองสามารถจะเกิด neutron activation และให้สารกัมมันตรังสีออกมามากมายในน้ำ ที่สำคัญคือ Mn-56, Cu-64, Na-24, Cr-51, Np-239, Ar-76, Si-31, Co-58, Co-60 และ Sn-65

และเนื่องจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์จะใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการทั้งหมดไปเพียง 35% ส่วนที่เหลือก็จะเกิดเป็นพลังงานความร้อนส่วนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย (thermal pollution)



รูป 6.3 The BOD Curve (a) normal curve for oxidation of organic matter (b) the influence nitrification

ระยะที่ 1 การออกซิไดส์สารประกอบคาร์บอน เกิดดังสมการ



ค่าของการใช้ออกซิเจนเนื่องจากแบคทีเรียใช้ในปฏิกิริยาทั้ง 2 นี้คือค่า BOD

ระยะที่ 2 การออกซิไดส์  $\text{NH}_3 \longrightarrow \text{NO}_2^- \longrightarrow \text{NO}_3^-$  โดยอาศัย autotrophic bacteria (nitrifying bacteria)

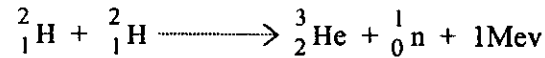
การวัดค่า BOD ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดค่าการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ จะกระทำโดยอบที่  $20^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 5 วัน เพื่อให้ได้อยู่ภายใต้สภาวะที่เป็นธรรมชาติมากที่สุด และที่เวลา 5 วันจะเหมาะสมที่สุดเพราะได้น้อยกว่าปริมาณออกซิเจนจะถูกใช้น้อยมากแต่ถ้านานกว่านี้ก็จะเป็นการย่อยสลายในระยะที่สองไป

#### Kinetics of BOD Reduction

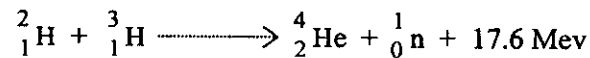
Phelps ได้ตั้งหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับค่าของ BOD ว่า "อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำจะเป็นปฏิกิริยา โดยตรงกับปริมาณสารอินทรีย์ที่"

นิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear Fusion Power) เป็นวิธีการนำไอโซโทปซึ่งมีน้ำหนักอะตอมต่ำมาหลอมเข้าด้วยกัน แล้วให้พลังงานออกมามากโดยเป็นอุณหภูมิสูงถึง  $4 \times 10^6$  °ซ และก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ตามมาซึ่งเป็นตัวอย่างที่เกิดใน hydrogen bomb ปฏิกิริยาที่เกิดได้แก่

- deuterium - deuterium reaction



- deuterium - tritium reaction



ปฏิกิริยาที่ 2 จะเกิดได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาแรก เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการหลอม นั้นน้อยกว่า การที่ต้องใช้พลังงานเนื่องจากนิวเคลียสมีแรงผลักกัน การนำมารวมกันจึงเกิดได้ยาก จึงต้องใช้พลังงานเริ่มต้นโดยอาศัยพลังงานจาก Nuclear fission Power

**กัมมันตรังสีที่ถูกปล่อยให้กับสิ่งแวดล้อม**

**(Radioactive inputs into the environment)**

นอกจากนิวไคลด์จากธรรมชาติแล้ว นิวไคลด์ที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งได้จากการทดสอบอาวุธ โดยเฉพาะระเบิดและโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ ก็มีส่วนที่จะก่อให้เกิดเพิ่มนิวไคลด์ในสิ่งแวดล้อมและมักมีครึ่งชีวิตที่ยาวจึงอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานดังตารางที่ 6.16 และไอออนูภาคอัลฟา, เบต้า และรังสีแกมมาดังรูปที่ 6.39 แสดงการสลายตัวของ Cs-137 และ Sr-90

จากรูปที่ 6.38 จะเห็นได้ว่าโอกาสที่สารกัมมันตรังสีจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมคือ

- วงจรที่เกี่ยวข้องกับ Mining, refining และ conversion ไป uranium hexfluoride ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนในการเพิ่มปริมาณ U-235 ในเชื้อเพลิง ทำให้มีโอกาสที่จะยูเรเนียมในรูปฟลูออไรด์บางส่วนเล็ดลอดไปในน้ำและอากาศได้



เหลือเวลานั้น” ดังนั้นอัตราการย่อยสลายนี้จึงจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{-dL}{dt} \propto L$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{-dL}{dt} = K_1 t$$

$$\text{อินทิเกรตจะได้ว่า } \ln L/L_0 = -K_1 t$$

$$\text{หรือ } \log L/L_0 = -0.434 K_1 t = -k_1 t$$

$$L/L_0 = 10^{-k_1 t}$$

โดย  $L_0$  หมายถึง BOD ทั้งหมด ณ เวลาเริ่มต้น (0)

$L$  หมายถึง BOD ณ ที่เวลา  $t$

$t$  หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง  $t$

$K_1, k_1$  หมายถึงค่าคงที่ของอัตราการสลายตัว BOD โดยใช้ฐาน  $e$  และฐาน

10 ตามลำดับ

$$\text{โดยที่ให้ } 0.434 K_1 = k_1$$

$k_1$  มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ โดยจะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

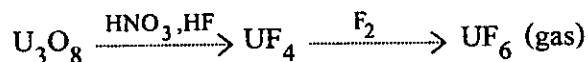
$$k_T = k_{20^\circ\text{C}} \times 1.047^{(T-20)}$$

โดย  $k_T$  หมายถึงค่าคงที่ของอัตราการสลายตัว BOD ณ ที่อุณหภูมิ  $T^\circ\text{C}$

$k_{20^\circ\text{C}}$  หมายถึง ค่าคงที่ของอัตราการสลายตัว BOD ณ ที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$

ในส่วนของ pressure vessel จะที่แท่งยูเรเนียมจุ่มในตัว moderator ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ เช่น กราไฟท์ พาราฟินหรือ D<sub>2</sub>O (heavy water) ซึ่งช่วยให้นิวตรอนเคลื่อนที่ช้าลง จนได้ช่วงความเร็วที่สามารถจับกับนิวไคลด์ U-235 ได้ เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่แท่งยูเรเนียมนิวตรอนจะถูกปล่อยออกมา และจะเคลื่อนช้าลงเมื่อไปชนกับอะตอมของโมเดอเรเตอร์ เมื่อนิวตรอนนี้วิ่งเข้าหาแท่งยูเรเนียมอีกแท่งหนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาฟิชชันขึ้นต่ออีก ปฏิกิริยาจึงเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ เป็นลูกโซ่และเพื่อป้องกันมิให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วเกินไปจะใช้แท่งควบคุมซึ่งทำด้วยแคดเมียมหรือแบเรียม ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอนบางส่วนไว้

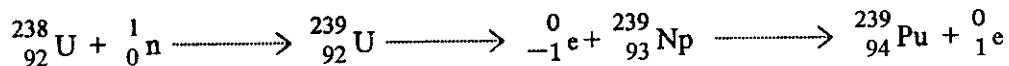
เชื้อเพลิงที่ใช้ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันคือ U-235 ซึ่งพบว่าในธรรมชาติจะอยู่ปนกับ U-238 โดยพบว่าจะมี U-238 ในธรรมชาติ 99.27% และมี U-235 เพียง 0.71% โดยผสมกันอยู่ในรูป U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ในการใช้ U-235 เป็นเชื้อเพลิงจะต้องใช้ U-235 ถึง 3.5% ฉะนั้นจึงต้องพยายามเพิ่มปริมาณโดยอาศัยเทคนิคของการ diffusion ซึ่งจะต้องทำให้อยู่ในรูป UF<sub>6</sub> ก่อน



(จะมี U-235 ผสม U-238)

U-235 มีขนาดเล็กกว่า ฉะนั้นจะไปได้ไกลกว่าในการ diffusion ผ่าน porous membrane เกิดเป็น Zone ขึ้น และจะทำซ้ำกันจนได้ U-235 3.5%

U-238 ไม่อาจเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ แต่จะสามารถทำปฏิกิริยากับนิวตรอน แล้วเปลี่ยนเป็น <sup>239</sup><sub>94</sub>Pu ที่ fissionable ได้โดย



ได้ <sup>239</sup><sub>94</sub>Pu เป็น breeder reactor ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

## แบบจำลองของการเติมออกซิเจนในแหล่งน้ำ

ออกซิเจนในแหล่งน้ำได้จากการละลายของออกซิเจนจากบรรยากาศซึ่งมีอยู่ประมาณ 20% โดยพบว่าอัตราของการเติมออกซิเจน โดยธรรมชาติจะเป็นสัดส่วนกับออกซิเจนที่ลดลง ดังสมการ

$$\frac{dC}{dt} = k_2 D \quad \text{-----} \textcircled{1}$$

โดย C คือความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นที่เวลาใด ๆ (mg/l)

$k_2$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการเติมออกซิเจนในน้ำ ( $\text{day}^{-1}$ )

D คือออกซิเจนที่ลดลงซึ่งเท่ากับความเข้มข้นออกซิเจนที่อิ่มตัว ลบ

ความเข้มข้นออกซิเจน ณ เวลาใด ๆ

ดังกล่าวแล้วว่า อัตราการลดของ BOD เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังนั้นอัตราการลดของออกซิเจนจึงเป็นสัดส่วนกับค่า BOD ที่มีอยู่ ซึ่งเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L \quad \text{-----} \textcircled{2}$$

D คือความเข้มข้นออกซิเจนที่ลดลง

L คือปริมาณความเข้มข้น BOD เริ่มต้น

$k_1$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการสลายตัวของ BOD

เมื่อรวมสมการที่ 1 และ 2 เข้าด้วยกันเมื่อมีน้ำทิ้งผสมในน้ำที่มีการเติม

ออกซิเจนตามธรรมชาติจะได้เป็นแบบจำลองที่เรียกว่า "Streeter Phelps Model"

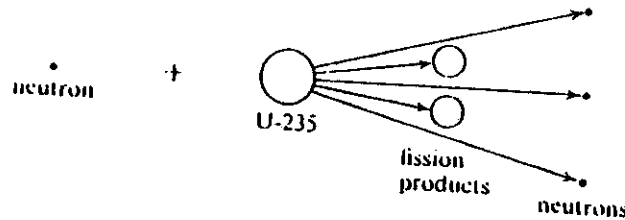
จะให้ความสัมพันธ์ของปริมาณออกซิเจนที่ลดลงจริงจะเกิดอัตราการเพิ่มของออกซิเจน (2) และอัตราการเพิ่มออกซิเจน (1)

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L + k_2 D$$

$k_1 L = \text{deoxygenation}$

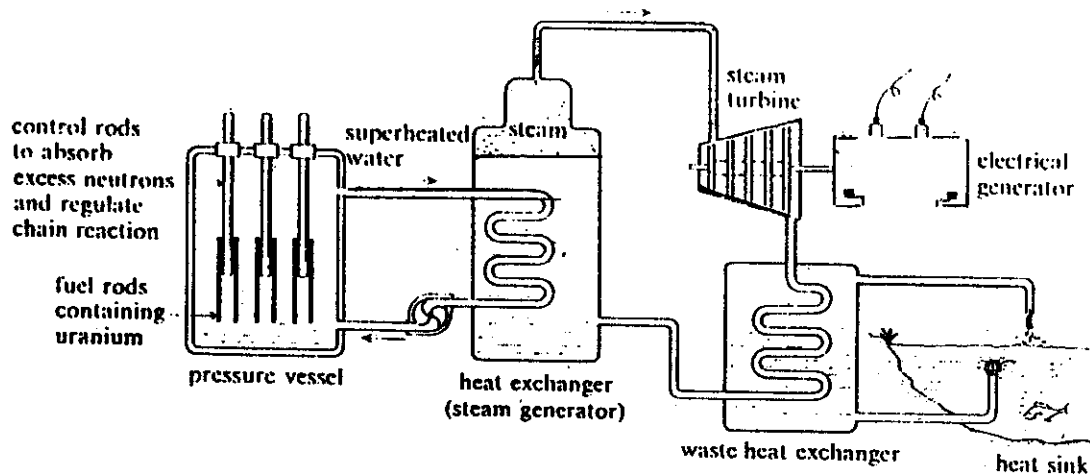
$k_2 D = \text{reaeration}$

ให้ออกมาจะทำให้ U-235 3 ตัวแตกแยกตัวออกให้นิวตรอนเพิ่มมากขึ้น จำนวนปฏิกิริยาฟิชชันยิ่งเกิดมากขึ้นเป็นดังนี้เรื่อย ๆ ดังรูป



ปฏิกิริยานี้จะเป็นแบบลูกโซ่ไปเรื่อย ๆ ครอบงำที่ยังมี U-235 อยู่และให้พลังงานออกมามากมาย ถ้าไม่มีการควบคุมพลังงานที่สะสมไว้ก็จะดันให้เกิดระเบิดได้ซึ่งเป็นหลักการในการทำระเบิดปรมาณู การควบคุมพลังงานความร้อนที่คายออกมา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะต้องอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor)

รูปแบบของ nuclear power plant ซึ่งใช้กระบวนการฟิชชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 รูปแบบของ nuclear power plant ซึ่งใช้กระบวนการฟิชชันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ตัวอย่างการเขียนเส้นกราฟสำหรับกระบวนการที่เกิดเมื่อมีการผสมน้ำทิ้งกับน้ำ โดยทั่ว ๆ ไปจะเกิดการลดลงของออกซิเจนเป็นเส้นโค้งแซ็ก (sag curve) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เมื่อพิจารณาาร่วมกับรูป 6.5 จะเห็นว่ากรณีในแหล่งน้ำที่มีของเสีย BOD อยู่ไม่มีการเติมออกซิเจนโดยกระบวนการธรรมชาติจะเกิดผลของปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำเส้นโค้ง e เส้นโค้ง d แสดงถึงการเพิ่มของออกซิเจนในแหล่งน้ำที่เกิดพร้อม ๆ กับการเติม BOD ในแหล่งน้ำ ถ้าวผลทั้งสองเข้าด้วยกันจะเกิดเป็นเส้นโค้งแซ็ก a ดังแสดงในรูป 6.5

จากรูป 6.4 และ รูป 6.5 ซึ่งแสดงรูปแบบการลดลงของออกซิเจนเมื่อมีการปนเปื้อนของ BOD อาจเขียนในภาพรวมเป็นเขตของน้ำให้ชัดเจนมากขึ้นดังในรูป 6.6 ซึ่งพบว่าแหล่งน้ำจะแบ่งเป็น 5 ระยะ ดังนี้

ระยะที่หนึ่ง น้ำยังไม่ถูกปนเปื้อนโดย BOD จึงเรียกว่า Clean zone ซึ่งพบว่าเมื่อออกซิเจนละลายอยู่ในปริมาณที่สูง

ระยะที่สอง นับจากจุดที่เริ่มมีการปนเปื้อนจะเริ่มเกิดกระบวนการสลายตัว มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง และพบว่ามีแบคทีเรียสูงมากในเขตนี้ซึ่งเรียกว่า decomposition zone

ระยะที่ 3 เรียกว่า septic zone เป็นระยะที่ปริมาณออกซิเจนจะลดลงเป็นศูนย์และเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic processes) ซึ่งในเหตุการณ์ที่เกิดจริงดังรูปที่ 6.4 พบว่าระยะทางที่เป็นเขตนี้อาจยาวเป็นกิโลเมตร จนกระทั่ง BOD เท่ากับศูนย์

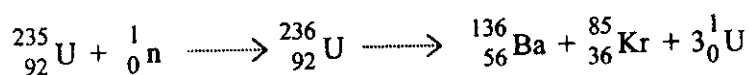
ระยะที่ 4 เรียกว่า Recovery zone สิ่งปนเปื้อนเริ่มหมดไปในขณะที่แบคทีเรียก็เริ่มลดลงเช่นกัน ทำให้ออกซิเจนละลายลงในน้ำได้มากขึ้น

ระยะที่ 5 Clean zone ออกซิเจนละลายในน้ำจนกระทั่งมีปริมาณเท่ากับตอนเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง

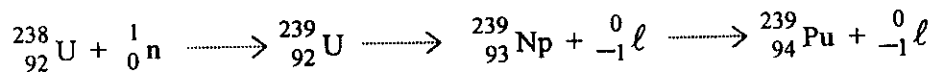
## การใช้พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear Energy Usage)

พลังงานนิวเคลียร์ได้ถูกนำไปใช้ 2 ทางคือเกี่ยวกับด้านอาวุธและผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งชนิดของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องของกระบวนการทางเคมีที่สำคัญมี 2 แบบคือแบบนิวเคลียร์ฟิชชัน และแบบนิวเคลียร์ฟิวชัน

นิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear fission power) เป็นวิธีการทำให้อะตอมที่มีขนาดใหญ่เกิดการแตกตัว ทำให้เกิดพลังงานออกมา nuclear power reactor ที่ใช้อยู่ปัจจุบันเป็นการฟิชชัน คือระดมยิง U-235 ด้วยนิวตรอนเกิดเป็น 2 ไอโซโทป และ 3 นิวตรอน ดังสมการ



หรือเป็นปฏิกิริยาฟิชชันของ U-238 ดังสมการ



ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วปฏิกิริยาฟิชชัน U-235 จะให้นิวตรอนเฉลี่ย 2.5 และให้พลังงานเฉลี่ย 200 Mev ต่อการเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง หรือ  $320 \times 10^{-4}$  erg หรือ  $7.65 \times 10^{-12}$  แคลอรี ซึ่งเป็นความร้อนที่คายออกมาจากการแยกตัวของ U-235 1 นิวไคลด์ ถ้ามี U-235 1 กรัมจะคายพลังงานออกมา เท่ากับ

$$\frac{(1.00 \text{ กรัม U-235})}{(235 \text{ กรัม/โมล U-235})} \times (6.02 \times 10^{23} \text{ อะตอม U-235/โมล}) (7.65 \times 10^{-12} \text{ แคลอรี/อะตอม U-235})$$

$$= 1.96 \times 10^{10} \text{ แคลอรี}$$

$$= 1.96 \times 10^7 \text{ กิโลแคลอรี}$$

เนื่องจากการแยกตัวของ U-235 หนึ่งไอโซโทปจะให้ 3 นิวตรอน และเนื่องจากนิวตรอนเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการฟิชชัน ดังนั้นทันทีที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นิวตรอนที่

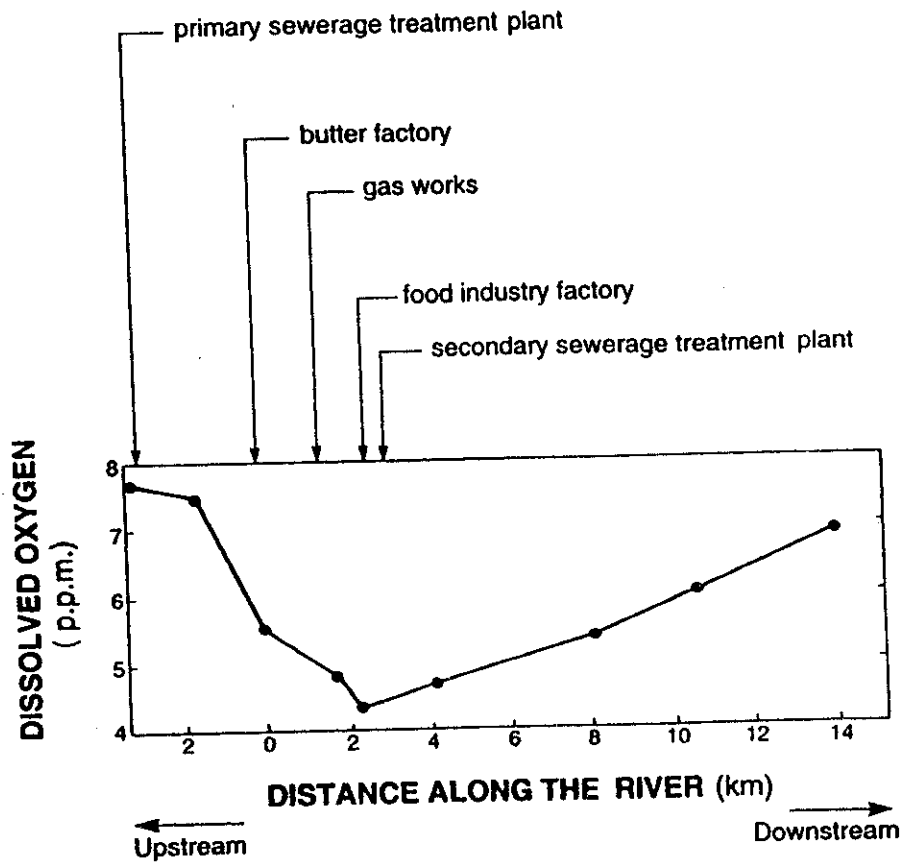


Fig 6.4 Dissolved oxygen profile of a river receiving wastewater discharges rich in organic matter.

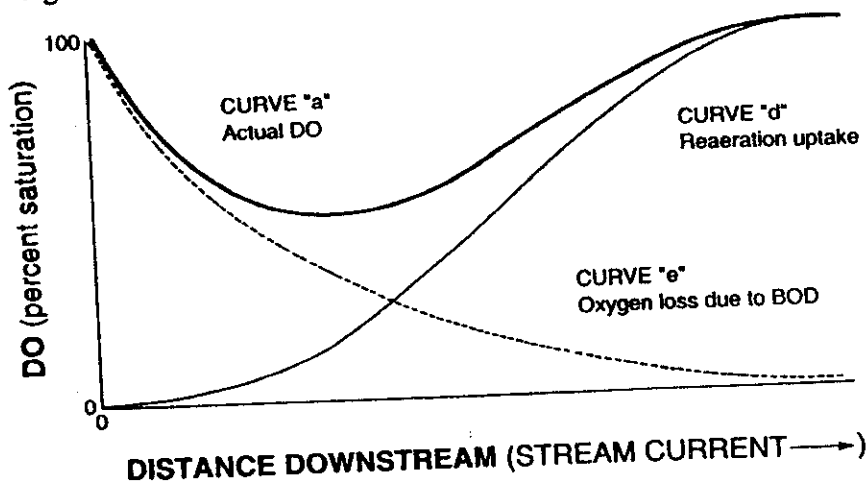


Fig 6.5 Deoxygenation, reaeration and oxygen sag curves in a stream as a result of an organic discharge at point zero giving a large increase in BOD.

Beta Dose Rate มีอำนาจในการทะลุทะลวงปานกลาง กระจายจะกั้นไม่ได้

$$\text{Beta dose rate} = 2.1 \text{ CE rad/hr}$$

C = ความแรงของรังสีเบตา หน่วย  $\mu\text{Ci/gm}$

E = พลังงานของรังสีเบตา หน่วย Mev

ตัวอย่าง เมื่อคนไข้ได้รับ I-131 ปริมาณ 10 Ci ในต่อมไทรอยด์ ซึ่งมีน้ำหนัก 20 กรัม

ถามว่าคนไข้จะได้ dose rate เท่าไร เมื่อกำหนดความแรงของ

รังสีเบตา = 0.3 Mev

$$\begin{aligned} \text{จาก Beta dose rate} &= 2.1 \times \frac{10}{20} \times 0.3 \\ &= 0.315 \text{ rad/hr} \end{aligned}$$

กรณีมีเครื่องหรือวัตถุกำบังรังสีแกมมา

เมื่อมีวัตถุมากขึ้น ความเข้มของรังสีจะลดลง ซึ่งพบว่าความหนาของ absorber จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของรังสี

$$\frac{dI}{dx} \propto I \quad \left( \begin{array}{l} I = \text{ความเข้มของรังสี} \\ x = \text{ความหนาของวัตถุที่กั้น} \end{array} \right)$$

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (\mu = \text{absorption coefficient ของวัตถุ})$$

กรณีที่เป็น point source (แหล่งที่ให้เป็นจุด)

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

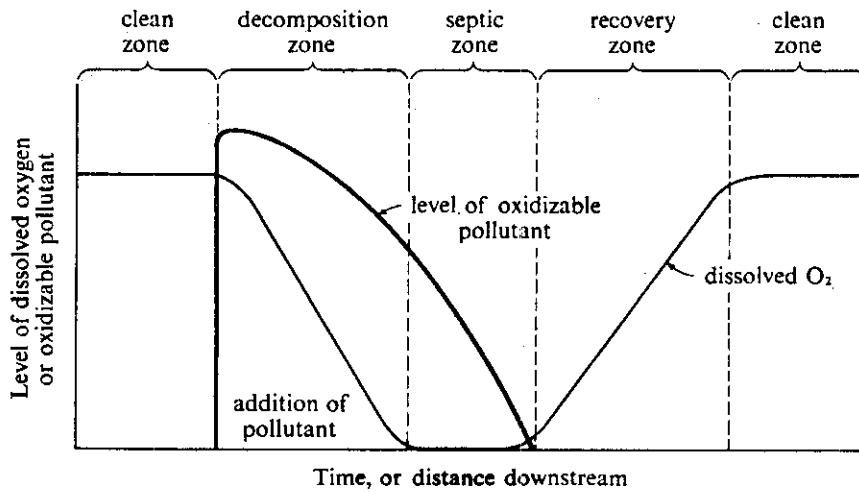
I = ความเข้มของรังสีที่เหลือ (Ci)

$I_0$  = ความเข้มของรังสีก่อนถูก absorp (Ci)

$\mu$  = absorption coefficient ของวัตถุ

x = ความหนาของวัตถุ (cm)





รูป 6.6 Oxygen sag curve resulting from the addition of oxidizable pollutant จากแบบจำลองของ Streeter Phelps Model

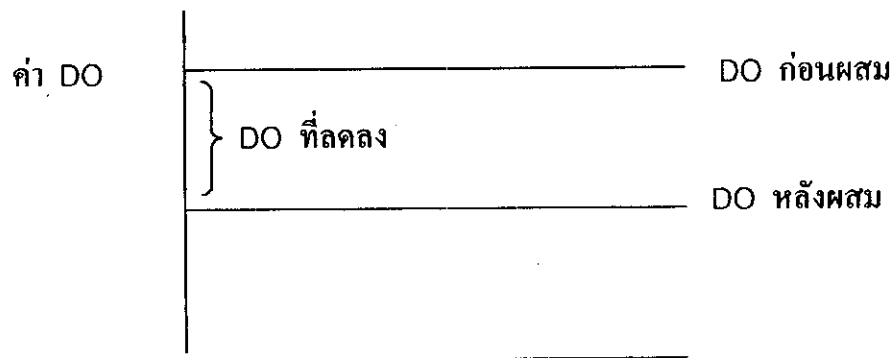
$$\frac{dD}{dt} = k_1 L + k_2 D$$

ถ้าให้  $k_1 = K_1$

และ  $k_2 = K_2$

$$D = DO \text{ ที่ลดลง} = DO_S - DO_t$$

ดังรูปซึ่งแสดงถึงค่า DO ของน้ำที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการผสมของน้ำ



เวลา

$L = \text{Ultimate BOD}$  ซึ่งหมายถึงความสกปรกทั้งหมดดังรูปที่ 6.7

$$\begin{aligned}
2.303 (\log 1 - \log 2) &= -\lambda t_{\frac{1}{2}} \\
(\log 2 = 0.301) - 2.303 \times 0.31 &= -\lambda t_{\frac{1}{2}} \\
-0.0693 &= -\lambda t_{\frac{1}{2}} \\
t_{\frac{1}{2}} &= \frac{0.069}{\lambda} \\
\text{หรือ } \lambda &= \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}
\end{aligned}$$

Mean life (อายุเฉลี่ย) T (tau)

ทุกอะตอมในสารกัมมันตรังสี มีการสลายตัวได้ไม่พร้อมกันนั่นคือการดูภาพโดยรวมของการสลายตัวของสาร จะต้องใช้อายุเฉลี่ยซึ่งมีความสัมพันธ์กับครึ่งชีวิตคือ

$$T = 1.44 t_{\frac{1}{2}}$$

การคำนวณหา Dose Rate จาก Point source (จากแหล่งที่ให้รังสีเป็นจุด)

Gamma Dose Rate เนื่องจากมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง คำนวณได้จาก

$$\text{Gamma dose rate} = \frac{6CE}{d^2} \text{ rad/hr}$$

C = ความแรงของแหล่งกำเนิด หน่วย Curie (Ci)

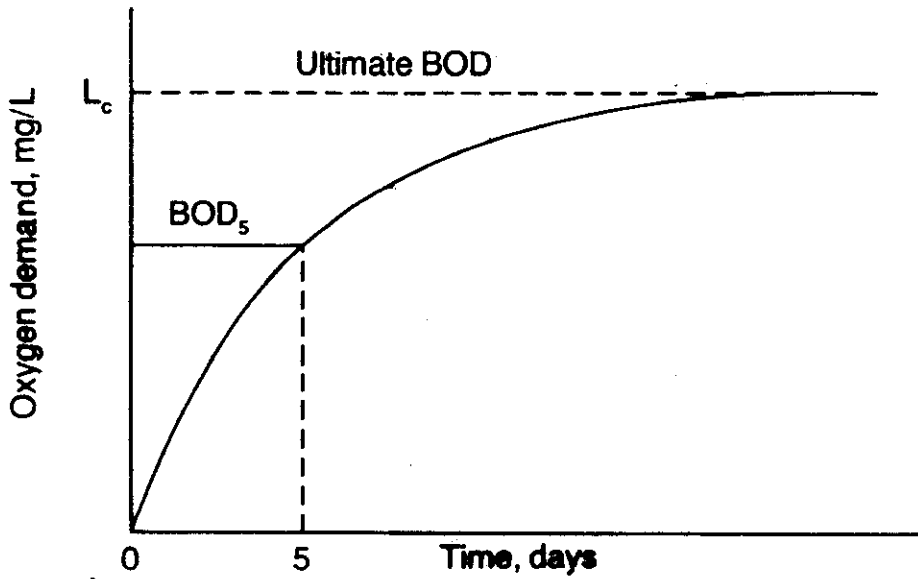
E = พลังงานของรังสีแกมมาต่อการสลายตัว 1 ครั้ง หน่วย Mev (millions electron volts)

d = ระยะทาง หน่วยเป็นฟุต

ตัวอย่าง CO-60 มีปริมาณ 10,000 Ci จะให้รังสีแกมมาเป็นแบบ point source ที่ระยะห่าง

1 ฟุต โดยกำหนดพลังงานของรังสีแกมมา = 5 mev

$$\begin{aligned}
\text{จาก Gamma dose rate} &= \frac{6CE}{d^2} \text{ rad/hr} \\
&= \frac{61 \times 10,000 \times 5}{1} \\
&= 3 \times 10^5 \text{ rad/hr}
\end{aligned}$$



รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะของความสัมพันธ์ของ BOD และเวลา

และจาก Streeter Phelp Model จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$D_t = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} [e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}] + D_a e^{-K_2 t}$$

Where  $D_t$  = DO deficit t day downstream (mg/l)

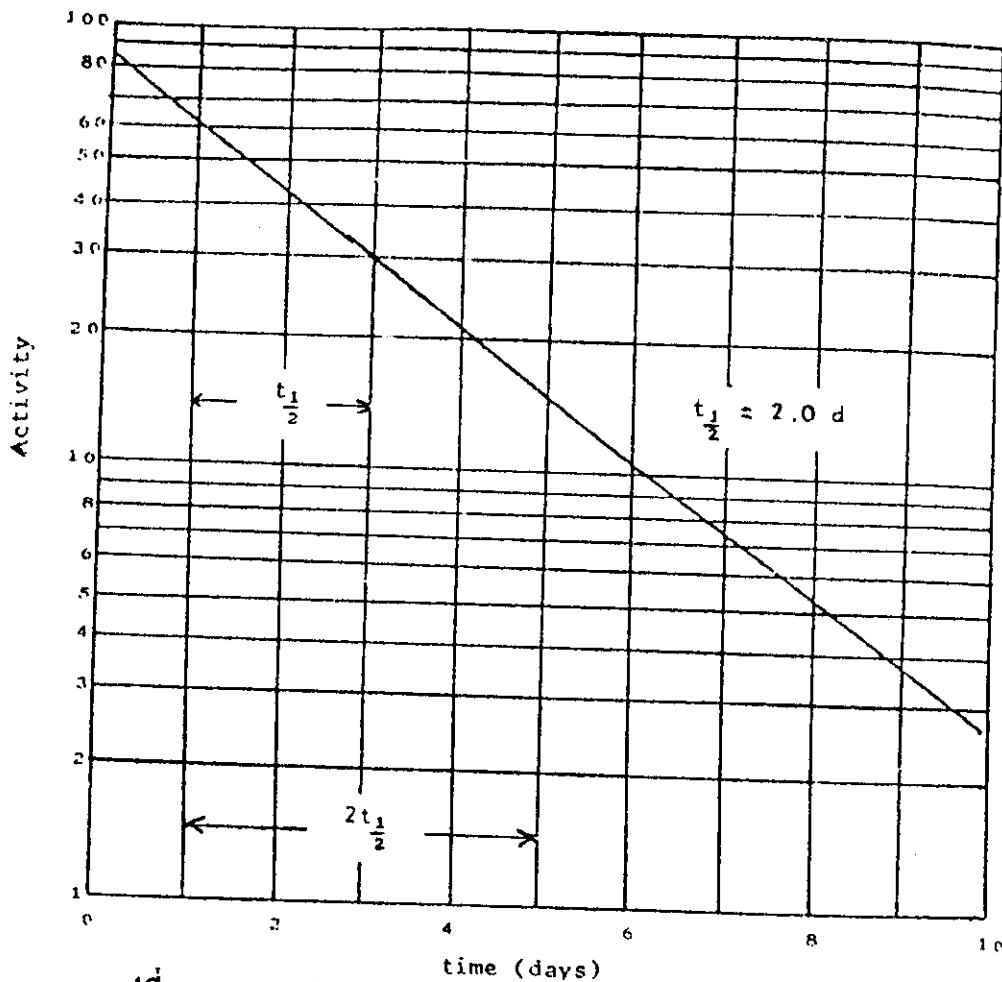
$L_a$  = initial ultimate BOD

$D_a$  = initial DO, deficit, mg/l

ค่าที่จุด critical (time and DO)

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \left[ \ln \left\{ \frac{K_2}{K_1} \left( 1 - \frac{D_a (K_2 - K_1)}{K_1 L_a} \right) \right\} \right]$$

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} L_a (e^{-K_1 t_c})$$



รูปที่ 6.37 กราฟการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิต 2 วัน

Half life (ครึ่งชีวิต)  $t_{\frac{1}{2}}$  คือระยะเวลาที่ทำให้สารกัมมันตรังสีลดลงเหลือปริมาณครึ่งหนึ่ง

จาก  $N = N_0 e^{-\lambda(t-t_1)}$  (3)

ให้  $t_1 - t_2 = t_{\frac{1}{2}}$ ,  $N = \frac{N_0}{2}$  แทนค่าใน (3)

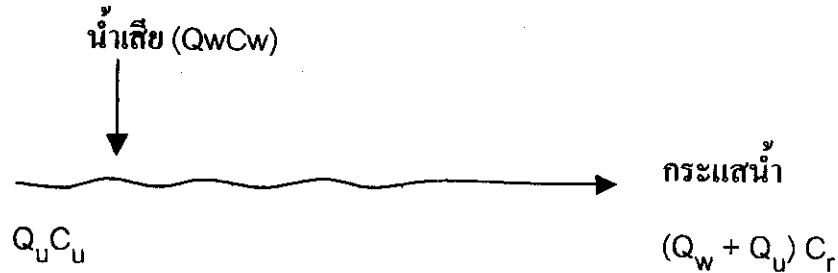
$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{\frac{1}{2}}$$

$$2.303 \log \frac{1}{2} = -\lambda t_{\frac{1}{2}}$$

แบบจำลองผสม (Mixed Model) กรณีที่เป็นสาร conservation (ไม่ถูกย่อยสลาย) เช่น heavy metal, suspended solid จะคำนวณความเข้มข้นได้จากแผนภาพดังนี้

ความเข้มข้นของมลพิษเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ



โดยที่  $Q_w$  และ  $C_w$  หมายถึงอัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นของสารในน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม

$Q_u$  และ  $C_u$  หมายถึง อัตราการไหลของน้ำ และความเข้มข้นของสารในน้ำ ซึ่งอยู่ต้นน้ำ

$C_r$  หมายถึง ความเข้มข้นของสารหลังจากผสมในน้ำแล้ว การใช้แบบ

จำลองนี้จะใช้หลักมวลสมดุลคือ ปริมาณน้ำและสารต้นแม่น้ำเท่ากับปริมาณน้ำและสารรวมกัน นั่นคือ

$$(Q_w + Q_u) C_r = Q_w C_w + Q_u C_u$$

$$\therefore C_r = \frac{Q_w C_w + Q_u C_u}{Q_w + Q_u}$$

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

$N$  = จำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิม (สารตั้งต้น)

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

$\lambda$  = disintegration constant ( $\text{sec}^{-1}$ )

= decay constant

= radioactive constant

integrate สมการที่ 1 ในช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$

$$-\lambda (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N$  = จำนวนอะตอมที่เหลือ

$N_0$  = จำนวนอะตอมเริ่มต้น

$\lambda$  = ค่าคงที่การสลายตัว

$t_1$  = เวลาที่สารเริ่มสลายตัว

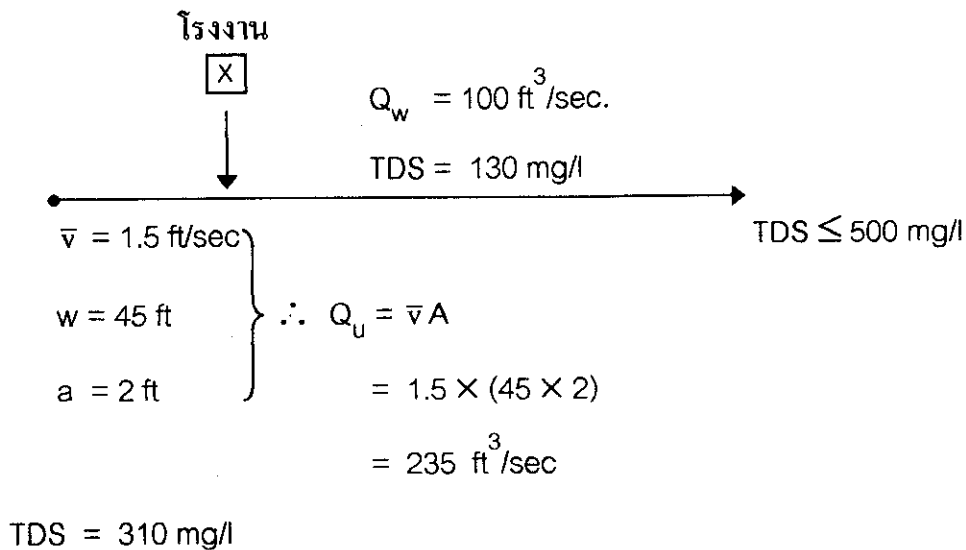
$t_2$  = เวลาที่สารสลายตัวหมด

การวัดกัมมันตรังสีจะใช้ค่า  $A$  (activity) ในการคำนวณจาก (2) จะเขียนความสัมพันธ์ในเทอมของ  $A$  ได้เป็น

$$A = A_0 e^{-\lambda(t_2 - t_1)}$$

$A_0$  คือค่า activity เริ่มต้น แบบอย่างของการสลายตัวที่สัมพันธ์กับสมการดังแสดงในรูปที่ 6.37

ตัวอย่าง ในแม่น้ำสายหนึ่งซึ่งมีขนาดกว้าง 45 ฟุต ลึก 2 ฟุต และมีความเร็วของกระแสน้ำ 1.5 ฟุต/นาที ค่า TDS ของแหล่งน้ำเท่ากับ 310 มก./ล. ถ้ามีโรงงานแห่งหนึ่งตั้งอยู่ริมแม่น้ำสายนี้และปล่อยน้ำทิ้งที่มีอัตราการไหล 100 ลบ<sup>3</sup>/วินาที ค่า TDS = 1300 มก/ล. ถามว่า ถ้ามาตรฐานของค่า TDS กำหนดให้มี  $\leq 500$  มก/ล. โรงงานแห่งนี้จะปล่อยน้ำแล้วทำให้ค่า TDS สูงกว่ามาตรฐานหรือไม่อย่างไร



$$\begin{aligned}
 \text{จาก } C_r &= \frac{C_w Q_w + C_u Q_u}{Q_w + Q_u} \\
 &= \frac{(1300 \times 100) + (310 \times 235)}{100 + 235} \\
 &= 731 \text{ mg/l}
 \end{aligned}$$

นั่นคือโรงงานนี้ปล่อย TDS ทิ้งในน้ำแล้วทำให้ค่าเกินมาตรฐานซึ่งกำหนดให้  $\leq 500$  มก/ล

6. คูรี (Curie) เขียนย่อว่า Ci เป็นหน่วยบอกความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสีของสารกัมมันตรังสี

$$1 \text{ คูรี (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dis/sec}$$

dis ย่อมาจาก disintegration แปลว่าการสลายตัว ในห้องปฏิบัติการอาจใช้หน่วยที่เล็กลงไปอีก ได้แก่ มิลลิคูรี (mCi) และไมโครคูรี ( $\mu\text{Ci}$ )

$$1 \text{ Ci} = 10^3 \text{ mCi}$$

$$1 \text{ mCi} = 10^3 \mu\text{Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 10^6 \mu\text{Ci}$$

$$1 \text{ คูรี (Ci)} = 9.7 \times 10^{10} \text{ becquerel}$$

7. หน่วยใหม่ๆ

$$- 1 \text{ gray} = 100 \text{ rads}$$

$$- 1 \text{ R (rontgen)} = 2.85 \times 10^{-4} \text{ coulomb/kg air}$$

$$- 1 \text{ R (rontgen)} = 1 \text{ Rad}$$

8. MPD (Maximum Permeable Dose)

คือปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยไม่เกิดอันตรายแก่ผู้รับ

$$\text{MPD} = 5(N-18) \text{ rem/year}$$

N = อายุเป็นปีของผู้ที่นำมาคำนวณ

**ทฤษฎีการสลายตัว (Theory of disitegration)**

อัตราการสลายตัวของกัมมันตรังสี (radioactive) จะเป็นปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่ง (first order) โดยอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิม เขียนเป็นสัมพันธได้ว่า

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

N = จำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิม (สารตั้งต้น)



ตัวอย่าง การศึกษา mixed model

ได้มีการจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ริมแม่น้ำสายหนึ่ง ซึ่งมี DO = 80 mg/l,  $BOD_5^{20} = 2.0$  mg/l, อุณหภูมิ 22.0°C และอัตราการไหล 250 ft<sup>3</sup>/sec กำหนดให้โรงงานปล่อยของเสียออกมาในอัตรา 125 ft<sup>3</sup>/sec  $BOD_5^{20} = 800$  mg/l, อุณหภูมิ 31°C

และจะมีการให้อากาศแก่น้ำเสีย 6.0 mg/l ภายหลังจากปล่อยน้ำเสกลงในแม่น้ำ 3 ฟุต กว้าง 50 ฟุต กำหนดให้มาตรฐานแหล่งน้ำจะต้องมี DO 5.0 mg/l

$$\text{ถ้า } K_1 \text{ at } 20^\circ\text{C} = 0.23 \text{ day}^{-1}$$

$$K_2 \text{ at } 20^\circ\text{C} = 3.00 \text{ day}^{-1}$$

$$\theta_1 = 1.05$$

$$\theta_2 = 1.02$$

จงหา max  $BOD_5^{20}$  ที่โรงงานแห่งนี้สามารถจะปล่อยลงสู่แม่น้ำได้  
สภาพแม่น้ำหลังปล่อย (Mixing zone model)

$$\begin{aligned} Q_{\text{ผสม}} &= Q_1 + Q_2 \\ &= 250 + 125 \text{ ft}^3/\text{sec} = 375 \text{ ft}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

$$\text{velocity} = \frac{Q}{A} = \frac{375}{3 \times 50} = 2.5 \text{ ft/sec}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{เฉลี่ย}} &= \frac{(t \cdot G) \text{ แม่น้ำ} + (t \cdot G) \text{ โรงงาน}}{Q \text{ รวม}} \\ &= \frac{(22 \times 250) + (31 \times 125)}{375} \\ &= 25^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DO_{\text{เฉลี่ย}} &= \frac{(D.O. \cdot Q) \text{ แม่น้ำ} + (D.O. \cdot Q) \text{ โรงงาน}}{Q \text{ รวม}} \\ &= \frac{(8.0 \times 250) + (6.0 \times 125)}{375} \\ &= 7.33 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

3. แรด (Rad) เนื่องจากรังสีเจอน (R) หรือ rep ที่กำหนดแต่เดิมใช้เฉพาะกับรังสี x และรังสีแกมมาจึงมีการกำหนดหน่วยใหม่เพื่อบอกปริมาณรังสีอื่นได้แก่รังสีอัลฟา เบตา และนิวตรอนที่มีความเร็วสูง คือหน่วย Rad (Radiation Absorption dose)

1 แรด คือปริมาณรังสีที่เทียบเท่ากับพลังงาน 100 erg ต่อกรัมของสารที่รับรังสีนั้นเข้าไป (สารทั่วไปคือเนื้อเยื่อ)

1 แรด = 100 erg/gm ของสารที่รับรังสีเข้าไป

ถ้าสิ่งที่ยอมรับรังสีเป็นเนื้อเยื่อของร่างกายแรดมีค่าประมาณเท่ากับ rep (100 erg/gm) ของเนื้อเยื่อเปรียบเทียบกับ 97 erg/gm ของเนื้อเยื่อ)

พึงสังเกตว่า รังสีจำนวนหนึ่งตามที่กำหนดให้จะมีจำนวนแรดแตกต่างกันได้ถ้าวัตถุที่รับรังสีนั้นแตกต่างกัน ขึ้นกับว่ารังสีนั้นจะสามารถทะลุทะลวงวัตถุนั้นมากน้อยเพียงใด แต่จำนวน rep หรือ R ที่เนื้อเยื่อได้รับจะเท่ากันเสมอไป

แรดจึงใช้วัดปริมาณรังสีที่วัตถุได้รับ โดยไม่คำนึงว่าจะเป็นรังสีชนิดใด

4. เรม (rem) ย่อมาจาก roentgen equivalent man หรือ mammal เป็นหน่วยที่บอกถึงความเสียหายทางชีวภาพที่เกิดขึ้นกับคนจากรังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งเทียบเท่าความเสียหายทางชีวภาพที่เกิดจากรังสีแกมมา 1 rep (97 erg ต่อกรัมของเนื้อเยื่อ)

5. RBE (Relative Biological Effectiveness) เป็นค่าที่บอกผลหรือความเสียหายของกัมมันตภาพรังสีที่มีต่อสิ่งมีชีวิต สำหรับรังสีเบตาและแกมมา มีค่า = 1 แต่สำหรับรังสีที่มีมวลมากกว่าจะสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาไอออนไนเซชันกว่าค่า RBE จะมีค่ามากกว่า 1 เช่นอนุภาคอัลฟามีค่า RBE = 10 หมายความว่าอนุภาคอัลฟา 1 แรดสามารถก่อความเสียหายต่อร่างกายเป็น 10 เท่าของรังสีเบตา หรือแกมมา 1 แรด หรือ 1 rem = 10 rad ค่า RBE ของโปรตอนและนิวตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงก็เท่ากับ 10 เช่นกัน แต่นิวเคลียสที่มีมวลสูงขึ้นไปอาจมีค่า RBE สูงถึง 20 ก็ได้

$$RBE = \frac{\text{rem}}{\text{rad}}$$

จากตาราง  $DO_{\text{อิ่มตัว}} = 8.38 \text{ mg/l}$

$$Da \left( \begin{array}{c} DO \\ \text{ลดที่จุดเริ่มต้น} \end{array} \right) = 8.38 - 7.33 = 1.05 \text{ mg/l}$$

$\therefore t$  เฉลี่ย =  $28^\circ \text{C}$   $\therefore$  ต้องเปลี่ยน  $K_1, K_2$  เป็นที่  $25^\circ \text{C}$  ด้วย

$$\text{จาก } Kt = K_{20} \theta^{t-20}$$

$$\therefore K_1 = 0.23 (1.05)^{25-20} = 0.29 \text{ day}^{-1}$$

$$K_2 = 3 (1.02)^{25-20} = 3.3 \text{ day}^{-1}$$

$$D_c = DO_{\text{sat แม่น้ำ}} - DO_{\text{standard แม่น้ำ}}$$

$$DO \text{ ที่จะลดลงได้} = 8.38 - 5.00$$

หลัง ร.จ.ปล่อยน้ำ

$$= 3.38 \text{ mg/l}$$

Trial & error    หาค่า  $La$  ( $BOD_5$ ) – BOD ultimate จากสูตร

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{1}{K_2 - K_1} \left( \ln \left\{ \frac{K_2}{K_1} \left[ 1 - \frac{Da(K_2 - K_1)}{K_1 La} \right] \right\} \right) \\ &= \frac{1}{3.3 - 0.29} \left( \ln \left\{ \frac{3.3}{0.29} \left[ 1 - \frac{1.05(3.3 - 0.29)}{(0.29)La} \right] \right\} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_c &= \frac{K_1}{K_2} La (e^{-kt_c}) , \\ &= \frac{0.29}{3.3} La (e^{-0.29t_c}) \\ &= 0.0879 La (e^{-0.29t_c}) \end{aligned}$$

ง. Ionization Gass มีพลังงานจลน้อย (เนื่องจากมีมวลน้อย) อำนาจการทะลุทะลวงจึงน้อยเมื่อเทียบกับอัลฟา ค่า RBE = 1

จ. Action on ZnS and film มีผลต่อ ZnS น้อยกว่า  $\alpha$  ส่วนผลต่อฟิล์มจะมากกว่า  $\alpha$  (เนื่องจากมักเกิดรังสี x-rays พร้อมกัน)

รังสีแกมมา ( $\gamma$  - rays)

ก. Nature เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น ( $0.0001-0.01 \text{ \AA}$ ) ไม่มีมวลประจุ ไม่หักเหสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ข. Velocity ความเร็วจะเท่ากับแสงคือ  $3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$

ค. Penetrating มีพลังงานสูงมักจะเรียก  $\gamma$  ว่า hard ray (สูงกว่ารังสี x) จะถูกดูดหรือกั้นโดยวัตถุที่หนามาก เช่นพบว่าจะผ่านแผ่นตะกั่วหนา 8 ซม. ได้และผ่านแผ่นเหล็กหนา 25 ซม. ได้ส่วนในอากาศจะผ่านได้ถึงประมาณ 4 เมตร

ง. Ionization gas เกิดได้น้อยพบว่าค่า RBE  $\sim 1$

จ. Action on ZnS and film จะมีผลต่อ ZnS และฟิล์มน้อย

นิวตรอน (Neutrons)

ก. Nature เป็นอนุภาคของสารที่ไม่มีประจุ

ข. Penetration power ผ่านอยู่ในอากาศได้ตลอด

ค. Ionization gas เกิดได้มากพอควร ค่า RBE  $\sim 5$

### หน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสี (Dose Rate Calculation)

1. รันต์เจน (Roentgen) ใช้ตัวย่อ R เป็นหน่วยของรังสีที่ใช้สำหรับวัดรังสี x และรังสีแกมมาที่เกิดในอากาศเท่านั้น 1 roentgen เท่ากับปริมาณ x-ray หรือรังสีแกมมาที่ทำให้ให้อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ  $273^\circ \text{ K}$  ความดัน 760 มม. ของ Hg) แตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุไฟฟ้า 1 ESU (electrostatic unit)

2. เรพ (Rep) roentgen equivalent physical (เป็นหน่วยที่เลิกใช้แล้ว)  
1 เรพ เท่ากับการดูดกลืนรังสี  $97 \text{ erg/g}$  ของเนื้อเยื่อของร่างกาย

Trial	BOD loading (La) mg/l trial	TC (Critical tise)	DC (Critical DO)
1	100	0.770	7.03
2	50	0.727	3.56
⋮	⋮	⋮	⋮
6	47	0.721	3.35
7	47.4	0.721	3.38 ขอมรับได้

เปลี่ยน La (BOD Ultimate) เป็น  $BOD_5^{20}$

$$\begin{aligned}
 BOD_5^{20} &= L(1 - e^{-5Kt}) \\
 &= 47.4 [1 - e^{-(0.25)(5)}] \\
 &= 32.4 \text{ mg/l}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็น  $BOD_5$  จากการผสมแล้ว (mixing zone)

$$\begin{aligned}
 \therefore BOD_5 &= \frac{BOD_{5\text{รวม}} Q_{\text{รวม}} - BOD_{\text{แม่น้ำ}} Q_{\text{แม่น้ำ}}}{Q_{\text{โรงงาน}}} \\
 &= \frac{(32.4)(375) - (2.0)(250)}{125} \\
 &= 93.2 \text{ mg/l}
 \end{aligned}$$

ค่า  $BOD_5$  ของโรงงานต้องไม่มากกว่านี้เพื่อไม่ให้น้ำมี  $DO < 5 \text{ mg/L}$

**COD** (Chemical oxygen demand) คือค่าที่ใช้วัดความสกปรกของน้ำ โดยบอกเป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยหลักการที่ว่าสารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถที่จะถูกออกซิไดส์ได้โดยตัวออกซิไดส์อย่างแรงภายใต้สภาวะที่เป็นกรด พร้อมทั้งพวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนแอมโมเนียในโตรเจน และสารอินทรีย์ในโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท

3. Pair production
4. Photonuclear reaction

### สมบัติของกัมมันตภาพรังสี

#### อนุภาคอัลฟา

ก. Nature เป็นนิวเคลียสของ He มีประจุ +2 มีมวลเป็น 4 เท่าของ H-atom ( ${}^4_2\text{He}$ )

ข. Velocity ความเร็วจะเป็น  $1/10$  ของความเร็วแสง คือ  $3 \times 10^9$  cm/sec

ค. Penetration Power (อำนาจการทะลุทะลวง) เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ฉะนั้นจึงมีอำนาจในการทะลุทะลวงไม่สูง โดยจะสามารถถูกดูดหรือกั้นได้โดยแผ่นอลูมิเนียมหนาเพียง  $1/10$  nm หรือของแข็งที่มีความบางมาก ๆ ได้ ส่วนในอากาศจะสามารถที่จะผ่านอากาศได้เพียง 5 ซม. เท่านั้น

ง. Ionization Gas (การทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออน) มีอำนาจในการทำให้ไอเลคตรอนของแก๊สในอากาศหลุดได้ง่าย ค่า Energy and Relative Biological Effectiveness (RBE) จึงมีค่าสูงมากประมาณ 20

จ. Action on Zinc sulfide and film ทำให้เกิดการเรืองแสงบน ZnS และทำให้ฟิล์มดำ

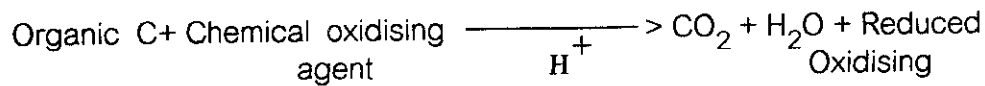
#### อนุภาคเบตา

ก. Nature เป็นอิเล็กตรอน (หรือโพสิตรอน) ที่มีความเร็วสูงประจุเป็นลบ

ข. Velocity ความเร็วจะไม่เท่ากันอยู่ระหว่าง 33-99% ของความเร็วแสง นั้นคือแสดงว่า  $\beta$  มีสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอ

ค. Penetrating Power อำนาจการทะลุทะลวงสูงกว่า  $\alpha$  (เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า  $\alpha$ ) สามารถถูกดูดหรือกั้นโดยแผ่นอลูมิเนียมหนา 5 nm หรือของแข็งอื่นที่บางได้ และจะผ่านอากาศได้เพียง 3 ซม.

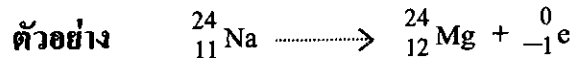
หลักการหาค่า COD จะเหมือน BOD ต่างที่ว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ BOD จะใช้แบคทีเรียซึ่งใช้เวลา 5 วัน อุณหภูมิ 20°ซ ส่วน COD จะใช้ตัวออกซิไดส์ที่แรงในสถานะที่เป็นกรดและใช้เวลาน้อยกว่า คือ น้อยกว่า 3 ชั่วโมง ดังสมการ



ปกติแล้ว ค่า COD จะมีค่ามากกว่า BOD เสมอ เนื่องจากการวิเคราะห์แบบ COD สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนโดยไม่ต้องอาศัยการดูดซึมทางชีวะ ซึ่งใช้เวลาและเงื่อนไขมากกว่า ในการวัดค่าความสกปรกของน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม จะใช้ข้อมูลของ COD เป็นส่วนมาก เนื่องจากกระทำได้รวดเร็วและค่าที่ได้น่าเชื่อถือมากกว่า แต่ข้อเสียคือไม่สามารถใช้แยกค่าสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์ทางชีวะได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูล COD อาจจะใช้บอกค่า BOD ได้อย่างคร่าว ๆ จากการพล็อตกราฟระหว่าง COD และ BOD เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง

TOC (total organic compound) เป็นวิธีการวัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำโดยอาศัยหลักการเผาสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 900 - 1000°ซ เกิดเป็น CO<sub>2</sub> แล้ววัด CO<sub>2</sub> ที่เกิดโดยใช้เครื่อง elemental analyzer

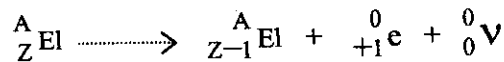
ทั้งค่า BOD, COD และ TOC เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำได้ทั้ง 3 ค่า ซึ่งนิยมกระทำทั้งในน้ำธรรมชาติและที่ถูกลบออกจากโรงงานอุตสาหกรรม การวัดค่า BOD บางครั้งจะทำโดยตรงไม่ได้ เนื่องจากภาวะที่เป็นพิษมากจนจุลินทรีย์ดำรงชีพไม่ได้ ฉะนั้นวิธีการหา BOD จะกระทำได้โดยการเจือจาง (dilution) โดยทั่วไปแล้วน้ำดื่มจะมีค่า BOD ประมาณ 1 ppm และน้ำที่บริโภคได้จะมีค่า BOD ประมาณ 3 ppm ส่วนมาตรฐานน้ำทิ้งนั้นจะมีค่า BOD ไม่มากกว่า 20 ppm และค่า BOD, COD, และ TOD นี้มีค่าความสัมพันธ์กันดังกราฟรูป 6.8



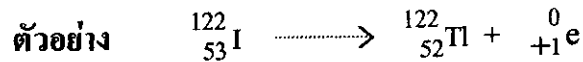
${}_{-1}^0\text{e}$  นี้คืออนุภาค ซึ่งอาจเขียนเป็น  $\beta$  หรือ  $\beta^-$  ก็ได้

(กรณีกล่าวถึงรังสี  $\beta$  นั้นถ้าไม่ระบุจะหมายถึง  $\beta^-$ )

ข. Positron emission จะเกิดเมื่อนิวเคลียสมีจำนวนโปรตรอนมากเกินไปกว่าที่ควรจะมี โปรตรอนบางส่วนจึงถูกเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน ปฏิกริยาทั่วไปเขียนได้เป็น



${}_{+1}^0\text{e}$  นี้คืออนุภาค  $\beta$  ซึ่งอาจเขียนได้เป็น  $\beta^+$



ค. Electron capture (EC) เกิดเมื่อมีพลังงานมาเกี่ยวข้องอย่างน้อย 1.02 MeV ทำให้อิเล็กตรอนในที่อยู่ชั้นในสุด ถูกเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียส อิเล็กตรอนดังกล่าวจึงอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร จึงพยายามจะทำให้อยู่สถานะพื้น โดยปล่อยพลังงานออกมาเป็น  $\beta$

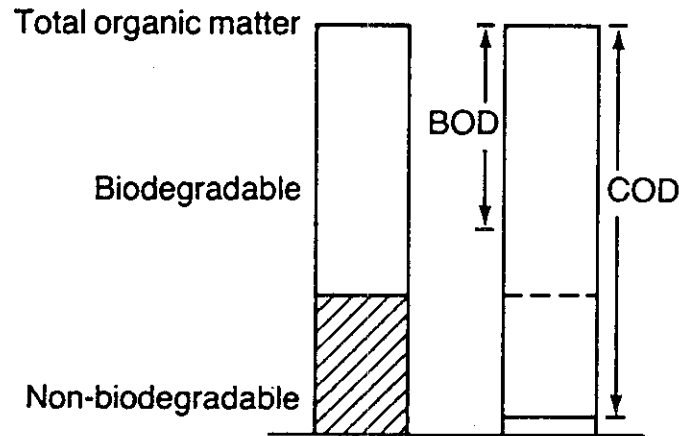
ขณะที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวก็จะเกิดรังสี  $x$  ด้วยเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นที่ว่างซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า โดยกรปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสี  $x$  (พลังงานที่ปล่อย =  $h\nu$ ) นั่นคือกรณี EC นอกจากจะเกิดรังสี  $\beta$  ยังมีเคลื่อนของอิเล็กตรอนในชั้นถัดไปเข้าไปแทนที่ชั้นที่อยู่ในสุด โดยการปล่อยรังสี  $x$  ออกมาด้วย

### Gamma radiation

x-ray และ  $\gamma$ -ray เหมือนกัน มีข้อแตกต่างคือ  $\gamma$  มีความถี่สูงกว่า ทำให้มีอำนาจการทะลุทะลวงมากกว่า และแหล่งกำเนิดต่างกัน รังสี  $\gamma$  เกิดจากนิวเคลียส วิธีการเกิดมี 4 วิธี

1. Photoelectric absorption
2. Compton scattering





รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของค่า BOD และ COD กับค่า TOC ในน้ำ

### 6.2.2 เชื้อโรค (Disease)

คือพวกเชื้อโรคซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางชีววิทยา ได้แก่

1. Coliform เป็นตัวชี้ที่จะบอกได้ว่าน้ำมีการปนเปื้อนของอุจจาระหรือไม่ (โดยการตรวจเชื้อ E. Coli)

2. Pathogenic Bacteria คือพวกที่ทำให้เกิดโรคซึ่งมีในน้ำเสีย ได้แก่ Salmonella typhi ซึ่งทำให้เกิดโรคไทฟอยด์ Shigella sp. ทำให้เกิดโรคบิด การตรวจสอบทำได้ยุ่งยากเนื่องจากมีชีวิตสั้นและมีสปอร์ ถ้าตรวจสอบไม่พบในครั้งแรกควรทำการทิ้งไว้และตรวจสอบต่อภายหลัง

### 6.2.3 ดินตะกอน (Sediment)

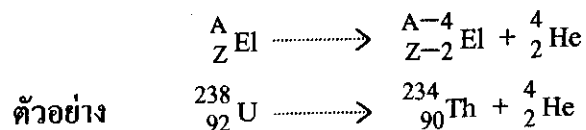
ไม่ได้เกิดพิษแบบโลหะหนักหรือยาฆ่าแมลง แต่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแง่คุณภาพชีวิตของคนและสัตว์

## รังสีจากการกระทำของมนุษย์

1. วงการแพทย์ ใช้ในการตรวจวินิจฉัยโรคหรือรักษาโรค เช่น พบว่าในการที่ฉายรังสี x ที่ปอด 1 ครั้ง ร่างกายจะได้รับรังสีประมาณ 200 มิลลิเรม หรือการตรวจคนที่ เป็นโรคคอพอก โดยให้กิน I-131 ซึ่งจะให้รังสีเบตากับร่างกายได้ด้วย
2. จากโรงงานไฟฟ้าปรมาณู ให้รังสีที่เล็ดรอดออกมาก หรือจากกากของเสีย นิวเคลียร์
3. รังสีจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ทำให้เกิดรังสีและอนุภาคกัมมันตรังสี เรียกว่า radioactive fall out
4. รังสีจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากโทรทัศน์, สารทอเรียม ซึ่งทำให้เกิดการเรืองแสงบนหน้าปัดมัทนาฬิกา (ให้รังสีแกมมา)

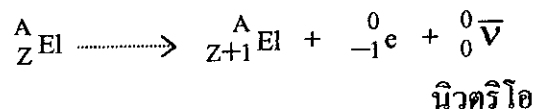
## การสลายของกัมมันตรังสี

1. Alpha decay จะเกิดกับ nucleus ที่มี nucleon (proton และ neutron) มาก โดยเฉพาะกับธาตุที่มี mass number > 209 ขึ้นไป กระบวนการสลายของอัลฟา อาจเขียนเป็นสมการทั่วไป



2. Beta decay จะเกิดกรณีที่อัตราส่วน n/p ในนิวเคลียสเปลี่ยนไป โดยอาจเนื่องจากการบวนการในธรรมชาติหรือถูกกระตุ้นด้วยนิวตรอนหรือโปรตรอน นิวเคลียสจะปรับตัวให้เหมือนเดิม เพื่อให้อยู่สภาวะ groundstate วิธีการสลายตัว  $\beta$  มี 3 ชนิด คือ

ก. Negatron emission จะเกิดเมื่อนิวเคลียสมีจำนวนนิวตรอนเกินกว่าที่ควรจะมี โดยนิวตรอนบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นโปรตรอน ปฏิกิริยาทั่วไปเขียนได้เป็น



## กิจกรรมมนุษย์ที่ก่อให้เกิด ได้แก่

1. การพัฒนาด้านการเกษตรกรรม
2. การสร้างถนนและสิ่งก่อสร้าง
3. การทำเหมืองเปิด

จากธรรมชาติ จะเกิดได้จากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

## ผลกระทบ

1. ทำให้แหล่งน้ำเกิดความตื้นเขิน
2. ทำอันตรายต่อสัตว์น้ำ ในแง่การทำลายแหล่งอาหารและที่พักไข่
3. ทำให้น้ำเกิดการขุ่น ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำ
4. แสงสว่างที่จะส่องลงน้ำทำให้พืชสังเคราะห์แสงได้น้อยลง และมีผลต่อปริมาณออกซิเจน
5. มีผลต่อการหาอาหารของสัตว์น้ำเนื่องจากมองไม่เห็น

สารแขวนลอย (suspended solid) เป็นตัวชี้ที่ใช้บ่งคุณภาพน้ำได้ โดยถ้ามีปริมาณสูง แสดงว่าน้ำนั้นไม่ดี ในน้ำธรรมชาติพบว่าจะมีสารแขวนลอยซึ่งมาจากอนุภาคของดินซึ่งมีประจุเป็นลบทำให้เกิดการผลัดกัน จึงเกิดการลอยตัวขึ้นและจะทำให้เกิดเป็นดินตะกอนจะต้องใช้วิธีการเติมสารเพื่อแล้วทำให้เกิดการรวมตัวตกตะกอนลงมาเช่นการใช้เกลือ  $Al^{3+}$  เพื่อจะได้ไปช่วยลดประจุลบของตะกอนที่แขวนลอยแล้วจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันได้

## การเกิดรวมตัวกันของสารแขวนลอย แบ่งได้ 2 ระยะ

1. Coagulation คือการที่ลดประจุของอนุภาคที่แขวนลอยโดยการเติมเกลือบางชนิดลงไป

2. Flocculation เกิดเมื่อมีการลดประจุลง จะทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้นแล้วตกตะกอนลงมา

สมบัติทั้งสองนี้จะต้องใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยการเติมสารที่ pH ที่ค่าต่าง ๆ

3. อากาศ สารกัมมันตรังสีที่สำคัญในอากาศคือ เรดอน ความเข้มข้นมากน้อยของเรดอนนั้นขึ้นอยู่กับสถานที่และเงื่อนไขในบรรยากาศ ชนิดเรดอนที่สำคัญ คือ  $^{222}\text{Rn}$  มีโดยเฉลี่ย  $1.0 \times 10^{-10}$  Ci/gm และชนิดอื่นได้แก่  $^{220}\text{Rn}$  สำหรับ daughter ของเรดอนคือ Pb-210 และ Po-210 ซึ่งจะเกิดการจับตัวกันเองกลายเป็นอะตอมแล้วเกิดเป็นอนุภาคฝุ่นและถูกกำจัดออกจากอากาศโดยฝนในที่สุด

4. น้ำ นิวไคลด์ที่สำคัญในน้ำคือ Ra-226 และ daughters ที่ให้รังสีอัลฟาคือ Rn-222, Po-218, Pc-214

5. อาหาร นิวไคลด์ที่เกี่ยวข้อง คือ Ra-226 ซึ่งได้มาจากน้ำ 80-90% จะให้รังสีอัลฟาเกิดเป็น daughter Po-210 ที่สำคัญ และชนิดอื่น คือ R-228 ซึ่งจะให้อัลฟากลายเป็น Po-210

นอกจากนี้พบว่านอาหารจะให้รังสี  $\beta$  จาก K-40 ซึ่งมีอยู่เช่นปลา พบว่ามี 0.3% โดย (น.น.) ของ K-40 และธาตุในเนื้อสัตว์ก็พบว่ามี C-14 ซึ่งจะให้รังสี  $\beta$  ด้วย

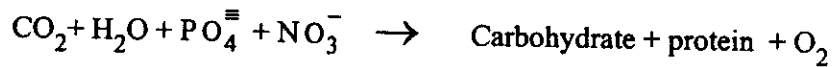
6. ในร่างกายมนุษย์ พบว่าในน้ำหนักมาตรฐาน 70 กิโลกรัม จะมีโปตัสเซียม 140 กรัม และเรดอน  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  กรัม ซึ่งโดยเรดอนนี้จะมียู่ในส่วนที่เป็นกระดูก ในเนื้อเยื่ออ่อนภายในร่างกายนั้นจะได้รับรังสีเบต้าจาก K-40 ประมาณ 20 mrem/year และยังได้จาก C-14 ที่มีอยู่ในร่างกายมนุษย์เองแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า

7. อวกาศ ได้แก่ cosmic ray ซึ่งพบว่าบริเวณขั้วโลกจะมีโอกาสได้รับมากที่สุด เนื่องจากผลของการดูดของสนามแม่เหล็กโลก รวมถึงมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในที่สูง ๆ ก็มีโอกาสดังกล่าวเช่นกัน เฉลี่ยแล้วมนุษย์เราจะได้รับ cosmic ray ประมาณ 0.001 roentgen ต่อวัน ซึ่งถ้าได้รับปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครโมโซมและ mutation ได้

สารแขวนลอยนี้จะสามารถดูดซับโลหะหรือไอออนของโลหะที่ผิวของมันได้ จึงสามารถมีการขนถ่ายไอออนของโลหะหรือโลหะที่ผิวได้แทนที่จะเกิดการจมตัวลง หรือกรณีสารอินทรีย์อื่น ๆ ก็เกิดได้เช่นกัน ฉะนั้นการวิเคราะห์โลหะหนักในรูปที่ละลายได้จึงต้องมีการกรองพวกนี้ออกไปก่อน

#### 6.2.4 สารอาหารของพืช (Plant Nutrients)

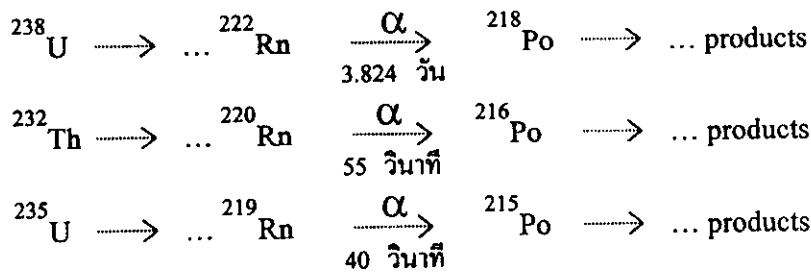
สารอาหารที่สำคัญที่พืชน้ำจะต้องใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงคือ



สารอาหารของพืชอื่น ๆ ได้แก่ K, Ca, Mg, S, P, N, C, ดังแสดงในตารางที่ 6.1 แต่ในแง่ที่เกี่ยวข้องกับสารพิษทางน้ำจะสนใจ N และ P เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดสภาวะที่เรียกว่า Eutrophication ซึ่งเป็นสภาวะที่มีสารอาหารในน้ำโดยเฉพาะ  $\text{PO}_4^{=}$  และ  $\text{NO}_3^-$  เพิ่มมากทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตได้เร็วมาก ทำให้เกิดผลต่อสิ่งแวดล้อมในแง่ของการลดลงของ  $\text{O}_2$  จากอากาศ เนื่องจากคลอโรพลาสต์เพิ่มการใช้  $\text{O}_2$  ในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดภาวะการขาด  $\text{O}_2$  ในแหล่งน้ำ ขัดขวางการสัญจร ฯลฯ กรณี P และ N พบว่า P สามารถที่จะควบคุมได้ง่ายกว่าเนื่องจากแหล่งน้ำที่ให้ P ก่อนข้างจะเป็น Point source โดยมาจากทางบ้านเรือนและจากโรงงานอุตสาหกรรม มีบางส่วนที่เป็น Nonpoint sources ได้แก่จากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ปุ๋ย และน้ำล้างจากขบวนการผลิตนม สำหรับ N นั้นแหล่งสำคัญที่ลงสู่หน้านั้นจะเป็นไปทั้งสองแบบ

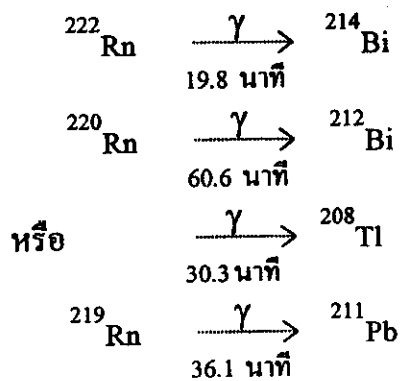
- U-235 เป็น parent ของ Actinum series ซึ่งจะสลายตัวจนหมดสภาพกลายเป็น Pb-207
- Th-232 เป็น parent ของ Thorium series ซึ่งจะสลายตัวจนหมดสภาพกลายเป็น Pb-208

การสลายของสารกัมมันตภาพรังสีทั้งสาม จะให้อิโซโทปเรดอนโดยใช้เวลาต่างกันคือ



เรดอน (เป็น noble gas) สามารถซึมผ่านช่องว่างของหินและดินออกสู่บรรยากาศ โดยเฉพาะ Ra-222 จะเข้าสู่บรรยากาศ และน้ำในสิ่งแวดล้อม

2. ในดิน จะให้รังสีแกมมาที่ความถี่จากสปีดดิฟเฟอเรนซ์ จากเรดอนซึ่งเกิดจากการสลายของทั้ง 3 series เกิดเป็นธาตุใหม่ คือ



ในสภาวะปกติ daughter ทั้งหมดนี้จะลอยขึ้นมาบนผิวดินเป็นปริมาณมากซึ่งสามารถจะตรวจพบได้ในบรรยากาศ

ตารางที่ 6.1 Essential Plant Nutrients : Sources and Functions

<i>Nutrient</i>	<i>Source</i>	<i>Function</i>
<i>Macronutrients</i>		
Carbon (CO)	Atmosphere, decay	Biomass constituent
Hydrogen	Water	Biomass constituent
Oxygen	Water	Biomass constituent
Nitrogen (NO)	Decay, atmosphere (nitrifying organisms), pollutants	Protein constituent
Phosphorus(phosphate)	Decay, minerals, pollutants	DNA, RNA constituent
Potassium	Minerals, pollutants	Metabolic function
Sulfur (sulfate)	Minerals	Proteins, enzymes
Magnesium	Minerals	Metabolic function
Calcium	Minerals	Metabolic function
<i>Micronutrients</i>		
B, Cl, Co, Cu, Fe, Mo, Mn,	Minerals, pollutants	Metabolic function and/or constituent of enzymes
Na, Si, V, Zn		

ไนโตรเจน สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องในเรื่องน้ำ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท  
คือ

1. สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  ซึ่งจะอยู่ในรูปปุ๋ย หรือเกลือในปัสสาวะ

2. สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก สารพวกนี้มีในพวกอุจจาระ ในปุ๋ยคอก

สารในรูปอินทรีย์ของไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนได้โดยอาศัยแบคทีเรีย เรียกกระบวนการนี้ว่า mineralization สารอนินทรีย์ไนโตรเจนจะละลายน้ำ

ที่มาของกัมมันตภาพรังสีสู่สิ่งแวดล้อม (radioactive input into the environment)

รังสีที่เกิดในธรรมชาติ มาจาก

สารแผ่รังสี (Radionuclides) ในสิ่งแวดล้อมได้แก่ น้ำ หิน ดิน อากาศ ฯลฯ ซึ่งเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เรียกว่าเป็นค่า back ground ดังแสดงในตาราง 6.16

ตารางที่ 6.16 ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของสารแผ่รังสีในธรรมชาติ

Nuclide	$t_{1/2}$ (yr)	Decay Type	Average Concentration (Ci g <sup>-1</sup> or m <sup>-3</sup> )	Inventory (Ci)
<i>Lithosphere</i>				
<sup>14</sup> C	5500	$\beta$	$4.46 \times 10^{-14}$	$1.5 \times 10^8$
<sup>40</sup> K	$1.3 \times 10^9$	$\beta, \gamma$	$1.69 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{15}$
<sup>87</sup> Rb	$4.8 \times 10^{10}$	$\beta$	$7.25 \times 10^{-12}$	$6.5 \times 10^{14}$
<sup>238</sup> U	$4.5 \times 10^9$	$\alpha, \gamma$	$1.65 \times 10^{-12}$	$1.5 \times 10^{14}$
<sup>230</sup> Th	$8.0 \times 10^4$	$\alpha, \gamma$	$3.88 \times 10^{-12}$	$3.5 \times 10^{14}$
<sup>210</sup> Pb	20	$\beta, \gamma$	$3.19 \times 10^{-12}$	$2.8 \times 10^{14}$
<i>Oceans</i>				
<sup>3</sup> H	12.26	$\beta$	$1.0 \times 10^{-12}$	$1.37 \times 10^9$
<sup>87</sup> Rb	$4.8 \times 10^{10}$	$\beta$	$2.8 \times 10^{-12}$	$3.8 \times 10^9$
<sup>40</sup> K	$1.3 \times 10^9$	$\beta, \gamma$	$3.3 \times 10^{-10}$	$4.5 \times 10^{11}$
<sup>238</sup> U	$4.5 \times 10^9$	$\alpha, \gamma$	$1.0 \times 10^{-12}$	$1.4 \times 10^9$
<i>Atmosphere</i>				
<sup>3</sup> H	12.26	$\beta$	$5.0 \times 10^{-13}$	$3.0 \times 10^6$
<sup>14</sup> C	5500	$\beta$	$1.1 \times 10^{-12}$	$4.0 \times 10^6$
<sup>222</sup> Rn	3.825 days	$\alpha$	$1.0 \times 10^{-10}$	$\sim 5 \times 10^7$

สารแผ่รังสีในธรรมชาติจะให้รังสีชนิดที่ต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่เกิด ดังนี้

1. หิน ในหินแกรนิตที่พบบนผิวโลกจะมีธาตุยูเรเนียม 3-4 พีพีเอ็ม และทอเรียม 10-15 พีพีเอ็ม โปแตสเซียม 2-6%

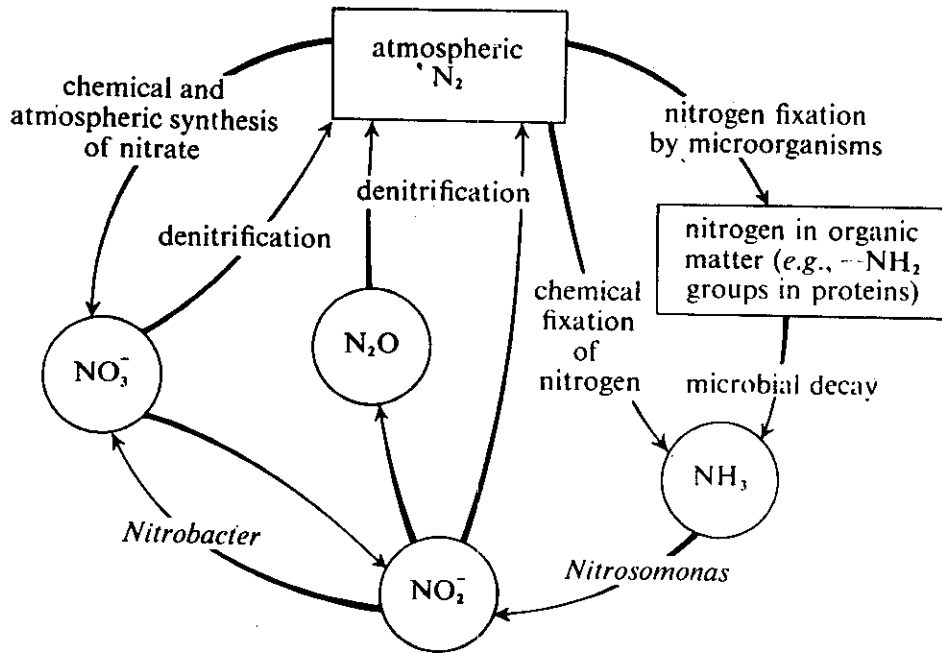
ยูเรเนียมในธรรมชาติจะประกอบด้วย 3 ไอโซโทป คือ

U-238(99.274%), U-235(0.725%) และ U-234(0.0056%)

- U-238 เป็น parent ของ Uranium series และ U-234 เป็นชนิดของ daughter ที่เกิดจาก U-238

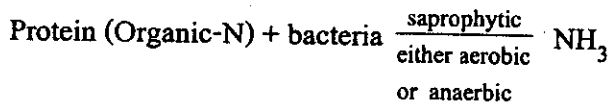


ได้โดยอาศัยแบคทีเรียจากกระบวนการ ammonification nitrification และ denitrification ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังรูปที่ 6.9 แสดงในวัฏจักรของไนโตรเจน (nitrogen cycle)

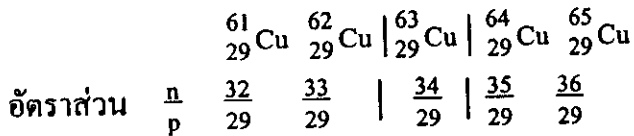


รูปที่ 6.9 แสดงวัฏจักรของไนโตรเจนในธรรมชาติ

ในสภาวะที่มีแสงแดดที่ขจัดโปรตีนโดยใช้  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{NH}_3$  ส่วนแบคทีเรียและสาหร่ายบางชนิดก็สร้างโปรตีนได้โดยอาศัยไนโตรเจนจากอากาศในระหว่างที่คนและสัตว์มีชีวิตจะปล่อยของเสียในรูปสารประกอบไนโตรเจนออกมา และเมื่อตายลงโปรตีนในร่างกายจะถูกละลายเป็นแอมโมเนียโดยอาศัย saprophytic bacteria

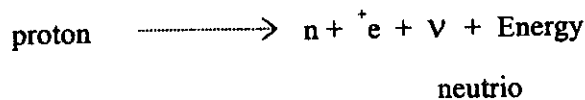


ตัวอย่าง เช่น  $^{63}_{29}\text{Cu}$  ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่เสถียร ถ้าเรียงตาม mass number ที่อยู่นอกแนวเสถียรได้ดังนี้



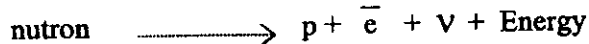
$\xleftarrow{\text{proton excess}}$ 
 $\xrightarrow{\text{neutron excess}}$

กรณี proton excess (ขาด neutron) proton บางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็น neutron โดย



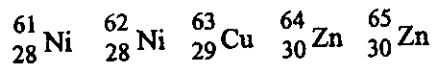
$e^+$  หรือ  $\beta^+$  เรียก positron (ไม่มี mass)

กรณี neutron excess (ขาด proton) neutron บางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็น proton โดย



$e^-$  หรือ  $\beta^-$  เรียก negatron

ฉะนั้น isotope ใหม่ที่เกิดเพื่อให้ได้อัตราส่วน n : P ที่เหมาะสมคือ

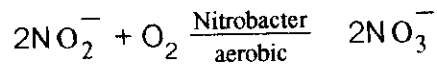
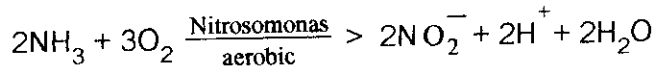


นิวเคลียสที่เสถียรอาจพิจารณาได้จากจำนวนโปรตอนและนิวตรอน โดยพบว่า

- ถ้าจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเป็นเลขคู่ทั้งหมด สารจะอยู่ตัวมากที่สุด และพบมากที่สุดในธรรมชาติ
- กรณีเป็นเลขคู่ ทั้งโปรตอนและนิวตรอนมีเสถียร 4 ธาตุ  $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$
- แบบที่เป็นเลขคี่คู่หรือ คู่คี่ (โปรตอนและนิวตรอน) จะพบว่าไม่มีเสถียรปานกลาง)

พืชนำแอมโมเนียไปใช้สร้างโปรตีนและออกซิไดส์ที่เกินเป็นไนไตรท์และไนเตรท

โดย autotrophic nitrifying bacteria



ไนเตรทที่เกิดจะเป็นปุ๋ยให้พืชต่อ ซึ่งมักจะเกิดมากเกินไปจนความจำเป็น จึงถูกชะลงดิน ส่วนใหญ่ภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ไนไตรท์และไนเตรทจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นไนโตรเจน โดยกระบวนการ denitrification

การวิเคราะห์หาไนโตรเจนในน้ำใช้บอกคุณภาพของน้ำได้อย่างคร่าว ๆ ว่าถูกปะปนด้วยอุจจาระหรือปัสสาวะนานเท่าใด เช่นกรณีที่มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน แสดงว่าถูกทำให้สกปรกใหม่ ๆ แต่ถ้ามีไนเตรทและไนไตรท์แสดงว่าถูกทำให้สกปรกเป็นเวลานานแล้ว.

การวิเคราะห์สารอนินทรีย์ไนโตรเจนทั้ง 3 แบบจำเป็นจะต้องกระทำเนื่องจากเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาในแง่ต่าง ๆ กัน กล่าวคือ แอมโมเนียมีผลต่อการทำให้เกิดพิษกับตัวอ่อนของลูกปลาและกุ้ง ไนไตรท์สามารถทำปฏิกิริยากับ enzyme ในร่างกายเกิดเป็น nitrosamine ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ส่วนไนเตรทพบว่าจะเกิดผลต่อเด็กเล็กโดยจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Meth-haemoglobin คือการเกิดการรวมตัวกับ haemoglobin

### ฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสที่พบในน้ำมีรูปแบบและโครงสร้างดังรูป 6.10 และตารางที่ 6.2 โดยสรุปรูปต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ

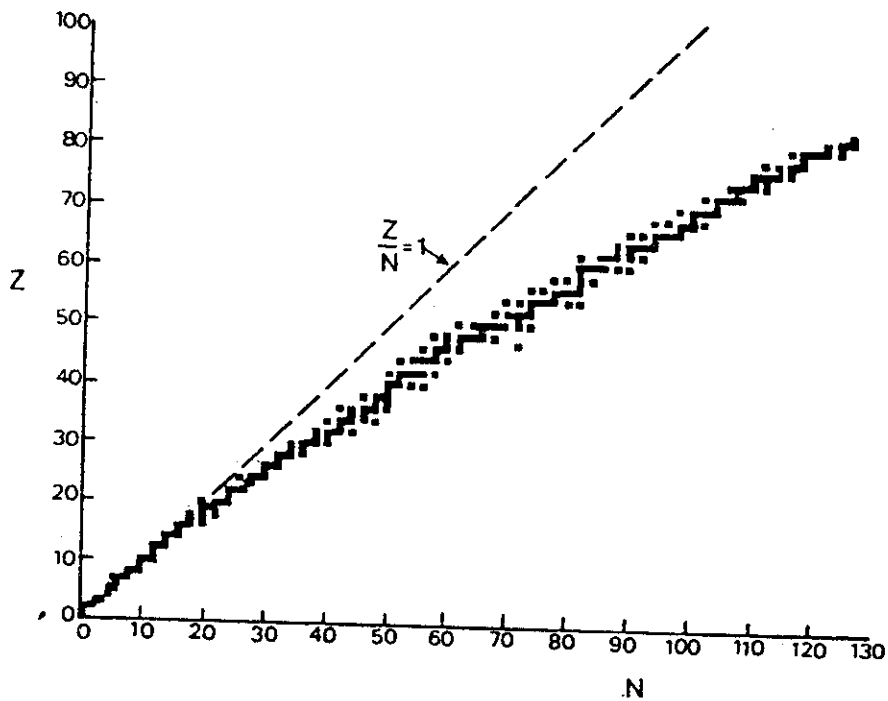
1. ออโรฟอสเฟต ที่พบมากที่สุด Tisodium phosphate ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), Disodium phosphate ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), Monosodium phosphate ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), Diammonium phosphate ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ )

### ความเสถียรของนิวเคลียส (Nuclear stability)

อัตราส่วน neutron และ proton จะเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความเสถียรของนิวเคลียส เรียกความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโปรตอนและจำนวนนิวตรอนของธาตุเสถียรที่เกิดขึ้นในธรรมชาติว่าแนวของความเสถียร (belt of stability) ดังรูป 6.38

กรณีที่เป็นธาตุเบาจะมี  $n : p = 1$

ธาตุหนัก (atomic number  $> 20$ )  $n : p > 1$



รูปที่ 6.36 แสดงแนวความเสถียร (belt of stability)

นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอนต่อนิวตรอนเบี่ยงเบนจากแนวที่เสถียรก็จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์เพื่อให้เกิดอัตราส่วน  $n : p$  ที่เหมาะสม

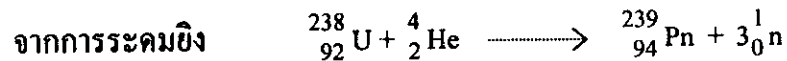
2. โพลีฟอสเฟต เช่น Sodium hexametaphosphate  $\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$ , Trisodium pyrophosphate ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) สารพวกนี้ถ้าอยู่ในน้ำ จะถูกไฮโดรไลซ์กลับไปเป็น orthophosphate โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับอุณหภูมิ พีเอชที่ต่ำและจะเกิดในน้ำ ไฮโดรไลต์เร็วกว่าน้ำบริสุทธิ์

3. อินทรีย์ฟอสเฟต เช่น nucleic acid, phospholipids

ตารางที่ 6.2 รูปแบบต่าง ๆ ของฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำธรรมชาติ

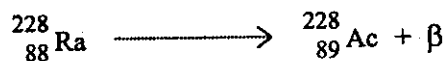
รูปแบบ	สารประกอบหลัก
Orthophosphates	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{FeHPO}_4^+$ , $\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$
Inorganic condensed phosphates:	
-pyrophosphates	$\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$ , $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{3-}$ , $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ , $\text{CaP}_2\text{O}_7^{2-}$
-tripolyphosphates	$\text{H}_2\text{P}_3\text{O}_{10}^{3-}$ , $\text{HP}_3\text{O}_{10}^{4-}$ , $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$ , $\text{CaP}_3\text{O}_{10}^{3-}$
-trimetaphosphates	$\text{HP}_3\text{O}_3^{2-}$ , $\text{P}_3\text{O}_9^{3-}$ , $\text{CaH}_2\text{P}_3\text{O}_9^{3-}$
Organic orthophosphates	
-glycosophosphates	Glucose-1-phosphate, adenosine monophosphate
-inositylphosphate	Inosityl monophosphate, inosityl hexaphosphate
-phospholipids	Phosphoglycerides, phosphatide acid, phosphatide choline
-phosphoamines	Phosphocreatinine
-phosphoproteins	Phosphoarginine
Organic condensated phosphates	Adenoine-5-triphosphate, coenzyme A

2. อนุภาคนิวตรอน ( ${}^1_0n$ ) เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคต่าง ๆ เช่น  $\alpha$  หรือ  ${}^1_0n$  เอง (ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดระดมยิง) ตัวอย่างเช่น

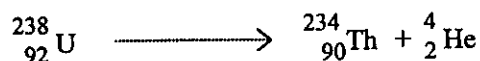


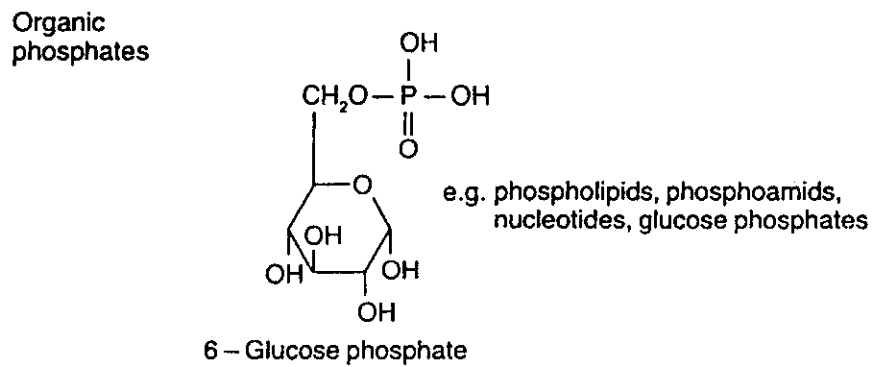
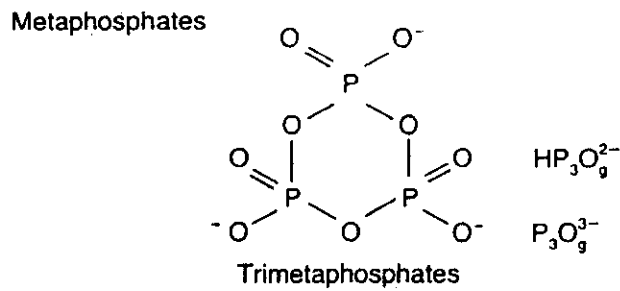
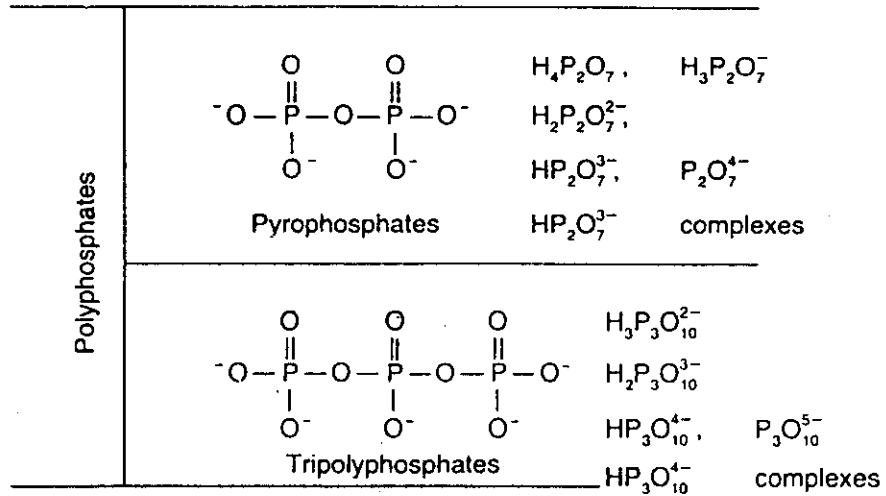
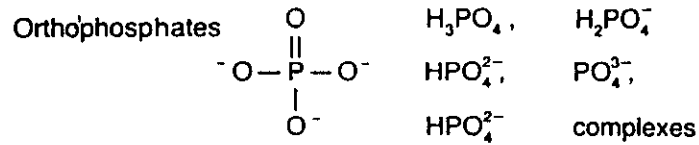
3. รังสีคอสมิก (cosmic ray) เป็นอนุภาพที่มีพลังสูง มาจากดวงอาทิตย์และอวกาศ นิวเคลียสประกอบด้วย โปรตอน 87% อัลฟา 12% ที่เหลือเป็นนิวเคลียสของธาตุหนัก มีอำนาจทะลุวงหินได้หลายฟุต ปกติแล้วรังสีคอสมิกจะถูกดูดที่บรรยากาศชั้นบนไว้ ฉะนั้นจึงแผ่มาผิวโลกปริมาณน้อย และมักจะแผ่มาพร้อม ๆ กับแสงอาทิตย์ซึ่งเชื่อกันว่าจะมีผลต่อการเกิด mutation ได้ด้วย

4. อนุภาคเบตา ( $\beta$  particle) เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปที่ไม่เสถียร เช่น  ${}^{228}_{88}\text{Ra}$



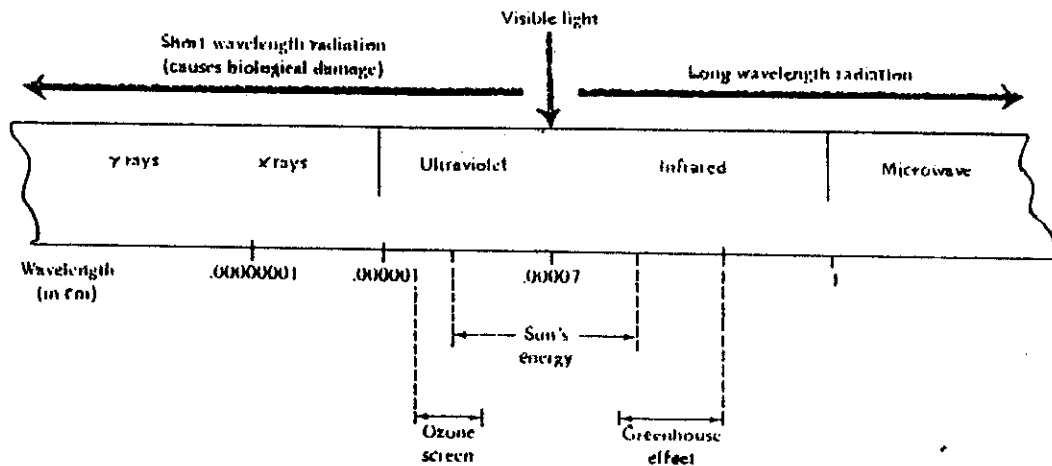
5. อนุภาคอัลฟา ( $\alpha$  particle,  ${}^4_2\text{He}$ ) เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปที่ไม่เสถียรโดยเฉพาะชนิดที่มีเลขอะตอมสูง เช่น  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  เป็นต้น





รูปที่ 6.10 สารประกอบฟอสฟอรัสต่าง ๆ ในน้ำ

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่สเปกตรัมของแสงทั้งหมด เรียงตั้งแต่ที่มีพลังงานสูง (ช่วงคลื่นสั้นที่สุด) ไปถึงพลังงานต่ำสุด (ช่วงคลื่นยาวสุด) ได้ดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.35 สเปกตรัมอิเล็กโตรแมกเนติก พลังงานรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยเรียกโฟตอน (photon)

$$E = hv$$

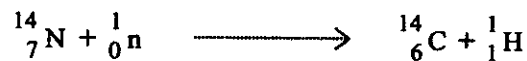
E = พลังงาน

H = Plank's constant =  $6.62 \times 10^{-27}$  erg-sec

v = ความถี่ของแสง (frequency)

รังสีอนุภาค ได้แก่

1. โปรตอน ( ${}^1_1\text{H}$ ) เกิดจากการระดมยิงนิวเคลียสด้วยนิวตรอน หรือ อนุภาค อัลฟา ( $\alpha$ ) ดังตัวอย่างสมการ



โปรตอนมีมวล  $\sim 1835$  เท่าของ electron ไม่มีนิวตรอน ไม่มีอิเล็กตรอน  
 อำนาจการทะลุทะลวง  $\beta > {}^1_1\text{H} > \alpha$



สารประกอบฟอสฟอรัสเข้าปะปนในน้ำธรรมชาติและน้ำโสโครกได้จาก

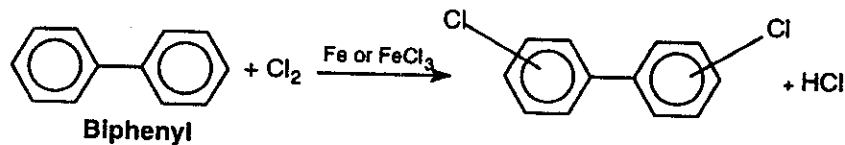
1. domestic sewage ได้แก่งจากบ้านเรือน ซึ่งมีการใช้ผงซักฟอก (ในรูปฟอสเฟต หรือโพลีฟอสเฟต)

2. industrial sewage ได้แก่งจากอุตสาหกรรม ได้แก่งจากโรงงานที่มีการใช้ไอน้ำจาก หม้อต้มน้ำที่มีการเติม complex phosphate เพื่อไม่ให้เกิดตะกรัน

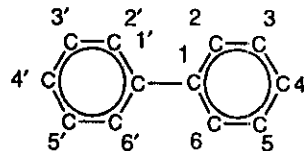
3. agricultural sewage ได้แก่งจากปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตร (ในรูปของออร์โธฟอสเฟต) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ จึงมักจะ พบว่าเป็น growth limiting nutrient ซึ่งจะก่อให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์น้ำอย่างรวดเร็ว

### 6.5.2 พีซีบีและไดออกซิน (Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Dioxins)

พีซีบี (PCBs) ถูกผลิตมาใช้โดยมีชื่อทางการค้าต่าง ๆ กันเช่น Arochlor chlophen, Kanechlor และ Fenclor มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมาก ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก หมึกพิมพ์ โดยเริ่มทำการผลิตที่อเมริกาเมื่อปี ค.ศ. 1929 จนถึงปี 1960 และ 1970 พบว่าเป็น สารเคมีที่ก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม การผลิต พีซีบี เกิดจากปฏิกิริยาของการเติมคลอรีนในไบฟีนีล (Biphenyl) โดยมีเฟอร์ริกคลอไรด์ (ferric chloride) เป็นตัวเร่งดัง ปฏิกิริยา ดังนี้



ตำแหน่งของคลอรีนอะตอมจะถูกเรียกตามหมายเลขของคาร์บอนอะตอมที่อยู่ในวงของฟีนีล ดังนี้



ตัวอย่างของสารพีซีบี ในสิ่งแวดล้อม ดังในรูปที่ 6.11

ทดลองฆ่าแม่ลงชนิดใหม่เพื่อปราบแมลงเหล่านี้ ผลที่เกิดขึ้นคือการแพร่กระจายและ  
สะสมชนิดต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะต้องก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเป็นส่วน  
รวมทั้งในปัจจุบันและในอนาคตอย่างแน่นอน

2. ต่อมนุษย์ โดยปกติแล้วสารเคมี ฆ่าแมลงถ้าใช้ด้วยความระมัดระวังไม่เป็น  
อันตรายต่อชีวิตอย่างฉับพลัน อย่างไรก็ตามในแต่ละปีก็มีรายงานว่าคนเป็นจำนวนมาก  
หรือคนตายเพราะพิษยาฆ่าแมลง และก็บ่อยครั้งเช่นกันที่มีคนตายเพราะรับประทานอาหารที่  
มีสารเคมีฆ่าแมลงเจือปนในปริมาณสูงเช่น ที่ประเทศโคลอมเบียประมาณ 80 คน ล้มตาย  
เพราะรับประทานอาหารที่ปรุงด้วยแป้งที่มีสารพาราไทออน (parathion) เจือปน เป็นต้น

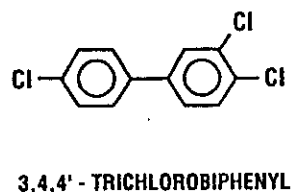
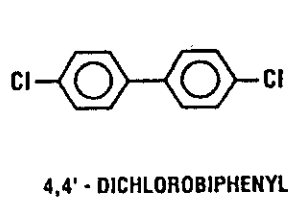
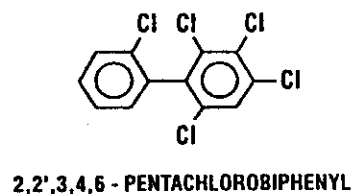
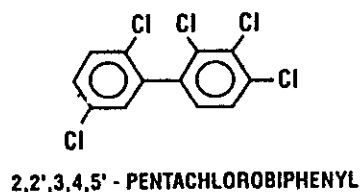
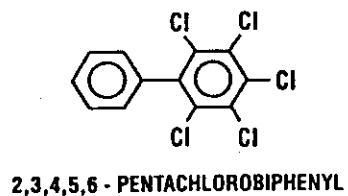
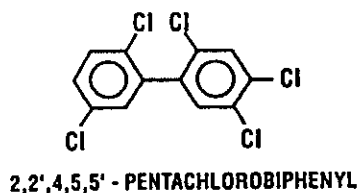
3. ต่อสัตว์ป่า มีผลต่อสัตว์ป่าที่อยู่ในลำดับสูงของโซ่อาหาร เช่น พบว่าเกิดผลร้าย  
อย่างมากต่อสุขภาพและความสามารถในการสืบพันธุ์ของนกและปลา จำนวนและชนิดของ  
นกได้ลดลงอย่างมาก ซึ่งสาเหตุหนึ่งเป็นเพราะไข่ของนกเหล่านี้มีเปลือกที่อ่อนเกินไป และ  
แตกเสียก่อนที่จะฟักออกมาเป็นตัวได้

#### 6.2.10 รังสีและความร้อน (Radioactivity and Thermal)

นับตั้งแต่มีการศึกษาเกี่ยวกับรังสี โดยได้มีการนำรังสีมาใช้ประโยชน์ทั้งในทาง  
การแพทย์ ทางแหล่งพลังงานทั้งทางสันติ เช่น โรงงานไฟฟ้าปรมาณู ทางพัฒนาอาวุธ  
นิวเคลียร์ ทำให้มนุษย์มีโอกาสได้รับรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งปกติจะมีอยู่ในระดับความเข้มข้นต่ำ  
ส่วนหนึ่งอยู่แล้ว ก่อให้เกิดผลเสียหายและอันตรายของรังสีที่เกิดต่อสิ่งมีชีวิต ผลกระทบ  
สำคัญที่จะเกี่ยวข้องโดยเฉพาะจากโรงงานไฟฟ้าปรมาณู ซึ่งจะให้ผลควบคู่กับมลพิษทาง  
ความร้อนที่จะกล่าวในบทนี้ด้วย

##### ธรรมชาติและชนิดของรังสี

รังสีในบรรยากาศที่เกิดจากการสลายตัวของไอโซโทปที่ไม่เสถียรในธรรมชาติเช่น  
 $^{238}_{92}\text{U}$  หรือจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ซึ่งมนุษย์เรากระทำขึ้นจะประกอบ  
ด้วยรังสี 2 ประเภทคือ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) และรังสีอนุภาค  
(particle radiation)



รูปที่ 6.11 Molecular structures and names of some pentachlorobiphenyl isomers, and other PCB congeners.

ไดออกซิน (Dioxin) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกรวมสารประกอบกลุ่ม polychlorinated dibenzodioxin (PCDDs) และรวมถึงหมู่สารที่เป็น polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) ดังแสดงในรูปที่ 6.12

ล่อแมลงทางเพศ (Sex attractant) ซึ่งโดยทั่วไปปล่อยโดยแมลงตัวเมีย เพื่อล่อแมลงตัวผู้มา เพื่อผสมพันธุ์กัน ได้มีการใช้สารล่อแมลงที่สังเคราะห์ขึ้นเรียกว่าเมทิลยูจีนอล (methylugenol) ในการปราบแมลงวัน (oriental fruit fly) จากเกาะ Rota ใน Mariauns อย่างได้ผลมาแล้ว และขณะนี้การค้นคว้าในสาขาวิชานี้ยังคงดำเนินต่อไป

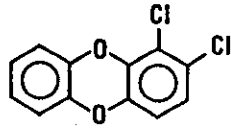
วิธีกำจัดแมลงวิธีอื่น ๆ ที่ได้รับความสนใจและศึกษามีอีกหลายวิธี เช่น ใช้ฮอร์โมน เพื่อระงับเจริญเติบโตของแมลง (juvenile hormone) หรือวิธีแมลงปราบกันเองเป็นต้น

### สรุปผลของการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์

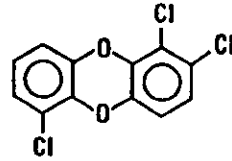
ผลจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลเสียและอันตรายที่เกิดขึ้น หรืออาจจะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมเป็นส่วนรวม เนื่องจากยาปราบศัตรูพืชที่ใช้ทั้งหมดเป็นพิษ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงสนใจและพยายามศึกษาผลเสียทั้งแบบฉับพลัน ตกค้างและแบบ สะสม ที่มีต่อมนุษย์ สัตว์ รวมทั้งตัวแมลงเองว่ามีอะไรบ้าง และร้ายแรงอย่างไร ตั้งแต่เริ่ม การใช้ยาเหล่านี้ในเชิงการค้า

1. ผลต่อแมลงและศัตรูพืช แมลงนับหมื่นชนิด มีเพียงประมาณ 200 ชนิด คือ ร้อยละ 1 เท่านั้นที่ถือได้ว่าเป็นศัตรูพืช กล่าวคือก่อความเสียหายต่อการเกษตรหรือต่อ มนุษย์และสัตว์ เช่น เป็นพาหะนำเชื้อโรค แต่แมลงส่วนใหญ่ไม่เป็นภัยต่อวงการเกษตร แมลงเป็นจำนวนมากจัดได้ว่าเป็นแมลงที่มีประโยชน์เช่น ผีเสื้อ ไล่เดือน การใช้สารเคมีฆ่า แมลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทฆ่าโดยการสัมผัส เช่น สารจากพวกคลอรีนเนคเตด ไฮโดรคาร์บอน ทำให้แมลงที่มีประโยชน์ถูกฆ่าหรือกำจัดไปด้วย เมื่อเป็นเช่นนี้ ย่อมก่อให้เกิดปัญหาต่อสมดุลของระบบนิเวศน์เป็นส่วนรวม

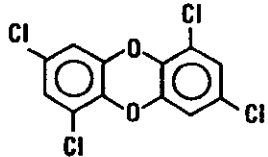
อีกปัญหาหนึ่งได้กล่าวมาบ้างแล้ว คือปัญหาการดื้อยาปราบศัตรูพืช ตัวอย่างแมลง ได้แก่ ยุงบางชนิด Colorado beetle การเกิดภูมิต้านทานของแมลงเหล่านี้ทำให้ต้องเพิ่ม ขนาดยาที่ใช้ ตลอดจนการใช้บ่อยครั้งขึ้นหรือถี่ขึ้นเป็นการเพิ่มพูนปัญหาการกระจายและ สะสมยาปราบศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อมของเรา ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อแมลงสามารถต้านทานยาฆ่า แมลงชนิดหนึ่งได้ เช่น ดีดีที ทำให้ยาฆ่าแมลงอื่น ๆ ที่มีฤทธิ์คล้ายคลึงกันพลอยเสื่อมประ สติภาพลงไปด้วย หรือในบางครั้งอาจใช้ไม่ได้ผลเลย เป็นเหตุให้ต้องพยายามหาและ



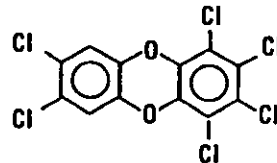
1,2 - DICHLORODIBENZO[1,4]DIOXIN



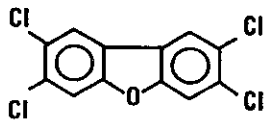
1,2,6 - TRICHLORODIBENZO[1,4]DIOXIN



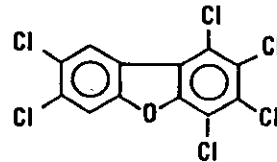
1,3,6,8- TETRACHLORODIBENZO[1,4]DIOXIN



1,2,3,4,7,8 - HEXACHLORODIBENZO[1,4]DIOXIN



2,3,7,8 - TETRACHLORODIBENZOFURAN



1,2,3,4,7,8 - HEXACHLORODIBENZOFURAN

รูปที่ 6.12 Molecular structures and names of some dioxin and PCDF congeners.

แหล่งที่มาของไดออกซิน แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. จากกระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับคลอรีน
2. จากกระบวนการเผาไหม้

1. กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับคลอรีนได้แก่อุตสาหกรรมการผลิตสารประกอบ organochlorine สารฟอกสีในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยพบว่าอุตสาหกรรม organochlorine จะก่อให้เกิดสารไดออกซินและกลุ่ม polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ตัวอย่างเช่นการสังเคราะห์ยากำจัดแมลงกลุ่ม 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T) โดยเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยโซเดียม

## การควบคุมศัตรูพืชโดยวิธีอื่น

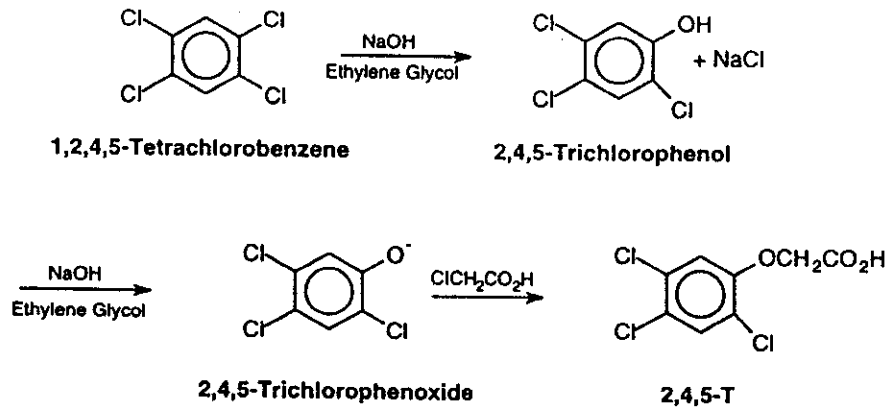
นักวิทยาศาสตร์จึงหันมาค้นคว้าและหาวิธีกำจัดศัตรูพืชโดยวิธีอื่น ซึ่งไม่ต้องใช้สารเคมี วิธีการมีหลายวิธีซึ่งบางวิธีได้ลองนำมาปฏิบัติและพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

1. การทำหมัน วิธีนี้ค้นพบและพัฒนาโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ คนิพลิง (E.F. Knippling) ตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1930 ซึ่งเขาเริ่มต้นจากแนวคิดที่ว่า การควบคุมหรือปราบแมลงนั้นน่าจะกระทำได้โดยการตัดวงจรการสืบพันธุ์ของแมลง จึงได้เริ่มทดลองกับแมลงวันชนิดหนึ่งคือ screwwormfly ซึ่งระบาดเป็นประจำในภาคตะวันตกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกา โดยเพาะแมลงวันประเภทนี้ขึ้นเป็นจำนวนมากในห้องปฏิบัติการ และทำให้แมลงวันเหล่านี้เป็นหมันโดยใช้รังสีเอกซ์ เมื่อถึงฤดูการผสมพันธุ์ก็ปล่อยแมลงวันที่เป็นหมันเหล่านี้ออกไป ซึ่งแข่งการผสมกับแมลงวันที่ไม่เป็นหมัน ผลที่ได้คือแมลงวันตัวเมียที่เข้าผสมพันธุ์กับแมลงวันที่เป็นนี้ไม่สามารถวางไข่ จำนวนแมลงวันจึงลดลงอย่างรวดเร็ว วิธีนี้ใช้กับศัตรูพืชอื่น ๆ ด้วย เช่น fruit fly ซึ่งมีมากตามชายแดนเม็กซิโกและอเมริกา จะเห็นได้ว่าวิธีนี้มีประโยชน์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ควบคุมแมลงที่มีปริมาณไม่มากนักแต่แพร่กระจายทั่วไป เพราะการปราบแมลงที่มีปริมาณมาก จึงเป็นการช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ปล่อยเข้าสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

2. การทำหมันโดยใช้สารเคมี (Chemosterilization) เป็นการทำให้แมลงที่มีในธรรมชาติเป็นหมันโดยให้แมลงกินอาหารที่เจือปนด้วยสารที่ทำให้เป็นหมันได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สะดวกในการปฏิบัติเนื่องจากแมลงอาจไม่กินอาหารนั้น ยิ่งไปกว่านั้นอาจเป็นอันตรายต่อแมลงที่มีประโยชน์และสัตว์อื่น ๆ ด้วย วิธีนี้จึงใช้ไม่ได้ผล เท่าไรนัก และยังไม่เคยนำออกปฏิบัติกันจริง ๆ

3. สารดึงดูดแมลง (insect attractant) สัตว์และแมลงทั่วไปปล่อยสารเคมีออกมา สารเคมีเหล่านี้รวมเรียกว่าเฟโรโมน (pheromones) เฟโรโมนทำหน้าที่สื่อสารภัยอันตรายจากศัตรูหรือดึงดูดเพศตรงข้ามเป็นต้น เฟโรโมนที่ใช้ดึงดูดเพศตรงข้ามเรียกว่าสาร

ไฮดรอกไซด์ ณ ที่อุณหภูมิสูงของสาร 1,2,4,5-tetrachlorobenzene ตามด้วยปฏิกิริยาของสาร phenoxide ที่เกิดด้วยกรดคลอโรอะซิติกดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดที่ก่อให้เกิดปัญหาของไดออกซินจากปฏิกิริยาข้างต้นนี้คือการเกิด 2,3,7,8-TCDD เนื่องจากโมเลกุลของฟีนอกไซด์ 2 โมเลกุลทำปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



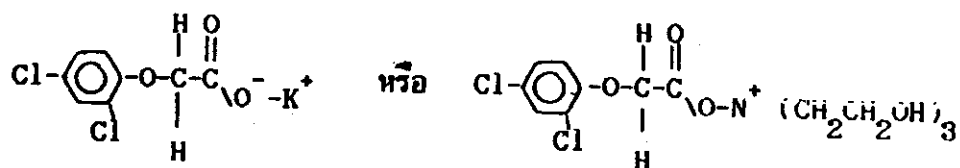
2. กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้สารเป็นแหล่งสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดกลุ่ม PCDD และ PCDF อันได้แก่เตาเผาขยะที่เป็นของแข็ง (solid waste) การเผาถ่านหิน การเผาไหม้สารที่มี organochlorine รวมถึงพีซีบีด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าพืชผักที่มีการใช้ยาปราบวัชพืชกลุ่ม phenoxyacetic acid ก็เป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดไดออกซินด้วย แม้แต่อากาศที่ปล่อยจากท่อไอเสียก็พบว่ามีไดออกซินเนื่องจากปฏิกิริยาการรวมตัวของสาร organochlorine ที่เติมในน้ำมัน คือ 1-2-dichloroethane

ตัวอย่างการเผาสารผสม PCBs ที่อุณหภูมิน้อยกว่า 700°C ในที่มีออกซิเจนจะก่อให้เกิด dioxin (PCDFs) ดังนี้

### 6.2.9.3 สารปราบวัชพืชฟีนอกซี

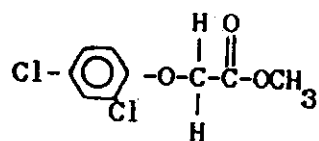
สารเคมีประเภทหนึ่งซึ่งเป็นคลอรีนเนตเตคไฮโดรคาร์บอน เช่นกัน แต่มีหมู่ฟีนอกซี (phenoxy, มีสูตร -O) เป็นหมู่ แสดงสมบัติเฉพาะตัวในโมเลกุลด้วยสามารถใช้ปราบวัชพืชได้อย่างได้ผล เรียกสารเคมีประเภทนี้ว่ายาปราบวัชพืชฟีนอกซี (phenoxy herbicide) สารที่เป็นสารแม่หรือสารหลักของสารประเภทนี้ได้แก่ 2, 4 dichlorophenoxyacetic acid ซึ่งเรียกย่อว่า 2, 4-D

เนื่องจากสารปราบวัชพืชเป็นกรด และสามารถละลายได้น้อยทั้งในน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์ จึงได้มีการดัดแปลงโครงสร้างของโมเลกุลเหล่านี้ให้เป็นสารละลายได้ง่าย แต่ขณะเดียวกันยังคงไว้ความสามารถในการปราบวัชพืช หรืออาจเพิ่มประสิทธิภาพการปราบวัชพืชได้ดียิ่งขึ้น การดัดแปลงโครงสร้างของสารนี้วิธีหนึ่ง คือการเปลี่ยนไปเป็นเกลือ เช่นเกลือโซเดียม โพแทสเซียมและเกลืออะมีน (amine) ซึ่งละลายในน้ำได้ดี เช่น



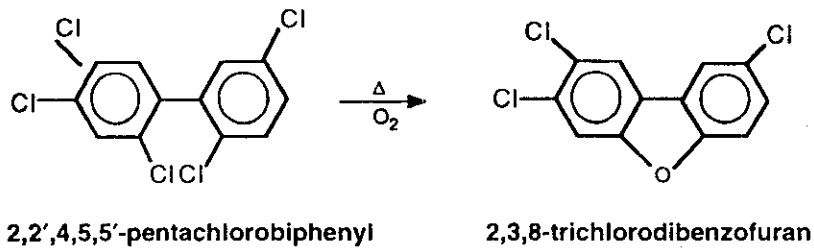
potassium 2, 4-dichlorophenoxyacetate      2, 4-D-triethanolamine salt

แม้ไม่สามารถละลายในน้ำแต่ก็สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เป็นอย่างดีตัวอย่างสารที่เป็นเอสเทอร์ได้แก่ 2, 4-D-methyl ester ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังนี้



ยาปราบวัชพืชประเภทฟีนอกซีทุกสารกำจัดวัชพืชโดยไปทำหน้าที่เป็นฮอร์โมนอยู่บริเวณการเจริญเติบโตของพืช ช่วยกระตุ้นให้พืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ลำต้นยืดแต่รากไม่งอกตามไปด้วยและใบขาดคลอโรฟิลล์ ความผิดปกติของพืชนี้ ทำให้พืชตายลงในที่สุด สารเหล่านี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในสงครามเวียดนาม เพื่อทำลายป่าซึ่งเป็นที่หลบซ่อนของฝ่ายคอมมิวนิสต์ และทำลายพืชผลทั้งในเวียดนามและกัมพูชาเพื่อตัดเสบียงอาหารของฝ่ายคอมมิวนิสต์





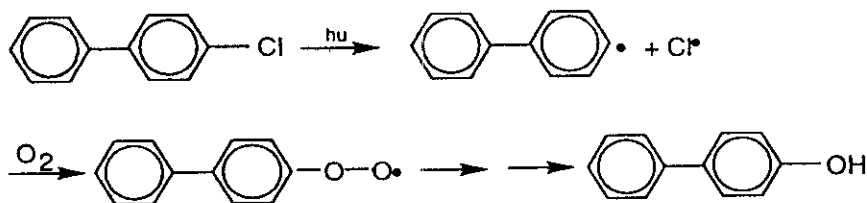
**การกระจายตัวของ PCB และ Dioxin ในสิ่งแวดล้อม (Environmental Distribution)**

ทั้งพีซีบีและไดออกซินเป็นของแข็งที่มีสีขาวในอุณหภูมิห้อง และมีสมบัติทางฟิสิกส์ คัลเคมีที่คล้ายกันมากดังนี้

- ละลายในน้ำได้น้อย
- ไม่ติดไฟ
- คงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- คงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
- สมบัติการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

**การกระจายในอากาศ**

มีผู้ประมาณว่าในสิ่งแวดล้อมจะมีการปนเปื้อนของพีซีบีประมาณ 400,000 ตัน และ 60% ของสารพีซีบีทั้งหมดที่ปนเปื้อนนี้จะอยู่ในแหล่งน้ำโดยเฉพาะในมหาสมุทร 1% ในอากาศ ที่เหลือกระจายในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ในชั้นโทรโปสเฟียร์พบว่าพีซีบีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยแสง (Phototransformation) เกิดเป็นสาร hydroxylated biphenyls โดยเริ่มจากการแตกของพันธะ C-Cl แล้วตามด้วยปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังสมการ

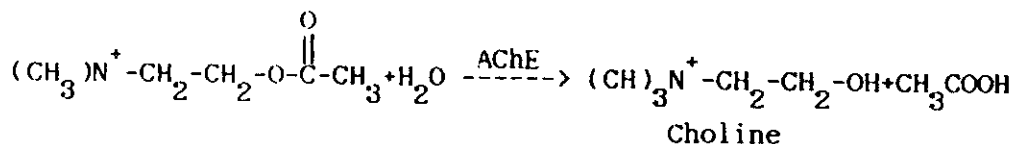


ไดออกซินมักพบจะอยู่ร่วมกับฝุ่นละออง (particulates) ในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ โดยมักจะเกิดในย่านที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรม การเปลี่ยนรูปโดยแสงของไดออกซิน เป็นปฏิกิริยาสำคัญในการเปลี่ยนรูปของไดออกซินเนื่องจากความสามารถในการดูดกลืนแสง

## กลไกการออกฤทธิ์ของสารฆ่าแมลงสูตร Organophosphates และ Carbamates

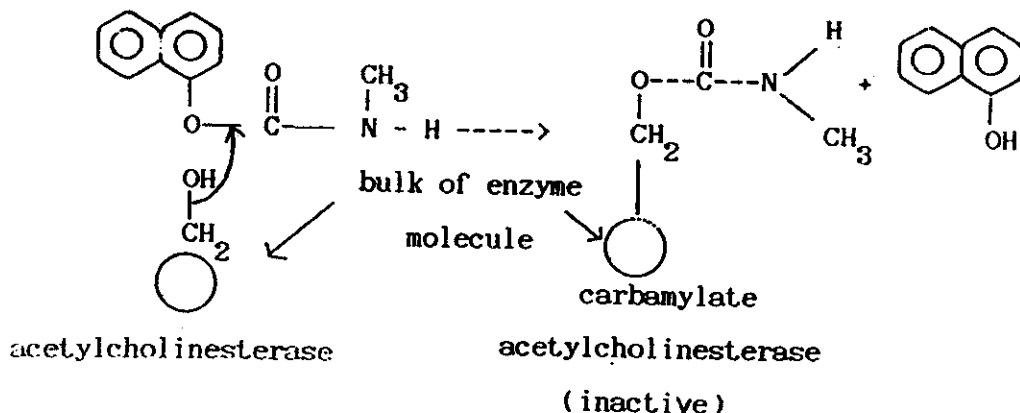
กลไกการออกฤทธิ์จะเกี่ยวข้องกับระบบประสาท (ศึกษาในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม) โดยเฉพาะที่ระบบประสาทซิมพาเทติก (sympathetic nervous system) ซึ่งเป็นระบบย่อยของระบบประสาทส่วนปลายโซมาติก (somatic system)

ระบบซิมพาเทติก ประกอบด้วยปุ่มประสาท (ganglia) ขนาดใหญ่ต่อกันอยู่นอกระบบประสาทส่วนกลาง แบ่งออกเป็นช่วง ๆ โดยสัญญาณจะส่งผ่านช่องว่างซินแนปส์ที่อยู่บริเวณปุ่มประสาท (synaptic gaps) โดยสารสื่อเคมีอะซิติลโคลีน (acetylcholine) สารนี้จะมีการส่งทั้งก่อนและหลังปุ่มประสาท การสื่อสัญญาณโดยสารนี้จะถูกย้ายที่ติดต่อกันหรือถูกทำให้หมดฤทธิ์ลงภายในเวลาอันสั้นซึ่งขึ้นกับลักษณะเฉพาะของแหล่งออกฤทธิ์ (มากกว่าหนึ่งวินาทีถึงน้อยกว่ามิลลิวินาที) โดยออสติไซม์ซึ่งอยู่ในของเหลวและเนื้อเยื่อของร่างกายคือ acetylcholinesterase หรือ AChE สามารถจะไฮโดรไลส์ acetylcholine ได้

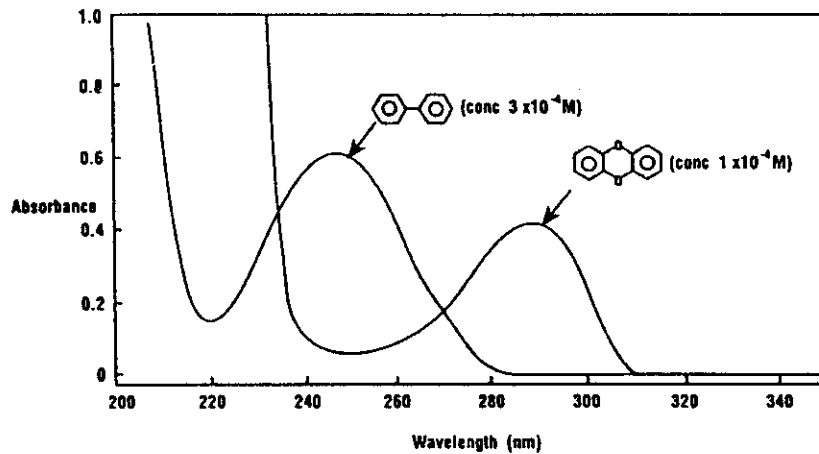


สารฆ่าแมลง Organophosphates และ Carbamates สามารถออกฤทธิ์โดยยับยั้งการทำงานของ enzyme AChE โดยการทำให้ปฏิกิริยากับ AChE ดังสมการต่อไปนี้ ทำให้ acetylcholine ที่ไม่สลายนั้นเกิดการสะสมกันที่ synap

### Carbaryl (Carbamates)



ในช่วงที่ยาวกว่าพีซีบี นั่นคือทำให้มีโอกาสในการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นด้วยตาเห็นได้มากกว่า ดังพิจารณาได้จากรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 Ultraviolet absorption spectra of methanol solutions of biphenyl and dibenzo [1,4] dioxin.

#### การกระจายในน้ำ

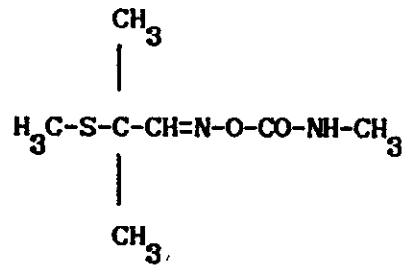
ทั้งพีซีบีและไดออกซินละลายน้ำได้น้อย และจะยิ่งละลายได้น้อยลงเมื่อมีจำนวนอะตอมของคลอรีนเพิ่มมากขึ้น นั่นคือเมื่อสารทั้งสองมีโอกาสลงสู่น้ำก็อาจจะมีโอกาสกระจายสู่สิ่งแวดล้อมในน้ำ ดังนี้

1. ดูดซับที่ดินที่อยู่ด้านใต้สุด
2. แขนงลอยอยู่ในน้ำ
3. ระเหยจากน้ำไปสู่บรรยากาศแล้วเกิดการเปลี่ยนต่อ โดยทำปฏิกิริยากับแสง

#### การกระจายในดิน

พีซีบีและไดออกซินในดินอาจเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ในดินโดยอาศัยเอ็นไซม์ ตัวอย่างการเกิดกับสาร 2,4-dichlorobiphenyl ดังรูปที่ 6.14

### 3. Oximecarbamates เช่น Aldicarb

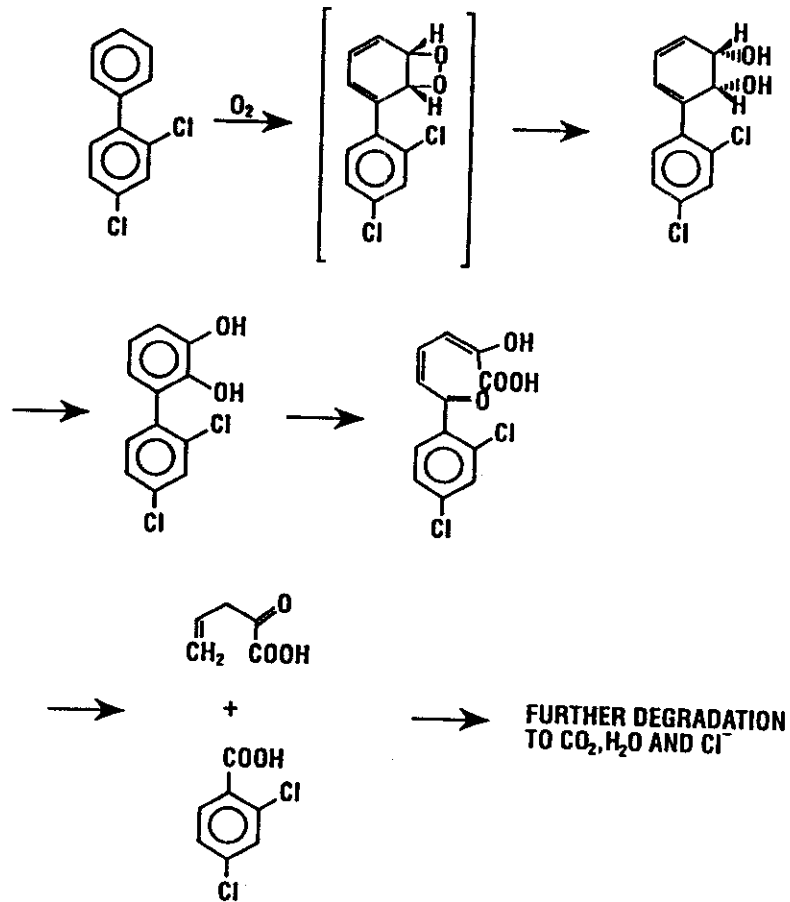


#### สมบัติทั่วไป

- สลายตัวได้ง่ายในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในดิน
- ดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดีมากกว่า Organophosphates และ Chlorinated hydrocarbons
- พิษกับ mammals น้อยมาก

ตารางที่ 6.15 ตัวอย่างของสารฆ่าแมลงสูตร Carbamate อื่น ๆ

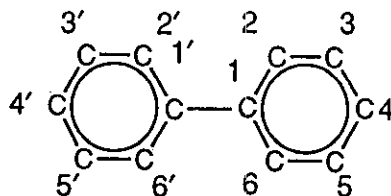
สาร*	สูตรโครงสร้าง	การใช้ประโยชน์
Isolan 1-isopropyl-3-methyl pyrazolyl-(5N,N, dimethyl carbamate		ใช้กับแมลงวันคอกบ้านและ fruit flies ออกฤทธิ์แบบ systemic
Dimetilan 2-(N,N-dimethylcarbamyl)- 3-methylpyrazolyl-(5)- N,N-dimethylcarbamate		ใช้กับแมลงวันคอกบ้านและ fruit flies
Carbaryl (Sevin) 1-naphthyl N-methyl- carbamate		ใช้เป็นยาฆ่าแมลงทั่วไป ใช้ควบคุม แมลงสาบวัยที่ขมกว่า 100 ชนิด โดยเฉพาะผีเสื้อ ผักและผลไม้
Baygon 2-isopropoxyphenyl N-methylcarbamate		ฆ่าแมลงวัน มด แมลงสาบ และ มด ใช้ควบคุมแมลงเห็บ



รูปที่ 6.14 Possible microbial biotransformation pathway for 2,4-dichlorobiphenyl.

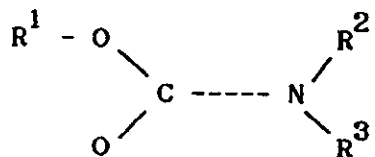
### ความเป็นพิษของพีซีบีและไดออกซิน

พีซีบีให้ผลของการเกิดพิษแบบเฉียบพลันค่อนข้างน้อย ผลส่วนใหญ่จะเป็นแบบเรื้อรัง (Chronic toxic effects) ที่เรียกว่า chloracne ซึ่งทำให้เกิดเป็นเนื้องอกและจุดดำปรากฏตามหน้า ลำคอ หน้อก และหลัง พีซีบีชนิดที่ให้อันตรายนมากที่สุดคือ ชนิดที่มีคลอรีนแทนที่ในตำแหน่ง 3, 3', 4, 4', 5, 5' ดังนี้



## 7.5 Carbamates

สารฆ่าแมลงโครงสร้างคาร์บาเมต สูตรโครงสร้างมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ  
สูตรโครงสร้างทั่วไปคือ



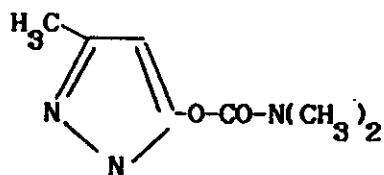
สูตรโครงสร้างที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีลักษณะดังนี้

1. กลุ่มไฮดรอกซีในสารประกอบ  $\text{R}^1\text{-OH}$  มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน
2.  $\text{R}^2$  เป็น methyl group
3.  $\text{R}^3$  มักจะเป็นไฮโดรเจนหรือเป็นส่วนที่หลุดได้ง่ายโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในร่างกาย

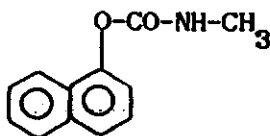
สารฆ่าแมลงโครงสร้างคาร์บาเมตนี้แบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 3 กลุ่ม คือ

1. N-N-Dimethylcarbamates of enols and hydroxy heterocyclics เช่น

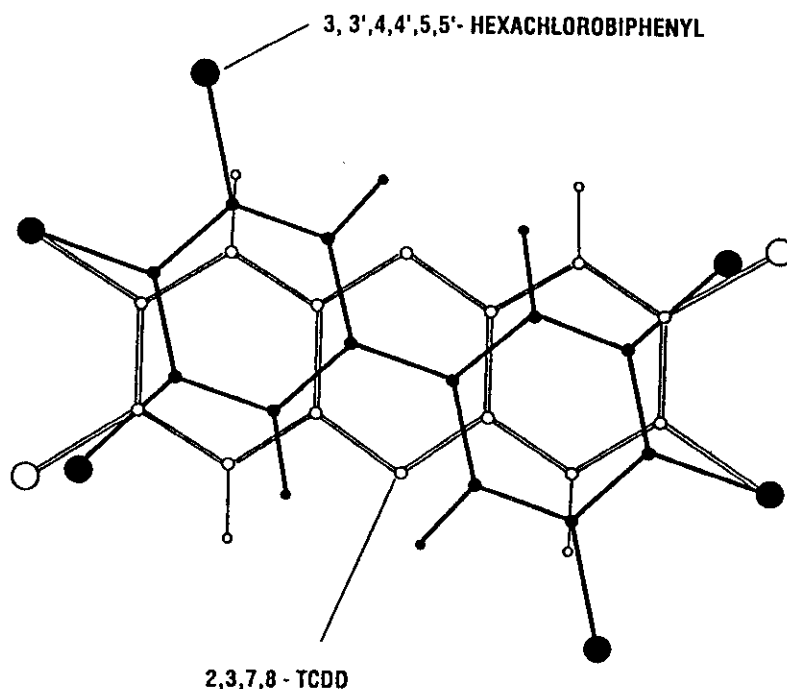
Pyrolan



2. Phenylcarbamates เช่น Carbaryl



ไดออกซินแต่ละชนิดจะให้พิษมากน้อยไม่เท่ากันแต่ชนิดที่มีพิษมากที่สุดคือ 2,3,7,8 TCDD ซึ่งมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 6.15

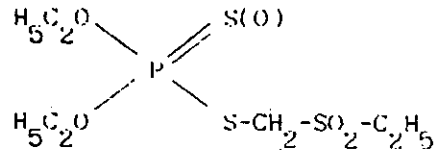
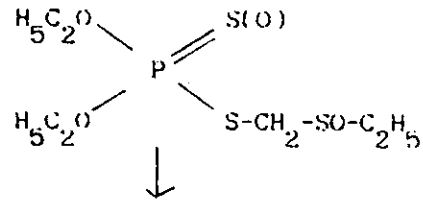
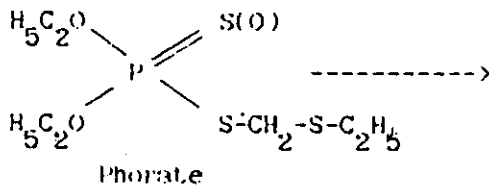


รูปที่ 6.15 แสดงโครงสร้างของ 2,3,7,8 TCPP เทียบกับ 3, 3', 4, 4', 5, 5' -Hexachlorobiphenyl

ไดออกซินมักจะให้พิษแบบเฉียบพลันโดยอาจเกิดลักษณะเหมือนอาการของอาหารเป็นพิษ พบว่า 90% ของไดออกซินที่พบในร่างกายมนุษย์นั้นได้มาจากอาหาร ตลอดจนการตรวจพบว่า Octachlorodibenzo [1, 4] dioxin มักจะตรวจพบในน้ำนมแม่เสมอ

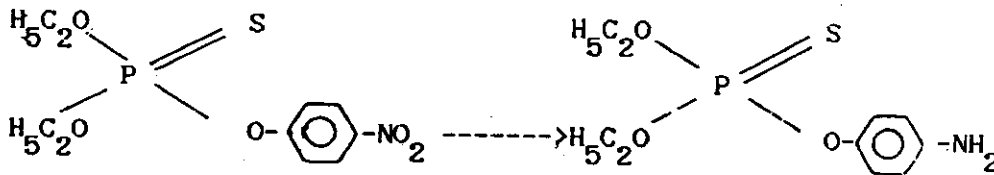
#### 6.2.6 สบู่และผงซักฟอก (Soaps and Detergents)

กระบวนการซักล้างของคนเราปัจจุบันประกอบการซักผ้า ด้วยขามภายในบ้านและอื่น ๆ จะต้องพึ่งพาสารซักล้างต่าง ๆ ได้แก่ สบู่ ผงซักฟอก ในปี ค.ศ. 1994 ข้อมูลจากอเมริกาพบว่าในปริมาณสารซักล้างทั้งหมด  $4 \times 10^9$  กิโลกรัมจะมีใช้สบู่เป็น 5% ปริมาณการใช้ทั้งหมดดังสรุปในรูปที่ 6.16



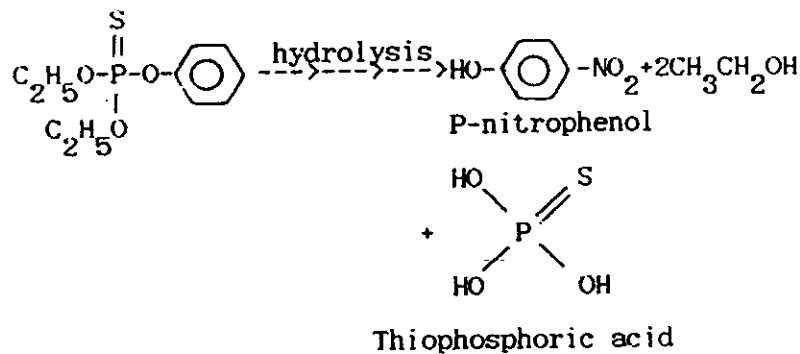
## 2. Reduction

เช่นปฏิกิริยา reduction กลุ่ม nitro ของ parathion เป็นกลุ่ม amino ซึ่งมักจะเกิดพร้อมปฏิกิริยา oxidation และ hydrolysis



## 3. Hydrolysis

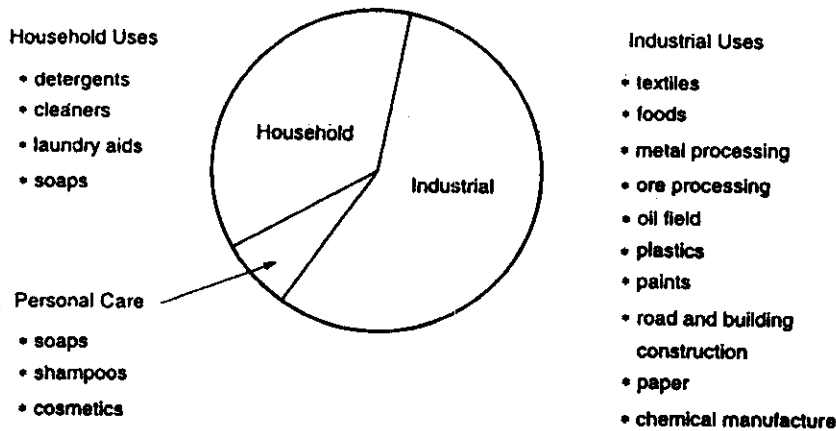
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาอื่นโดยมี enzyme เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



## 4. Conjugation

เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไปเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งอาจถูกกำจัดหรือสะสมไว้ในพืชหรือสัตว์ เช่น กลูโคส จากพืชและแมลง



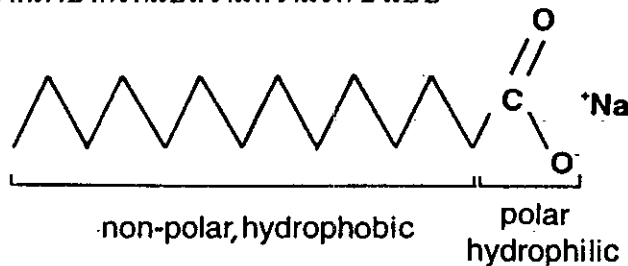


รูปที่ 6.16 แสดงสัดส่วนการใช้สารลดแรงตึงผิว

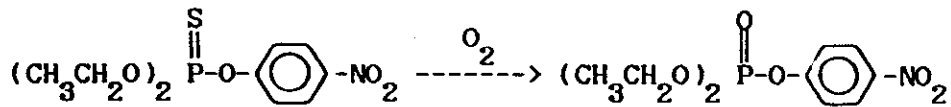
### สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

ทั้งสบู่และผงซักฟอกประกอบด้วยสารสำคัญที่มีผลต่อการซักล้างที่เรียกว่าสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ซึ่งจะให้ผลที่ผิวหรือรอยต่อระหว่างเฟสที่มีขั้วและเฟสที่ไม่มีขั้ว ตัวอย่างเช่นที่ผิวน้ำซึ่งเป็นเฟสที่มีขั้วกับอากาศซึ่งเป็นเฟสที่ไม่มีขั้ว

การที่สารลดแรงตึงผิวอยู่ด้วยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเฟสทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ซึ่งเป็นตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวในสบู่โซเดียมไมริสเทท (sodium myristate) โมเลกุลจะมี 2 ส่วนซึ่งมีสมบัติต่างกัน คือ ไฮโดรคาร์บอนที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวเปิดส่วนหางกลุ่มไฮโอไนคคาร์บอกซิลจะเรียกว่าส่วนหัว ส่วนหัวไฮโอไนคคาร์บอกซิลจะชอบน้ำ (hydrophilic) จึงจะอยู่ในน้ำ แต่ส่วนหาง (ไฮโดรคาร์บอน) ซึ่งไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะชอบสารที่ไม่มีขั้ว อย่างเช่นกรีซ นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้สารลดแรงตึงผิวถูกเรียกว่า แอมฟิไฟล์ (amphiphiles) ซึ่งมาจากภาษากรีกแปลว่ามีความรัก 2 แบบ



รูป 6.17 แสดงโครงสร้างสบู่โซเดียมไมริสเทท



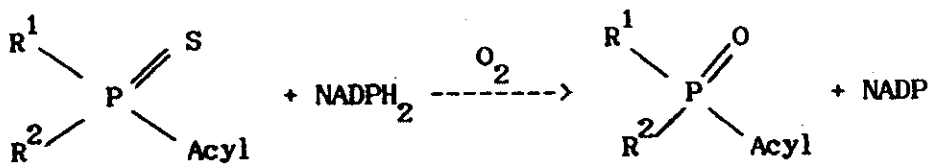
ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสารฆ่าแมลงกลุ่ม organophosphates ในพืชและสัตว์

ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสารกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเกิดที่ตับ ซึ่งมีเอสเทอร์อยู่มาก สูตรโครงสร้าง organophosphates นั้นมีส่วนที่เป็นเอสเทอร์จึงสามารถจะเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ

1. Oxidation ที่สำคัญได้แก่

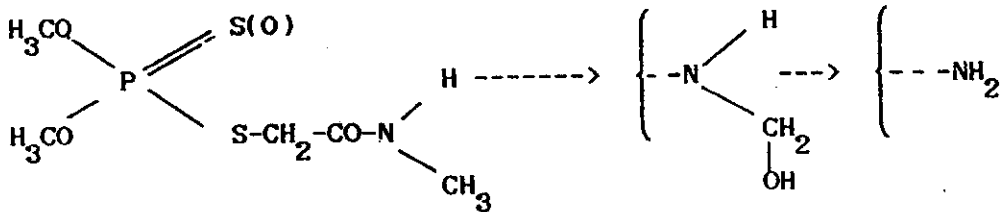
1.1 เปลี่ยนกลุ่มไรโอโน (Thiono) เป็นกลุ่มออกโซ (Oxo) โดยเกิดออกซิเดชัน S

และเปลี่ยนจาก phosphorothionate เป็น phosphates โดยอาศัย  $\text{NADPH}_2$  และออกซิเจน



1.2 Oxidative dealkylation เป็นปฏิกิริยากำจัด alkyl group ซึ่งต่อกับ N ออก

เช่น สารฆ่าแมลง dimethoate

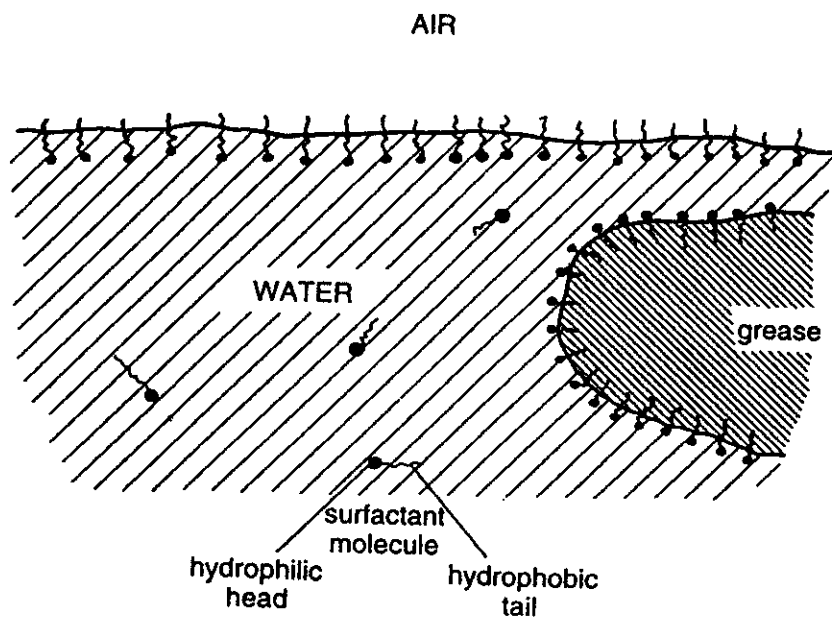


Dimethoate

1.3 Oxidation of thioether โดยเกิด oxidation ที่ thioether เป็น sulfoxides

และ sulfones เช่น

โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเสถียรมากที่สุดระหว่างรอยต่อของเฟส เช่น น้ำ-อากาศ หรือผิวของน้ำมันกับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนที่ชอบน้ำ (ส่วนหัว) จะอยู่ในน้ำ ในขณะที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (ส่วนหาง) จะอยู่ใอากาศ หรือในน้ำมัน โดยที่ผิวของน้ำสารลดแรงตึงผิวจะปกคลุมผิวน้ำขึ้นหนึ่งชั้น (monolayer) จึงมีผลให้แรงตึงผิวน้ำลดลงถึง 25% ของที่เป็นตามปกติ และที่ผิวต่อระหว่างน้ำและน้ำมัน (กรีซ) สารลดแรงตึงผิวก็สามารถส่งผลดังกล่าวนี้แล้วลดแรงตึงผิวได้มากกว่า  $10^5$  เท่า จากผลทั้งสองนี้เองจึงส่งผลถึงการเกิดฟองที่ผิวน้ำและการเกิดสารแขวนลอยในน้ำ

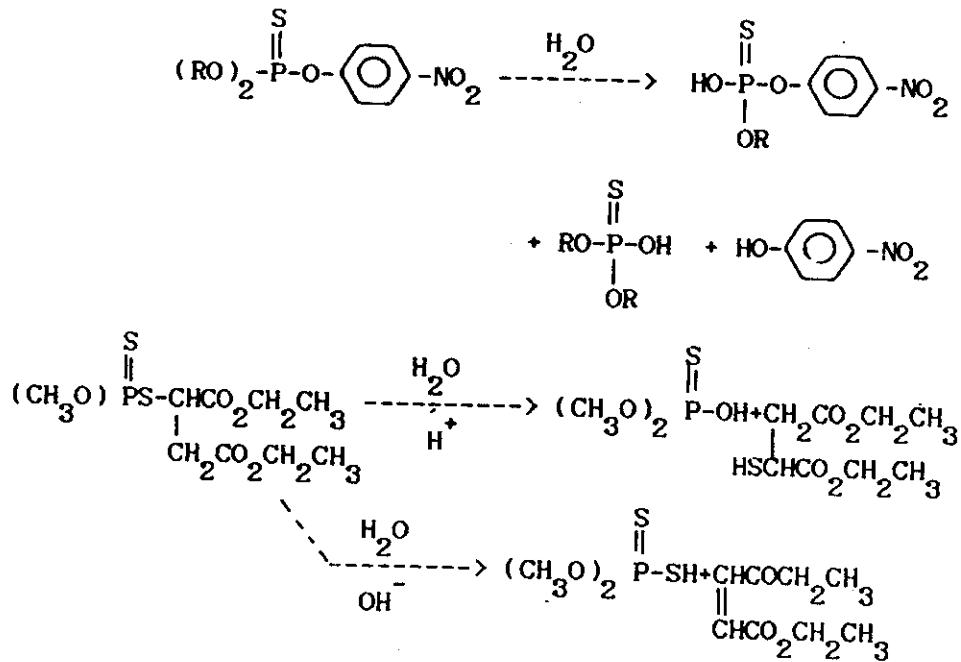


รูปที่ 6.18 แสดงโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในรูปต่อของเฟสที่ต่างกัน

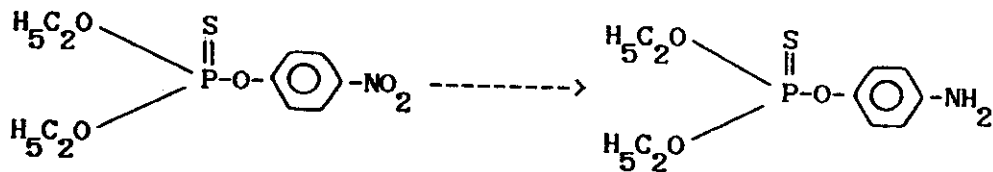
เมื่อสารลดแรงตึงผิวละลายได้หมดแล้วก็จะส่งผลให้เกิดเป็นไมเซลล์ (micelles) ดังรูปที่ 6.19 โดยหนึ่งไมเซลล์เล็ก ๆ นี้จะประกอบด้วยกลุ่มไอออนิกคาร์บอกซิล 50-100 หน่วย

## Environmental degradation

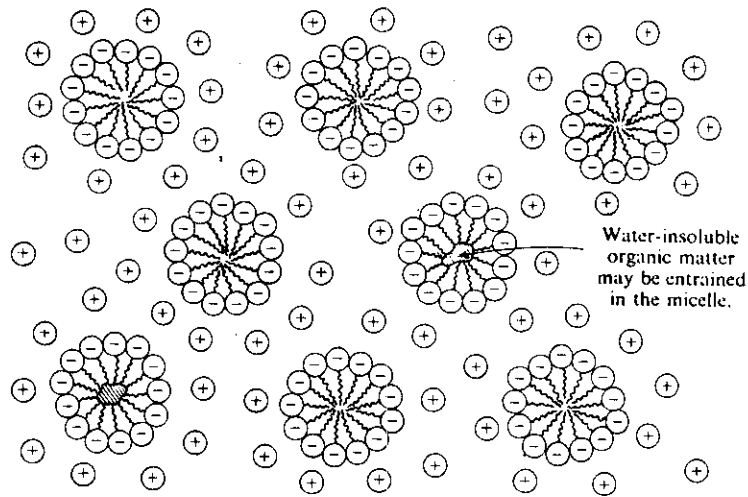
สารฆ่าแมลงกลุ่ม organophosphates เป็นสารที่สามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในสิ่งแวดล้อมโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เช่น



ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดคือปฏิกิริยา oxidation และ reduction เช่น ปฏิกิริยา reduction ของ parathion ที่เกิดโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน

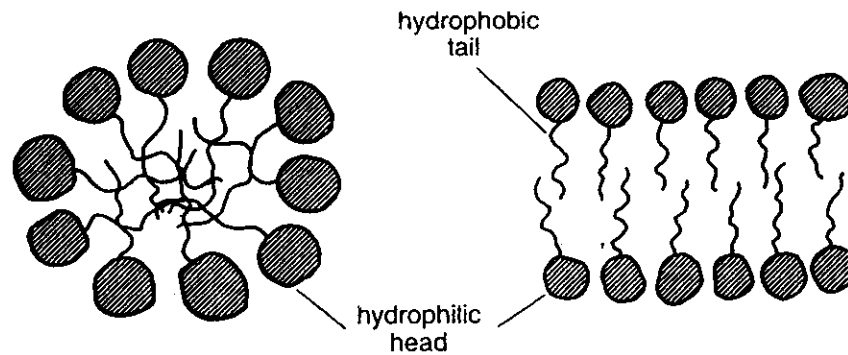


ปัญหาของสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้ในแง่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมนั้นในแง่ของการสะสมนั้นไม่มี ปัญหาส่วนใหญ่ที่ยังศึกษากันอยู่คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของสารซึ่งพบว่ามักจะเป็นสารที่มีพิษมากกว่าเดิม เช่น ปฏิกิริยา oxidation ของ parathion โดยออกซิเจนในบรรยากาศหรือ enzyme แล้วเกิดเป็นสารใหม่ซึ่งมีพิษมากกว่า parathion เองถึง 4 เท่า



รูป 6.19 Colloidal soap micelles

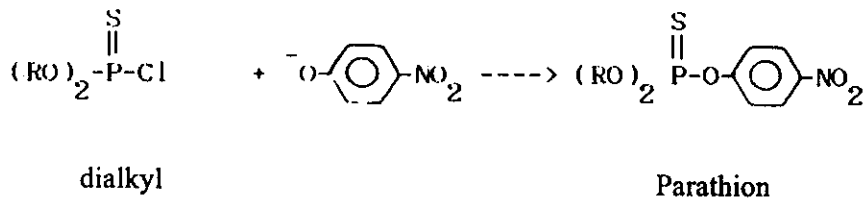
ไมเซลล์จะมีรูปร่างไม่เหมือนกันเช่น เป็นแท่ง แผ่น ขึ้นอยู่กับประเภท ความเข้มข้น และเงื่อนไขอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 แสดงรูปตัดขวางของไมเซลล์ในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

ชนิดที่นิยมใช้และมีการศึกษากันมากคือ Parathion และ Malathion

Parathion เตรียมได้จากปฏิกิริยาการแทนที่แบบ SN<sub>2</sub> ของ

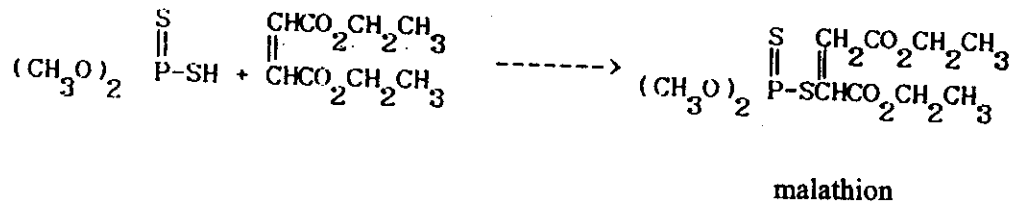


phosphorothiochloridates (R = CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>)

Parathion เป็นชนิดที่สำคัญและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่ม diethoxy สมบัติทั่วไปคือ

- กลิ่นคล้ายกระเทียม
- การสลายตัวได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม จึงไม่สะสมในสิ่งแวดล้อม
- มีพิษต่อสัตว์เลื้อยลูกค้ำยนมสูงกว่า chlorinated hydrocarbons

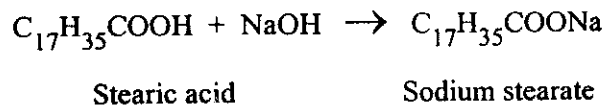
Malathion เตรียมได้จากปฏิกิริยา nucleophilic addition ของ thioacid ที่ double bond



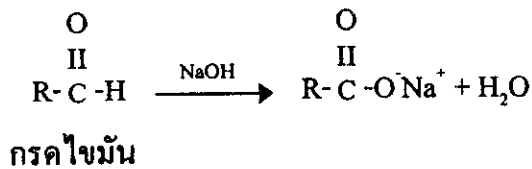
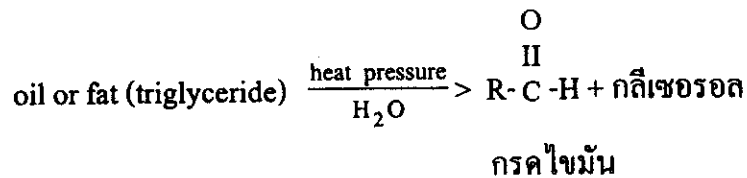
malathion จัดเป็นชนิดที่สำคัญและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มของ organophosphates ซึ่งเป็นชนิดที่มีความปลอดภัยสูงที่สุดเนื่องจากสมบัติของ malathion เป็นสารซึ่งมีพิษต่อสัตว์เลื้อยลูกค้ำยมน้อยมาก และไม่สะสมในสิ่งแวดล้อมเพราะสลายตัวได้ง่าย

## สบู่

สบู่คือเกลือโซเดียมของกรดไขมันซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก ( $C_{17}H_{35}COOH$ ) กับด่างแก่เช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



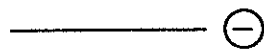
การเตรียมสบู่ในโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบันเตรียมจากปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับน้ำโดยภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูงจะให้เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล หลังจากนั้นจะเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นสบู่ดังสมการ



## สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

สารลดแรงตึงผิวแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ เป็น 4 พวกตามประจุของของส่วนที่เป็นขั้วที่ชอบน้ำเมื่อละลายน้ำ ดังนี้

1. แอนไอออนิก (Anionic) เมื่อละลายน้ำแล้วแสดงประจุลบได้แก่สบู่ ผงซักฟอก ในรูปของแข็ง



ตารางที่ 6.14 แสดงตัวอย่างชื่อสารและโครงสร้างของกลุ่ม organophosphates

ชื่อสาร	สูตรโครงสร้าง	การใช้ประโยชน์
Parathion O,O-diethyl O-p-nitrophenyl phosphorothionate		ใช้มากที่สุด มีกลิ่นคล้ายกระเทียม เป็นพิษอย่างแรงกับสัตว์เลื้อยคลาน ใช้น้ำแมลงทั่วไป น้ำแมลงของมันฝรั่ง
Methyl parathion O,O-dimethyl O-p-nitrophenyl phosphorothionate		เป็นพิษต่อสัตว์เลื้อยคลานด้วยน้ำหนักน้อยกว่า parathion ไม่เสถียรนัก หรือสลายตัวได้ง่าย
Malathion O,O-dimethyl S-(1,2-dicarboxy ethyl) phosphorodithionate		ใช้ควบคุมแมลงตามบ้าน สวนผลไม้ สวนผัก ความคุมยุงและแมลงวัน
TEPP tetraethyl pyrophosphate		สลายตัวได้ง่ายมาก เหมาะสำหรับควบคุมศัตรูพืชของพืชผัก
Sulfotepp tetraethyl dithionopyrophosphate		เสถียรกว่า TEPP ใช้ควบคุมศัตรูพืชเกือบไม้ทั่วๆไป
DDVP or dichlorvos O,O-dimethyl-2,2-dichlorovinyl phosphate		น้ำแมลงวัน ยุง และแมลงสาบ กักขังรวดเร็ว
Systox (demeton) Mixture of 2 parts O,O-diethyl O-2-(ethylthio) - ethyl phosphorothiomate		เป็นยาฆ่าแมลงที่มีฤทธิ์ ตกด่างได้มาก สามารถดูดซึมได้รวดเร็ว และสลายตัวของมันไม่ได้
With 1 part O,O-diethyl S-2-(ethylthio)-ethyl phosphorothiolate		

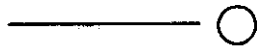
ชื่อแรกเป็นชื่อสามัญ ชื่อที่สองเป็นชื่อเคมี



2. แคทไอออนิก (Cationic) เมื่อละลายน้ำแล้วแสดงประจุบวก เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มากในน้ำยาปรับผ้านุ่ม ขาฆ่าเชื้อโรคและครีมนวดผม



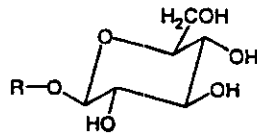
3. นอนไอออนิก (Nonionic) เมื่อละลายน้ำแล้วไม่แสดงประจุเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำผงซักฟอกประเภทที่เป็นของเหลว



4. แอมโฟเทริก (Amphoteric) เมื่อละลายน้ำแล้วแสดงประจุทั้งบวกและลบ ใช้มากในเครื่องสำอาง แชมพูสระผม

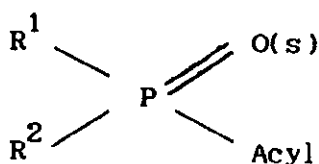


ตารางที่ 6.3 แสดงสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ทั้ง 4 แบบ

Common name	Structure	
<b>Anionics</b>		
Carboxylates (soaps)	$R-CH_2-COO^-Na^+$	$R = C_{10-18}$
Linear alkylbenzene sulfonates (LAS)	$R-\text{C}_6\text{H}_4-SO_3^-Na^+$	$R = C_{10-13}$
Alcohol sulfates	$R-CH_2-OSO_3^-Na^+$	$R = C_{11-17}$
Alcohol ethersulfates	$R-O(CH_2CH_2O)_nSO_3^-Na^+$	
<b>Nonionics</b>		
Fatty alcohol ethoxylates	$R-(OCH_2CH_2)_nOH$	$R = C_{9-18}, n = 9-70$
Alkyl glucosides		$R = C_{12-18}, n = 1-4$
<b>Cationics</b>		
A quaternary ammonium chloride	$R-N^+(CH_3)_3 Cl^-$	$R = C_{16-18}$
<b>Amphoteric</b>		
A sulfobetaine	$R-N^+(CH_3)_2(CH_2)_5SO_3^-$	$R = C_{12-18}$

### 6.2.9.2 สารฆ่าแมลงกลุ่ม Organophosphates

เป็นสารอินทรีย์ที่มีกลุ่ม P เป็นองค์ประกอบสำคัญ และมีสูตรทั่วไปเป็นดังนี้



ผู้ที่คิดค้นสูตรนี้คือ Schrader ซึ่งพบว่าสูตรดังกล่าวว่าฟอสเฟตจะแสดงฤทธิ์ฆ่าแมลงได้ต่อเมื่อมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

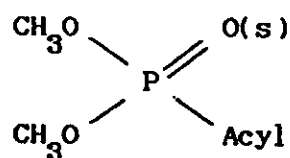
1. S หรือ O ต้องเชื่อมต่อโดยตรงกับฟอสฟอรัส ซึ่งมี valency เป็น 5 (pentavalent phosphorus)

2. R<sup>1</sup> และ R<sup>2</sup> อาจเป็น alkoxy , alkyl หรือส่วนของ amino

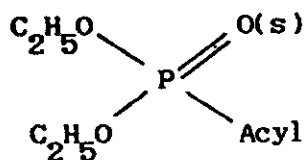
3. acyl คือประจุลบของสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ที่เป็นกรด เช่น ฟลูออรีน ไทโอไซยาเนต ไซยาเนตหรือเป็นส่วนหนึ่งของกรด เช่น enol , mercapto

ยาฆ่าแมลงกลุ่ม Organophosphates ที่ใช้ปัจจุบันจะแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ dimethoxy และ diethoxy

1. dimethoxy โครงสร้างทั่วไปคือ



2. diethoxy โครงสร้างทั่วไปคือ

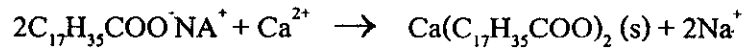


ตัวอย่างชื่อสารและโครงสร้างของทั้งสองกลุ่มนี้ ดังตารางที่ 6.14

สบู่จัดเป็นสารลดแรงตึงผิวโดยมีไอออนสเตริยเรทเป็นส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำเนื่องจากไม่มีขั้ว และมีไอออนิกคาร์บอกซิลซึ่งมีประจุลบเป็นส่วนหัวที่ชอบน้ำเนื่องจากมีขั้ว จึงเรียกสารลดแรงตึงผิวจากสบู่ว่าเป็นกลุ่มสารลดแรงตึงผิวแอนไอออนิก (Anionic surfactant)

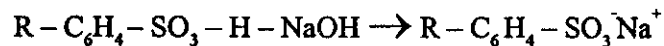
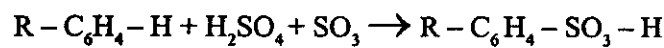
### ผงซักฟอก (Detergents)

เนื่องจากสบู่มีข้อเสียในการใช้งานหลายประการ เช่น ในน้ำที่มีสภาพเป็นกรดจะเกิดเป็นกรดไขมันที่ไม่ละลายในน้ำจึงไม่เกิดผลในแง่สารลดแรงตึงผิว หรือการละลายได้น้อยลงเมื่ออยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีไอออนโซเดียมอยู่ ที่เกิดผลมากคือในน้ำกระด้างจะให้เกลือแคลเซียมหรือแมกเนเซียมของกรดไขมันดังสมการ



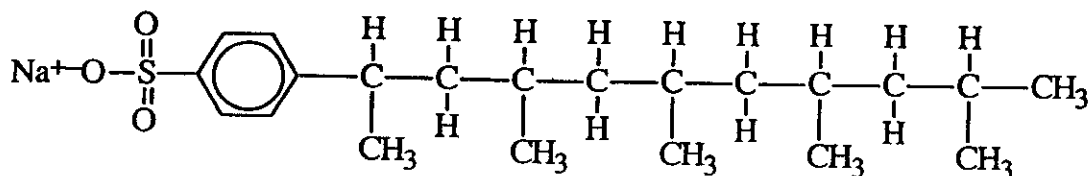
เกลือนี้มีผลทำให้ผลการซักล้างลดลงและยังก่อให้เกิดคราบติดในเสื้อผ้าและเครื่องซักผ้าด้วย จึงมีการสังเคราะห์ผงซักฟอกซึ่งมีข้อดีในการใช้มากกว่าสบู่ในรูปสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์

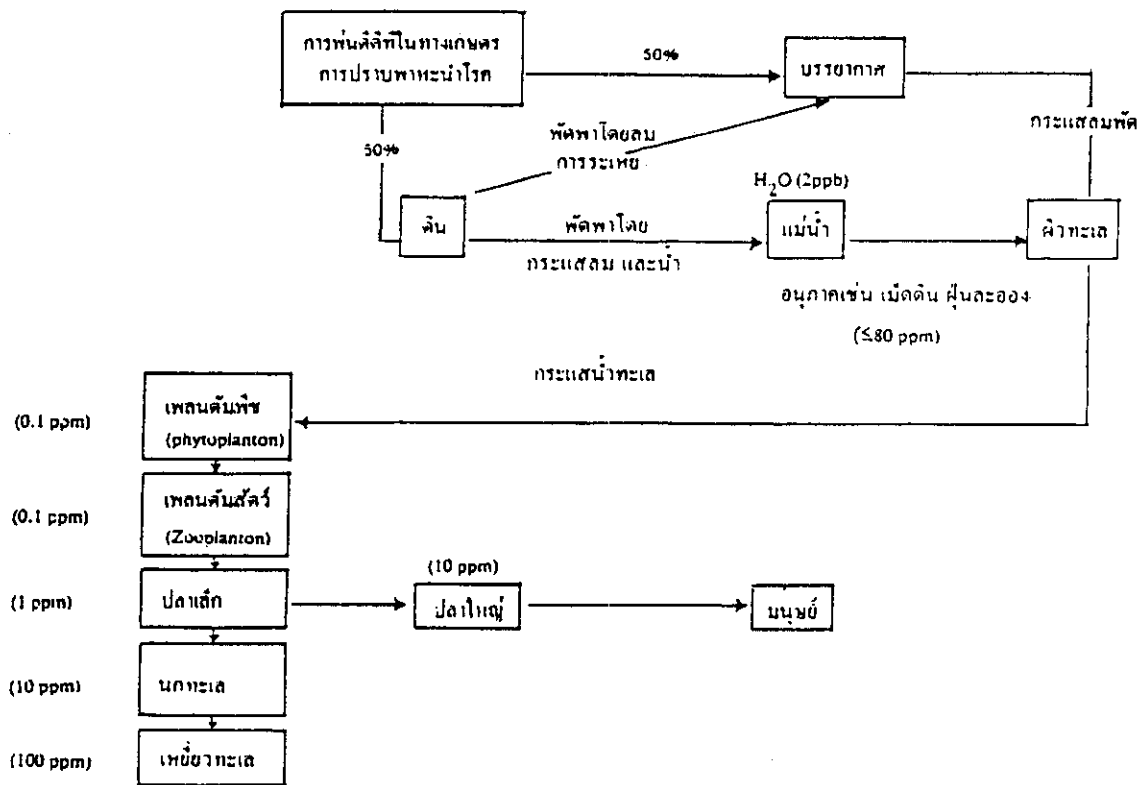
สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ชนิดที่ผลิตออกมาใช้อย่างกว้างขวาง คือ alkylbenzene sulfonates (ABS) โดยสารตั้งต้นคือสาร alkylbenzene และเตรียมได้ดังนี้



โดย R = alkyl group C<sub>12</sub> - C<sub>18</sub>

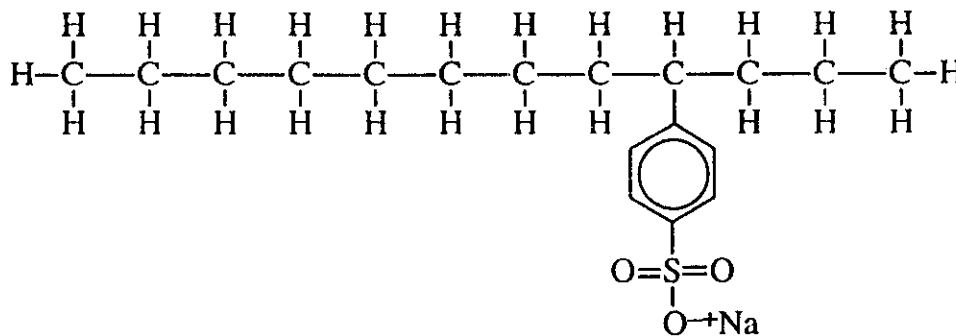
สูตร ABS ทั่วๆ ไปดังนี้



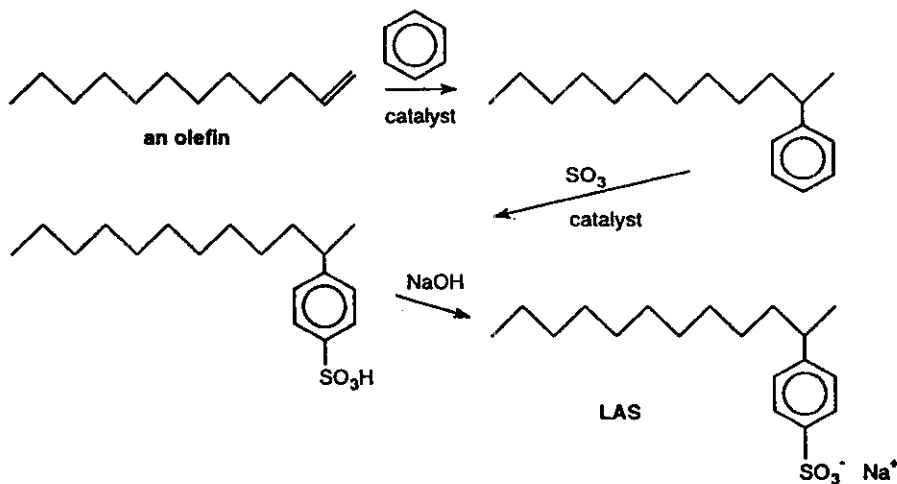


รูปที่ 6.34 แสดงการสะสม DDT ตามวงจรลูกโซ่อาหาร

จากสูตร ABS พบว่าเมื่อถูกนำมาใช้ในสิ่งแวดล้อมจะเกิดการย่อยสลายที่ช้ามาก ๆ ตามธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้าน ฟองของ ABS ที่อยู่ตัวมีผลทำให้ขัดขวางระบบการบำบัดน้ำเสียกล่าวคือไปลดแรงตึงผิวของน้ำจึงมีผลให้ของแข็งที่มากับน้ำเกิดการลอยตัวเกิดการแขวนลอยของน้ำมันและกริซ อีกทั้งยังมีผลต่อระบบการทำงานของแบคทีเรียในน้ำด้วย จึงมีผลให้เกิดการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวกลุ่มใหม่คือ LAS (Linear alkylbenzene sulfonate) ซึ่งมีสูตรดังนี้



LAS เตรียมจาก alkene (Olefin) ซึ่ง 70% มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีปฏิกิริยาการเตรียมมีดังนี้



แมลงที่มีสูตรใกล้เคียงกับ DDT ในการศึกษาพบว่าค่า polarity ของสารจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีกลุ่มที่เข้าแทนที่ใน aromatic ring เป็น  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{CO}_2\text{H}$ ,  $-\text{CO}_2\text{CH}_3$  และ  $-\text{OH}$  เนื่องจากทำให้การดูดซึมผ่านเข้ายัง nerve membrane ซึ่งเป็นแบบไม่มีขั้วเกิดได้น้อยลง

กลไกการเกิดพิษ มีการศึกษากันอย่างมากมาย โดยเฉพาะ DDT แต่ก็ยังไม่เป็นที่ยอมรับอย่างสมบูรณ์ เข้าใจว่ากลไกการเกิดพิษเกิดที่เส้นประสาทมอเตอร์ (motor nerve) เส้นประสาทเซนซอรี (sensory nerve) และส่วนมอเตอร์คอร์เทกซ์ (motor cortex)

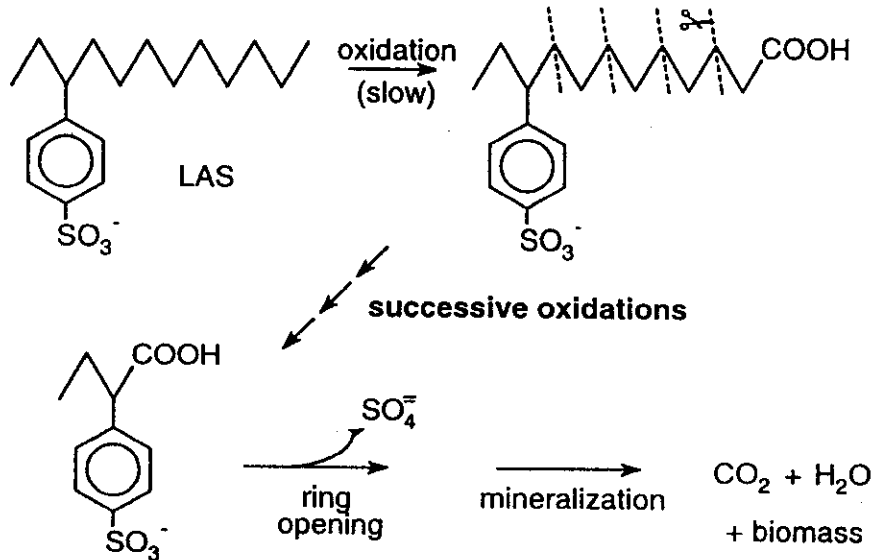
Narahashi (1979) ได้รายงานว่า DDT สามารถเปลี่ยนแปลงการขนส่ง  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  ผ่านผนังของเซลล์ประสาทแอกซอนโดยจะทำให้ขั้นตอนการหุคขนส่ง  $\text{Na}^+$  ผ่านผนังเซลล์ใช้เวลานานขึ้นและไประงับการขนส่ง  $\text{K}^+$  ผ่านเซลล์ด้วย เหตุผลที่เกิดยังทราบไม่แน่ชัด

### ปัญหาสารฆ่าแมลงกลุ่ม Chlorinated Hydrocarbons

คุณสมบัติทั่วไปของสารฆ่าแมลงกลุ่มนี้ ซึ่งมีผลทำให้ศักยภาพในการก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อมสูง โดยเฉพาะ DDT มีดังนี้

1. ละลายในไขมันได้ดีและละลายในน้ำได้น้อย (high lipophilicity and low water solubility) ทำให้สามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตในระดับสูงกว่าที่พบในสิ่งแวดล้อมทั่วไป
2. มีความคงทนสูง (high persistence) คือ เกิดการสลายในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติได้ยากหรือเป็นไปอย่างช้าๆ และถึงแม้จะถูกเปลี่ยนแปลงจากการสลายตัวก็ตามก็ยังคงได้สารที่มีความเป็นพิษและความคงทนสูง
3. มีความสามารถในการสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ (Potential to bioaccumulation) โดยมีปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นตามวงจรลูกโซ่อาหาร ทำให้สามารถแพร่กระจายไปในสิ่งแวดล้อมได้ดี และมนุษย์มีความเสี่ยงต่อพิษของสารสูงขึ้น ดังรูปที่ 6.34 ซึ่งแสดงถึงกระบวนการคั่งกล่าว

ข้อดีของ LAS คือจะสามารถเกิดกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติ (Biodegradation) ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของส่วนที่เป็นขี้ที่ไม่ชอบน้ำก็จะเริ่มออกซิไดส์ที่คาร์บอนตัวริมสุดได้เป็นกลุ่มของคาร์บอกซิล โดยแต่ละครั้งของการออกซิเดชัน คาร์บอนจะหลุดไปจากโซ่ครึ่งละสองตัว จนในที่สุดวงแหวนจะถูกเปิดให้เป็นสารประกอบสุดท้ายคั่งสมการ



ผงซักฟอกมีสารประกอบหลักคือสารลดแรงตึงผิว ส่วนอื่น ๆ ประมาณ 50% จะเป็นสารอนินทรีย์ที่ช่วยให้ผงซักฟอกทำงานได้ดีมากขึ้น สารอนินทรีย์อื่น ๆ ที่เติมในผงซักฟอก ได้แก่

1. สารเติมแต่ง (builders) เติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการซักฟอกของผงซักฟอกคือ

- 1.1 แก้ความเป็นด่างของน้ำ โดยรวมตัวเป็น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และ  $\text{Ba}^{2+}$  ในน้ำ
- 1.2 ทำให้สารละลายเป็นด่างเนื่องจากผงซักฟอกจะใช้งานได้ดีในสภาวะเป็นด่างที่มีค่าพีเอชมากกว่า 9

## พิษและกลไกการออกฤทธิ์

พิษของสารฆ่าแมลง cholinate hydrocarbons นั้นส่วนใหญ่จะมีผลต่อระบบประสาท (neuropoison) โดยเฉพาะกลุ่ม cyclodiene และ DDT สารในกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 6.13 และเป็นที่ยอมรับว่าเป็นยาฆ่าแมลงที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำกว่า แต่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดพิษเรื้อรังในระยะยาวเนื่องจากสลายตัวยาก ตารางที่ 6.13 แสดงพิษของ cyclodiene และ DDT

ชื่อยาฆ่าแมลง	ค่า LD <sub>50</sub> (มก./กก.) ในหนูขาวตัวผู้	
	ให้ทางปาก (oral)	ให้ทางผิวหนัง (Dermal)
DDT	113 (p,p-DDT) 217 (technical)	-- 2,510
DDE	880	--
DDA	740	--
Methoxychlor	5,000-7,000	98
Aldrin	39	98
Dieldrin	46	90
Heptachlor	100	195
Endrin	18	18
Chlordane	335	840
Lindane	88	1,000
Mirex	740	> 2,000

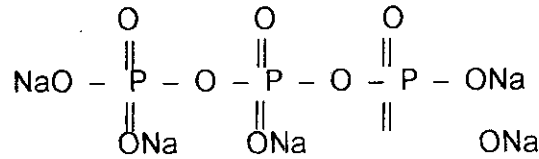
**พิษเฉียบพลัน** อาการที่เกิดคือเวียนศีรษะ กระจกกระวาย ตัวเขียวคล้ำ หัวใจล้มเหลว และอาจตายได้ในที่สุด ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันดังในตารางที่ 6.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า endrin จะมีพิษรุนแรง และที่น้อยที่สุดคือ methoxychlor

**พิษเรื้อรัง** โดยเฉพาะ DDT พบว่าจะแสดงอาการผิดปกติต่อทางเดินอาหาร มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน น้ำหนักลด เหน็ดเหนื่อย และเมื่อยล้าตามร่างกาย สำหรับสารฆ่า

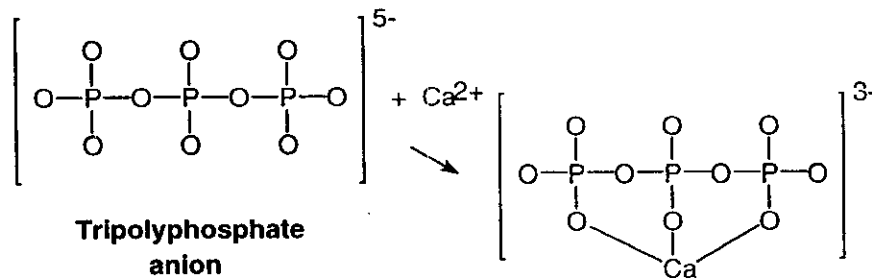


### 1.3 ช่วยทำให้สิ่งสกปรกแขวนลอยได้คิและถูกกำจัดออกไปได้

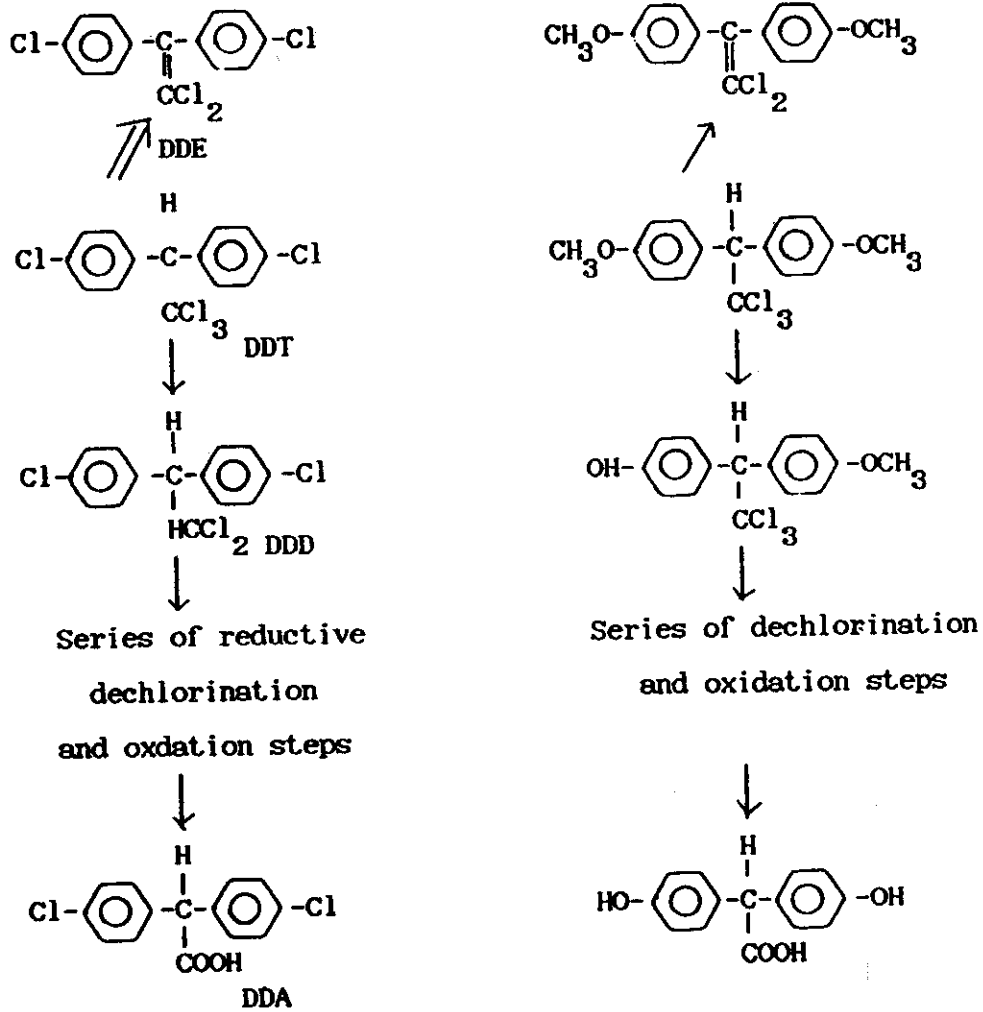
สารหลักพวกนี้ได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต หรือ STPP ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ )



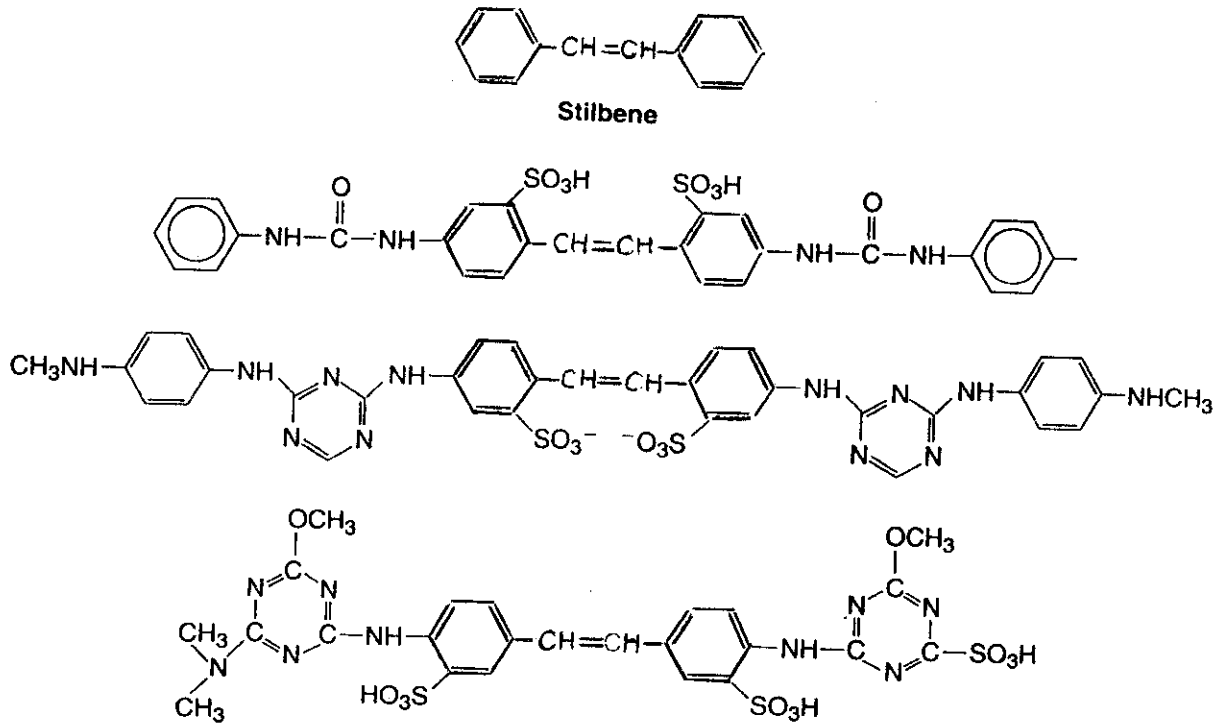
เนื่องจากการสะสมของฟอสฟอรัสซึ่งก่อให้เกิด Eutrophication ปัจจุบันมีการนำซีโอไลต์มาใช้แทน ซึ่งมีสูตร  $2\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{Ca}^{2+}$  แต่ไม่เกิดกับ  $\text{Mg}^{2+}$  อันเป็นข้อเสียในการใช้สารนี้แทน STPP ซึ่งราคาถูกกว่าด้วย โดยจะจับ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{Mg}^{2+}$  ในน้ำดังรูป



2. Optical brightening agents ใส่เพื่อให้ผ้าดูขาวมากขึ้น เนื่องจากเป็นสารเคมีที่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและปล่อยแสงสีฟ้าออกมาทำให้ผ้าดูขาวขึ้น สารเคมีพวกนี้ได้แก่คอมเพลก สติลบิน (Complex Stilbene) ซึ่งมีโครงสร้างดังในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.33 เปรียบเทียบสารเมตาโบไลต์ระหว่าง DDT และ methoxychlor



รูปที่ 6.20 โครงสร้างทางเคมีของสตีลบินและสารที่ทำให้ผ้าดูขาวขึ้นที่มีสตีลบินอยู่ 3 ประเภท จากโครงสร้างของสตีลบินพบว่า มีพันธะคู่ที่เป็นคอนจูเกตหรือเปลี่ยนที่ไปมาได้มีผลให้โมเลกุลดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและปล่อยแสงสีฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเห็นได้

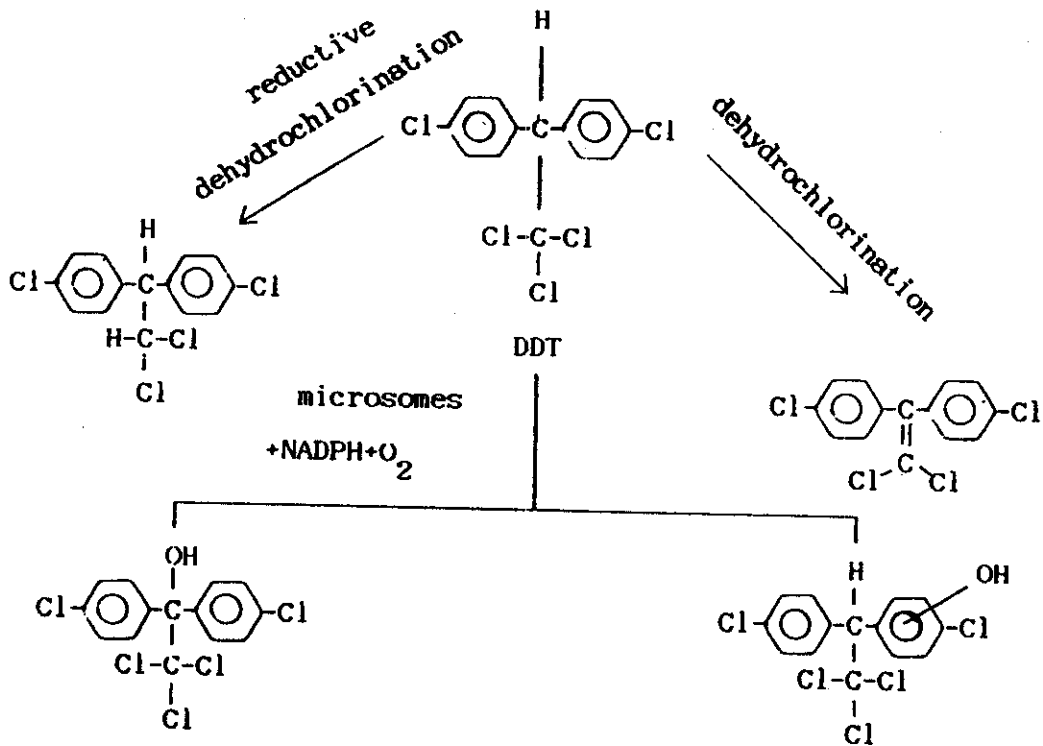
3. Antiredeposition agents ใส่เพื่อไม่ให้ความสกปรกกลับไปสู่ที่ผ้าอีก สารทั่วไปที่ใช้คือ Sodium carboxyl cellulose (CMC)

4. Bleaches สารฟอกขาวที่ใช้มากได้แก่ Sodium perborate ( $\text{NaBO}_3$ ) อย่างอื่นที่ใช้้น้อยกว่าคือเกลือโซเดียมหรือแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{NaOCl}$  หรือ  $\text{Ca(OCl)}_2$ ) เนื่องจากทำลายเนื้อผ้าด้วยขณะใช้

5. Enzymes ใส่เพื่อทำลายคราบสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนเนื้อผ้าอย่างหนาแน่น เช่น proteases จะไฮโดรไลซ์คราบพวกโปรตีน amylases ใช้ไฮโดรไลซ์พวกคราบแป้ง lipases ใช้ไฮโดรไลซ์ไขมันและน้ำมัน

6. สารอื่นๆ ได้แก่ น้ำหอม สารเพิ่มฟอง ฯลฯ

ส่วนเมตาโบลิซึมของ DDT ในร่างกายมนุษย์ทั้งหมดที่เกิด สามารถสรุปได้ดัง  
แสดงในรูป 6.32 โดยจะเกิดได้อย่างช้า ๆ ในร่างกายมนุษย์ และถูกขับออกจากร่างกายโดย  
ทางปัสสาวะ



รูป 6.32 แสดงเมตาโบลิซึม DDT ในร่างกายมนุษย์

Methoxychlor จะเกิดเมตาโบลิซึมเมื่อเข้าสู่ร่างกายมนุษย์หรือสัตว์ได้โดยอาศัยตัว  
เร่งปฏิกิริยา คือ microsomal enzymes ซึ่งลักษณะการเกิดสารเมตาโบไลต์บางส่วนจะ  
คล้ายคลึงกับ DDT ดังแสดงในรูป 6.33 ซึ่งพบว่าเมตาโบลิซึมเป็นส่วนน้อยจะเกิดได้อย่างช้า  
 ๆ ส่วนใหญ่เกิดได้เร็วจะเกิดจากปฏิกิริยา O-demethylation ตามด้วย conjugation และถูกขับ  
ออกจากร่างกายในที่สุด

## ผลของสบู่และผงซักฟอกต่อสิ่งแวดล้อม

สบู่และผงซักฟอกไม่มีผลต่อสัตว์เลื้อยลูกค้ำยวมโดยเฉพาะคนในแง่ความเป็นพิษแบบกิน (oral toxicity) แต่จะมีผลมากกว่าในสัตว์ที่อยู่ในน้ำซึ่งค่า  $LC_{50}$  อยู่ในช่วงพีพีเอ็ม สารลดแรงตึงผิวแบบแคทไอออนิกพบว่าฆ่าพวกแบคทีเรียและสาหร่ายในน้ำได้ดังแสดงในตัวอย่าง 6.4

สารลดแรงตึงผิวกลุ่มแอนไอออนิกโดยเฉพาะ LAS จะสามารถถูกย่อยสลายได้ในน้ำจึงถูกนำมาใช้แทน ABS ดังอธิบายแล้ว สำหรับแอนไอออนิกและนอนไอออนิกอื่น ๆ พบว่าจะย่อยสลายได้ 98% กลุ่มแคทไอออนิกจะมีสมบัติที่ต่างเป็นกล่าวคือถ้าหากความเข้มข้นน้อยกว่า 1 พีพีเอ็ม จะถูกย่อยสลายได้ทั้งหมดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูงกว่านี้ จะถูกปนเปื้อนในน้ำและมีผลในการทำลายสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะแบคทีเรีย ยกเว้นถ้าในน้ำมีกลุ่มไอออนิกอยู่ด้วยก็จะทำให้กลายเป็นกลางและมีผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง

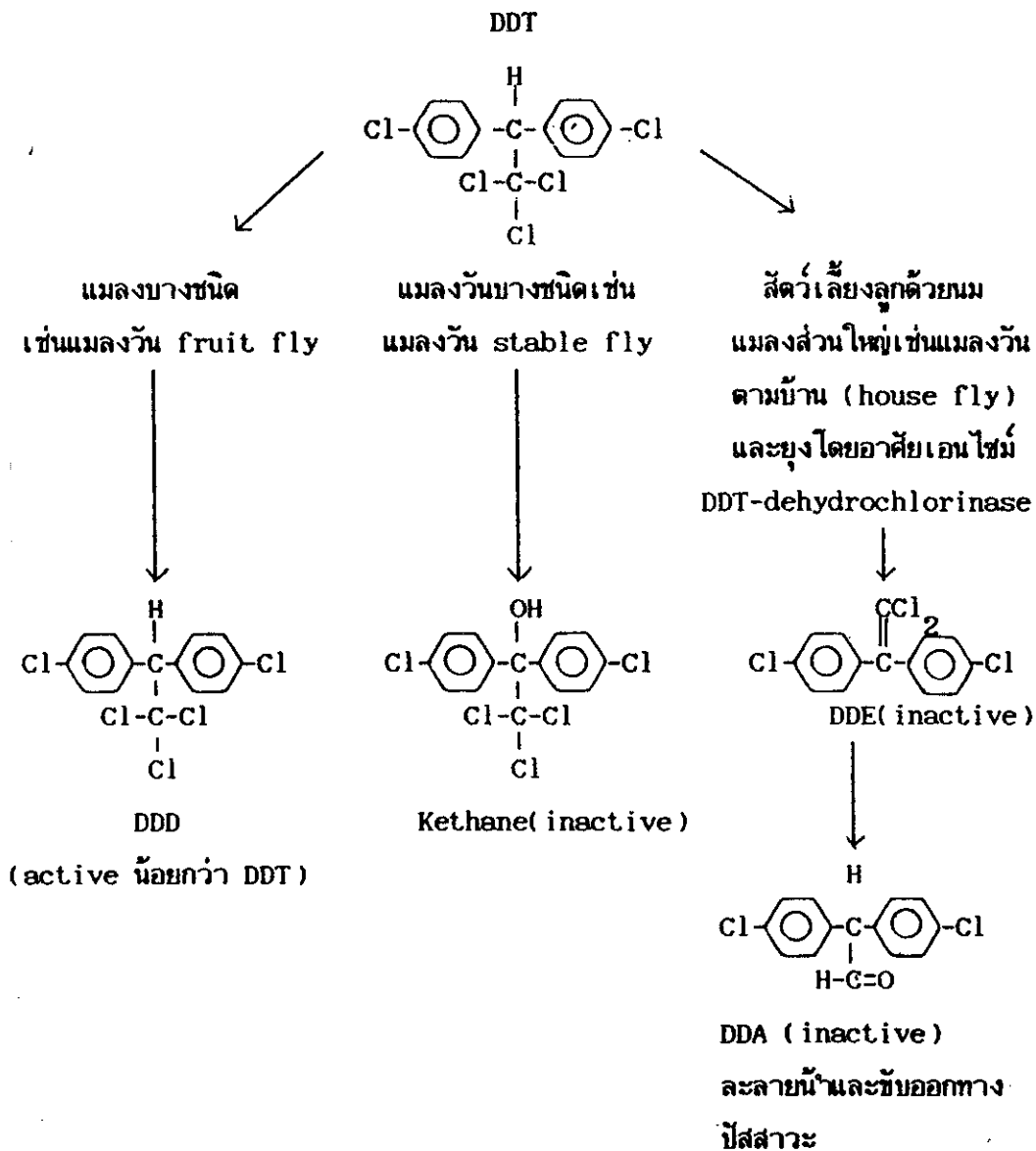
ตารางที่ 6.4 Surfactant Toxicity to Some Aquatic Organisms

Surfactant	Fish $LC_{50}$ ( $mg L^{-1}$ )	<i>Daphnia</i> $LC_{50}$ ( $mg L^{-1}$ )	Algae growth Inhibition $EC_{50}$ ( $mg L^{-1}$ )
<b>Anionic</b>			
Linear alkylbenzene sulfonates	3-10	1-10	1-100
C12 fatty alcohol sulfates	3-20	5-70	-60
<b>Nonionic</b>			
Fatty alcohol ethoxylates	1-10	1-10 <sup>a</sup>	4-50
Alkylglucosides	3.7	-	6.5
<b>Cationic</b>			
Distearyldimethyl	0.62-3 <sup>b</sup>	0.16-0.48 <sup>b</sup>	0.1-10
Ammonium chloride	10-24 <sup>c</sup>	3.1 <sup>c</sup>	

<sup>a</sup> Various invertebrates

<sup>b</sup> Clarified water

<sup>c</sup> River water



รูปที่ 6.31 แสดงเมตร โบลิซึม DDT โดยแมลงและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

อย่างไรก็ตามปัญหาของผงซักฟอกคือการก่อให้เกิดปัญหา Eutrophication ดังกล่าวไว้แล้ว

### 6.2.7 น้ำมัน (Oil)

น้ำมันที่เป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมคือปิโตรเลียม (Petroleum) เนื่องจากมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักทั้งยานพาหนะ เรือ และเครื่องบิน

#### สมบัติทางเคมีของปิโตรเลียม

ปิโตรเลียมเหลวเกิดเองตามธรรมชาติ จากการทับถมของพืชและสัตว์เป็นเวลานานเป็นล้านปี มีลักษณะเป็นน้ำมันติดไฟได้และสารประกอบหลักคือไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) ที่เหลือจะเป็นกลุ่มอื่น ๆ (non-hydrocarbons)

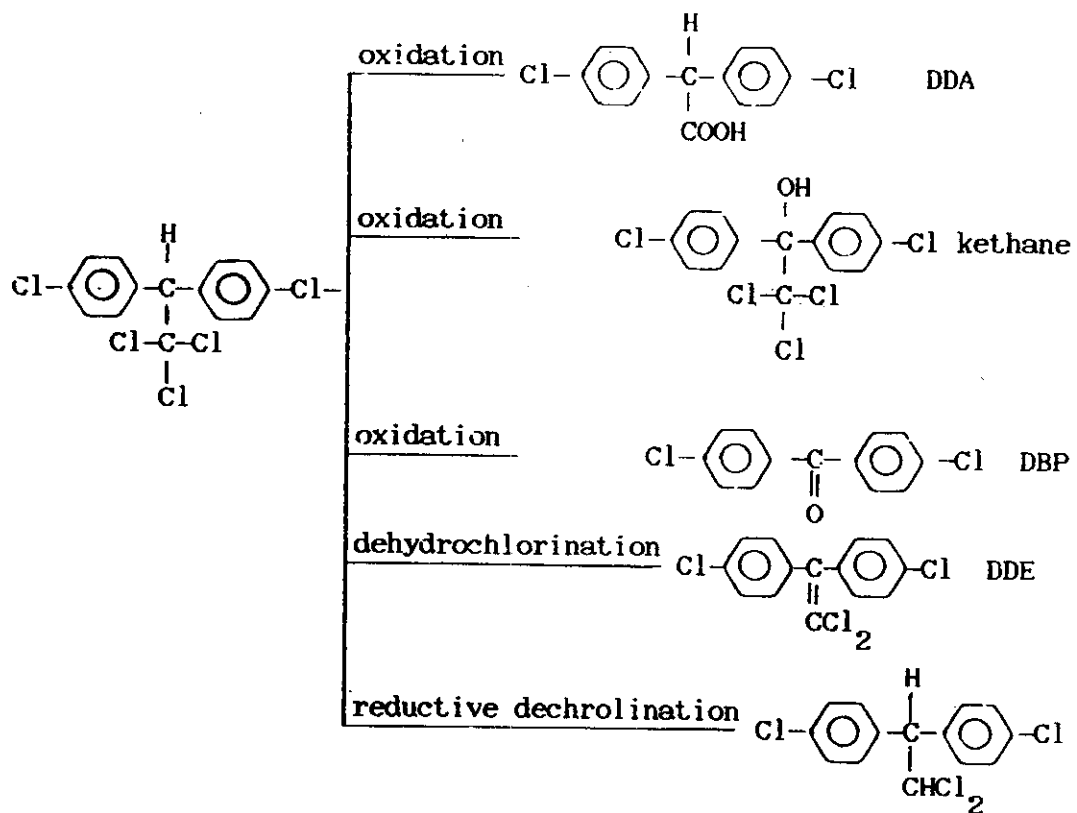
กลุ่มไฮโดรคาร์บอน องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบหรือปิโตรเลียมคนั้นพบว่าค่อนข้างซับซ้อนและไม่แน่นอน แต่ทุกๆ ไปแล้วพบว่าจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน 50-90% โดยจะเป็นไฮโดรคาร์บอนประมาณ 200 ชนิด ส่วนใหญ่จะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว (saturated hydrocarbon) ซึ่งได้แก่ n-alkanes, branched alkanes และ cycloalkanes ที่เหลือจะเป็นสารประกอบอะโรแมติก (aromatics) สำหรับไฮโดรคาร์บอนประเภทไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbons) นั้นมีน้อยมาก

ตัวอย่างโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีในน้ำมัน ดังแสดงในรูป 6.21 และตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 แสดงสารเคมี (%) ที่มีในตัวอย่างปิโตรเลียม

Chemical Component	Southern Louisiana Crude	Kuwait Crude
Alkanes (normal and branched)	28.0	34.1
Cycloalkanes <sup>a</sup>	44.8	20.3
Aromatics <sup>a</sup>	18.6	24.2
Polar (O,N,S-containing) components	8.4	17.9
High boiling, high molecular weight material <sup>a</sup>	0.2	3.5

<sup>a</sup> Includes compounds with alkyl side chains.





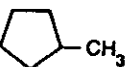
เมตาไลซิสซึมของคีคิทีเมื่อเข้าสู่ร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม หรือแมลงหรือสัตว์บางชนิดจะเป็นดังรูปที่ 6.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่า DDT จะถูกเปลี่ยนเป็นสารเมตาโบไลท์ที่ไม่เป็นพิษหรือมีพิษน้อยลง




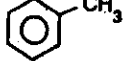

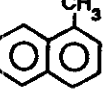

## ALKANES

Methane	$\text{CH}_4$
n - Hexane ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$
n - Triacontane ( $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{28}\text{CH}_3$
2 - Methylpentane ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )	$\text{CH}_3\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$
Phytane ( $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ )	$\text{CH}_3\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}(\text{CH}_2)_3\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}(\text{CH}_2)_3\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}(\text{CH}_2)_3\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\text{CH}_2\text{CH}_3$

## CYCLOALKANES

Cyclopentane ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ )	
Cyclohexane ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ )	
Methylcyclopentane ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ )	

## AROMATICS

Benzene ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )	
Toluene ( $\text{C}_7\text{H}_8$ )	
Tetralin ( $\text{C}_{10}\text{H}_{12}$ )	
1 - Methyl-naphthalene ( $\text{C}_{11}\text{H}_{10}$ )	
Acenaphthene ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ )	

รูปที่ 6.21 Structures of typical hydrocarbons found in petroleum samples.

จากโครงสร้างของ lindane ซึ่งเป็น aromatic ทำให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ E<sub>2</sub> elimination เกิดได้ค่อนข้างยาก ฉะนั้นจึงเป็นสารที่ค่อนข้างจะอยู่คงทนในสิ่งแวดล้อม การดูดซึมและการกระจาย

การดูดซึมของยาฆ่าแมลงกลุ่ม cholrinated hydrocarbons นี้พบว่าถ้าอยู่ในลักษณะที่เป็นผงจะเกิดได้น้อย และจะดูดซึมได้ดีเมื่อเป็นสารละลาย โดยเฉพาะกลุ่มย่อย cyclodienes จะถูกดูดซึมได้มากกว่าชนิดอื่น ๆ

เนื่องจากยาฆ่าแมลงกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะสามารถละลายได้ดีในไขมัน เพราะมีค่า partition coefficient ระหว่างไขมันและน้ำสูง ฉะนั้นเมื่อมนุษย์และสัตว์ได้รับสารนี้เข้าสู่ร่างกายก็จะสะสมตามส่วนของร่างกายที่มีเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) อวัยวะดังกล่าวได้แก่ ไขมัน ไขกระดูก เลือด น้ำดี ไขมัน และต่อมแอดรีนัล

ได้มีการทดลองระยะของการสะสมของสารฆ่าแมลงในหนูทดลองของสารกลุ่มนี้ โดยเฉพาะ methoxychlor และ DDT พบว่า methoxychlor มีครึ่งชีวิตในการสะสม 1-2 สัปดาห์ ส่วน DDT สะสมได้ 6 เดือนถึง 1 ปี

#### สารเมตาโบไลต์ (metabolite) และการขับถ่ายสาร

สารฆ่าแมลงกลุ่ม cholrinated hydrocarbons เมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์หรือสัตว์ จะเกิดเมตาบอลิซึม (metabolism) ในมนุษย์และสัตว์ เกิดเป็นสารเมตาโบไลต์ซึ่งอาจมีพิษมากหรือน้อยกว่าสารเดิมก็ได้

DDT ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการให้สารเมตาโบไลต์สรุปได้ดังนี้คือ

กลุ่มอื่น ๆ (non-hydrocarbons)

ได้แก่กลุ่มสารประกอบที่มีกำมะถัน (sulfur) ไนโตรเจน (nitrogen) และออกซิเจน (oxygen) เป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างสารประกอบของทั้งสามกลุ่มนี้ดังแสดงในรูปที่ 6.22

### SULPHUR CONTAINING COMPOUNDS

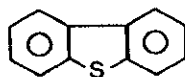
Ethanethiol ( $C_2H_6S$ )  $CH_3CH_2-SH$

Dimethylsulphide ( $C_2H_6S$ )  $CH_3-S-CH_3$

Thiacyclohexane ( $C_5H_{10}S$ )

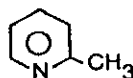


Dibenzothiophene ( $C_{12}H_8S$ )

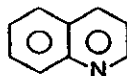


### NITROGEN CONTAINING COMPOUNDS

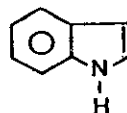
2-Methylpyridine ( $C_6H_7N$ )



Quinoline ( $C_9H_7N$ )

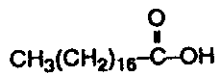


Indole ( $C_8H_7N$ )

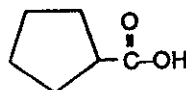


### OXYGEN CONTAINING COMPOUNDS

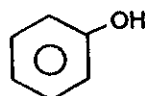
Stearic acid ( $C_{18}H_{36}O_2$ )



Cyclopentanecarboxylic acid ( $C_6H_{10}O_2$ )

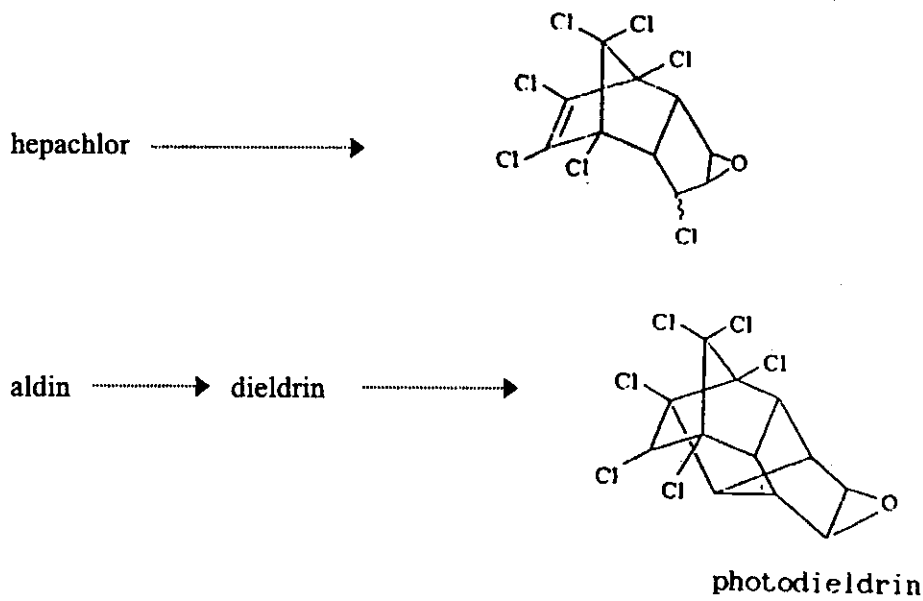


Phenol ( $C_6H_6O$ )



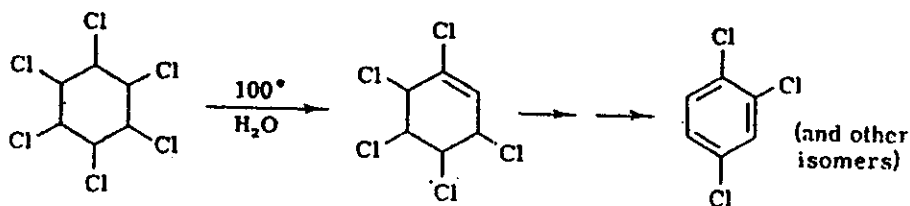
รูปที่ 6.22 สารประกอบที่มีกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนในตัวอย่างน้ำมันปิโตรเลียม

กลุ่ม cyclodienes เป็นสารฆ่าแมลงที่มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากมี bicyclic ring ที่แข็งแรงทำให้การเกิด carbonium ion เป็นไปได้ยาก ฉะนั้นปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดในสิ่งแวดล้อมคือปฏิกิริยา oxidation โดยจุลินทรีย์ในดิน พืช และสัตว์ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสารใหม่ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารที่เป็นพิษมากกว่าเดิม เช่น



สำหรับ aldrin เมื่อถูกออกซิไดส์เป็น dieldrin แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโดยปฏิกิริยาของแสง ultraviolet โดยอาศัย oxidase enzymes เกิดเป็น photodieldrin ต่อ

Lindane เป็นสาร chlorinated hydrocarbons ที่มีความเฉื่อยมากต่อหนึ่ง เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมจะเกิดการหลุดของ HCl ในสารละลายที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิ 100° C ได้อย่างช้าๆ



## แหล่งที่มาของปิโตรเลียมในสิ่งแวดล้อม

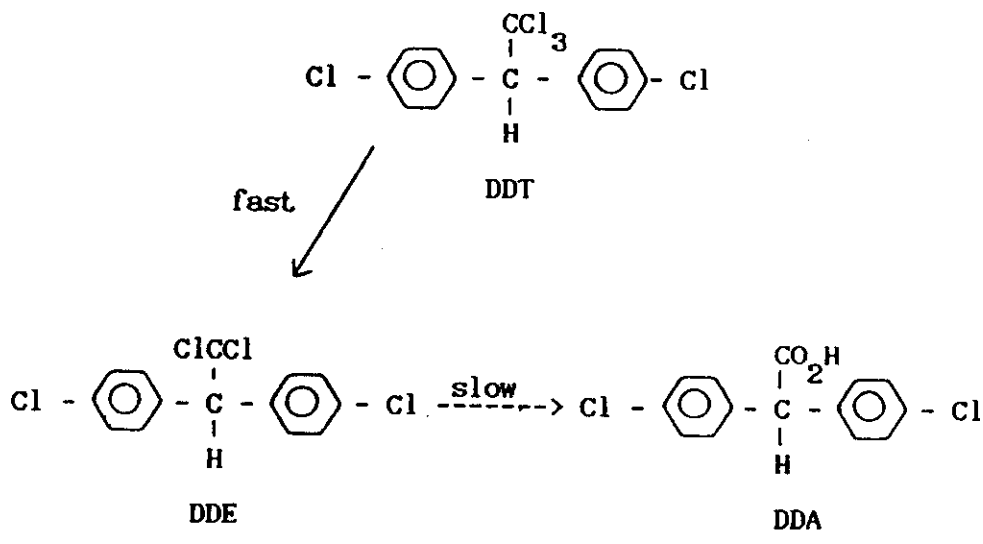
ปิโตรเลียมในสิ่งแวดล้อมเกิดจากหลายสาเหตุดังสรุปได้ในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แหล่งของปิโตรเลียมที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

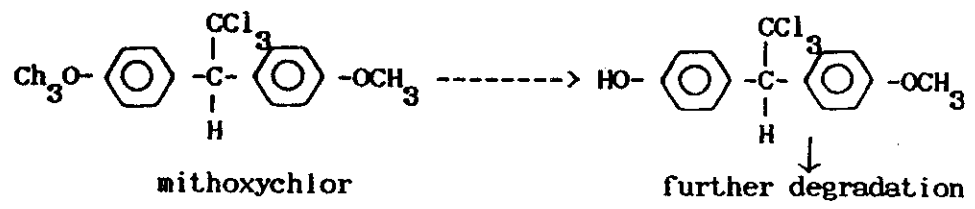
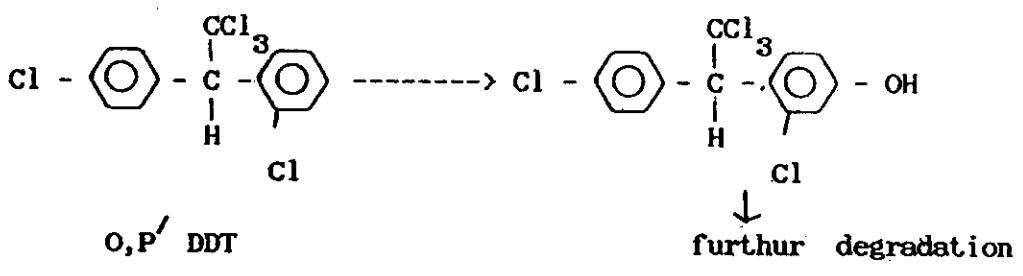
Source	Quantity
Marine environment	
Municipal waste (sewage)	+++
Urban run-off	++
Industrial waste	++
Accidents	++
Natural marine seeps	++
Terrestrial environment	+++
Incomplete combustion	++
Industrial operations	++

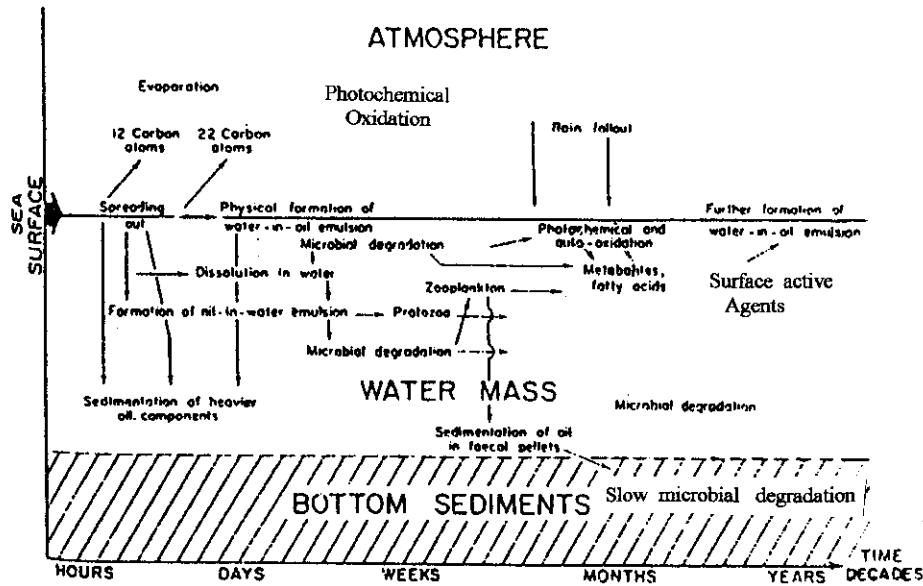
## การเปลี่ยนรูปของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อม (The Fate of Petroleum in the environment)

เมื่อปิโตรเลียมถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในทะเลจะมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยาที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปและเกิดเป็นสารใหม่ที่มีผลกระทบต่อสัตว์น้ำดังกล่าวกระบวนการพื้นฐานที่สรุปในรูปแบบที่ 6.23 และรายละเอียดมีดังนี้



Methoxychlor และสารที่มีสูตรใกล้เคียง DDT ชนิดที่ไม่มีกลุ่ม P, P' chloro ทำให้มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เมื่ออยู่ในดินจะถูกเปลี่ยนแปลงด้วยจุลินทรีย์ในดินเกิดเป็น phenol และเปลี่ยนรูปต่อเป็น acetate เช่น





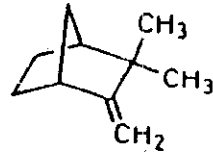
รูปที่ 6.23 กระบวนการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนรูปปิโตรเลียม

A. การกระจายตัว (Spreading or Dispersion) เนื่องจากปิโตรเลียมส่วนใหญ่จะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าน้ำทะเลซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อน้ำมันถูกปล่อยลงสู่ทะเลก็จะเกิดการกระจายตัวเป็นลักษณะแผ่นบาง ๆ อยู่ชั้นบนและแบ่งเป็นชั้น ๆ ขึ้น (slick) กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นและใช้เวลา 6 ถึง 10 ชั่วโมง ภายหลังจากที่ปิโตรเลียมถูกปล่อยสู่น้ำทะเล ซึ่งปกติแล้วชั้นน้ำมันจะมีความหนาดัง 0.1 มิลลิเมตรหรือบางกว่านี้ได้ขึ้นอยู่กับแรงต้านทาน แรงโน้มถ่วง กระแสน้ำและลม

B. การระเหย (Evaporation) หลังจากปิโตรเลียมถูกปล่อยลงสู่ทะเลจะเกิดการระเหยของโมเลกุลของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ระเหยกลายเป็นไอในอากาศ อัตราการระเหยจะขึ้นกับความเข้มข้นของสาร อุณหภูมิของอากาศและทะเล ลม และพื้นที่ผิวของแผ่นน้ำมันที่กระจาย

C. การละลาย (Dissolution) โมเลกุลของปิโตรเลียมชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ มีแนวโน้มที่จะละลายในน้ำทะเลได้ดีกว่าชนิดที่มีโมเลกุลสูง ตัวอย่างความสามารถของการละลายของไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตามลำดับได้ดังนี้ อะโรเมติก > ไฮโคลเฮกเซน > อัลเคนแบบกิ่ง > อัลเคนแบบเส้นตรง ดังแสดงในตาราง 9.7

Taxaphene เป็น chlorinated camphene ซึ่งเป็น สารผสม ของ สารไฮโดรคาร์บอนซึ่งมี 10 คาร์บอน และมีการแทนที่ด้วยคลอรีน 5 ถึง 12 อะตอม หลายสารผสมกันเช่น Phenacide หรือ Phenatox ซึ่งเป็นสาร camphene ซึ่งมีจำนวนคลอรีน 67-69%



สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของกลุ่ม Chlorohydrocarbon Pesticides ชนิดที่มีการใช้มากสรุปดังตารางที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าเป็นกลุ่มที่ละลายได้น้อยในน้ำเนื่องจากเป็นสารที่ค่าขั้วและโคโพลโมเมนต์ต่ำ

ตารางที่ 6.12 แสดงสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของ Chlorohydrocarbon Pesticides

Compound	LD <sub>50</sub> (mg kg <sup>-1</sup> body rats)	LC <sub>50</sub>	EC <sub>50</sub> <sup>a</sup>	Half-life range (soil, years)
		(estuarine fish µg L <sup>-1</sup> ; 96 hr)	(Daphnia, µg L <sup>-1</sup> ; 48 hr)	
4,4'-DDT	115	0.4-89	0.36	2.0-15.6
Dieldrin	50	0.9-34	250	0.5-3.0
Lindane	125	9-66	460	0.04-0.7
Aldrin	50	5-100	28	0.06-1.6

<sup>a</sup> Concentration that induces immobilization rather than lethality.

#### Environmental Degradation

สารฆ่าแมลงกลุ่ม chlorinated hydrocarbon เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมจะสามารถที่จะถูกสลายในสิ่งแวดล้อมได้อย่างช้า ๆ และเกิดเป็นสารอนุพันธ์ชนิดใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารใหม่ที่ยังคงมีพิษและความคงทนสูงเช่นกัน เช่น

DDT เมื่ออยู่ในน้ำซึ่งร้อนก็จะเกิดปฏิกิริยา dehydrochlorination คือ มีการหลุดออกไปของ HCl เกิดไปเป็น DDE (1, 1-dechloro-2, 2-bis (p-chloropheny) ethylene) ได้อย่างรวดเร็ว และ DDE สามารถเกิดปฏิกิริยา hydrolysis เป็น DDA อย่างช้า ๆ (เนื่องจากเป็น vinyl และ aryl chlorides ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้า) ฉะนั้น DDE จึงเป็นสารสุดท้ายที่เกิดจากการสลายของ DDT ที่พบในสิ่งแวดล้อมมากกว่า DDA

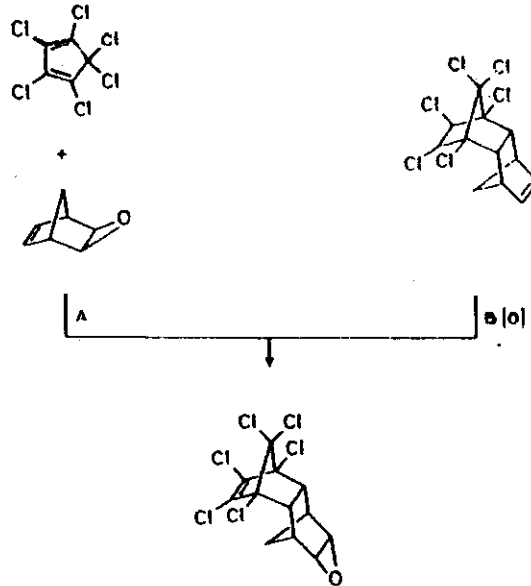


ตารางที่ 6.7 แสดง Aqueous Solubilities of Various C<sub>6</sub> Hydrocarbons

Compound	Structure	Aqueous Solubility	
		(g m <sup>-3</sup> )	(mole m <sup>-3</sup> )
n-Hexane	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>	9.5	0.11
2-Methylpentane	CH <sub>3</sub> CH(CH <sub>2</sub> )CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	13.8	0.16
Cyclohexane		55	0.65
Benzene		1780	22.8

D. เป็นสารแขวนลอย (Emulsion formation) เป็นสถานะหนึ่งของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กมากกระจายอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ในกรณีปิโตรเลียมในน้ำจะเกิดการแขวนลอยได้สองแบบ คือแบบน้ำมันแขวนลอยในน้ำ (O/W) หรือแบบน้ำแขวนลอยในน้ำมัน (W/O) การแขวนลอยแบบ O/W เกิดโดยหยดของปิโตรเลียมขนาดเล็กซึ่งปกติจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1-1 ไมครอนจะกระจายตัวอยู่ในน้ำ เป็นกระบวนการที่ทำให้การเกิดคราบน้ำมันเป็นไปได้อย่างขึ้น สำหรับ W/O นั้นพบว่าน้ำจะกระจายในน้ำมัน ในกรณีนี้พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของน้ำมันปิโตรเลียมน้อยลงเนื่องจากกระบวนการแพร่ของอากาศและสารอาหารที่เกิดขึ้นในสารแขวนลอยประเภทนี้มีโอกาสจะเกิดขึ้นน้อยลง

E. โฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) เป็นกระบวนการหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยอาศัยออกซิเจนและแสงแดดโดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เกิดหมู่ของสารที่มีออกซิเจนได้แก่อัลกอฮอล์ คีโตน อัลดีไฮด์ คาร์บอกไซคลิก แอลคิลและเปอร์ออกไซด์ ซึ่งพบว่ามักจะให้สารใหม่ที่มีพิษต่อแหล่งน้ำมากยิ่งขึ้น ปิโตรเลียมชนิดที่เป็นสารประกอบที่มีกลุ่มเบนไซลิก เมทิลีน ซึ่งประกอบด้วยหมู่ CH<sub>2</sub> ต่อกับวงอะโรมาติกดังแสดงในรูปข้างล่างนี้



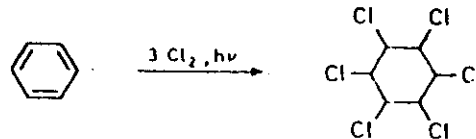
[O] ได้แก่ hydrogen peroxide – acetic anhydride หรือ peracetic หรือ perbenzoic

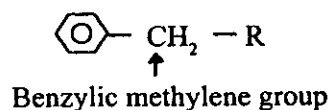
กลุ่มอื่นๆ ได้แก่

hexachlorocyclohexane ได้แก่ Lindane และ BHC

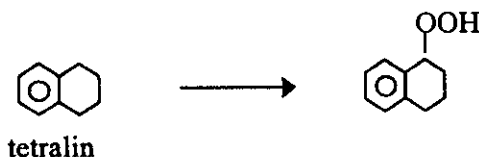
Lindane ชื่อทางเคมี  $\gamma$ -1, 2, 3, 4, 5, 6-Hexachlorocyclohexane

เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง chlorine กับ benzene โดยอาศัยแสง ultraviolet



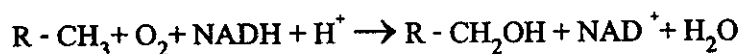


เมื่อเกิดปฏิกิริยานี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบ hydroperoxide ตัวอย่างเช่นปีโตรเลียมที่มี tetrahydronaphthalene



เมื่อปีโตรเลียมถูกแสงจึงทำให้ปีโตรเลียมเปลี่ยนสีและขุ่นมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดซึ่งก่อให้เกิดสารเรดิคัลหรือปฏิกิริยาต่าง ๆ ก่อนจะให้สารประกอบที่มีออกซิเจนดังกล่าวแล้ว

F. การเปลี่ยนแปลงโดยอาศัยจุลินทรีย์ (Microbial Transformation) การเปลี่ยนแปลงรูปของปีโตรเลียมหรือการย่อยสลายของปีโตรเลียมโดยเกิดจากจุลินทรีย์ซึ่งพบว่าจะเกิดหรือไม่ นั้นจะขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ประเภทหรือชนิดของจุลินทรีย์ ปริมาณออกซิเจน และอาหารที่มี เรียกขบวนการย่อยของปีโตรเลียมให้เกิดเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยจุลินทรีย์ว่า bioremediation พบว่าประเภทปีโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอัลเคนเส้นตรง (n-alkanes) จะถูกเปลี่ยนได้โดยจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic condition) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่เกิดเฮกเซนโดยอาศัยแบคทีเรียจะมีการเพิ่มออกซิเจนไปที่คาร์บอนตัวที่อยู่ท้ายสุด การเพิ่มของออกซิเจนนี้จะเพิ่มหนึ่งถึงสองอะตอมจึงเรียกกระบวนการนี้ว่าโมโนออกซิจีเนส (monooxygenase) โดยจะต้องอาศัยเอ็นไซม์ NAPH เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอน และลดพลังงานลดคังสมการ



รูปที่ 6.24 แสดงวิธีการออกซิไดส์ n-hexane โดยแบคทีเรียซึ่งจะให้กรด n-hexanoic และเกิดเบต้าออกซิเดชัน แล้วทำให้คาร์บอน 2 ตัวจากโมเลกุลหลุดจากกัน คาร์บอนตัวที่สองที่หลุดมาจะรวมกับ Acetyl-CoA แล้วเข้าสู่วงจรของเครป (tricarboxylic acid) สำหรับการหายใจและให้คาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด

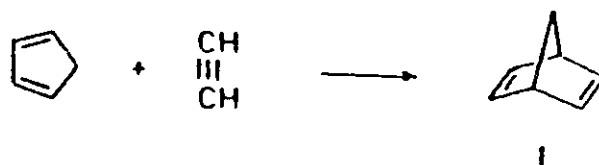
## 2. Cyclodiens

เป็นกลุ่มสารฆ่าแมลงที่มีความสำคัญมาก แม้ว่าจะระงับหลายประเทศได้จำกัดการใช้แล้ว เนื่องจากปัญหาพิษตกค้างสารกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างหลักที่สังเคราะห์ขึ้นตามหลักของ Diels-Alder reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเติม ethylene group ของ dienophile กับ cycloodiene สารฆ่าแมลงกลุ่มย่อยนี้ได้แก่ อัลดริน (aldrin), ดีลดริน (dieldrin)

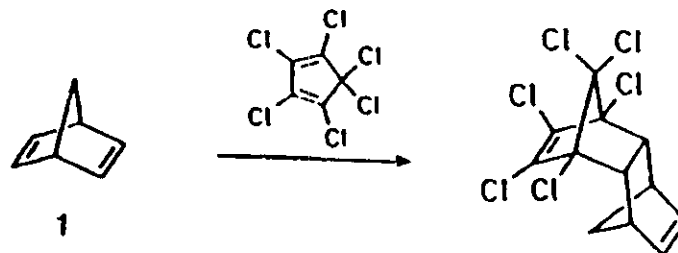
Aldrin ชื่อเคมี 1, 2, 3, 4, 10, 10 – Hexachloro-1 $\alpha$ , 4 $\alpha$ , 5 $\alpha$ , 8 $\alpha$

8 $\alpha\beta$  -1, 4:5, 8-dimethanonaphthalene

เตรียม diene ได้จากปฏิกิริยาของ cyclopentadiene กับ acetylene ที่ความดัน 1-2 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 150-400°C



และทำปฏิกิริยาต่อกับ hexachlorocyclopentadiene ได้เป็น Aldrin



Dieldrin ชื่อทางเคมี 345699-Hexachloro-1 $\alpha$ , 2 $\beta$ , 2 $\alpha$ , 3 $\beta$ , 6 $\beta$ , 6 $\alpha$ , 7 $\beta$ ,

7 $\alpha$ -octahydro-2, 7:3, 6 dimethanonaph

การเตรียม dieldrin ทำได้ 2 วิธีคือ

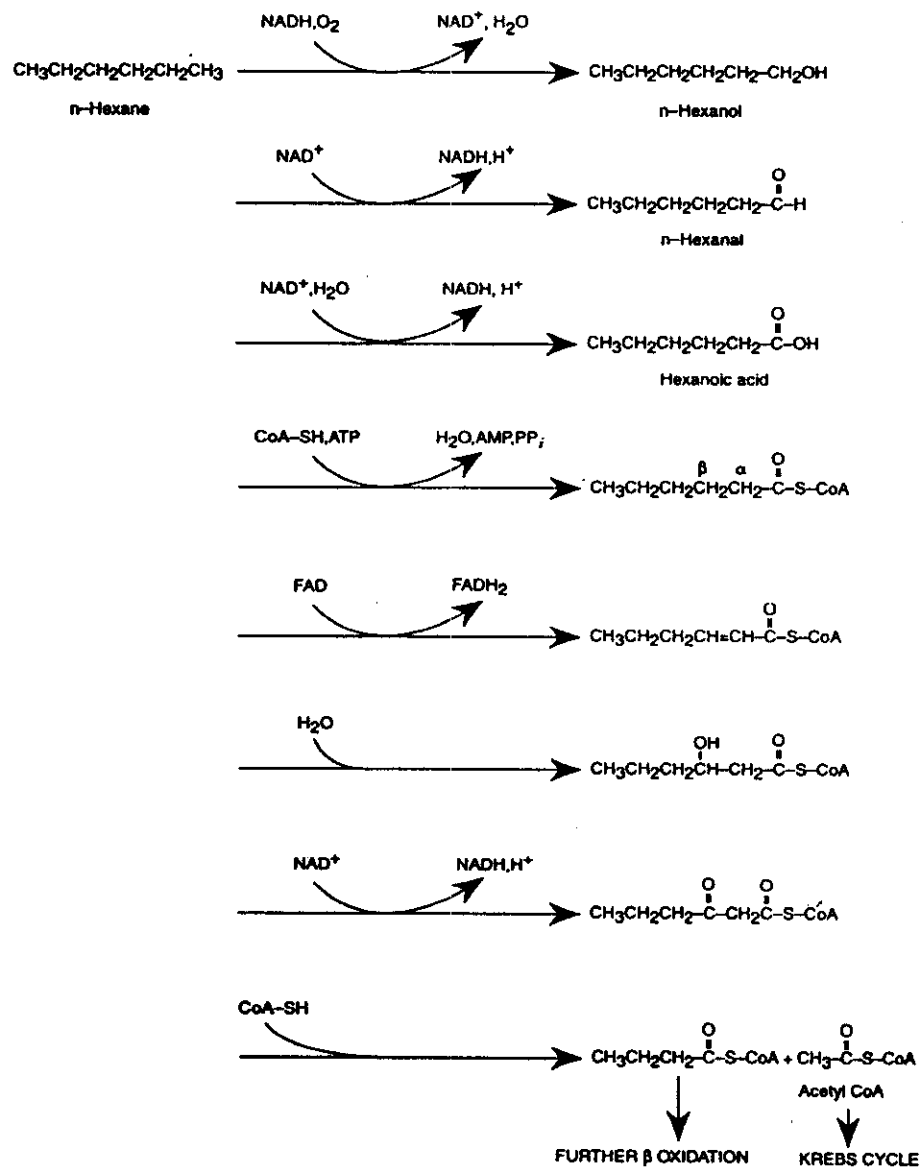
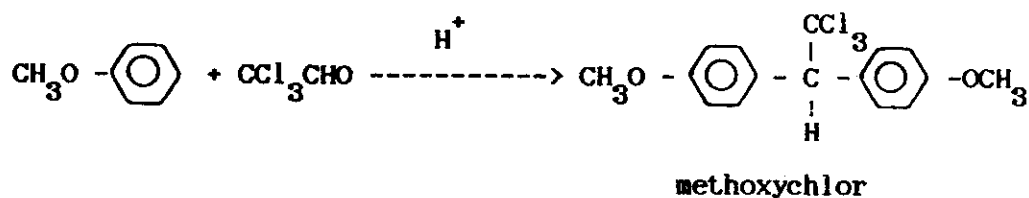


Fig. 6.24 A pathway for the microbial transformation of an *n*-alkane.

DDT ถึง 3 เท่าและมีราคาแพงกว่าเพราะใช้สารตั้งต้นที่มีราคาแพงกว่า Chlorobenzene จากปฏิกิริยาเตรียมดังนี้

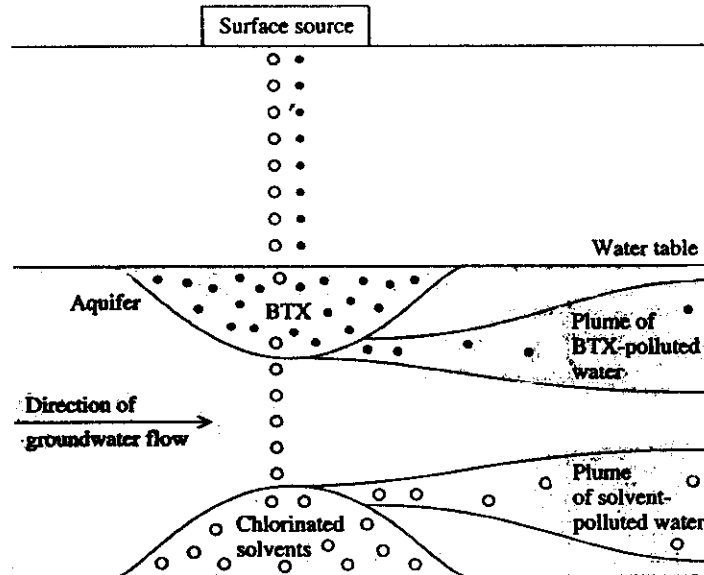


ตารางที่ 6.11 ตัวอย่างและวิธีการใช้ของสารฆ่าแมลงที่มีสูตรใกล้เคียง DDT

Product	LD50 (mg/Kg)	Pattern of Activity and Use
Methoxychlor	5000-7000	Ectoparasites (dairy cattle and fat stock), Household, in fodder and vegetable crops, For pest control in barns and stables, against cabbage seedpod weevil and cherry fruit fly
DFDT	900	Hygiene and veterinary sector, initial activity Superior to DDT, in crop protection (too Phytotoxic)
TDE Rothane	3400	On fruit and vegetable crops, more active Than DDT against leaf roller, tobacco hornworm, caterpillars on brassicars
Dilan	620-1320	Better activity than DDT against certain Aphid species and the Mexican bean beetle

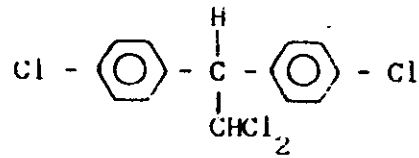
## ผลของ oil pollution

1. ผลทางตรง ต่อนก หรือสัตว์ทะเล โดยถ่านกโคมมาติดน้ำมัน ทำให้เกิดการบินไม่ได้ หรือก่อให้เกิดพิษต่อสัตว์โดยตรง
2. ผลทางอ้อม คราบน้ำมันจะกันแสงไม่ได้ทะลุไปในทะเล ทำให้สิ่งมีชีวิตได้รับแสงน้อยลง เกิดการย้ายที่อยู่ ทำให้ปริมาณลดลงและทำให้ปลาที่มนุษย์นำมาบริโภคมีกลิ่นได้  
สิ่งที่เป็นผลจากปิโตรเลียมที่น่าสนใจคือการปนเปื้อนของสาร BTX ในน้ำใต้ดินที่พบ อันเป็นสารผสมของแก๊สโซลีนและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมได้แก่เบนซีน ( $C_6H_6$ ) methylated derivative toluene ( $C_6H_5CH_3$ ) และ 3 ไอโซเมอร์ของโซลีน ( $C_6H_4(CH_3)_2$ ) เนื่องจากสารไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม BTX นี้มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ ดังแสดงในตาราง 6.8 เมื่อมีโอกาสอยู่ในน้ำจะลอยอยู่บนผิวของตาน้ำใต้ดินดังรูป 6.25 ทำให้ตรวจพบเสมอในน้ำใต้ดินซึ่งพบว่าจะมีความเข้มข้นประมาณ 1-50 ppb อย่างไรก็ตามพบว่าสารกลุ่มนี้โดยเฉพาะ alkylated



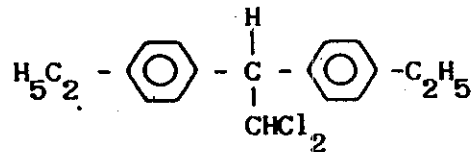
รูปที่ 6.25 The contamination of groundwater by organic chemicals.

สารฆ่าแมลงที่มีสูตรใกล้เคียง DDT ได้แก่ DDD, Ethylan และ methoxyechlor  
 DDD ชื่อเคมีคือ 1,1'-(2,2-Dichloroethylidene) bis (4-chlorobenzene)



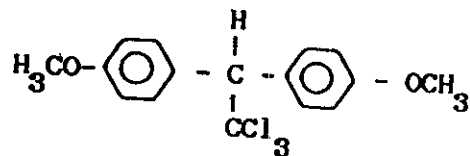
ชื่อทางการค้าคือ Rhothane สังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่าง  
 dichloroacetaldehyde และ chlorobenzene ปัจจุบันเลิกผลิตแล้ว

Ethylan ชื่อเคมีคือ 1,1'-(2,2-Dichloroethylidene) bis (4-ethylbenzene)



ชื่อทางการค้าคือ Perthane เตรียมได้จาก Condensation of dichloroacetaldehyde  
 กับ ethylbenzene

Methoxychlor (อาจเรียกชื่อสามัญว่า DMDT หรือ Methoxy-DDT) ชื่อทางเคมี  
 คือ 1,1'-(2,2,2-trichloroethylidene)



ปัจจุบันเป็นชนิดที่มีการนำมาใช้ในการฆ่าแมลงแทน DDT เนื่องจากก่อให้เกิด  
 ปัญหาสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเพราะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ในธรรมชาติและไม่สะสมใน  
 พวกเนื้อเยื่อไขมันจึงมีพิษต่อมนุษย์น้อย แต่เนื่องจากให้ผลในแง่เป็นสารฆ่าแมลงน้อยกว่า



ตารางที่ 6.8 ชนิดและสมบัติของสารอินทรีย์ทั่วไปที่ตรวจพบในแหล่งน้ำใต้ดินในอเมริกา

Chemical	Density (g/mL)	Water Solubility (g/L)
Present at 25–50% of sites:		
Chloroform (trichloromethane)	1.48	8.2
Bromodichloromethane	1.98	4.4
Dibromochloromethane	2.45	2.7
Bromoform (tribromomethane)	2.89	3.0
Present at a lesser fraction of sites:		
Trichloroethene	1.46	1.1
Tetrachloroethene (perchloroethene)	1.62	0.15
1,1,1-Trichloroethane	1.34	1.5
1,2-Dichloroethenes	1.26, 1.28	3.5, 6.3
1,1-Dichloroethane	1.18	5.5
Carbon tetrachloride	1.46	0.76
Dichloriodomethane	1.58	
Xylenes	0.86–0.88	0.18 (o)
1,2-Dichloropropane	1.16	2.8
Benzene	0.88	1.8
Toluene	0.87	0.54
Also commonly present at wells close to hazardous waste sites:		
Methylene chloride	1.33	20
Ethylbenzene	0.87	0.15
Acetone	0.79	sol
1,1-Dichloroethene	1.22	2.3
1,2-Dichloroethane	1.24	8.5
Vinyl chloride (chloroethene)	gas	8.8
Methyl ethyl ketone	0.80	268
Chlorobenzene	1.11	0.47
1,1,2-Trichloroethane	1.44	4.5
Chloroethane	0.90	5.7
Fluorotrichloromethane	gas	1.1
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1.60	2.7
Methyl isobutyl ketone	0.80	19

Source: Based upon U.S. EPA surveys of about 2% of U.S. water supplies, as discussed by R. Rajagopal and P. C. Yi in AEL, 1994, 4: 16 and 5: 16.

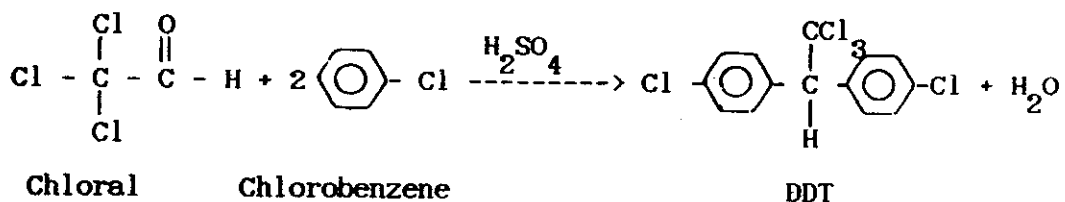
### 6.2.9.1 สารฆ่าแมลงกลุ่ม Chlorohydrocarbons

เป็นสารฆ่าแมลงที่มี H, C และ Cl เป็นองค์ประกอบแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มย่อย คือ Chlorinated Ethane Derivative, Cycloienes และกลุ่มอื่นๆ

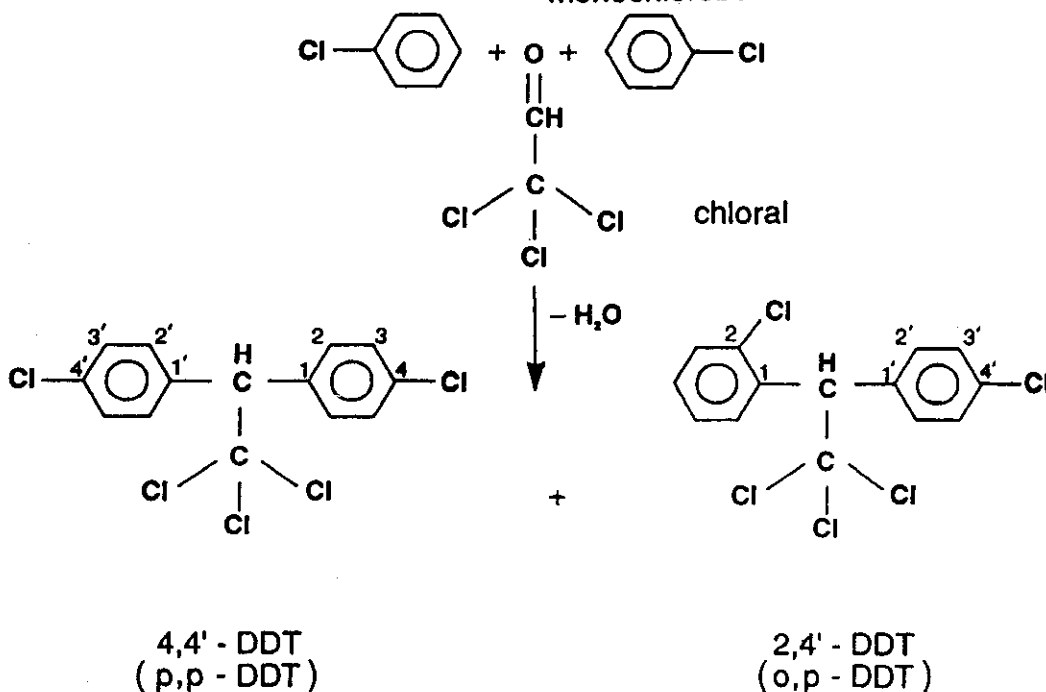
1. Chlorinated Ethane Derivatives ได้แก่ DDT และสารฆ่าแมลงชนิด

อื่นซึ่งมีสูตรใกล้เคียงกันกับ DDT ซึ่งมีการนำไปใช้ดังในตารางที่ 6.11

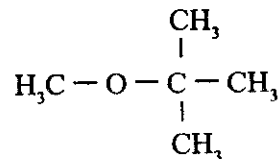
DDT ชื่อสามัญคือ dichlorobiphenyltrichloromethane ชื่อ IUPAC คือ 1, 1, 1-trichloro - 2, 2 - bis (p - chlorophenyl) ethane สังเคราะห์ครั้งแรกโดย Paul Muller ปี 1939 จากปฏิกิริยา Chloral กับ Chlorobenzene โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



กระบวนการสังเคราะห์นั้นจะได้เป็นสองไอโซเมอร์และพบว่าจะเกิดชนิดแรกมากกว่าดังนี้  
monochlorobenzene.



Benzene เป็นสารที่จะย่อยสลายในสิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการของการใช้ aerobic bacteria ได้จึงไม่อยู่ในสิ่งแวดล้อมนานมากนัก เมื่อเทียบกับ MTBE ซึ่งสลายตัวได้ยากกว่า MTBE (methyl tert-butyl ether) เป็น oxygenated gasoline additive มีโครงสร้างดังนี้



โดย MTBE จะมีค่า octane number เท่ากับ 118 จึงถูกนำมาใช้แทนสารตะกั่วในแก๊สโซลีน และมีผลในการลด Co ด้วยเนื่องจากเป็นกลุ่ม oxygenated MTBE เป็นสารที่สลายตัวยากไม่มีพิษ แต่ให้ผลสำคัญกับทำให้น้ำใต้ดินมีกลิ่นและรสชาติที่เปลี่ยนไป EPA จึงกำหนดให้ระดับ MTBE จะต้องไม่น้อยกว่า 20-40 ppb ในน้ำดื่มทั่วไป

#### 6.2.8 สารอนินทรีย์และแร่ธาตุ (Inorganic and Mineral Substances)

โลหะ (Metal) แบ่งได้เป็น

1. โลหะเบา (Light metal) พวกนี้มี density < 5 gm/cc
  2. โลหะหนัก (Heavy metal) พวกนี้จะมี density > 5 gm/cc
- ส่วนใหญ่แล้วโลหะมักจะเป็นพวกนี้

พิจารณาจากตารางธาตุ

หมู่ I – จัดเป็นพวกโลหะเบาทั้งหมดซึ่งมีความว่องไวมาก จึงไม่พบในรูปของธาตุ

IA - ความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นเมื่อเลขอะตอมสูงขึ้น

IB - ความเป็นพิษจะลดลงเมื่อเลขอะตอมสูงขึ้น เช่น Cu>Ag>Au

หมู่ II - จัดเป็นโลหะหนักทั้งหมดยกเว้น RA (จัดเป็นโลหะเบา)

- มีพิษมากกว่าหมู่ I

- พิษจะเพิ่มขึ้นเมื่อเลขอะตอมเพิ่ม

ตัวอย่างค่ามาตรฐานบางตัวของกลุ่มนี้ได้แก่

### 3. ระยะที่ 3

หลังจากที่ประเทศทั่วโลกได้ตระหนักถึงการนำสารอินทรีย์สังเคราะห์มาใช้ในการฆ่าศัตรูพืชและสัตว์แล้วก่อให้เกิดปัญหาต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม จึงมีการใช้สารเคมีอื่น ๆ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าวมาใช้แทน เช่น สารคล้ายฮอร์โมนและสารที่คล้ายเฟโรโมนส์

#### การจำแนกกลุ่มของสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์

คาซารทและคณะได้จำแนกจากลักษณะการใช้ประโยชน์เป็นกลุ่มใหญ่ได้ 5 กลุ่มคือ

1. สารฆ่าแมลง (Insecticides) เป็นสารเคมีที่ใช้ป้องกันกำจัดหรือขับไล่ศัตรูพืชและสัตว์ เช่น Organophosphate, Organochlorine, Carbamates
2. สารฆ่าวัชพืช (Herbicides) เป็นสารเคมีที่ใช้ทำลายวัชพืชซึ่งแย่งน้ำอาหาร และแสงสว่างจากพืชที่เพาะปลูก Carbamates, Triazines
3. สารฆ่าเชื้อรา (Fungicides) เป็นสารเคมีที่ใช้ฆ่าเชื้อราเช่นทองแดง ปรอท
4. สารฆ่าหนู หรือสัตว์แทะอื่น ๆ (Rodenticides)
5. สารรมควัน (Fumigants) เป็นสารเคมีซึ่งเมื่ออยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิกำหนด จะอยู่ในสภาพแก๊สซึ่งมีความเข้มข้นพอใช้ฆ่าศัตรูพืชได้

การจำแนกสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ตามองค์ประกอบทางเคมี ได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. Chlorohydrocarbons (Chlorinated Hydrocarbon) เป็นสารเคมีที่มี C, H และ Cl เป็นองค์ประกอบ
2. Organophosphates (Organophosphorus) เป็นสารเคมีที่มี P, O และ Cl เป็นองค์ประกอบ
3. อินทรีย์วัตถุอื่น ๆ เช่น Carbamate, Rotenone, Nicotine และ Organic sulfur compounds
4. อนินทรีย์วัตถุอื่น ๆ เช่น  $\text{CuSO}_4$ , Cu และ  $\text{SO}_2$

Zn	5.0	ppm
Cd	0.01	ppm
Hg	0.002	ppm

ทรานซิชัน (Transition) - ทั้งหมดจะเป็นโลหะหนักยกเว้น Sc, Y, Ti จะเป็นโลหะเบา

หมู่ III - เป็นโลหะหนักทั้งหมดยกเว้น B, Al

ตัวอย่างความเป็นพิษ 3A Tl>In>Ga

ที่เหลือทั้งหมดในตารางธาตุเป็น non metal

การเปรียบเทียบความเป็นพิษหมู่ 3 ถึง 8 นั้นจะใช้ชีวิต Toxicity/Atom

เนื่องจากมีค่าของน้ำหนักอะตอมที่มีความแปรผันกันมาก

พวกโลหะนี้ถ้าแบ่งตามความมากน้อย จะแบ่งได้เป็น

1. Abundant metal คือพวกที่มีมากในธรรมชาติได้แก่ O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K และ Mg

2. Trace metals คือพวกที่มี < 0.1% โดยน้ำหนักพวกนี้จะมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากถ้าได้รับมาก เช่น Pb, Ni, Cd, Be, Hg, Ag, Au และ Ba ในแง่สารมลพิษจะเน้นในเรื่องของ heavy metal และ trace metal

สมบัติของโลหะในสิ่งแวดล้อม

1. โลหะบางชนิดมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตในปริมาณที่มีน้อย ๆ โดยอาจจะอยู่ใน protein โดยทำหน้าที่เป็น Co-enzyme ช่วยในการสังเคราะห์ Protein หรือกรณี Light metal บางประเภทเช่น Na, K ซึ่งมีในผนังเซลล์เพื่อช่วยในการรักษาสมดุล เช่น Mo, Co, Zn, Cu, Fe

2. โลหะบางชนิดจะก่อให้เกิดพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงมากเกินไป

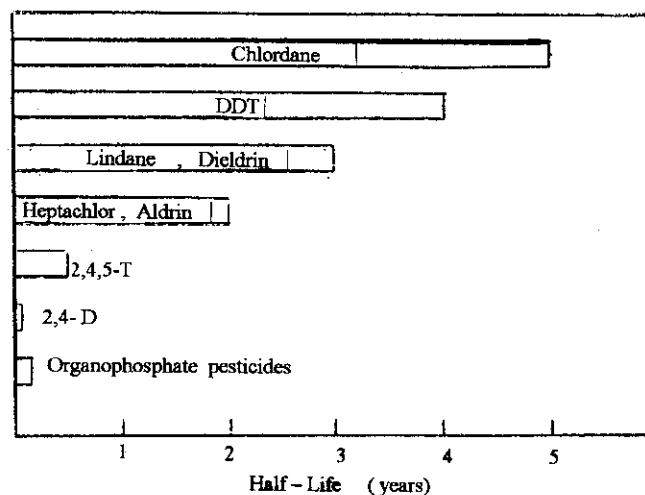
3. เมื่อโลหะอยู่ในสิ่งแวดล้อมอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กันเช่น โลหะเกลือ orgametallic compound

ชาวจีนได้เริ่มนำ As มาใช้เพื่อฆ่าแมลงเมื่อ 2 พันกว่าปีที่แล้วมา ปัจจุบันก็มีการนำสารเคมีชนิดนี้มาใช้อีกในรูปของ lead arsenate ( $PbAsO_4$ ), calcium arsenate ( $CaAsO_4$ ) และยังมีการใช้สารเคมีอื่น ๆ อีกเช่น sodium fluoride (NaF) ผงกำมะถัน (S) และคอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ )

1.2 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ที่สกัดจากพืช (Botanical pesticides) เป็นสารเคมีที่สกัดจากพืชจะมีอยู่หลายชนิด เช่น นิโคตินในใบยาสูบ หรือไพริทรินส์ จากดอกไม้ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า chrysanthemum สารเคมีพวกนี้โดยเฉพาะชนิดหลังนี้กำลังได้รับความสนใจและศึกษาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฆ่าแมลงได้เร็วและไม่มีพิษต่อคนและสัตว์เลี้ยง รวมถึงสลายตัวได้ดีในสิ่งแวดล้อม

## 2. ระยะที่ 2

มีการสังเคราะห์สารอินทรีย์มากใช้ฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ โดยเริ่มนำมาใช้ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่ 2 ถึงปัจจุบัน และมีการใช้อย่างแพร่หลาย สารเคมีที่สังเคราะห์นี้ส่วนใหญ่จะมีพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต และเนื่องจากสลายตัวได้ยากในสิ่งแวดล้อมโดยพิจารณาจาก half life ของสารกลุ่มนี้บางชนิดในรูปที่ 6.30 จึงให้ผลในความเสถียรในสิ่งแวดล้อมต่างกัน สารกลุ่มนี้ได้แก่ Chlorohydrocarbons, Organophosphate และ Carbamate



รูปที่ 6.30 half-life ของสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์บางชนิดในสิ่งแวดล้อม

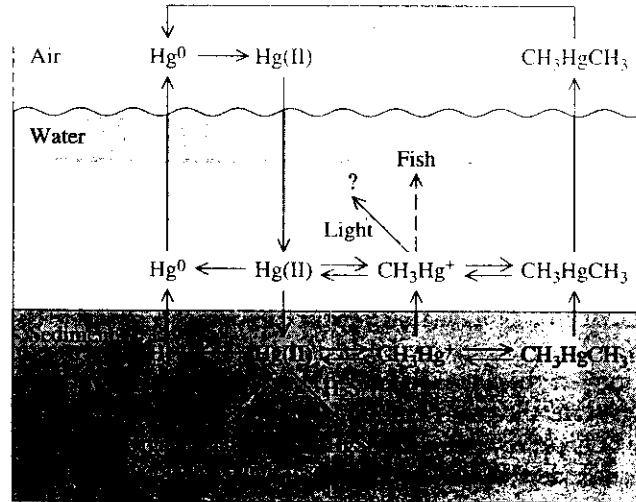
4. เป็นพวกที่ไม่ถูกย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม (nondegradable) จึงทำให้เกิดผลต่อสิ่งแวดล้อมในแง่ของการสะสมตามห่วงโซ่อาหาร (biomagnification หรือ bioamplification)

Trace element คือธาตุที่ระบบยอมให้มีในระดับต่ำ ๆ และนอกจากจะเป็นธาตุ ยังรวมถึงพวกโมเลกุลด้วย

ตารางที่ 6.9 รวบรวมชนิดของ trace element ที่มีในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในน้ำ

<i>Element</i>	<i>Sources</i>	<i>Effects and significance</i>	<i>U.S. Public Health Service Limit, mg/liter<sup>1</sup></i>
Arsenic	Mining by-product, pesticides, chemical waste	Toxic, possibly carcinogenic	0.05
Beryllium	Coal, nuclear power and space industries	Acute and chronic toxicity, possibly carcinogenic	Not given
Boron	Coal, detergent formulations, industrial wastes	Toxic to some plants	1.0
Cadmium	Industrial discharge, mining waste, metal plating, water pipes	Replaces zinc biochemically, causes high blood pressure and kidney damage, destroys testicular tissue and red blood cells, toxic to aquatic biota.	0.01
Chromium	Metal plating, cooling-tower water additive (chromate), normally found as Cr(VI) in polluted water	Essential trace element (glucose tolerance factor), possibly carcinogenic as Cr(VI)	0.05
Copper	Metal plating, industrial and domestic wastes, mining, mineral leaching	Essential trace element, not very toxic to animals, toxic to plants and algae at moderate levels	1.0
Fluorine (fluoride ion)	Natural geological sources, industrial waste, water additive	Prevents tooth decay at about 1 mg/L, causes mottled teeth and bone damage at around 5 mg/L in water	0.8-1.7 depending on temperature

ก็ตาม สุดท้ายจะถูกเปลี่ยนเป็น  $Hg^{2+}$  ได้ทั้งหมดโดยแบคทีเรียและสลายเป็น  $(CH_3)_2Hg$  หรือ  $CH_3Hg^+$  ได้ในที่สุด ซึ่งจะละลายน้ำได้ดี จึงมีโอกาสสะสมในสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ดี วัฏจักรของสารปรอทในน้ำแสดงดังในรูป 6.29



รูป 6.29 แสดงวัฏจักรของสารปรอทในน้ำ

## 6.2.9 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides)

สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) คือสารเคมีหรือยาที่ใช้ฆ่าหรือกำจัดสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นพืชหรือสัตว์ ซึ่งเป็นศัตรูของมนุษย์ สัตว์ หรือกับพืชที่มนุษย์เลี้ยงหรือปลูกไว้

### ประวัติการใช้สารฆ่าศัตรูพืชหรือสัตว์

การใช้สารฆ่าศัตรูพืชหรือสัตว์ แบ่งระยะการวิวัฒนาการใช้สารเคมีเป็น 3 ระยะคือ

#### 1. ระยะต้น

สารเคมีที่ใช้เป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ

##### 1.1 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic pesticides)



ตารางที่ 6.9 (ต่อ)

<i>Element</i>	<i>Sources</i>	<i>Effects and significance</i>	<i>U.S. Public Health Service Limit, mg/liter<sup>1</sup></i>
Iodine (iodide)	Industrial waste, natural brines, seawater intrusion	Prevents goiter	Not given
Iron	Corroded metal, industrial wastes, acid mine drainage, low pH water in contact with iron minerals	Essential nutrient (component of hemoglobin), not very toxic, damages materials (bathroom fixtures and clothing)	0.05
Lead	Industry, mining, plumbing, coal, gasoline	Toxicity (anemia, kidney disease, nervous system), wildlife destruction	0.05
Manganese	Mining, industrial waste, acid mine drainage, microbial action on manganese minerals at low pH	Relatively nontoxic to animals, toxic to plants at higher levels, stains materials (bathroom fixtures and clothing)	0.05
Mercury	Industrial waste, mining, pesticides, coal	Acute and chronic toxicity	Not given
Molybdenum	Industrial waste, natural sources, cooling-tower water additive	Possibly toxic to animals, essential for plants	Not given
Selenium	Natural geological sources, sulfur, coal	Essential at low levels, toxic at higher levels, causes "alkali disease" and "blind staggers" in cattle, possibly carcinogenic	0.01
Silver	Natural geological sources, mining, electroplating, film-processing wastes, disinfection of water	Causes blue-grey discoloration of skin, mucous membranes, eyes	0.05
Zinc	Industrial waste, metal plating, plumbing	Essential element in many metallo-enzymes, aids wound healing, toxic to plants at higher levels; major component of sewage sludge, limiting land disposal of sludge	5.0

## ปัญหาปรอทต่อสิ่งแวดล้อม

ปรอทเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อม อาจอยู่ได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ

1. Organic mercury compound ได้แก่ aryl หรือ alkyl mercury compounds
2. Non organic mercury compound ได้แก่ inorganic salt ( $\text{HgCl}_2$ ) หรือ

metallic compound (Hg)

รูปแบบของการทำให้เกิดพิษของโลหะหนักได้ดีคือการเกิด methylation ปรอททุกรูปแบบถ้าเกิดเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แล้วจะก่อให้เกิดพิษทั้งสิ้น แต่จะให้ผลต่างกันทั้งค่า half life และ retention time ก็แตกต่างกันด้วย บรรดาปรอทของปรอททั้งหมดพบว่า alkyl mercury compounds จะเกิดพิษได้มาก เช่น monomethyl mercury ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) หรือ dimethyl mercury ( $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ) เนื่องจากละลายได้ดีในเนื้อเยื่อที่เป็นไขมันในสัตว์และสะสมในลูกโซ่อาหารที่มี (bioaccumulation) นอกจากนี้ยังพบว่า  $\text{CH}_3\text{Hg}$  ยังสามารถรวมกับกลุ่ม amino acid ที่มี S แล้วกลายเป็นสารประกอบ  $\text{CH}_3\text{HgX}$  (X = amino acid ที่มี S) ซึ่งสามารถละลายในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและยังผ่านไปสะสมในเนื้อเยื่อสมองหรืออื่น ๆ ได้ พวกนี้มีครึ่งชีวิต ประมาณ 70 วัน

พวกสารอนินทรีย์ของปรอทไม่มีพิษมากนักเนื่องจากสามารถรวมกับไอออนคลอไรด์ในท้องแล้วเปลี่ยนเป็น  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$

การเกิด alkyl mercury compound ในสิ่งแวดล้อม อาจเกิดการปนเปื้อนจากแหล่งที่มีการใช้โดยตรงปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ หรือเกิดจากการเกิด methylation ของปรอทในรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยลงน้ำโดยอาศัยพวกแบคทีเรียทั้งชนิดที่เป็น aerobic และ anaerobic bacteria ที่อยู่ตามดิน โคลน หรือในแหล่งน้ำ

ในสภาวะที่เป็น reducing condition ปรอทมักจะอยู่ในรูปของปรอทซัลไฟด์ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมากหรือไม่ละลายเลยเป็นส่วนใหญ่ แต่พบว่าไม่ว่าปรอทจะอยู่ในรูปใด

ธาตุบางชนิดเป็นอาหารของพืชและสัตว์ และบางชนิดก่อให้เกิดพิษกับสิ่งแวดล้อม เช่น ตะกั่ว และปรอท

โลหะหนักเป็นธาตุชนิดที่เป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด ธาตุพวกนี้ส่วนใหญ่จะเป็นธาตุอยู่ทางมุมขวามือด้านล่างของตารางธาตุ และรวมถึงเหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม และปรอท ธาตุพวกนี้ส่วนใหญ่แล้วสามารถที่จะเกิดพันธะกับซัลเฟอร์ในเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์เคลื่อนที่ไม่ได้ และยังเกิดพันธะได้อีกกับ protein carboxylic acid ( $-CO_2H$ ) และ amino ( $-N_2H$ ) ไอออนของแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดงและปรอทจึงรวมกับเซลล์เมมเบรน และเคลื่อนตัวผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ได้ นอกจากนี้โลหะหนักยังสามารถตกตะกอนฟอสเฟตซึ่งเป็นสารประกอบในสิ่งมีชีวิต หรือไปเร่งการสลายตัวของสารประกอบ

นอกจากนี้พบว่าพวก metalloids เช่น Ar, Se เป็นสารที่อยู่และมีผลในสิ่งแวดล้อมด้วย

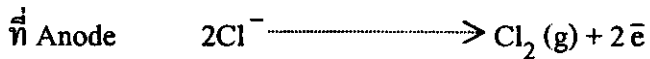
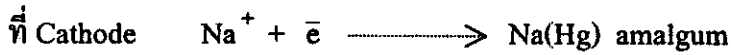
โรงงานอุตสาหกรรมอนินทรีย์เคมีมากมายที่ให้ trace element ในน้ำ เช่น โรงงานผลิต chlor-alkali, hydrochloric acid, sodium dichromate ฯลฯ

การควบคุมและกำจัดสารอนินทรีย์จะใช้วิธีดังต่อไปนี้

1. equalization, alkaline, precipitation and settling clarification เพื่อตกตะกอนโลหะและฟลูออไรด์
2. การกรองแบบ dual-media เพื่อกำจัดสารประกอบโลหะที่แขวนลอย
3. ตกตะกอนซัลไฟด์พวก As, Cd, Cu, Pb, Hg และ Ag
4. ใช้ coagulants เพื่อทำให้สารรวมตัวและตกตะกอนแยกออกมา
5. รีดักชัน Cr(VI) เป็น Cr(III) โดยใช้ Fe(II)
6. ใช้อากาศลด COD และ Fe(II) เป็น  $Fe(OH)_3$
7. dechlorination โดย catalytic decomposition chemical treatment หรือ thermal treatment

การใช้ประโยชน์ของปรอทมีหลายอย่าง ได้แก่

1. ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ หลอดไฟ สวิตช์ แบตเตอรี่ วิทยุ
2. อุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งมี Hg เป็นสารประกอบในอุตสาหกรรม ซึ่งใส่เพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษยุ่ยง่าย และฆ่าเชื้อรา
3. อุตสาหกรรม “chlor alkaline” ซึ่งผลิต NaOH และ Cl<sub>2</sub> จะมีการใช้กระดาษกาว Hg cathode โดยปฏิกิริยาที่เกิด



ถ้านำ Na(Hg) มาทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงได้ NaOH



วิธีนี้ Hg มีโอกาสที่จะถูกปล่อยสู่อากาศและนำไปมาก

4. ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชและฆ่าเชื้อรา โดยอาจจะคลุกกับเมล็ดพืชเพื่อป้องกันเชื้อราหรือศัตรูพืช
5. อุตสาหกรรมสี เพื่อใช้ฆ่าเชื้อราหรือ fungi ในสีน้ำ
6. จะใช้ amalgum ของ Hg ในการอุดฟัน
7. ใช้เป็นเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหรือโมโนเมอร์ในการผลิตพลาสติกพีวีซี

การนำปรอทมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย ทำให้ปรอทมีโอกาสกระจายทั่วทุกหนทุกแห่งในสิ่งแวดล้อม เป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาปรอทเป็นพิษ ซึ่งพบว่าปรอทในสถานะที่เป็นของเหลวเป็นพิษไม่มากนัก แต่ถ้าอยู่สถานะที่เป็นไอจะก่อให้เกิดพิษอย่างแรง และนอกจากอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้แล้ว ยังพบว่าอุตสาหกรรมการทำเหมือง หรือการใช้ถ่านหิน หรือจากกระบวนการสีกร่อนของแร่ธาตุต่าง ๆ ในธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปของโลหะหรือซัลไฟด์ก็มีโอกาสที่จะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

โดยที่โลหะมีปริมาณน้อยที่ปนอยู่ในน้ำนั้นมาจากกระบวนการกระจายในน้ำซึ่ง  
เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เคมีและสมดุล

การละลายของน้ำในแหล่งธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับ

1. pH
2. ชนิดของความเข้มข้นของลิแกนด์และ chelating agent
3. oxidation state ของส่วนประกอบของแร่
4. ระบบรีดอกซ์ของสิ่งแวดล้อม

โลหะที่มีปริมาณน้อยอาจจะอยู่ในแหล่งน้ำในรูปของสารแขวนลอย คอลลอยด์  
หรือสารละลายอยู่ โดยแบ่งตามขนาด ถ้าเป็นสารแขวนลอยจะมีขนาดมากกว่า 100  $\mu\text{m}$  ถ้า  
เป็นสารละลายขนาดจะเล็กกว่า 1  $\mu\text{m}$  และคอลลอยด์จะมีขนาด 1-100  $\mu\text{m}$

ในรูปสารแขวนลอยและคอลลอยด์นั้นจะประกอบด้วย

1. สารประกอบหรือสารผสมของโลหะในรูปของไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ ซิลิเกต  
หรือซัลไฟด์

2. รวมกับดิน ทราย หรือสารอินทรีย์โดยกระบวนการดูดซับ ไอออนเอกเซนจ์  
หรือ การเกิดสารเชิงซ้อน

สารในรูปที่ละลายได้จะอยู่ในรูป ไอออน อย่างง่าย หรือเชิงซ้อน หรือ  
unionized organometallic chelates หรือสารเชิงซ้อน

ปรอทมีสีเงินและลักษณะจะกลิ้งไปมาได้เหมือนน้ำ มนุษย์ในยุคก่อนจึงเรียกกันว่า “quicksilver” และนำมาใช้ประโยชน์ในแง่ของการชุบเคลือบผิวโลหะต่าง ๆ เช่น ทองแดง ทองคำแต่คนในยุคก่อนไม่ค่อยมีใครนิยมใช้สารปรอทกันเนื่องจากตระหนักถึงพิษภัยของปรอทที่เกิดขึ้น

ในปี พ.ศ. 2506 ที่อ่าวมินามาตะทางภาคใต้ของญี่ปุ่นได้ตรวจพบว่าชาวประมงแถบนั้นมีอาการผิดปกติคือสายตามัว เกิดอาการเหน็บชาและบางส่วนเป็นอัมพาต ความจำเสื่อม บางคนเสียชีวิต และในที่สุดก็ตาย จนถึงปี พ.ศ. 2508 พบว่ามีคนเกิดอาการนี้ถึง 40 คน จากการสอบสวนและศึกษาพบว่าสาเหตุของโรคนี้เกิดจากสารประกอบพวกปรอท ซึ่งมีปริมาณสูงที่อ่าวมินามาตะ จึงเรียกโรคนี้ว่า “มินามาตะ”

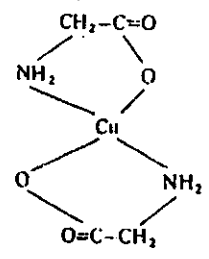
การสะสมของสารปรอทเนื่องจากที่นี่มีอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกพีวีซีซึ่งในกระบวนการจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น Hg(II) ในรูปของ HgCl<sub>2</sub> ซึ่งมีการรั่วไหลลงสู่อ่าวนี้เป็นประจำทำให้เกิดการสะสมและเกิดปัญหาดังกล่าว

สมบัติทางเคมีและกายภาพที่ดีของปรอท ทำให้มีสมบัติที่ต่างจากโลหะอื่น ๆ จึงทำให้มีการนำไปใช้ในกิจกรรมและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งสมบัติที่ดีคือ

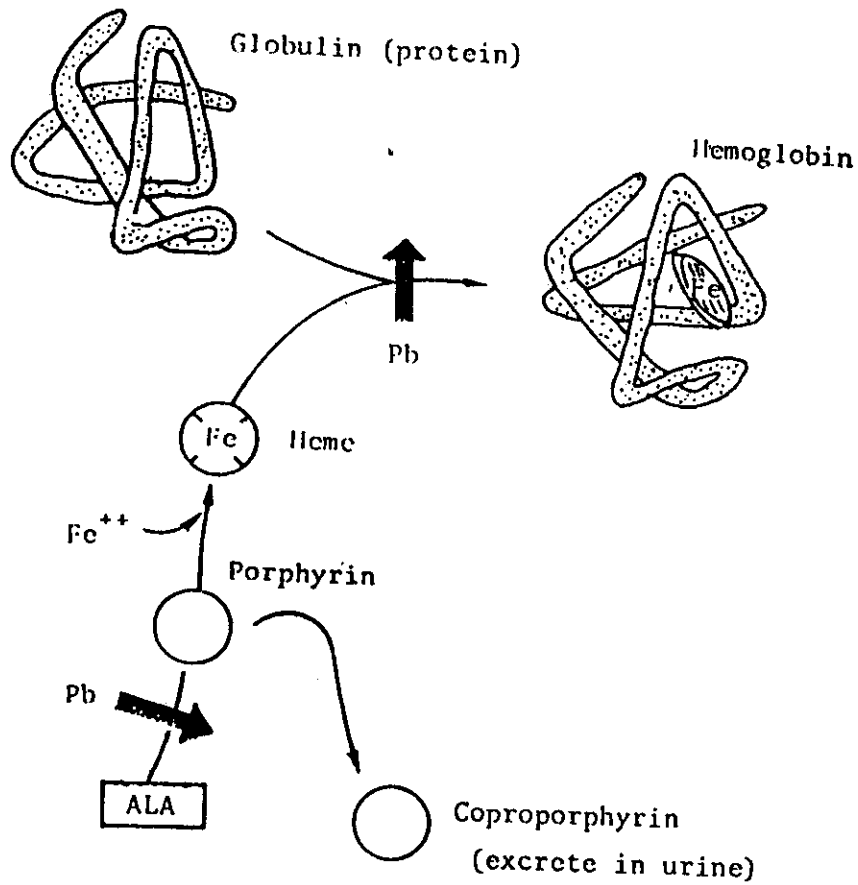
1. ปรอทที่บริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องจุดหลอมเหลว  $-38.87^{\circ}\text{C}$ .
2. มีการขยายตัวได้สม่ำเสมอ
3. โลหะหลาย ๆ ชนิดเช่น Cu, Ag สามารถจะละลายได้ในปรอท (ยกเว้น Fe และ Pt) ได้เป็นสารละลายของแข็งที่เรียกว่า amalgam
4. สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

สารประกอบปรอทมีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 โดยสารประกอบเมอคิวรัสจะมี Hg สองอะตอมอยู่ด้วยกันเป็นลักษณะโคเมอร์เสมอ และเมื่อละลายน้ำจะอยู่ในรูปของ Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup> ซึ่งจะมีสมบัติทางเคมีคล้ายกับไอออนเดี่ยวทั่ว ๆ ไป เช่น Ag<sup>+</sup> ก็เกิดตะกอนกับคลอไรด์ได้ตะกอน Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> ซึ่งเรียกทั่วไปว่าคาโลเมล (calomel) ใช้เป็นอิเล็กโทรดในเซลล์ไฟฟ้า Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> เมื่อถูกแสงสว่างจะสลายให้ Hg และ HgCl<sub>2</sub> ซึ่งเป็นพิษร้ายแรง

ตารางที่ 6.10 Stumm และ Bilinski ได้แสดงตัวอย่างชนิดและรูปแบบโลหะที่อยู่ในน้ำ

Form	Examples
Free metal ions	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}), \text{Fe}^{3+}(\text{aq}), \text{Pb}^{2+}(\text{aq})$
Inorganic ion pairs	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}, \text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$
Inorganic complexes	$\text{CdCl}^+$
Organic complexes	<p>Me-SR, Me-OOCR</p> 
Metal species complex bound to high molecular weight organic material	<p>Me-lipids                      Me-humic acid                      Me-polysaccharites "Lakes"                      "Gelbstoffe"</p>
Metal species in the form of highly dispersed colloids	$\text{Fe}(\text{OH})_3, \text{Mn(IV) oxides}, \text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Metal species sorbed on colloids Precipitates, organic particles, remains of living organisms	$\text{Me}_x(\text{OH})_y, \text{MeCO}_3, \text{MeS}, \text{etc. on clays}$

รูป 6.26 และ รูป 6.27 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของโลหะน้ำและช่วงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอนินทรีย์ในน้ำส่วนผิวหน้า



รูปที่ 6.28 แสดงการขัดขวางการสร้าง hemoglobin เนื่องจากตะกั่ว

### ปรอท (Hg)

มนุษย์เรารู้จักนำปรอทมาใช้ทำเป็นสีและยาฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ เมื่อประมาณ 2 พันปี แล้ว สารประกอบที่มีมากที่สุดทางธรรมชาติคือ cinnabar (HgS) ซึ่งมีสีแดงและไม่ละลายน้ำ การสกัด Hg ออกมาโดยทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผากับออกซิเจน ดังนี้





After membrane filters						
After dialysis						
In solution						
Free hydrated ions	Inorganic ion pairs inorganic complexes	Organic complexes	Metals bound with high molecular organic substances	Metals in forms of dispersed colloids	Metals adsorbed on colloids	suspended solids particles debris of living organisms
Size	1 nm	10 nm		100 nm		
	0.001 $\mu\text{m}$	0.01 $\mu\text{m}$		0.1 $\mu\text{m}$		
Examples: (M = metal)						
Cu, $\text{aq}^{2+}$	$\text{Cu}(\text{OH})_2^{2+}$	M-SR	M-lipids	FeOOH	$\text{M}_x(\text{OH})_y$	
Fe, $\text{aq}^{3+}$	$\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$	M-OOCR	M-humic substances	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\text{MCO}_3$	
Pb, $\text{aq}^{2+}$	$\text{CuCO}_3$		M-poly-saccharides	Mn(IV)oxides	MS	
	$\text{AgSH}^-$			$\text{Mn}_7\text{O}_{13} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	M on clay particles	
	$\text{CdCl}^+$			$\text{Na}_4\text{Mn}_{14}\text{O}_{27}$		
	$\text{CoOH}^+$			$\text{Ag}_2\text{S}$	FeOOH	
	$\text{Zn}(\text{OH})_3^-$					
	$\text{Ag}_2\text{S}_3\text{H}_2^{2-}$					

รูปที่ 6.26 รูปแบบต่าง ๆ ของโลหะในน้ำและชนิดและค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของพวกโลหะในแหล่งน้ำ

## ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วที่อยู่ในน้ำจะมีค่าออกซิเดชันสเตทเท่ากับ 2 แหล่งส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมและเหมืองแร่ ส่วนตะกั่วในอากาศมาจาก แก๊ส โซลีนนั้นจะอยู่ในรูปของ tetraethyl lead หรือ tetraethyl lead เฉลี่ยค่าของการรับสารตะกั่วของมนุษย์จากแหล่งต่าง ๆ คือ ดังนี้

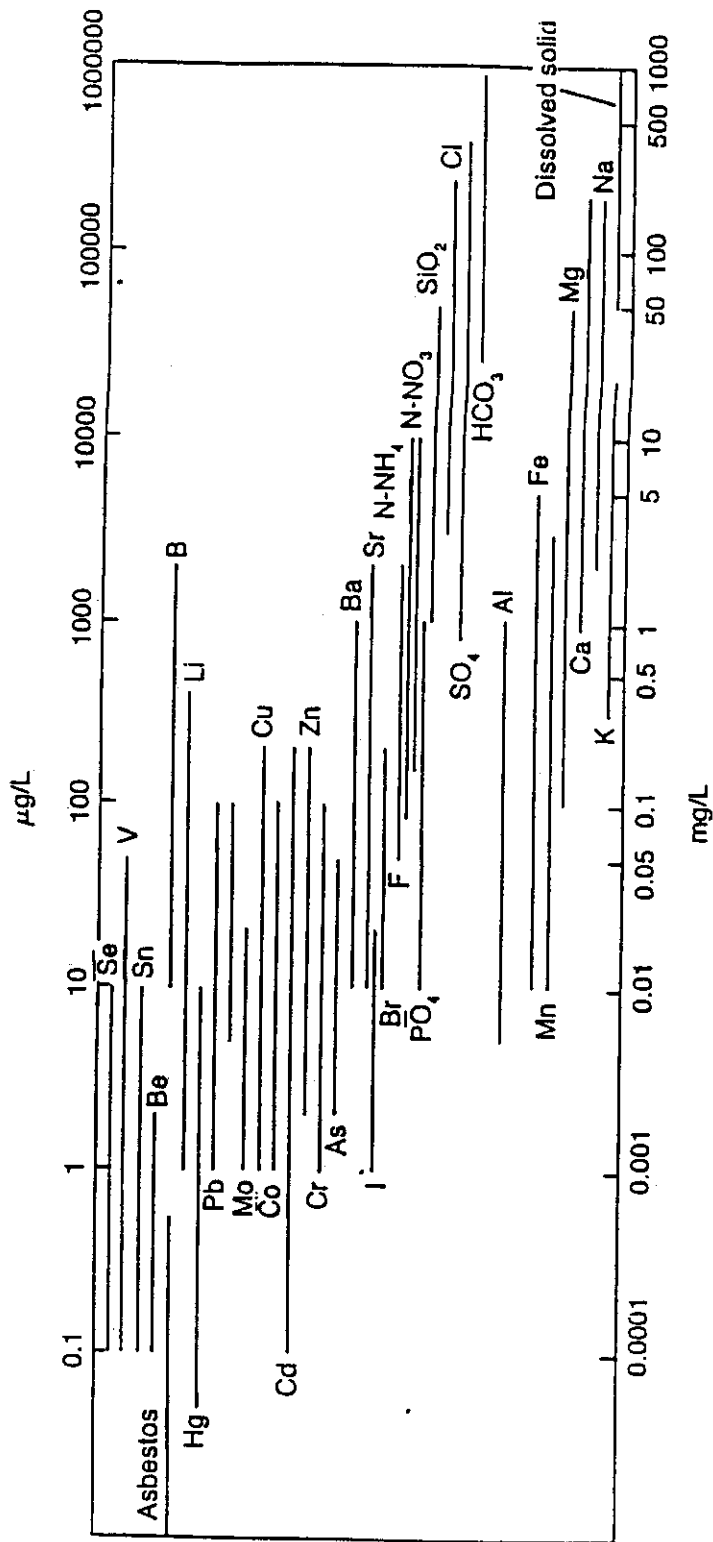
จากอาหาร	20 µg/day
น้ำ	1 µg/day
อากาศ (ในเมือง)	10 µg/day

รูปแบบของสารตะกั่วซึ่งอยู่ในรูปสารอินทรีย์ และอนินทรีย์นั้นพบว่ารูปที่เป็นสารอินทรีย์จะเข้าทางร่างกายโดยทางผิวหนังและหายใจ ส่วนรูปสารอนินทรีย์จะเข้าได้โดยการกินและหายใจ พบว่าตะกั่วที่ได้รับโดยการหายใจจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจึงเป็นโอกาสให้ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้มากกว่า

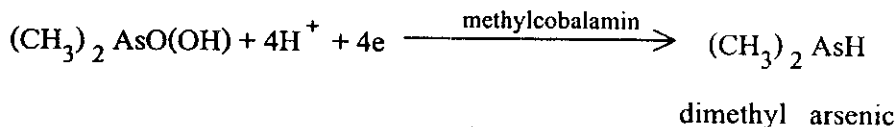
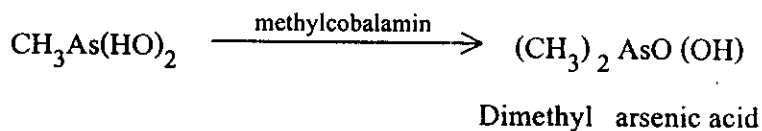
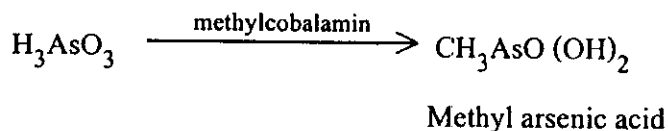
เนื่องจากตะกั่วมีลักษณะคล้ายกับ  $Ca^{2+}$  เมื่อเข้าสู่ร่างกายจึงมักจะรวมอยู่กับ  $Ca^{2+}$  ถ้าร่างกายมีการทำ  $Ca^{2+}$  ที่มี  $Pb^{2+}$  ผสมอยู่ไปใช้ในภาวะที่จำเป็นก็จะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้

พิษของตะกั่ว มี 2 แบบคือ แบบเฉียบพลัน เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้ วิงเวียน การกระตุกของกล้ามเนื้อ ฯลฯ และแบบเรื้อรังที่สำคัญคือโรคโลหิตจาง

การเกิดโรคโลหิตจางเนื่องจากตะกั่วจะขัดขวางการสร้าง hemoglobin ของเม็ดเลือดแดง ซึ่งประกอบด้วย globulin protein และ heme ตะกั่วจะเกี่ยวข้องกับการสร้าง hemoglobin ใน 2 ระยะคือ ระยะที่ 1 ขัดขวางการทำงานของ ALA (ที่จะทำให้เกิด porphyrin ซึ่งจะรวมกับเหล็กเกิดเป็น heme) ระยะที่ 2 คือขัดขวางการรวมตัวของ heme และ globulin ทำให้เกิดเป็น Haemoglobin ดังแสดงในรูป 6.28



รูปที่ 6.27 ช่วงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอนินทรีย์ในน้ำส่วนผิวหน้าและชนิดค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของพวกโลหะในแหล่งน้ำ



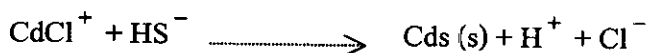
### Cadmium

แหล่งที่ปล่อยแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมคือเหมืองแร่และอุตสาหกรรม คุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับสังกะสี ฉะนั้นกลไกการเกิดพิษและผลต่อสิ่งแวดล้อมจึงคล้ายกัน โรคที่เกิดจากพิษแคดเมียมคือ อีไต อีไต

แคดเมียมและสังกะสีจะมีอยู่ในน้ำและอยู่ในรูปตะกอนด้วยบริเวณรอบอ่าวพบว่ามีถึง 130 พีพีเอ็ม และบริเวณที่ห่างออกไปมี 1.9 พีพีเอ็ม ในช่วงฤดูร้อนจะพบว่าปริมาณของแคดเมียมจะมีความแตกต่างกันโดย ที่ผิวจะมีแคดเมียมละลายอยู่มากกว่าในรูปของ  $\text{CdCl}^+$  ที่ท้องน้ำจะพบแคดเมียมน้อยกว่าเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตเกิดเป็นซัลไฟด์



และซัลไฟด์ที่เกิดจะทำให้แคดเมียมตกตะกอน

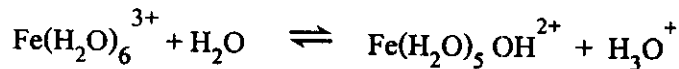


โลหะในธรรมชาติอาจอยู่รูปไอออนของโลหะร่วมกับโมเลกุลของน้ำหรือแอนไอออนในน้ำเช่น  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  กรดอินทรีย์และกรดอะมิโนรวมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น นอกจากนั้นแล้วพบว่าอาจรวมกับสารคอลลอยด์หรือ particulates เช่น ดินเหนียว แมงกานีสออกไซด์ และสารอินทรีย์

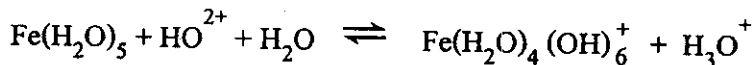
ปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างไอออนของโลหะกับสารชนิดอื่นที่มีในน้ำได้แก่

### 1. Hydrolysis Reaction of Metal Ions

โลหะที่มีเลขประจุสูงเช่น  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายในสารละลาย

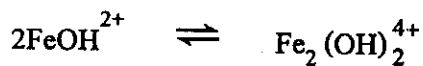


และยังเกิดไฮโดรไลซิสต่อได้



พวกโคเวเลนต์ได้แก่  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  ได้ในสถานะพีเอชของแหล่งน้ำธรรมชาติได้เช่นกัน

การไฮโดรไลซิสของไอออนของโลหะในน้ำจะทำให้เกิดสารเชิงซ้อน polynuclear ซึ่งมีโลหะมากกว่า 1 ไอออน เช่น



ซึ่งสารพวกนี้มีความสำคัญเป็นรูปของโลหะที่มีอยู่เข้มข้น

2. Complexation of Metal Ions ไอออนของโลหะทำปฏิกิริยาสารเชิงซ้อนอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทั้งที่มีอยู่ในธรรมชาติและจากที่ถูกปล่อยลงในน้ำ ชนิดของสารเชิงซ้อนอนินทรีย์ที่มีมากได้แก่  $\text{Ce}^-$ ,  $\text{So}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$  และ  $\text{PO}_4^{3-}$  ปฏิกิริยาการเกิดเหมือนไฮโดรไลซิสของโลหะซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของโลหะและลิแกนด์และค่าพีเอช

ลิแกนด์ที่เป็นสารอนินทรีย์จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนขึ้นกับ

- ความเสถียรของผลิตภัณฑ์จากไฮโดรไลซิส

- แนวโน้มของไอออนของโลหะที่จะเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น Pb(II), Zn(II) Cd(II) และ Hg(II) จะเกิดสารเชิงซ้อนในสารละลายที่มี  $Cl^-$  และหรือ  $SO_4^{2-}$  ที่ความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่ใกล้เคียงกันในน้ำทะเล
- ค่าพีเอชจะขึ้นกับสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ไฮโดรไลซิสที่เกิดซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของลิแกนด์

โลหะยังสามารถเกิดพันธะได้กับสารในธรรมชาติและสารอินทรีย์สังเคราะห์โดยวิธีการเกิดพันธะกับ

1. อะตอมของคาร์บอนให้เป็นสารประกอบ Organomettalic
2. กลุ่มคาร์บอกซิลิกเกิดเป็น organic acid
3. อะตอมที่ให้อิเล็กตรอนคือ O, N, S, P เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน
4. กลุ่มที่ให้ II อิเล็กตรอนเช่น Olefinic bonds aromatic ring

พบว่าพีเอชในน้ำธรรมชาติระหว่าง 5-9.5 ในสภาวะที่เป็น aerobic จะพบว่าไอออนของโลหะอิสระจะเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำ และในค่าพีเอชสูงจะพบอยู่ในรูปตะกอนของออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ หรือ ซิลิเกต

### Arsenic

ระดับเฉลี่ยของปริมาณอาร์เซนิก อยู่ 2-5 พีพีเอ็ม แหล่งที่มนุษย์กระทำให้เกิดอาร์เซนิกคือการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน ซึ่งจะอยู่ในรูปสารประกอบฟอสเฟตและส่วนมากแล้วอาร์เซนิกจะถูกปล่อยออกมาในรูปของ เลดอาร์เซนเตด ( $Pb_3(AsO_4)_2$ ) โซเดียมอาร์ไซไนท์ ( $Na_3AsO_3$ ) และคอปเปอร์อาร์เซนเตด ( $Cu_3(AsO_3)_2$ )

อาร์เซนิกจะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุพันธ์ของเมทิลโดยแบคทีเรีย ดังปฏิกิริยาดังนี้

