

## บทที่ 3

### จุลินทรีย์กับการเกิดมลพิษจากสารอินทรีย์

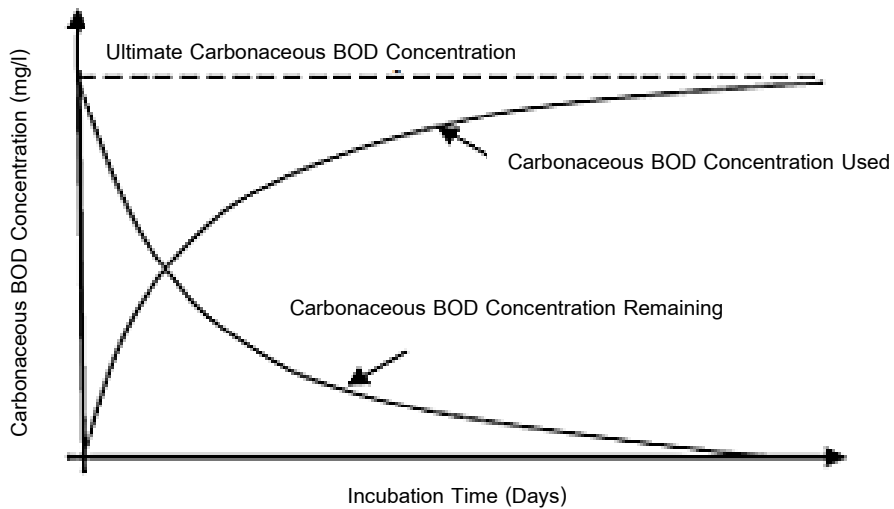


สารอินทรีย์เป็นจำนวนมากที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมในธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นดินหรือน้ำ และมีการปล่อยลงเพิ่มเติมตลอดเวลาตามกิจกรรมของมนุษย์จะทำให้เกิดสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย ทำให้แหล่งน้ำที่ได้รับสารเหล่านี้มีการใช้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำปริมาณมากกว่าการได้รับคืนจากอากาศและการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ เกิดการขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ มีผลกระทบทั้งน้อยและมากต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดในน้ำ เพราะต้องใช้ออกซิเจนในการหายใจ นอกจากนั้นสารอินทรีย์จำนวนมากเหล่านี้ยังทำให้เกิดสารแขวนลอยเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องลงสู่ผิวน้ำ เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำที่ดำรงชีวิตด้วยการสังเคราะห์แสง และถ้าสารแขวนลอยจมนตัวลงสู่ก้นน้ำก็จะทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เปลี่ยนลักษณะของแหล่งน้ำนั้นไปที่ไม่เหมาะสมกับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่หลากหลายชนิด และยังทำให้เกิดสารพิษเพิ่มมากขึ้น

วิธีการวัดปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์หรือย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยจุลินทรีย์ เรียกว่า การทำ BOD test (Biochemical Oxygen Demand

test) BOD จึงสามารถเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำได้ น้ำที่มีปริมาณ BOD สูงจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษจากสารอินทรีย์

การวัดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biochemical oxygen demand) มีหลักการ คือ เป็นการวัดค่าการใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ให้เป็น  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  แต่ในความเป็นจริงคาร์บอนในสารอินทรีย์ไม่ได้เปลี่ยนเป็น  $\text{CO}_2$  ทั้งหมด แต่ถูกใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรีย กลายเป็นบางส่วนในการสร้างเซลล์ใหม่ของแบคทีเรีย การทดสอบบีโอดีจึงเป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์โดยอ้อมเท่านั้น สภาวะมาตรฐานของการวิเคราะห์ คือนำน้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ด้วยแบคทีเรียมาเก็บไว้ในภาชนะปิด บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในน้ำเมื่อเริ่มต้น ( $\text{DO}_0$ ) หลังจากบ่มแล้วจึงนำน้ำนั้นมาวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่หลังจาก 5 วัน ( $\text{DO}_5$ ) ผลต่างของ  $\text{DO}_0$  และ  $\text{DO}_5$  คือปริมาณบีโอดี ซึ่งบางทีเรียกว่า ค่า BOD ใน 5 วัน หรือ  $\text{BOD}_5$  มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร และแม้ว่าค่า BOD จะไม่สามารถวัดปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดได้อย่างแม่นยำก็ตาม วิธีนี้ยังได้รับความนิยมอย่างมาก เพราะเป็นดัชนีตัวสำคัญที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ออกซิเจนจากค่า BOD กับสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่

ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2008)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในขบวนการชีวเคมีเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นที่ 1: แบคทีเรีย heterotroph จะใช้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย เช่น น้ำตาลและแป้งในน้ำก่อน และในขณะที่กำลังเจริญจะปล่อยสารพวก reduced inorganic metabolites เช่น  $\text{NH}_4^+$  โดยในช่วงสุดท้ายของขั้นนี้ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายจะถูกใช้ไปหมด ในน้ำจะมีสารประกอบแอมโมเนียอยู่มาก ดังนั้นการวัดค่า BOD จึงวัดเฉพาะปริมาณ  $\text{O}_2$  ที่ถูกใช้โดย heterotroph ในขั้นนี้เท่านั้น และหมายถึงสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้ทันทีเท่านั้น

ในการหาค่าบีโอดี การใช้ออกซิเจนที่เกิดจากคาร์บอนในสารอินทรีย์จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซีบีโอดี (carbonaceous BOD, CBOD)

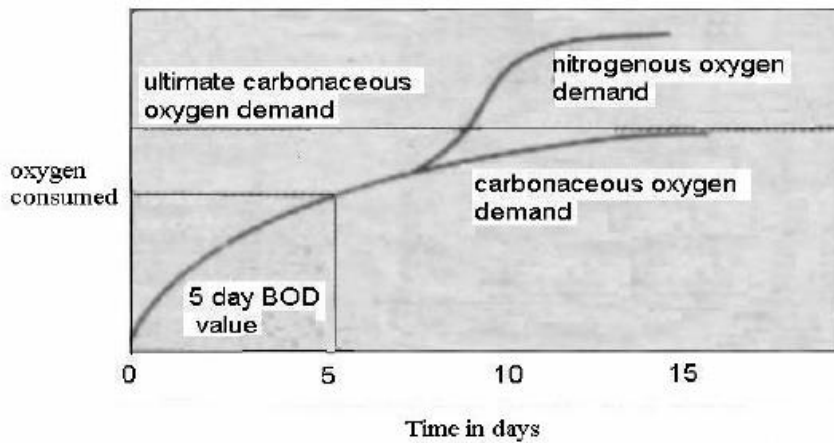
ขั้นที่ 2: แบคทีเรีย autotroph เช่น nitrifying bacteria ซึ่งสามารถออกซิไดซ์  $\text{NH}_4^+$  ไปเป็น  $\text{NO}_3^-$  จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นโดยใช้  $\text{CO}_2$  เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งการใช้ออกซิเจนใน

การออกซิเดชันไนโตรเจนนี้ เรียกว่า บีโอดีไนโตรเจน หรือ เอ็นบีโอดี (nitrogenous BOD, NBOD)

ขั้นที่ 3: การใช้  $O_2$  ในขั้นนี้เกิดจากการหายใจของโปรโตซัว และจุลินทรีย์อื่นๆ ที่กินแบคทีเรียซึ่งมีอยู่จำนวนมากเป็นอาหาร เรียกขั้นนี้ว่า predation

โดยออกซิเจนที่ถูกใช้ในขั้นที่ 2 และ 3 จะมีปริมาณน้อยกว่าขั้นที่ 1 มาก จึงไม่วัดเป็นค่า  $BOD_5$  เหมือนกับขั้นที่ 1

การใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในขั้นตอนต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในขบวนการบีโอดี

ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2008)

### 3.1 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม และถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ จะประกอบไปด้วย แป้ง ไขมัน โปรตีน แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ อัลดีไฮด์ และเอสเทอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. สารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิต แบ่งออกตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ประเภท ดังนี้

(1) ซากของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ซึ่งมักไม่ค่อยทำให้เกิดปัญหา เนื่องจากจะถูกย่อยสลายได้ง่ายในดินและน้ำ โดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ และผลสุดท้ายจะได้ธาตุอาหารหรือแร่ธาตุในธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตต่อไปได้อีก

(2) สิ่งขบถ่ายจากสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะคนและสัตว์เลี้ยง เป็นสารอินทรีย์ที่มักก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนประชากรและกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ ปริมาณสิ่งขบถ่ายจึงมีมากขึ้นเรื่อยๆ และสะสมเป็นจำนวนมาก เพราะถูกกำจัดโดยวิธีที่ไม่ถูกต้อง

2. สารอินทรีย์จากกิจกรรมอื่น เป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากกิจกรรมที่นอกเหนือจากสิ่งมีชีวิต แต่ถูกทิ้งลงดินและแหล่งน้ำเช่นกัน เช่น สารลดแรงตึงผิว น้ำมัน สารกำจัดศัตรูพืช และสัตว์ ของเสียและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สารอินทรีย์เหล่านี้มักจะก่อให้เกิดปัญหา เนื่องจากมีปริมาณมาก มีลักษณะเฉพาะและหลายชนิดประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่กำจัดยาก นั่นก็คือถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยาก

### 3.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์

สารอินทรีย์เกือบทุกชนิดสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1. การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (aerobic decomposition)
2. การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic decomposition)

การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์จะถูกควบคุมด้วยปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ พีเอช ออกซิเจน และส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ลักษณะการย่อยสลายสรุปได้ดังนี้

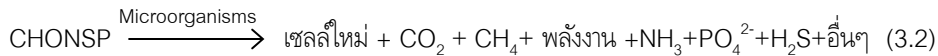
1. จุลินทรีย์จะปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ที่เป็นตัวเด่น (dominant species) จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่มีอยู่มากในสิ่งแวดล้อมนั้น
2. อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีอุณหภูมิสูงพอเหมาะ ประมาณ 35 – 37 องศาเซลเซียส และจะมีอัตราการย่อยสลายเร็วขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นเท่าตัวต่อทุก 10 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มต้องไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส ส่วนพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดไม่เหมือนกัน แบคทีเรียจะเจริญได้ดีที่เป็นกลางหรือค่อนข้างด่างเล็กน้อย คือ 6.5 – 8.5 ส่วนฟังไจและยีสต์สามารถเติบโตได้ดีที่พีเอชต่ำ สำหรับการใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์บางชนิดสามารถเติบโตได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไร้ออกซิเจนก็ได้ แต่บางชนิดอาจเจริญเติบโตได้เฉพาะในสภาวะไร้ออกซิเจน สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบบางชนิด เช่น  $\text{NH}_3$  และ หรือ  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  เป็นต้น ปฏิกิริยา ดังสมการ



การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนนี้จะเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสมบูรณ์กว่าแบบไร้ออกซิเจน นอกจากปัจจัยต่างๆ ดังกล่าว ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ก็เป็นปัจจัยสำคัญ สารอินทรีย์บางอย่างย่อยสลายได้ง่าย เช่น น้ำตาล แป้ง เป็นต้น บางอย่างย่อยสลายได้ยาก เช่น เซลลูโลส ลิกนิน เป็นต้น อัตราการย่อยสลายจะเกิดรวดเร็วมากในช่วงต้นของปฏิกิริยา เนื่องจากมีสารอินทรีย์มาก เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์เหลือเล็กน้อยอัตราการย่อยสลายก็จะช้าลง

3. อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์นั้นๆ เนื่องจากจุลินทรีย์ต่างๆ ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์มีคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น แบคทีเรียมีอัตราส่วนของ C:N ในน้ำหนักแห้ง 5:1 เป็นต้น ฉะนั้นถ้าสารอินทรีย์ใดมีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนอยู่ในอัตราส่วนพอเหมาะและเพียงพอ ก็สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายและรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้สารประกอบที่มี C:N สูง เช่น มี C:N = 100:1 จะย่อยสลายได้ช้ากว่าสารประกอบที่มี C:N ต่ำ เช่นมี C:N = 100:10 ในระบบนิเวศสัดส่วนธาตุอาหารที่เหมาะสม คือ C:N:P = 100:10:1 ส่วนในระบบบำบัดน้ำเสีย คือ สัดส่วน BOD:N:P = 100:5:1 ซึ่งตรงจุดนี้แสดงให้เห็นว่า นอกจากจุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนให้เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่แล้ว ยังต้องการฟอสฟอรัสอีกด้วย

หลังจากเกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนไประยะหนึ่งจะทำให้ปริมาณ  $O_2$  ลดน้อยลง และถ้าอัตราการย่อยสลายยังคงสูงอยู่ ปริมาณ  $O_2$  จะเป็นศูนย์ ทำให้กลายเป็นไร้ออกซิเจน ซึ่งจะมีกลุ่มจุลินทรีย์ที่เป็น anaerobic organism มาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ต่อไป จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้สารอินทรีย์เป็น electron donor แทน  $O_2$  ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซบางชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็น  $CO_2$  และ  $CH_4$  โดยมี  $H_2S$  และอื่นๆ ประปนมาด้วย โดยอาจมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น  $NH_3$  เกิดขึ้นมาด้วย ดังสมการ



ในสภาวะไร้ออกซิเจนเกิดผลดังนี้

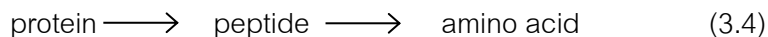
- (1) พลังงานที่ได้้น้อยกว่า
- (2) ปริมาณเซลล์น้อยกว่ามาก
- (3) อัตราการย่อยสลายช้ากว่ามาก
- (4) มีการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์

และปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนมีหลายขั้นตอนกว่าการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนมาก ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดเป็น 4 ขั้นตอนได้แก่

ขั้นที่ 1: การไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

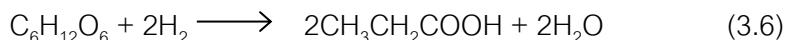
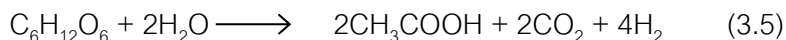
ในขั้นตอนแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ (exocellular enzyme) เช่น เซลลูเลส (cellulases) โปรตีเอส (proteases) และไลเปส (lipases) ออกมาเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน หรือโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งจะถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงหรืออาจอยู่ในรูปสารอินทรีย์โมโนเมอร์ที่ละลายน้ำได้เพื่อจะผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้โดยง่าย เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นอาหารของแบคทีเรียอื่นๆ ต่อไป สารอินทรีย์แต่ละชนิดมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแตกต่างกัน เช่น ไขมันจะถูกไฮโดรไลซ์ช้ามาก ตัวอย่างการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันของ *Staphylothermus* และ *Pyrodictium*

ส่วนแบคทีเรียที่ย่อยสลายโปรตีนได้ดี เช่น *Pseudomonas*, *Proteus* และ *Flavobacterium* เป็นต้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายดังสมการ



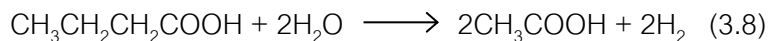
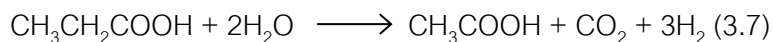
### ขั้นที่ 2: การเกิดกรด (acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรด (acid formers, acidogenic bacteria) เช่น *Clostridium* จะเปลี่ยนสารโมเลกุลเล็กจากขั้นที่ 1 เป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้ (volatile organic acid) ชนิดต่างๆ ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัวเป็นส่วนใหญ่ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) กรดโพรพิโอนิก (propionic,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ ) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และคีโตน (เช่น เอทานอล เมทานอล กลีเซอรอล อะซีโตน) รวมทั้ง  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  และ  $\text{H}_2\text{S}$  ตัวอย่างการย่อยสลายกลูโคสเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ปฏิกริยาการย่อยสลาย ดังสมการ



### ขั้นที่ 3: การเกิดกรดอะซิติก (acetogenesis)

กรดอินทรีย์ต่างๆ จากขั้นตอนที่ 2 จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CO}_2$  โดย acetogenic bacteria เช่น *Syntrobacter wolinii* และ *Syntrophomonas wolfei* ปฏิกริยาการย่อยสลายดังสมการ

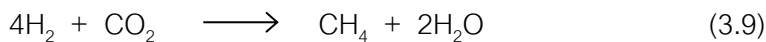


### ขั้นที่ 4: การเกิดมีเทน (methanogenesis)

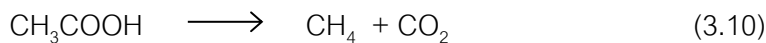
แบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน (methanogen) จะเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากขั้นตอนที่ 2 และ 3 ซึ่งได้แก่ กรดอะซิติก แอลกอฮอล์, CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub> ให้เป็น CH<sub>4</sub> และ CO<sub>2</sub> จากการที่ผลิตมีเทนโดยมีสารตั้งต้นหลายชนิด จึงพบแบคทีเรียผลิตมีเทนเป็นกลุ่มใหญ่ที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันหลากหลายชนิด ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นท่อนหรือกลม แกรมลบ เจริญเติบโตได้ดีที่สุดในสภาวะไร้ออกซิเจน และไม่สามารถดำรงชีพในสภาวะที่มีออกซิเจน (obligate anaerobic bacteria)

ปฏิกิริยาการเกิดมีเทนอาจเกิดได้ 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

(1) การเกิดจากไฮโดรเจน โดย H<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> จะถูกแบคทีเรีย hydrogen – utilizing bacteria เช่น *Methanobacterium thermoautotrophicum* เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนดังสมการ



(2) การเกิดจากกรดอะซิติก แบคทีเรีย acetoclastic methane bacteria เช่น *Methanothrix soehngenii* จะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนดังสมการ



(3) การเกิดจากสารอื่นๆ เช่น กรด formic โดย *Methanococcus vannielii* เมทิลแอลกอฮอล์โดย *Methanococoides methylutens*, methylamine โดย *Methanococcus frisius* และบางชนิดสามารถสร้างมีเทนจากสารมากกว่าหนึ่งชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของแบคทีเรียที่เรียกับสารตั้งต้นต่างๆ ที่ใช้สร้างมีเทน

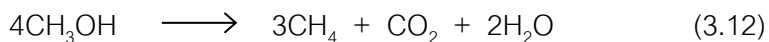
ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้นสร้างมีเทน
<i>Methanobacterium bryantii</i>	H <sub>2</sub>
<i>M. formicicum</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. thermoautotrophicum</i>	H <sub>2</sub>
<i>M. alcaliphilum</i>	H <sub>2</sub>
<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	H <sub>2</sub>
<i>M. ruminantium</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. smithii</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>Methanogenium cariaci</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. marisnigri</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. tatii</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. olentangyi</i>	H <sub>2</sub>
<i>M. thermophilicum</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. bourgense</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. aggregans</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>Methanococoides methylutens</i>	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> และ CH <sub>3</sub> OH

ตารางที่ 3.1 ชนิดของแบคทีเรียที่เรียกับสารตั้งต้นต่างๆ ที่ใช้สร้างมีเทน (ต่อ)

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้นสร้างมีเทน
<i>Methanothrix soehngeni</i>	CH <sub>3</sub> COOH
<i>M. concilii</i>	CH <sub>3</sub> COOH
<i>Methanothermus fervidus</i>	H <sub>2</sub>
<i>Methanolobus tindarius</i>	CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> , (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> และ (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N
<i>Methanosarcina barkeri</i>	CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> COOH, H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> , (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH และ (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N
<i>Methanosarcina thermophila</i>	CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> COOH, H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> , (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH และ (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N

ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2000)

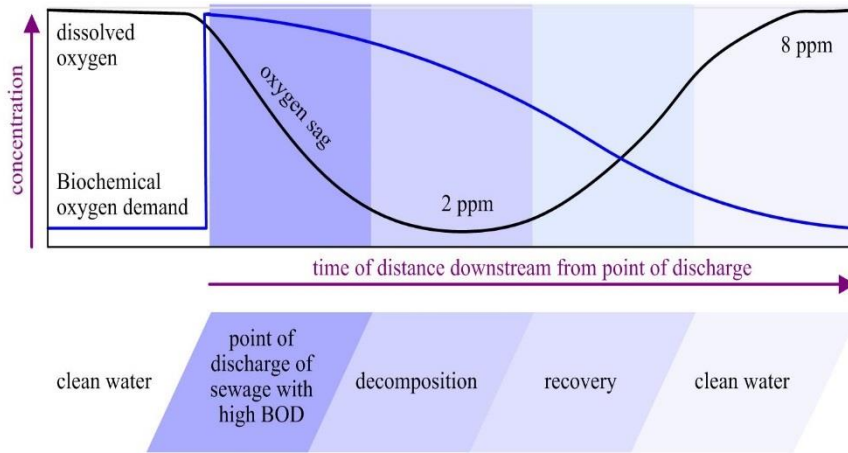
และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างดังสมการ



### 3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ

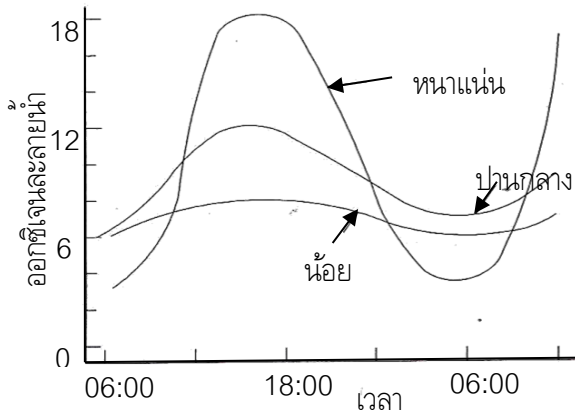
#### เส้นหย่อนดีไอ (the oxygen sag curve)

ในแหล่งน้ำธรรมชาติเมื่อได้รับการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ (DO) จะถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบต้องการออกซิเจน และเวลาต่อมาตามที่เส้นทางน้ำไหลไปปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืชน้ำ เส้นกราฟที่แสดงลักษณะของระดับดีไอที่เปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 3.3 เรียกว่า เส้นหย่อนดีไอ (DO sag curve) ซึ่งในระหว่างวันจะมีความแตกต่างของตอนกลางวันกับตอนกลางคืน เนื่องจากในตอนกลางวันมีการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืชน้ำ ทำให้มีปริมาณออกซิเจนมาก และถ้ามีสาหร่ายและพืชน้ำจำนวนมากจะเกิดสภาวะที่ออกซิเจนละลายในน้ำเกินกว่าค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวในน้ำ คือมากกว่า 8 มิลลิกรัม/ลิตร (oversaturation) มักจะเกิดช่วงบ่ายถึงพลบค่ำ ในขณะที่ในตอนกลางคืนมีการใช้ออกซิเจนในการหายใจของจุลินทรีย์พืชและสัตว์เพียงอย่างเดียว ทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำมีค่าต่ำในตอนเช้านี้ เส้นกราฟที่แสดงลักษณะนี้เรียกว่า diurnal oxygen curve (รูปที่ 3.4)



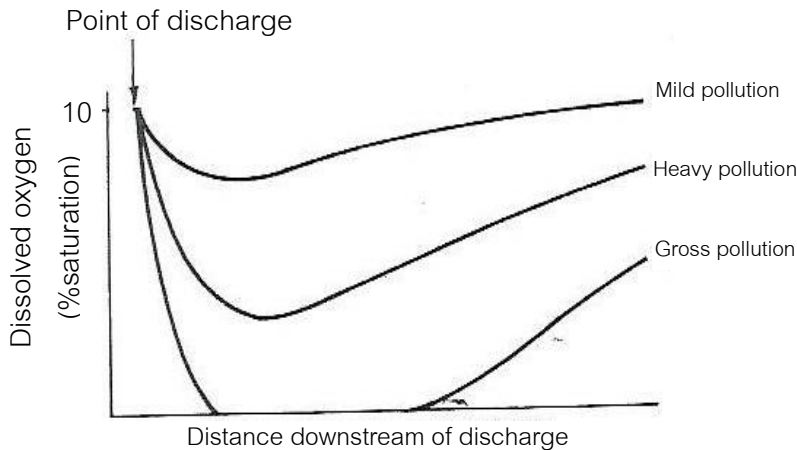
รูปที่ 3.3 เส้นหย่อชนิดโอ (DO sag curve)

ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2008)



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงเป็นประจำวันของออกซิเจนละลายน้ำในตอมนบน (0 – 0.5 เมตร) ของบ่อปลาที่มีแหล่งกักต่อนพีชอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับน้อย ปานกลาง และหนาแน่น

ที่มา: มั่นสินและไพพรรณ (2539)

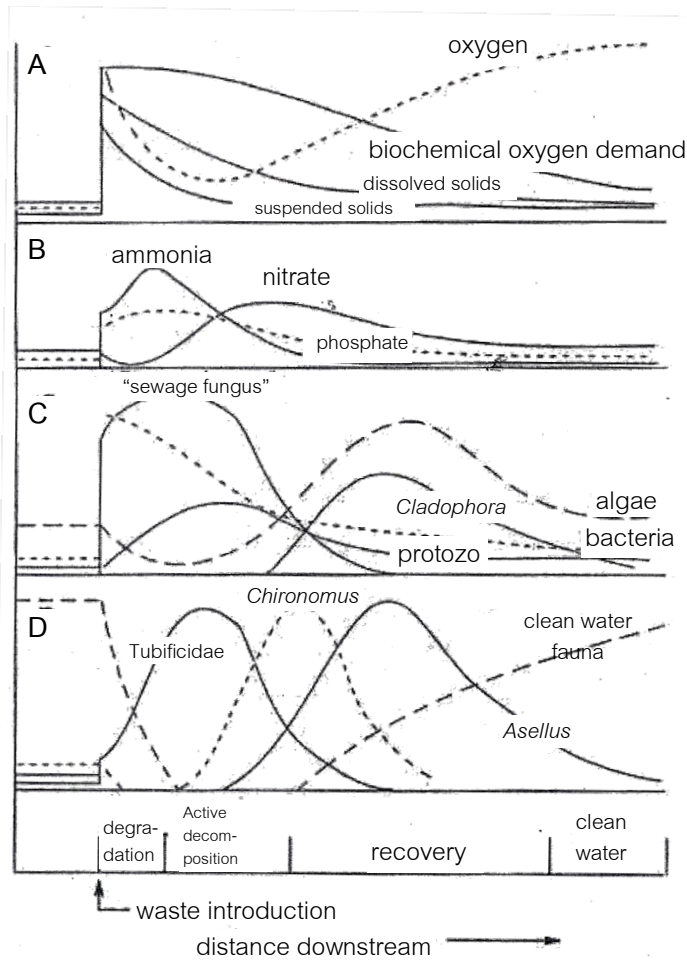


**รูปที่ 3.5** ผลกระทบของการทิ้งสารอินทรีย์ปริมาณต่างๆ ต่อปริมาณ DO ในลำน้ำ  
ที่มา: Mason (1994)

เส้นหย่อนดีโอมีความสำคัญมากในการเป็นดัชนีที่จะบอกสภาพของแหล่งน้ำธรรมชาติว่ามีขีดความสามารถ ในการทำความสะอาดตัวเองหรือฟอกตัวเอง (self purification) ดังนั้น หากมีการทิ้งสารอินทรีย์ลงในระดับที่ไม่เกินขีดความสามารถ ระดับดีโอก็ยังคงสูง แต่หากมีการทิ้งจนเกินขีดความสามารถของแหล่งน้ำในการฟอกตัวเอง จะทำให้ระดับดีโอลดลงจนทำให้สภาพของแหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง สิ่งมีชีวิตในน้ำส่วนใหญ่ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้เพราะปริมาณดีโอต่ำกว่าศูนย์ จากรูปที่ 3.5 ถ้าปริมาณสารอินทรีย์มากจนเกิดสภาวะมลพิษมากที่สุด (gross pollution) จะเห็นว่าเส้นหย่อนต่ำกว่าศูนย์ ส่วนที่มีปริมาณรองลงมา เส้นหย่อนก็จะมากขึ้นจากศูนย์ตามลำดับ จากการเกิดสภาวะมลพิษมาก (heavy pollution) และการเกิดสภาวะมลพิษน้อย (mild pollution) ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถคาดคะเนปริมาณสารอินทรีย์ที่ทิ้งลงไปแหล่งน้ำโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

### ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

สารอินทรีย์ที่ทิ้งลงสู่ลำน้ำจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตตามเส้นทางไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำของลำน้ำนั้นๆ ซึ่งจะตามมาด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติอื่นๆ ของแหล่งน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 รูป A ณ จุดที่มีการทิ้งสารอินทรีย์ลงไปจะเห็นว่าค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะค่อยๆ ลดลง และจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่น้ำไหลไป ในขณะที่ค่าบีโอดีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนปริมาณสารแขวนลอยและปริมาณเกลือของสารต่างๆ จะเพิ่มขึ้นตรงจุดที่ทิ้งสารเช่นเดียวกัน และจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว รูป B ปริมาณแอมโมเนียจะถูกแทนที่ด้วยปริมาณไนเตรตเนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จากรูป C จำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้นมากในทันทีที่ทิ้งสารอินทรีย์ลงไป เคยมีการตรวจวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียในแม่น้ำดานูบในช่วงที่เกิดมลพิษทางน้ำได้ถึง  $3.6 \times 10^7$  CFU/มิลลิลิตร ซึ่งจำนวนนี้ยังได้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เพราะในขณะที่เกิดมลพิษเป็นการวิเคราะห์จากจำนวนแบคทีเรียที่แขวนลอยในน้ำโดยไม่รวมที่ติดค้างอยู่ตามผิวหนังของพืชน้ำอีก 10% (Mason, 1994) หลังจากเพิ่มจำนวนแล้วแบคทีเรียจะค่อยๆ ลดลงเมื่อสารอาหารต่างๆ พร่องลง ในขณะที่มีการเพิ่มจำนวนมากของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นสายที่เรียกว่า “sewage fungus” ตามหลังแบคทีเรียมา กลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยทั้ง แบคทีเรีย ฟังไจ โปรโตซัว และสาหร่าย ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.7 และกลุ่มนี้จะทำให้มองเห็นว่าตามผิวหนังของน้ำในลำน้ำเป็นเมือกสีเขียวหรือน้ำตาลอ่อน โดยชนิดที่มีมากที่สุด คือ *Spaerotilus natans* และ zoogloal bacteria



รูปที่ 3.6 การฟอกตัวเองของแหล่งน้ำ

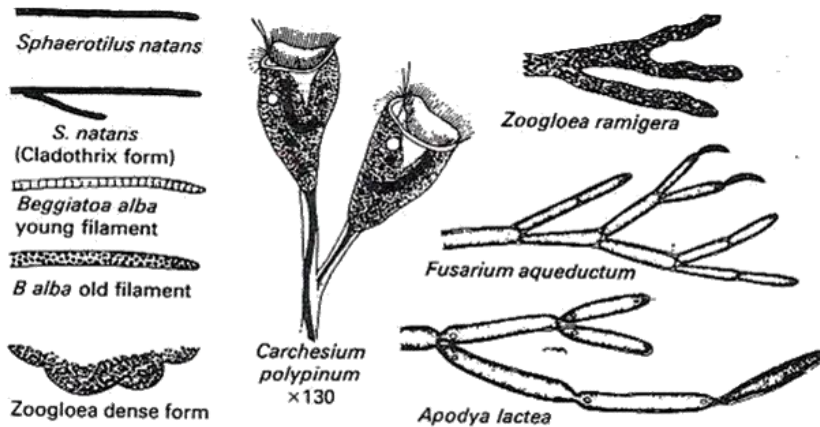
- A. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ
- B. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี
- C. การเปลี่ยนแปลงของชนิดจุลินทรีย์
- D. การเปลี่ยนแปลงของชนิดสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดใหญ่

ที่มา: Mason (1994)

ตารางที่ 3.2 ชนิดของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม sewage fungus

Bacteria	<i>Sphaerotilus natans</i> Zoogloal bacteria <i>Beggiatoa alba</i> <i>Flavobacterium</i> sp.
Fungi	<i>Geotrichum candidum</i> <i>Leptomitus lacteus</i>
Protozoa	<i>Colpidium colpoda</i> <i>Colpidium campylum</i> <i>Chilodonella cucullulus</i> <i>Chilodonella uncinata</i> <i>Cinetochilum margaritaceum</i> <i>Trachellophyllum pusillum</i> <i>Paramecium caudatum</i> <i>Paramecium trichium</i> <i>Uronema nigricans</i> <i>Hemiophrys fusidens</i> <i>Glaucoma scintillans</i> <i>Carchesium polypinum</i>
Algae	<i>Stigeoclonium tenue</i> <i>Navicula</i> spp. <i>Fragilaria</i> spp. <i>Synedra</i> spp.

ที่มา: Curtis, Delves-Broughton and Harington (1971)



รูปที่ 3.7 จุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม sewage fungus บางชนิด

ที่มา: Mason (1994)

*Sphaerotilus natans* มีลักษณะเซลล์เป็นเส้น ไม่มีกิ่ง มีชีท (sheath) ที่เป็นเมือกหุ้มรอบเซลล์ โดยชีทนี้จะช่วยป้องกันแบคทีเรีย พยาธิ และผู้ล่าต่างๆ (predator) ไม่ให้ทำอันตรายเซลล์ได้ สามารถใช้สารอินทรีย์หลายชนิดเป็นอาหาร และใช้อินทรีย์ไนโตรเจนในการเจริญเติบโตได้ด้วย แม้ว่าจะให้การเจริญน้อยกว่าอินทรีย์ไนโตรเจนก็ตาม แบคทีเรียชนิดนี้จะไม่สร้างเมือกถ้ามีปริมาณกลูโคสและอะซีเตตต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ถ้ามีปริมาณกลูโคสและอะซีเตตมากการสร้างเมือกจะขึ้นกับปริมาณออกซิเจนในน้ำ และเป็นแบคทีเรียต้องการออกซิเจนที่ทนปริมาณออกซิเจนต่ำได้ถึง 2 มิลลิกรัม/ลิตร ในฤดูหนาวจะเห็น sewage fungus เป็นระยะทางยาวในลำน้ำมากกว่าฤดูร้อน เพราะการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปได้ช้ากว่าในฤดูร้อน

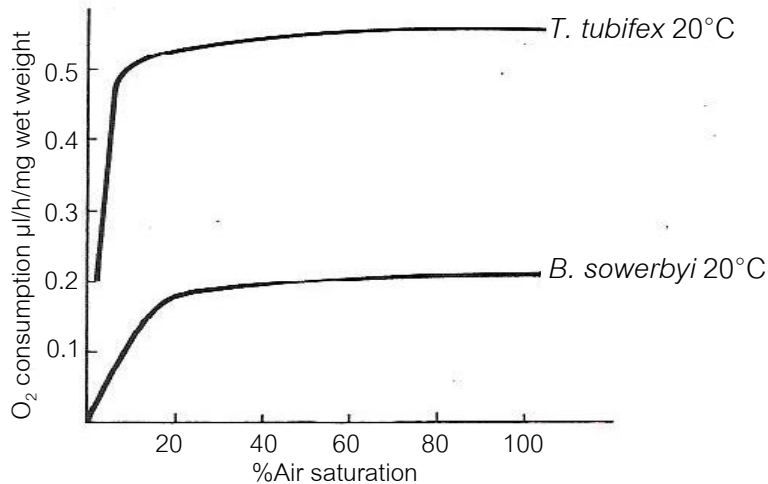
นอกจากแบคทีเรียแล้ว พบว่ามีโปรโตซัวถึง 12 ชนิด ซึ่งเป็นจำนวนมากที่สุดในสิ่งแวดล้อม sewage fungus โดยมีชนิด *Carchesium* (stalked ciliated) จำนวนมากที่สุดและอยู่ในช่วงที่ใกล้จะหมดไซซน ซึ่งบริเวณนี้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำได้เพิ่มขึ้นบ้างแล้ว โปรโตซัวชนิดนี้เป็นผู้ล่าด้วย โดยจะกินแบคทีเรียเป็นอาหารในปริมาณมาก *Carchesium* ที่มีจำนวนมากในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดตะกอนที่ก้นแม่น้ำ เพราะจะจับตัวเป็นก้อน ชนิดอื่นที่มีมากเช่นกัน คือ *Colpidium colpoda* และ *Chilodonella cucullulus* ซึ่งเป็นโปรโตซัวประเภท holotrich ทั้งสองชนิด แต่ *Colpidium* จะกินเฉพาะแบคทีเรีย ในขณะที่ *Chilodonella* จะกินทั้งแบคทีเรีย ไดอะตอม และโปรโตซัวพวก flagellate

สำหรับสาหร่าย ในช่วงแรกที่ทิ้งสารอินทรีย์ สาหร่ายจะตายหายไปจากลำน้ำ เพราะการลดของปริมาณออกซิเจนและความขุ่นของน้ำที่ทำให้มีแสงแดดน้อย และเมื่อเวลาผ่านไปก็คาลักษณะสมบัติต่างๆ ในลำน้ำเริ่มดีขึ้น รวมทั้งสารอาหาร เช่น ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จะพบสาหร่ายชนิด *Stigeoclonium tenue* เพิ่มจำนวนขึ้น เห็นเป็นแผ่นบางในลำน้ำ เกิดขึ้นเป็นชนิดแรก ซึ่ง *Stigeoclonium* นี้อาจพบในสิ่งแวดล้อม sewage fungus ด้วย (ตารางที่ 3.2) ต่อจากนั้นจะเป็นกลุ่มไดอะตอม คือ *Nitzschia* และ *Gomphonema parvulum* ไซยาโนแบคทีเรีย คือ *Chamaesiphon* sp. สาหร่ายสีเขียว คือ *Ulvella frequens* และไดอะตอม คือ *Cocconeis placentula* ตามสภาพการฟื้นตัวหรือคืนสภาพ (recovery) ของลำน้ำ การคืนสภาพของสิ่งแวดล้อมสาหร่ายจากที่ไม่พบเลยในช่วงแรกที่ทิ้งสารอินทรีย์จำนวนมากระดับ gross pollution จนถึงคืนสภาพจะเป็นระยะทางไกลจากจุดแรกที่ทิ้ง เช่น ตัวอย่างการเกิดมลพิษของแม่น้ำในประเทอังกฤษ แม่น้ำเทม (The River Tame) คืนสภาพในระยะทาง 70 กิโลเมตร ส่วนแม่น้ำเทรนต์ (The River Trent) คืนสภาพในระยะทาง 50 กิโลเมตร ส่วน

ชนิดและปริมาณของสาหร่ายในบริเวณที่เป็นน้ำสะอาดจะมีจำนวนน้อยกว่าบริเวณพื้นตัวขึ้นอยู่ใกล้กับลักษณะเฉพาะตามธรรมชาติของแหล่งน้ำนั้นๆ

ในบางลำน้ำสาหร่ายพวก filamentous green algae ชนิด *Cladophora* มีจำนวนมากในช่วง recovery zone และทำให้เกิดความหนาแน่นปกคลุมลำน้ำ ซึ่งจะเป็นอาหารของพวกสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง การเจริญของสาหร่ายชนิดนี้ปัจจัยที่ควบคุมคือ การเพิ่มของสารอาหาร โดยเฉพาะฟอสเฟตต้องมีมากกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ในลำน้ำบางแห่งที่มีสารอินทรีย์มากจนถึงขั้นที่ระยะที่เกิด *Cladophora* สามารถทำให้การใช้ออกซิเจนในตอนกลางคืนในการหายใจของสาหร่ายเป็นสาเหตุการตายของปลา เพราะปริมาณออกซิเจนต่ำจนเป็นศูนย์ และยังเป็นอุปสรรคต่อการพักผ่อนทางน้ำ เช่น การเล่นเรือและการตกปลา

จากรูป 3.6D แสดงถึงชนิดของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดใหญ่ (macroinvertebrates) ที่เกิดขึ้นหลังการทิ้งสารอินทรีย์จำนวนมากลงไป สัตว์ที่พบส่วนใหญ่มีเพียงกลุ่มเดียว คือ tubificid worms ปริมาณความหนาแน่นมากกว่า  $10^6$  ตัว/ตารางเมตร ในกรณีนี้ที่สภาพน้ำวิฤตมากและมากขึ้นเรื่อยๆ จะพบชนิด *Limnodrilus hoffmeisteri* และ/หรือ หนอนปล้อง (*Tubifex tubifex*) การที่ tubificid เหล่านี้สามารถเจริญได้เพราะความสามารถในการหายใจในบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ จากรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำเพียง 20% เกือบจะไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของ *Tubifex tubifex* (รูปที่ 3.9f) และ *Branchiura sowerbyi*

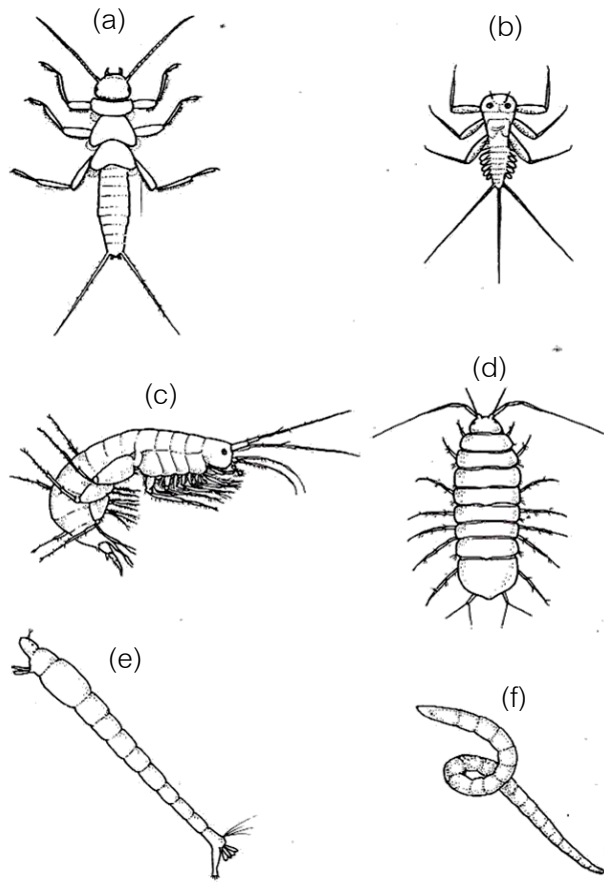


รูปที่ 3.8 การใช้ ออกซิเจน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของออกซิเจนละลายน้ำของ turbificid worm 2 ชนิด (*Tubifex tubifex* และ *Branchiura sowerbyi*)

ที่มา: Mason (1994)

ในตัว Tubificid จะมีฮีโมโกลบิน (haemoglobin) คอยจับออกซิเจน และสามารถจับได้แม้ pH ต่ำ เนื่องจากมี CO<sub>2</sub> ในน้ำสูงมาก ซึ่งเป็นลักษณะของน้ำที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูง โดยฮีโมโกลบินจะรับส่งออกซิเจนเท่านั้น แต่ไม่เก็บสะสมออกซิเจนไว้ใช้ ในกรณีที่ขาดออกซิเจนเป็นเวลานาน tubificid สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาวะขาดออกซิเจนนานถึง 4 สัปดาห์ โดยการสร้างไกลโคเจน (glycogen) แบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ นอกจากนี้มีชีวิตอยู่แล้ว tubificid ยังสามารถกิน วางไข่ ในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำได้ด้วย

ตามระยะทางที่น้ำไหลไปหลังจากทิ้งสารอินทรีย์ แล้วน้ำมีปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มมากขึ้นทำให้จำนวน tubificid ลดลง และถูกแทนที่ด้วย midge larva (blood worm) หรือ หนอนแดง ซึ่งเป็นตัวอ่อนของริ้นน้ำจืด (*Chironomus riparius*) (รูปที่ 3.9 e) โดย *C. riparius* จะไม่ทนต่อออกซิเจนที่ต่ำมากได้เท่ากับ tubificid ในบริเวณโชนที่มี *Chironomus* จะมี species อื่นๆ อยู่ด้วย รวมทั้ง *Tanypodinae* ซึ่งเป็นโปรโตซัวที่กิน tubificid และ chironomid ขนาดเล็กเป็นอาหาร ตามลำน้ำที่เกิดการคั่งสภาพหลังจากทิ้งสารอินทรีย์ลงไป *Chironomus* จะเพิ่มจำนวน และค่อยๆ ลดจำนวนจนหายไปจากลำน้ำภายในระยะทาง 1 กิโลเมตร การที่สามารถอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำๆได้ เพราะเลือดของ *Chironomus* จะมีฮีโมโกลบินที่มีจำนวนถึง 25% ของเลือดมนุษย์ โดยฮีโมโกลบินนี้มีน้ำหนักโมเลกุลถึง 34,400 ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของฮีโมโกลบินในสัตว์เลือดอุ่น และจะเพิ่มจำนวนเมื่อน้ำมีออกซิเจนละลายน้อย ถ้าในน้ำมีออกซิเจนละลายน้อยจนสัตว์อื่นๆ ไม่สามารถใช้ออกซิเจนได้ *C. riparius* จะอาศัยอยู่ในหลอด (tube) ซึ่งจะเก็บออกซิเจนจากการเคลื่อนไหวเป็นคลื่นของร่างกายสัตว์อื่นๆ ทำให้มีออกซิเจนเพิ่มขึ้นในชั้นโคลนของตะกอน ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการใช้ออกซิเจนได้



รูปที่ 3.9 สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังน้ำจืดบางชนิดที่ทนต่อภาวะมลพิษจากสารอินทรีย์

- a. *Dinocras cephalotes* (Plecoptera)    b. *Ecdyonurus venosus* (Ephemeroptera)  
c. *Gammarus pulex* (Amphipoda)    d. *Asellus aquaticus* (Isopoda)    e. *Chironomus riparius* (Diptera)  
f. *Tubifex tubifex* (Oligochaeta)

ที่มา: Mason (1994)

ต่อจากโชนของ Chironomid จะเป็น isopod ชนิด *Asellus aquaticus* หรือ “เหาน้ำ” (waterlouse) (รูปที่ 3.9d) เพิ่มจำนวนมากขึ้น (ภาพที่ 3.6D) โดยเฉพาะเมื่อ *Cladophora* เริ่มปรากฏให้เห็น ภาวะมลพิษจะมีผลทำให้ความยาวและน้ำหนักของ *Asellus* น้อยลง และตัวเมียมีจำนวนไข่ลดลงด้วย สัตว์จำพวก ปลิง หอย และ alderfly (*Sialis lutaria*) มีจำนวนมากในโชนนี้เช่นเดียวกัน และมี amphipod ชนิด *Gammarus pulex* (รูปที่ 3.9c) ซึ่งจะมีความไวต่อภาวะมลพิษจากสารอินทรีย์มาก โดยจะตายถ้าออกซิเจนในน้ำมีเพียง 1 มิลลิกรัม/ลิตร การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของ amphipod ในแหล่งน้ำจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากในตอนกลางคืนระหว่างที่ออกซิเจนในน้ำลดลงเรื่อยๆ จนถึงขั้นวิกฤตในตอนใกล้รุ่ง เพราะแหล่งน้ำอยู่ในภาวะที่สิ่งมีชีวิตใช้ออกซิเจนอย่างเดียวไม่มีการได้รับจากการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำเหมือนตอนกลางวัน

ต่อจากโชน *Asellus* ซึ่งน้ำค่อยๆ ฟอกตัวเองแล้ว สัตว์ชนิดอื่นๆ เริ่มปรากฏในสิ่งแวดล้อมที่มีชีวิต ชนิดที่มีความไวต่อภาวะมลพิษจากสารอินทรีย์ในโชนนี้ก็ได้แก่ แมลงเกาะหิน หรือ stonefly (Plecoptera) (รูปที่ 3.9a) และอีกชนิดซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าคือ แมลงชีปะขาว หรือ mayfly (Ephemeroptera) (รูปที่ 3.9b) ซึ่งมักจะตายแม้มีภาวะมลพิษเพียงเล็กน้อย stonefly ที่ทนต่อภาวะมลพิษจากสารอินทรีย์มากที่สุดคือ *Amphinemura sulcicollis* ส่วน mayfly คือ *Baetis rhodani* และ *Caenis horraria*

### 3.4 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

นอกจากองค์ประกอบในสารอินทรีย์ในสิ่งมีชีวิตจะประกอบด้วยคาร์บอนแล้วยังประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งในธรรมชาติจะมีปริมาณค่อนข้างต่ำ แต่ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ น้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนและน้ำทิ้งจากเกษตรกรรม ทำให้มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำสูง ถึงแม้พืชจะต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการสร้างเซลล์ แต่ความต้องการมีเพียง 6.7% สำหรับไนโตรเจน และ 0.08% สำหรับฟอสฟอรัส (Cutler *et al.*, 2013) ดังนั้นในแหล่งน้ำที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงจึงเป็นการกระตุ้นให้มีการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็วเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication)” ซึ่งแหล่งน้ำที่เกิดปรากฏการณ์นี้เมื่อเวลาผ่านไปพืชเหล่านี้จะตายทับถมกันเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ จุลินทรีย์ในน้ำจะต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจนเกิดการเน่าเสียของน้ำจนในที่สุดเกิดภาวะมลพิษในน้ำ

#### 3.4.1 ระบบนิเวศในแหล่งน้ำธรรมชาติและผลของ eutrophication ต่อแหล่งน้ำ

ในระบบนิเวศของแหล่งน้ำที่มีความอุดมสมบูรณ์ของสายโซ่อาหารตามธรรมชาติได้แหล่งพลังงานเริ่มต้นมาจากแสงอาทิตย์ ซึ่งพืชสีเขียวและแพลงก์ตอนจะใช้ในการผลิตอาหารด้วยปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งเป็นอาหารเริ่มต้นของโปรโตซัว แพลงก์ตอนสัตว์อื่นๆ และปลากินพืชต่างๆ สิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่กว่าจะได้ปลาเป็นอาหาร สิ่งมีชีวิตในระดับต่างๆ ตั้งแต่ชั้นต่ำสุดจนถึงชั้นสูงสุดจึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสายโซ่อาหาร นอกจากสมดุลในเรื่องอาหารแล้ว จะมีสมดุลระหว่างปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงและการหายใจ คือ สมดุลระหว่างออกซิเจนที่ผลิตได้จากการสังเคราะห์แสงและออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในระหว่างการหายใจ ในขณะที่ออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21%

ในน้ำจะมีออกซิเจนละลายได้สูงสุดประมาณ 8 มิลลิกรัม/ลิตร เท่านั้น ปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำ จะใช้ออกซิเจนจำนวนดังกล่าวในการหายใจ ถ้าน้ำมีออกซิเจนอยู่น้อยกว่า 8 มิลลิกรัม/ลิตร อากาศจะให้ ออกซิเจนกับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าน้ำมีแพลงก์ตอนหนาแน่น ทำให้ผลิออกซิเจนได้มาก น้ำจะมีออกซิเจนละลายอยู่เกินกว่าค่าอิมิตัว ในกรณีนี้ ออกซิเจนจะหนีออกจากน้ำให้กับ อากาศ

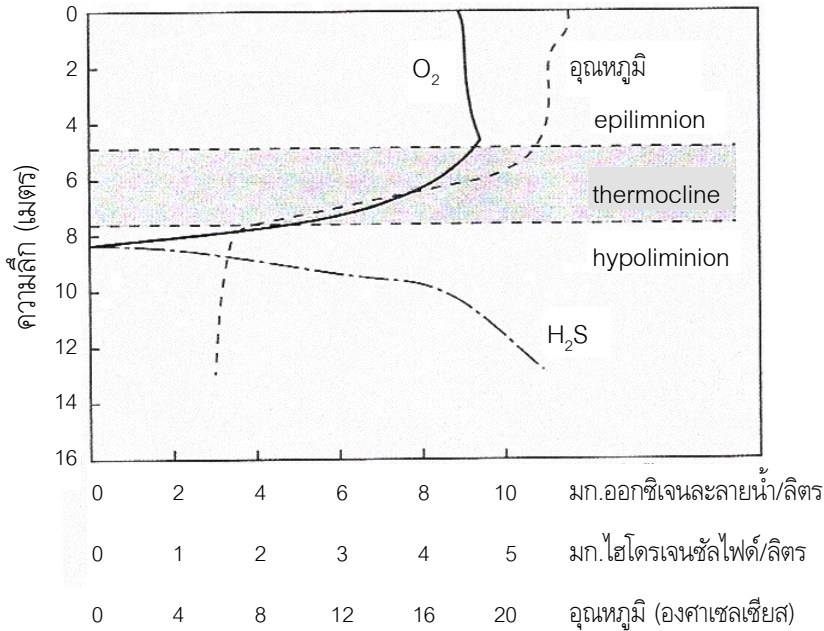
ในสภาวะที่เกิด eutrophication จำนวนแพลงก์ตอนที่หนาแน่นจะทำให้ผิวน้ำ ไม่สัมผัสอากาศ ความขุ่นของน้ำจะทำให้แสงส่องได้แค่ผิวน้ำเท่านั้น สภาพแวดล้อมเช่นนี้จะ ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง ปริมาณออกซิเจนไม่สมดุล มีการใช้ออกซิเจนจากการหายใจ รวมทั้งการย่อยสลายซากแพลงก์ตอนที่ทับถมและตายลง มากกว่าการให้ออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสง ในบางกรณีในตอนกลางคืนจนถึงใกล้รุ่งที่ไม่มีแสง ไม่มีการสังเคราะห์แสง อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำเป็นศูนย์ได้ตอนเช้าตรู่ ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดในน้ำ

การเกิด eutrophication จะส่งผลอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งน้ำด้วย ในแหล่งน้ำที่มีความลึกจะต่างกับแหล่งน้ำปกติทั่วไป เพราะการมีอุณหภูมิแตกต่างกันของชั้นน้ำตามความลึก เรียกว่า “thermal stratification” ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับ ทะเลสาบ หนอง คลอง บึง 2 ประเภท คือ

(1) แหล่งน้ำจืดในเขตอากาศอบอุ่น ซึ่งภูมิอากาศตลอดปีแบ่งเป็น 4 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูใบไม้ร่วง ฤดูหนาว และฤดูใบไม้ผลิ

(2) แหล่งน้ำจืดในเขตร้อนชื้น ซึ่งภูมิอากาศตลอดปีแบ่งเป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว เพราะความลึกของแหล่งน้ำ ในฤดูร้อนจากคุณสมบัติของการส่งผ่านความร้อนของมวลของน้ำ น้ำตอนบนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำตอนล่าง บริเวณรอยต่อระหว่างน้ำตอนบนที่มีอุณหภูมิสูงและน้ำตอนล่างที่มีอุณหภูมิต่ำ จะเป็นเขตที่มีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว

เรียกว่า “thermocline” ชั้นน้ำตื้นบนเรียกว่า “epilimnion” และตื้นล่างเรียกว่า “hypolimnion” (รูปที่ 3.10)



**รูปที่ 3.10** การแบ่งชั้นของน้ำในแหล่งน้ำลึกตามระดับอุณหภูมิ แสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและปริมาณ  $H_2S$

**ที่มา:** Madigan, Martinko and Parker (2008)

3.4.2 การเกิด thermal stratification และการเกิด eutrophication ในแหล่งน้ำของเขตภูมิอากาศอบอุ่น

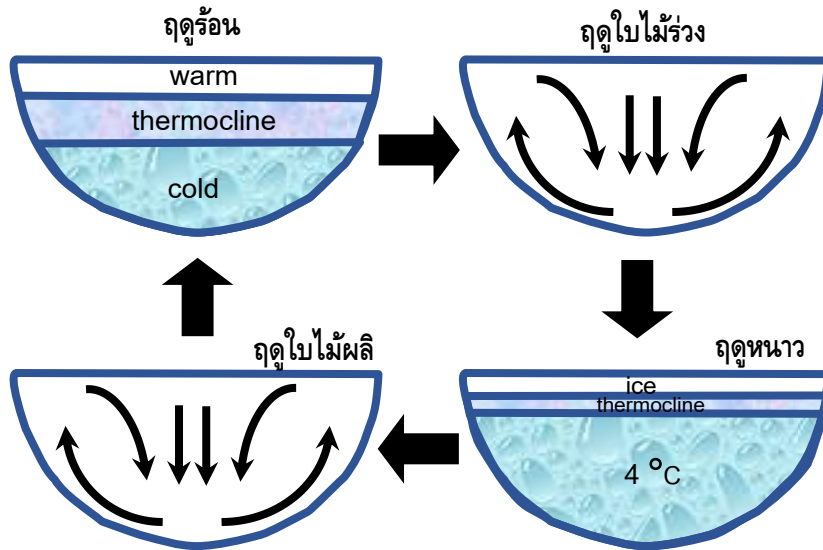
ในฤดูร้อน ผิวน้ำชั้นบนและชั้นล่างมีความแตกต่างกันเนื่องจาก ความร้อนจากแสงแดดจะทำให้ผิวน้ำตื้นบนมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่การส่งผ่านความร้อนของมวลของน้ำจะ

เป็นไปตามความหนาแน่นของน้ำ จึงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วคั่นกลางระหว่างชั้นน้ำที่เย็นกว่าที่จมอยู่ด้านล่าง การแบ่งชั้นของผิวน้ำที่มีอุณหภูมิต่างกัน เรียกว่า “thermal stratification” นอกจากชั้นน้ำจะมีอุณหภูมิต่างกันแล้วยังมีปริมาณออกซิเจนต่างกันด้วย (รูปที่ 3.11) ซึ่งเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของบริเวณนี้ต่างกัน เนื่องจาก redox potential แตกต่างกัน สาเหตุมาจากในชั้น hypolimnion ของแหล่งน้ำมีสิ่งเจือปนมาก จะมีปฏิกิริยาย่อยสลาย จึงต้องใช้ใช้ออกซิเจนโดย heterotrophic bacteria ทำให้ออกซิเจนถูกใช้ไปหมด ในที่สุดกลายเป็นสภาพไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย SRB ได้  $H_2S$  เกิดขึ้น (รูปที่ 3.10) และออกซิเจนจากน้ำตอนบนบริเวณ epilimnion ไม่สามารถละลายลงมาผสมกับน้ำชั้นล่างบริเวณ hypolimnion ได้ เพราะมีชั้น thermocline กั้นไว้ แพลงก์ตอนและแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงก็มีน้อยในชั้นนี้ จึงไม่สามารถให้ออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงได้ สภาวะไร้ออกซิเจนจากการไม่หมุนเวียนของน้ำนี้จะเกิดขึ้นในช่วงกลางฤดูร้อนเรียกว่า “summer stratification” ซึ่งในช่วงนี้แพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) ที่ไม่ได้รับสารอาหารที่มีจำนวนมากจากก้นบ่อเพราะน้ำไม่ผสมกันก็จะเริ่มตายลง เมื่อแพลงก์ตอนพืชหมดไป แพลงก์ตอนสัตว์ (zooplankton) ที่กินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหารก็จะตายลงไปด้วย แพลงก์ตอนที่ตายเหล่านี้จะกลายเป็นสารอาหารตกตะกอนอยู่ก้นบ่อ และไม่สามารถหมุนเวียนขึ้นไปในผิวน้ำชั้นบนได้ อย่างไรก็ตามตะกอนของมันก็จะเป็นสารอาหารสะสมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วง

เมื่อถึงฤดูใบไม้ร่วง อุณหภูมิในบรรยากาศลดลง อุณหภูมิของชั้น epilimnion ก็จะลดลงด้วย จะค่อยๆ ลดจนเท่ากับชั้น thermocline จนถึงจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าชั้น hypolimnion น้ำตอนบนซึ่งเย็นและหนักกว่านี้จะจมลงก้นบ่อ ส่วนน้ำตอนล่างซึ่งร้อนและ

เบาว่าจะลอยตัวขึ้นข้างบน ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำ เกิดการผสมกันระหว่างชั้น epilimnion กับ hypolimnion โดยไม่มีการคั่นด้วยชั้น thermocline สารอาหารที่มีสะสมอยู่มากจากน้ำชั้นล่างและตะกอนก้นบ่อจะกระจายขึ้นสู่ชั้นบน ในขณะที่เดียวกันออกซิเจนจากผิวน้ำก็จะสามารถลงไปสู่ก้นบ่อได้ ทำให้ไม่มีการขาดแคลนออกซิเจนเกิดขึ้น สภาวะเช่นนี้เรียกว่า “fall overturn” มักจะเกิดขึ้นในเดือน กันยายน-ตุลาคม

ในฤดูหนาว การแบ่งชั้นจะเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เรียกว่า “winter stratification” แต่จะเป็นตรงข้ามกับฤดูร้อน น้ำในชั้น epilimnion จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้น hypolimnion แต่จะเป็นช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะลอยขึ้นมาอยู่ด้านบนกลับมาผสมกันอีก เกิดการหมุนเวียนสารอาหารและออกซิเจนระหว่างกันอย่างต่อเนื่องหรือเกือบต่อเนื่อง สภาพน้ำนิ่งที่ก้นแหล่งน้ำจะเกิดน้อยมาก ไม่มีสภาวะขาดแคลนออกซิเจนเกิดขึ้น แต่เนื่องจากผิวน้ำถูกปกคลุมด้วยน้ำแข็ง จำนวนแพลงก์ตอนจะลดลง เพราะแสงผ่านน้ำลงไปได้น้อย แต่ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านลงไปไม่ได้ ในที่สุดการสังเคราะห์แสงจะหยุด แพลงก์ตอนพืชจึงลดจำนวนลง ส่งผลให้แพลงก์ตอนสัตว์ลดลงด้วย ทำให้สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำลดลงเช่นกัน หลังจากอากาศอุ่นขึ้น อุณหภูมิค่อยๆ สูงขึ้น ก็จะมีการพลิกกลับของชั้นน้ำอีกครั้งหนึ่ง แต่เป็นการผลิตจากชั้นล่างที่อุ่นกว่าขึ้นมา เรียกว่า “spring overturn” มักจะเกิดขึ้นในเดือนมีนาคม-เมษายน เพราะฉะนั้นการขาดแคลนออกซิเจนในน้ำชั้นล่างจึงไม่เกิดขึ้นถาวร ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงสภาพแหล่งน้ำตามอิทธิพลของภูมิอากาศ

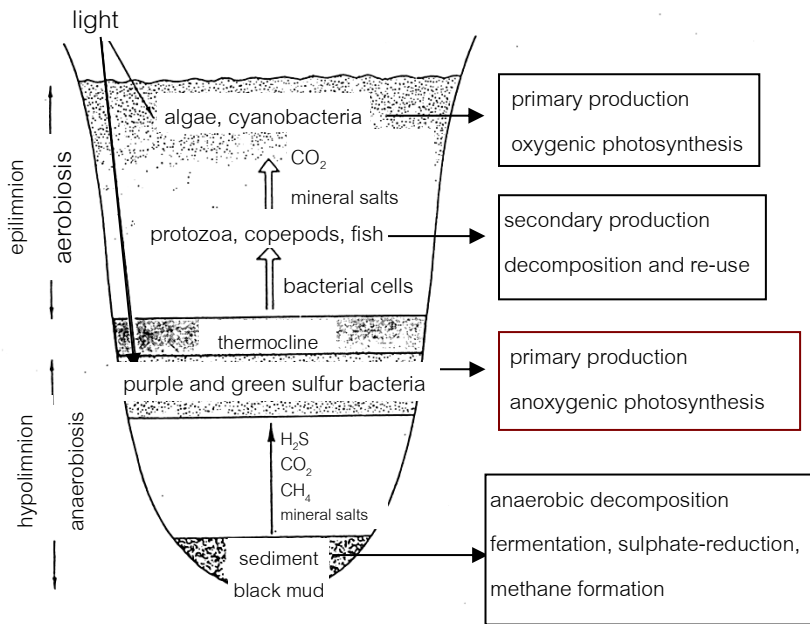
ที่มา: ดัดแปลงจาก Maier, Pepper and Gerba (2000)

3.4.3 thermal stratification และการเกิด eutrophication ในแหล่งน้ำของเขต ภูมิอากาศร้อนชื้น

ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งมีเพียง 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ถึงแม้อุณหภูมิของชั้นน้ำในฤดูร้อนจะแตกต่างกัน จนเกิดการแบ่งได้เป็นชั้น epilimnion, thermocline และ hypolimnion ก็ตาม แต่ในฤดูหนาว อุณหภูมิในบรรยากาศไม่ต่ำมาก จนถึงขนาดทำให้อุณหภูมิของน้ำชั้นบนต่ำกว่าชั้น hypolimnion ได้ ดังนั้นการเกิดการ หมุนเวียนของน้ำผสมกันเพื่อแลกเปลี่ยนออกซิเจนและสารอาหารจึงไม่สมบูรณ์ หรือไม่เกิด

การผสมกันเลย เป็นผลให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนถาวรในชั้น hypolimnion และคงอยู่ตลอดไปทุกฤดูกาล สภาพเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้นอกจากการมีสารอาหารที่เจือปนอยู่ในน้ำจำนวนมากแล้ว ยังขึ้นกับสภาพทางภูมิศาสตร์และกระแสลมด้วย

จุลชีววิทยาและปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นของแหล่งน้ำที่มีการแบ่งชั้นถาวร (meromictic lake) และการเกิด eutrophication แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ภาพตัดขวางของแหล่งน้ำแบบ meromictic lake และการเกิด eutrophication

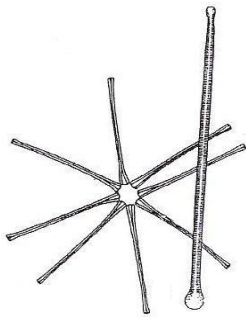
ที่มา: ดัดแปลงจาก Mason (1994)

จากรูป ในชั้น epilimnion ซึ่งแสงส่องถึงจะมีการเจริญของแพลงก์ตอนพืชต่างๆ คือ diatom, dinoflagellate และ cyanobacteria (ตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.13)

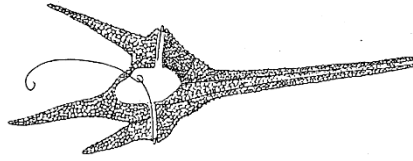
**ตารางที่ 3.3** กลุ่มของแพลงก์ตอนและตัวอย่างบางชนิดที่พบในแหล่งน้ำที่เกิด eutrophication

กลุ่มแพลงก์ตอน	ตัวอย่างชนิด
diatom plankton	<i>Asterionella</i> , <i>Fragillaria crotonensis</i> , <i>Stephanodiscus astraea</i> , <i>Melosira granulata</i>
dinoflagellate plankton	<i>Peridinium bipes</i> , <i>Ceratium</i> , <i>Glenodinium</i>
chlorococcal plankton	<i>Pediastrum</i> , <i>Scenedesmus</i>
cyanobacterial plankton	<i>Anacystis</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Anabaena</i>

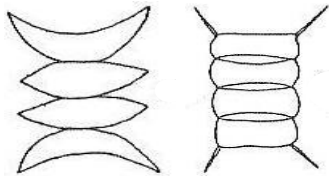
ที่มา: Mason (1994)



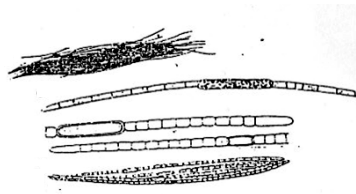
a. *Asterionella*



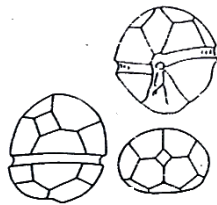
b. *Ceratium*



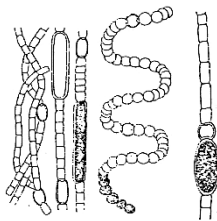
c. *Scenedesmus*



d. *Aphanizomenon*



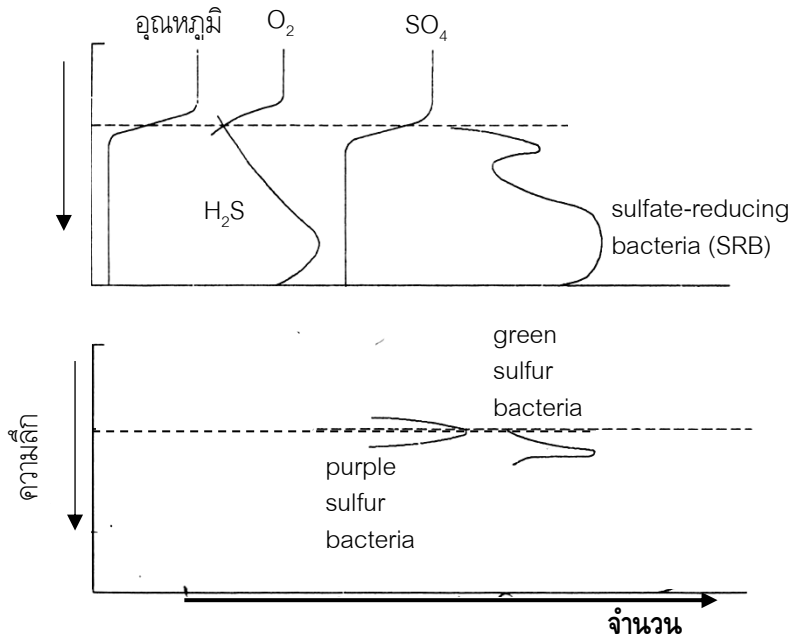
e. *Glenodinium*



f. *Anabaena*

ภาพที่ 3.13 แพลงก์ตอนบางชนิดที่พบในแหล่งน้ำที่เกิด eutrophication  
ที่มา: Mason (1994)

ในช่วงปลายฤดูร้อนหลังจากแพลงก์ตอนพืชเจริญอย่างหนาแน่น เพราะอาหารอุดมสมบูรณ์ ก็จะตายลงตกตะกอนลงสู่ใต้น้ำและถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะมีอากาศ และเมื่อออกซิเจนถูกใช้หมดไปสภาวะของตะกอนก้นน้ำจะเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาการย่อยสลายจึงเปลี่ยนไปด้วย โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะเจริญขึ้นมาแทน ซึ่งทำให้เกิดผลผลิตจากกระบวนการ anaerobic metabolism หลายนชนิด เช่น  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  และ  $CO_2$  สารเหล่านี้จะละลายขึ้นมาในชั้นน้ำอย่างช้าๆ ยกเว้นมีเทน ( $CH_4$ ) จะลอยขึ้นสู่อากาศเป็นฟองอากาศ และมีบางส่วนจะละลายน้ำแล้วถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียที่ใช้มีเทนเป็นอาหารได้ภายใต้สภาวะมีออกซิเจน ดังนั้นในชั้น hypolimnion ที่อาจจะมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในส่วนบนของชั้นก็就会被ใช้หมดไป ชั้น hypolimnion อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยสิ้นเชิง และปฏิกิริยาที่เกิดตามมาก็คือ sulfate reduction โดยกลุ่ม sulfate-reducing bacteria ซึ่งทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นจำนวนมาก บริเวณนี้จะมีแสงส่องถึงบ้าง ทำให้แบคทีเรียชนิดที่ใช้ออกซิไดซ์  $H_2S$  โดยใช้แสง 2 กลุ่ม คือ purple sulfur bacteria และ green sulfur bacteria เจริญอยู่ที่ชั้น thermocline โดยที่ purple sulfur bacteria จะเจริญเป็นชั้นบางๆ อยู่เหนือชั้นอาศัยของ green sulfur bacteria (ภาพที่ 3.14) เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้ต้องการแสงมากกว่าและทนออกซิเจนได้มากกว่า แต่ทน  $H_2S$  ได้น้อยกว่า ส่วน green sulfur bacteria สามารถเจริญได้ในบริเวณที่มีแสงน้อยที่สุดและไม่สามารถทนออกซิเจน แต่ทน  $H_2S$  เข้มข้นสูงได้ จึงพบในชั้นน้ำตั้งแต่ระดับที่หมดออกซิเจนลงไปจนถึงระดับที่แสงส่องถึงน้อยที่สุด ผลของการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มนี้ทำให้โปรโตซัวและสัตว์น้ำขนาดเล็กอื่นในชั้น epilimnion ที่อยู่ถัดมาเพิ่มจำนวนขึ้นโดยการกินแบคทีเรียเหล่านี้เป็นอาหาร ได้แก่ พวก ciliates, copepods และเกิดสาหร่าย *Cladophora*



รูปที่ 3.14 การกระจายความหนาแน่นของ purple sulfur bacteria, green sulfur bacteria และ sulfate-reducing bacteria

ที่มา: ดัดแปลงจาก มั่นสินและไพพรรณ (2539)

### 3.4.4 ลักษณะสมบัติของน้ำที่เกิด eutrophication

ในตารางที่ 3.4 เป็นตารางที่แสดงถึงปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในขณะที่เกิด eutrophication ของอ่างเก็บน้ำแห่งหนึ่งในประเทศอังกฤษ จะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนทั้งหมดมีถึง  $>500$  ไมโครกรัม/ลิตร ซึ่งมากกว่าปริมาณปกติในแหล่งน้ำผิวดินถึง 100 เท่า โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไนเตรตซึ่งแพลงก์ตอนพืชจะใช้ในการเจริญเติบโต คือ ผลิตโปรตีน หรือสารอินทรีย์ไนโตรเจนรูปอื่นๆ ไนเตรตละลายน้ำได้ดีและแตกตัวให้อิออน

จึงถูกใช้โดยพืชอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสจะมีความสำคัญมากกว่าในการกำหนดความสมบูรณ์ของพืชน้ำ เพราะฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในแหล่งน้ำจะเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ และต้องอาศัยแบคทีเรียในวัฏจักรไนโตรเจนย่อยสลายเมื่อตายลงให้กลับเป็นไนเตรตอีกครั้ง อีกทั้งการขาดแคลนไนโตรเจนจะเกิดขึ้นได้ยาก เพราะมีจุลินทรีย์ที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ได้แก่ Cyanobacteria, phytoplankton และ แบคทีเรีย สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำมักเป็นออร์โทฟอสเฟต ซึ่งในแหล่งน้ำปกติควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ไมโครกรัม/ลิตร แต่ในน้ำที่เกิด eutrophication มีถึง >20 ไมโครกรัม/ลิตร ปริมาณของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนดังกล่าวนี้จะส่งผลให้เกิดการเบ่งบาน (bloom) ของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายจนทำให้ค่าความขุ่น ซึ่งวัดจากการมองเห็นเครื่องหมายจากระดับน้ำที่หย่อนแผ่นเซคคิ (secchi disk) ลงไป มีค่า <2.0 เมตร ซึ่งแสดงว่า ฝืนน้ำเต็มไปด้วยสารแขวนลอยของแพลงก์ตอนหนาแน่น สอดคล้องกับปริมาณของคลอโรฟิลล์เอ ซึ่งมีค่า >10 ไมโครกรัม/ลิตร และผลผลิตของแพลงก์ตอนพืชมีปริมาณถึง 350 – 700 กรัม C/ตารางเมตร/วัน ซึ่งแพลงก์ตอนพืชจำนวนมากมายังส่งผลให้ในชั้น hypolimnion เหลือออกซิเจนปริมาณน้อย โดยมีออกซิเจนละลายอยู่เพียง <10%

ตารางที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของน้ำที่เกิด eutrophication

ลักษณะสมบัติ	ปริมาณความเข้มข้น
total phosphorus ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	>20
total nitrogen ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	>500
secchi depth (m)	<2.0
hypolimnetic dissolved oxygen (% saturation)	<10
chlorophyll-a ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	>10
phytoplankton production ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	350-700

ที่มา: ดัดแปลงจาก Mason (1994)

จากลักษณะดังกล่าวของน้ำที่เกิด eutrophication จึงเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลกระทบของ eutrophication ต่อระบบนิเวศและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

<p><b>ผลกระทบ</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความหลากหลายชนิดของสิ่งมีชีวิตลดลง และสิ่งมีชีวิตที่เป็นชนิดเด่น (dominant sp.) เปลี่ยนชนิดไป</li> <li>2. มวลชีวภาพของพืชและสัตว์เพิ่มขึ้น</li> <li>3. ความขุ่นของน้ำเพิ่มขึ้น</li> <li>4. อัตราการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินเร็วขึ้น</li> <li>5. ในที่สุดจะนำไปสู่การเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนในแหล่งน้ำ</li> </ol>
<p><b>ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. การบำบัดน้ำเพื่อประโยชน์ต่างๆ จะยุ่งยากขึ้น และทำให้เกิดกลิ่นและรสที่ไม่พึงประสงค์</li> <li>2. น้ำอาจจะมีผลต่อสุขภาพ เนื่องจากสารพิษที่เกิดขึ้น เช่น แอมโมเนีย ไนเตรต สาหร่ายพิษ เป็นต้น</li> <li>3. ทศนิยมภาพที่ดีของแหล่งน้ำเสียไป</li> <li>4. การเพิ่มของพืชน้ำทำให้ขัดขวางการไหลของน้ำ และกีดขวางการคมนาคมทางน้ำ</li> <li>5. พันธุ์ปลาที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจสูญพันธุ์ไปจากแหล่งน้ำ</li> </ol>

ที่มา: Mason (1994)

## 3.4.5 ผลกระทบอื่นๆ จากการเกิด eutrophication

## (1) สาหร่ายมีปริมาณมาก

การเกิด eutrophication บางครั้งมีความรุนแรงเกิดการสะพรั่ง (bloom) ของสาหร่ายจำนวนมากจนสามารถวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ได้มากกว่า 40 ไมโครกรัม/ลิตร และถ้าปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่า 100 ไมโครกรัม/ลิตร โอกาสที่ปลาในแหล่งน้ำจะตายมีสูงมากเพราะการหายใจในตอนกลางคืนร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่นๆ โดยไม่มีการสังเคราะห์แสงทำให้ออกซิเจนเป็นศูนย์ในแหล่งน้ำ ในประเทศไทยพบสภาวะนี้ในแหล่งน้ำหลายแห่ง เช่น ลำตะคอง จ.นครราชสีมา กว๊านพะเยา จ.พะเยา บึงแก่นนคร จ.ขอนแก่น และทะเลสาบสงขลา จ.สงขลา ทำให้มีสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติและเลี้ยงในกระชังตายเป็นจำนวนมาก ชนิดของสาหร่ายที่พบ เช่น *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Nostoc*, *Oscillatoria* และ *Cladophora*

## (2) สาหร่ายพิษเพิ่มจำนวน

สาหร่ายชนิดที่มีพิษที่มีความเข้มข้นมาก มีจำนวนหลายเซลล์ในแหล่งน้ำที่เกิด eutrophication เมื่อเซลล์ตายหรือเซลล์แก่ หรือเกิดการรั่วของผนังเซลล์ จะปล่อยสารพิษออกมา โดยทั่วไปแล้วการตายของสัตว์จะเกิดจากการได้รับพิษเนื่องจากการย่อยเซลล์ของสาหร่ายที่กินเข้าไป ถึงแม้บางครั้งมีการใช้จุนสีสัต (copper sulfate) เพื่อกำจัดเซลล์สาหร่ายแล้ว แต่ก็ยังพบว่ามีการพิษตกค้างอยู่ในแหล่งน้ำ และเป็นสาเหตุให้สัตว์ตายได้ โดยปริมาณของน้ำที่สัตว์ดื่มเข้าไปแล้วตายมีได้ตั้งแต่ 2-3 มิลลิลิตร จนถึงหลายลิตร สาหร่ายพิษเหล่านี้ส่วนใหญ่คือกลุ่ม Cyanobacteria จะมีสารพิษแตกต่างกัน เช่น

*Anabaena* เป็นสาหร่ายที่มีสารพิษหลายชนิด คือ อนาโทกซิน-เอ (anatoxin-a, ANTX-A) อนาโทกซิน-เอ (เอส) (anatoxin-a (s), ANTX-A (s)) แซกซิ

ทอกซินและนีโอแซกซิทอกซิน (saxitoxin, STX and neosaxitoxin, NEOSTX) เป็นพิษต่อระบบประสาท และนอกจากนี้ยังมีสารพิษที่มีพิษต่อดับ คือ ไมโครซิสติน (microcystin, MCYST)

*Aphanizomenon* เป็นสาหร่ายที่มีสารพิษ อานาทอกซิน-เอ และแซกซิทอกซิน

*Microcystis* เป็นสาหร่ายที่มีสารพิษไมโครซิสติน ซึ่งนอกจากมีพิษต่อดับแล้ว มีรายงานการศึกษาในประเทศจีน (Abdul – Hussein, 1988) ว่าคนที่ดื่มน้ำจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนของสาหร่ายชนิดนี้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน มีอัตราการเกิดมะเร็งในตับสูงเป็นพิเศษ โดยเฉพาะชนิด *Microcystis aeruginosa*

(3) สาหร่ายสร้างสารที่มีกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ โดยเฉพาะในแหล่งน้ำเพื่อบริโภค

สาหร่ายบางชนิดสามารถให้กลิ่นและรสได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยที่บางครั้งกลิ่นและรสจะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่บางครั้งก็แยกจากกัน เช่น รสหวานและขม ซึ่งจะกลายเป็นรสเปรี้ยว ถ้ามีกลิ่นเป็นกรด เป็นต้น ปริมาณของสาหร่ายก็มีส่วนในการให้กลิ่นที่แตกต่างกัน มีสาหร่ายหลายชนิดที่เมื่อมีปริมาณมาก (abundant) กับปริมาณปานกลาง (moderate) จะให้กลิ่นไม่เหมือนกัน (ตารางที่ 3.6)

ตารางที่ 3.6 กลิ่นและรสชาติของสาหร่ายในน้ำบางชนิด

จีโนส (algal genus)	กลุ่ม (algal group)	กลิ่นเมื่อสาหร่ายมีปริมาณต่างกัน		รส
		ปานกลาง	มาก	
<i>Anaebaena</i>	cyanobacteria	grassy, nasturtium, musty	septic	-
<i>Anacystis</i>	cyanobacteria	grassy	septic	sweet
<i>Aphanizomenon</i>	cyanobacteria	grassy, nasturtium, musty		sweet
<i>Asterionella</i>	diatom	geranium, spicy	fishy	-
<i>Ceratium</i>	flagellate	fishy	septic	bitter
<i>Fragilaria</i>	diatom	geranium	musty	-
<i>Glenodinium</i>	flagellate	-	fishy	-
<i>Melosira</i>	diatom	geranium	musty	-
<i>Pediastrum</i>	green	-	grassy	-
<i>Peridinium</i>	flagellate	cucumber	fishy	-
<i>Scenedesmus</i>	green	-	grassy	-
<i>Stephanodiscus</i>	diatom	geranium	fishy	-

ที่มา: ดัดแปลงจาก Mason (1994)

## (4) พิษของแอมโมเนีย

สาหร่ายที่มีจำนวนมากในแหล่งน้ำที่เกิด eutrophication เมื่อตายลงต้องมีการย่อยสลาย ซึ่งต้องใช้ออกซิเจนจำนวนมาก ซึ่งนอกจากทำให้น้ำขาดแคลนออกซิเจนแล้ว การเน่าเปื่อยของเซลล์สาหร่ายเหล่านี้ที่มีสารประกอบไนโตรเจน ทำให้เกิดแอมโมเนียปริมาณสูงมากด้วย แอมโมเนียอิสระ หรือ  $\text{NH}_3$  เป็นพิษอย่างมากต่อปลา แต่อิออนแอมโมเนียม หรือ  $\text{NH}_4^+$  ไม่เป็นพิษ แอมโมเนียปริมาณมากในน้ำ ทำให้ปลาที่อาศัยอยู่ไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือด เกิดผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น ทำอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน ส่งผลให้ปลามักจะอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย

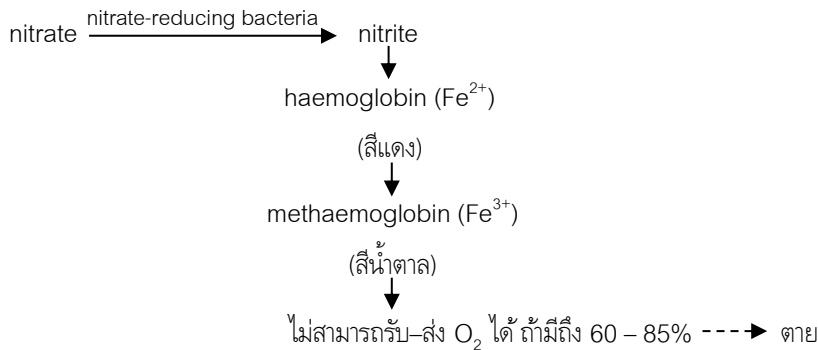
## (5) พิษของไนไตรต์

จุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomanas* และ *Nitrosococcus* จะเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ ไนไตรต์ในน้ำมักไม่สะสมในปริมาณที่สูง เนื่องจากมักจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรตด้วยจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrobacter* เพราะไนไตรต์เป็นสาร intermediate ในกระบวนการ nitrification แต่ก็ยังมีบางโอกาสที่จะสะสม ถ้าในแหล่งน้ำมีความสมบูรณ์ของปฏิกิริยานitrification ไนไตรต์ทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน (haemoglobin) ได้ เมทิโมโกลบิน (methaemoglobin) ซึ่งไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ ปลาที่ได้ไนไตรต์จึงมีเมทิโมโกลบินในเลือด ซึ่งเห็นได้จากเลือดเป็นสีน้ำตาล ปลาที่มีอาการเช่นนี้ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากไม่สามารถใช้ออกซิเจน

## (6) พิษของไนเตรต

ไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากขั้นสุดท้ายของกระบวนการ nitrification ในแหล่งน้ำที่เกิด eutrophication จะมีไนเตรตปริมาณมาก ถ้ามีจำนวนมากถึง 90-140 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้เด็กทารกอายุต่ำกว่า 4 เดือน เป็นโรคโลหิตเป็นพิษ เรียกว่าโรค

“methaemoglobinaemia” ลักษณะของโรคคือ เม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับ-ส่งออกซิเจน จึงทำให้เกิดภาวะ asphyxia เคยมีรายงานว่ามีปริมาณไนเตรตในน้ำใต้ดินที่ทำให้เด็กในประเทศสาธารณรัฐเชคโกสโลวาเกียเป็นโรค methaemoglobinamia มีค่าอยู่ระหว่าง 18–257 มิลลิกรัม/ลิตร (IRPTC, 1984) สาเหตุของการเกิดโรคนี้ เนื่องจากในกระเพาะอาหารของทารก มีสภาพเป็นกรด (pH ต่ำมาก) มากกว่ากระเพาะของผู้ใหญ่ ซึ่งเป็นสภาวะที่เอื้ออำนวยต่อการเกิด reduction ของไอออนไนเตรตเป็นไนไตรต์ และยังเอื้ออำนวยต่อการเจริญของจุลินทรีย์พวก nitrate-reducing bacteria ซึ่งสามารถ reduce ไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ ปฏิกริยาแสดงในรูปที่ 3.15



**รูปที่ 3.15** แผนภาพการเกิด methaemoglobin

**ที่มา:** ดัดแปลงจาก Maier, Pepper and Gerba (2008)

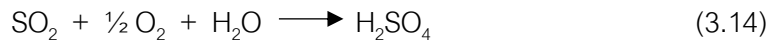
โดยปกติใน haemoglobin จะมีไอออนเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) อยู่ เมื่อได้รับ  $\text{O}_2$  ไอออนนี้จะจับกับ  $\text{O}_2$  กลายเป็น oxyhaemoglobin มีสีแดง และสามารถรับ-ส่งออกซิเจนได้ตามปกติ แต่ถ้ามีไนไตรต์จะออกซิไดซ์ไอออนเฟอร์รัส ซึ่งมีผลทำให้ methaemoglobin มีสีน้ำตาล และไม่สามารถรับ-ส่งออกซิเจนได้ตามปกติ ถ้าร่างกายมีปริมาณ methaemoglobin

ถึงมากกว่า 25% จะเห็นผิวหนังเป็นสีน้ำเงิน (cyanosis) แต่ถ้ามีถึงช่วงระหว่าง 60-85% จะเกิดภาวะ asphyxia ซึ่งมีอาการหายใจติดขัด ชีพจรหยุดเต้น

### 3.5 การทำลายสิ่งปลูกสร้างและโบราณสถานของจุลินทรีย์

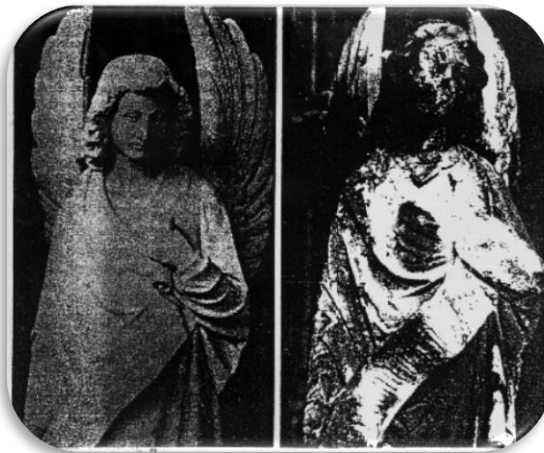
#### (1) การทำลายประติมากรรม

แบคทีเรียชนิดออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และไม่สังเคราะห์แสง (ไม่มีสีเขียว) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นแหล่งคาร์บอน หรือสารอินทรีย์ชนิดอื่นหรือสารอินทรีย์คาร์บอน ได้แก่ *Thiobacillus* และประเภทที่สะสมซัลเฟอร์ไว้ในตัว เช่น *Beggiatoa*, *Thiospira* เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าเกิดกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้สิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นมีสภาพเป็นกรด มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดผลเสียหายตามอย่างมาก โดยเฉพาะการทำลายรูปปั้นหินประติมากรรม เช่น รูปปั้น "Peter" ในโบสถ์เมือง Cologne ประเทศเยอรมัน (รูปที่ 3.16) เปรียบเทียบเมื่อเริ่มแรกสร้างปี 1880 และถูกทำลายด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในปี 1993 และการทำลายมหาวิหาร "Parthenon" ในประเทศกรีซ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เกิดจากกิจกรรมของแบคทีเรีย *Thiobacillus thioparus* ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปเป็นกรดซัลฟูริกได้ โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มาจากการเกิดมลพิษทางอากาศที่เพิ่มมากขึ้นทุกปีในสิ่งแวดล้อม

ตามสภาพสังคม การใช้รถยนต์ และอุตสาหกรรมของมนุษย์ การทำลายเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ร่วมกับมลพิษทางอากาศ กล่าวกันว่าได้ทำลายประติมากรรมและสิ่งปลูกสร้างหินอ่อนในโลกเป็นจำนวนมากในรอบ 35 ปีที่ผ่านมา เกิดผลมากกว่าเมื่อ 300 ปีก่อนหน้านี้ โดยกรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อไปกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นส่วนประกอบในหินอ่อน ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ซึ่งจะเห็นเป็นคราบปูนสีขาว คราบนี้จะอ่อน สามารถชะได้ด้วยน้ำฝน หรือแตกเป็นผงทำให้เกิดคราบไหลเป็นทางและกร่อนไปเรื่อยๆ ในที่สุดก็ทำลายได้ทั้งหมด แปรสภาพจากอนุสรณ์สถานกลายเป็นถ้ำจุลินทรีย์ (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.16 รูปปั้น “Peter” ในโบสถ์เมือง Cologne ประเทศเยอรมัน ก่อนและหลังถูกทำลายด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์

ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2000)



รูปที่ 3.17 ซากมหาวินิจฉัย “Parthenon” ที่ยังคงเหลืออยู่  
ที่มา: Vernam (2000)

## (2) การทำลายภาพจิตรกรรม

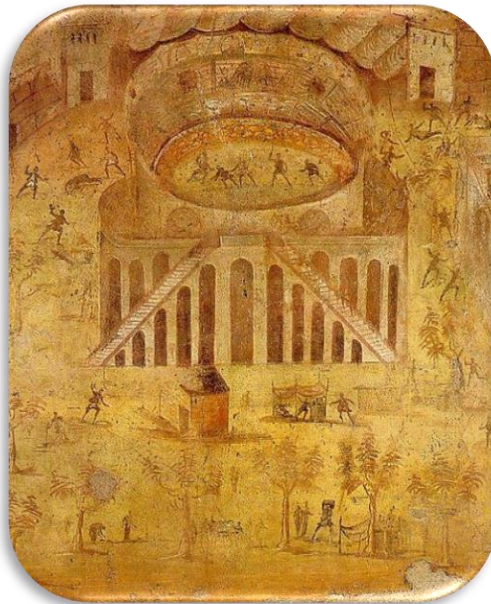
การเสื่อมสภาพของจิตรกรรมฝาผนังนอกจากสาเหตุทางกายภาพและทางเคมียังมีสาเหตุทางชีวภาพโดยเฉพาะจากจุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีต เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ เช่น การเสื่อมสภาพของภาพเขียน “The Last Supper” ของจิตรกรระดับโลก Leonardo Da Vinci (รูปที่ 3.18) การเสื่อมสภาพของภาพเขียนในเมืองโรมันโบราณ “Herculaneum” ในประเทศอิตาลี (รูปที่ 3.19) พบสาเหตุการเสื่อมมาจากแบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* (*B. cercus*, *B. thuringiensis*, *B. simplex*, *B. muralis*, *B. megaterium* และ *B. subtilis*) นอกจากนี้ยังพบ *Micrococcus*, *Arthrobacter* และ *Microbacterium* ส่วนราพบ *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Fusarium* (Pepe et al,

2011) ส่วนในประเทศไทยพบจุลินทรีย์ที่ทำให้ภาพจิตรกรรมฝาผนังสมัยอยุธยาอายุ 400 ปี ที่วัดใหญ่สุวรรณารามวรวิหาร จ.เพชรบุรี เสื่อมสภาพ (รูปที่ 3.20) แบคทีเรีย ได้แก่ *Bacillus*, *Pseudomonas* และ *Micropolyspora* รา ได้แก่ *Currularia*, *Tilletiopsis*, *Aspergillus* และ *Fusarium* (วิษณุ, 2557) สำหรับสาเหตุที่ทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญและแพร่พันธุ์อย่างรวดเร็วเนื่องจากความชื้น อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยจุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ธาตุอาหารจากฝุ่นละอองคราบสกปรกเกลือแร่บนผิวภาพ รวมทั้งตัวกลางละลายสีฝุ่น (powder pigment) ที่ใช้เขียนหรือวาดภาพเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน ทำให้อุณหภูมิของสีขาดแรงยึดเหนี่ยวกันเป็นแผ่น นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสร้างเอนไซม์บางชนิด เช่น amylase, cellulose, hemicellulase และ chitinase เป็นต้น และกรดอินทรีย์บางชนิดเช่น citric acid, oxalic acid และ gluconic acid เป็นต้น ซึ่งขับออกมาออกเซลล์ แล้วย่อยสลายสีบางชนิด ทำให้สีเดิมซีดจางลงได้ ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะภายนอกของภาพที่ปรากฏตลอดจนทำให้โครงสร้างของภาพไม่แข็งแรงหลุดร่อนได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสร้างสีต่างๆ ซึ่งสามารถแทรกซึมลงบนภาพ ทำให้ภาพเกิดการเปลี่ยนสี (discoloration) รวมทั้งยังสร้างโครงสร้างบางอย่างที่มีสี ทำให้เกิดรอยเบื้อนเห็นเป็นคราบต่างด้าเป็นจุดหรือเกิดลักษณะของความสกปรกบนภาพ ทำลายหรือลดความงดงามของภาพจิตรกรรมฝาผนังไปได้



รูปที่ 3.18 การเสื่อมสภาพของภาพจิตรกรรม “The Last Supper”

ที่มา : Artwatch UK (2015)



รูปที่ 3.19 การเสื่อมสภาพของภาพจิตรกรรมในเมืองโรมันโบราณ “Herculaneum”

ที่มา : Pepe *et al.* (2011)



**รูปที่ 3.20** ภาพจิตรกรรมฝาผนังสมัยอยุธยาถูกทำลายด้วยรา  
**ที่มา:** วิษณุ (2557)

(3) การทำลายอาคารบ้านเรือน

ในปัจจุบันมีการก่อสร้างอาคารสูงเป็นจำนวนมากในเมืองใหญ่หลายแห่งทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดสภาพไม่เหมาะสม ก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ (รูปที่ 3.21) เพราะเกิดคราบสีน้ำตาลดำ รวมทั้งการกัดกร่อนพื้นผิวและสีที่ทาภายนอกหลุดร่อน สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นทั้งอาคารที่ทาสีและไม่ทาสี ทั้งที่สร้างใหม่และเก่า จึงไม่ใช่แค่เกิดขึ้นกับโบราณสถานซึ่งเป็นสิ่งใกล้ตัว แต่ได้เกิดปัญหานี้กับสิ่งปลูกสร้าง อาคารบ้านเรือนต่างๆ ในชีวิตประจำวันที่อยู่ใกล้ตัว โดยมีจุลินทรีย์สำคัญที่เป็นสาเหตุคือสาหร่าย ได้แก่ *Chroococcus*, *Chlorococcum*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Scenedesmus* และ *Trentepohlia* เป็นต้น (Cutler et al., 2013) เนื่องจากสาหร่ายเหล่านี้สามารถสร้างกรดอินทรีย์กัดกร่อนพื้นผิวและสีที่ทาภายนอก รวมทั้งการมีการทำลายฟิล์มของสีขณะพื้นผิวบริเวณที่มีสาหร่ายเจริญอยู่แห้งตัวลง ทำให้สภาพพื้นผิวหลุดร่อนเปลี่ยนแปลงไป บางครั้ง

การสร้างกลุ่มเซลล์ของสาหร่ายทำให้ขีดขวางการไหลของน้ำเกิดการกักเก็บน้ำบนพื้นผิว เป็นผลให้เกิดความชื้นสะสมบนพื้นผิวอาคาร และยังชักนำให้เกิดการเจริญและพัฒนาของพืชชั้นสูงขึ้นตามลำดับ ได้แก่ ไลเคนส์ (lichens) มอสส์ (mosses) เฟิร์น (fern) ไปจนถึงพืชชั้นสูงที่สร้างเมล็ด ซึ่งพืชในกลุ่มต่างๆ เหล่านี้จะมีบทบาทต่อการกักกรองทางเคมีและกายภาพอย่างรุนแรงของพื้นผิว และวัสดุที่ก่อสร้างต่อไป



รูปที่ 3.21 การทำลายพื้นผิวอาคารบ้านเรือนของสาหร่าย

ที่มา: Artwatch UK (2013)

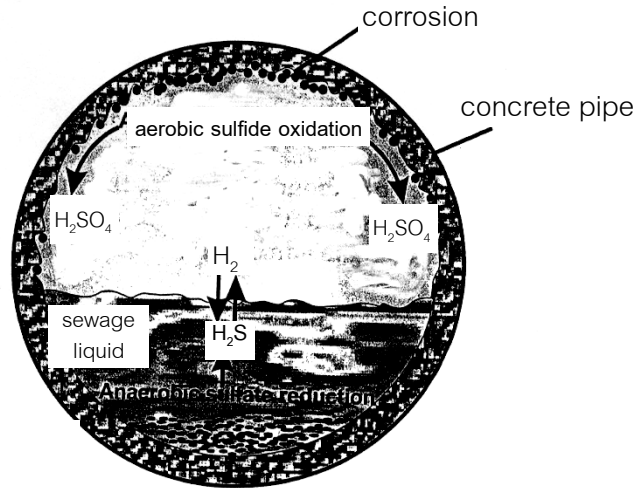
(4) การกักกรองคอนกรีตและโลหะ

เนื่องจากการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วผลิตกรด ซัลฟิวริก หรือกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) และกรดบิวทีริก (butyric acid) ของแบคทีเรียกลุ่ม sulfide-oxidizing bacteria เช่น *Thiobacillus concretivorus*, *Acidithiobacillus thiooxidans* เป็นตัวการสำคัญที่ทำลายท่อคอนกรีตในระบบจ่ายน้ำ และถ้ามีส่วนผสมเป็นเหล็กก็จะเป็น *Acidithiobacillus ferrooxidans* การกักกรองนี้ก่อความเสียหายอย่างมาก

ต่อท่อคอนกรีตในประเทศสหรัฐอเมริกาปีละนับร้อยล้านดอลลาร์ การทำลายจะเริ่มจากทางด้านในของท่อคอนกรีต โดยกลุ่ม sulfide-oxidizing และ sulfate-reducing bacteria จากรูปที่ 3.22 ในท่อคอนกรีตที่มีน้ำเสียอยู่ข้างในจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นน้ำเสีย และช่องว่างเหนือน้ำที่มีความชื้น ส่วนที่เป็นน้ำจะอยู่ในสภาพไร้อากาศและมีสารอินทรีย์จำนวนมาก ทำให้ SRB เช่น *Desulfovibrio* ซึ่งมีในธรรมชาติอยู่แล้วเจริญอย่างรวดเร็ว และให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซ  $H_2S$  ( $HS^- \leftrightarrow H_2S$ ) อยู่ภายในท่อที่เต็มไปด้วยความชื้น ซึ่งในสภาวะสิ่งแวดล้อมเช่นนี้จะเหมาะสมกับการเจริญของ sulfide-oxidizing bacteria ที่มีอยู่บริเวณผนังของท่อคอนกรีต จะออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปเป็นกรดซัลฟูริก ( $H_2S \leftrightarrow H_2SO_4$ ) การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อกรดซัลฟูริกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $Ca(OH)_2$ ] ที่เป็นตัวจับผนึก (binder) ของคอนกรีตได้เป็นแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) ทำให้ไม่สามารถจับผนึกเป็นคอนกรีตได้อีกต่อไป เรียกว่าเกิดการกร่อน (deterioration) ปฏิกิริยาเป็นดังนี้ คือ

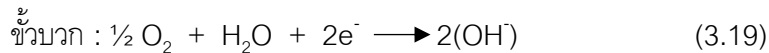


Mori *et al.* (1992) ได้ศึกษาการกัดกร่อนคอนกรีตของแบคทีเรีย พบว่าใกล้บริเวณการกัดกร่อนลึก 0-4 มิลลิเมตร พบ *Thiobacillus thiooxidans* จำนวนเกือบ 100,000 เซลล์/ก.คอนกรีต ซึ่งกิจกรรมของแบคทีเรียจำนวนมากนี้ทำให้เกิดการกร่อนเป็นปริมาณถึงระหว่าง 4.3-4.7 มิลลิเมตร/ปี ส่งผลให้ท่อคอนกรีตบางลงจาก 88 มิลลิเมตร เหลือเพียง 32-36 มิลลิเมตร ภายใน 12 ปี จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่า ท่อคอนกรีตจะมีอายุการใช้งานได้เพียงประมาณ 20 ปี

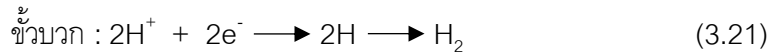


รูปที่ 3.22 ภาพตัดขวางแสดงการเกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนท่อคอนกรีตส่งน้ำของแบคทีเรีย  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Maier, Pepper and Gerba (2008)

สำหรับการกัดกร่อนของโลหะ จะเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี 2 ปฏิกิริยาที่  
ขั้วบวก (cathode) และขั้วลบ (anode) ของโลหะ ในที่นี้ยกตัวอย่างเหล็ก (Fe) เมื่อสัมผัส  
กับอากาศและน้ำ โดยปฏิกิริยาแรก คือ



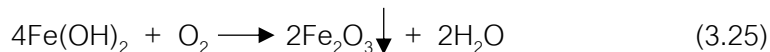
ปฏิกิริยาที่สอง จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นจากสภาพไร้ออกซิเจนของบริเวณที่น้ำปกคลุม  
โลหะอยู่เป็นลักษณะของฟิล์ม เรียกว่า “biofilm” ซึ่งจะเต็มไปด้วยเซลล์แบคทีเรียและน้ำมี  
สารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่แล้วตามธรรมชาติ โดยปฏิกิริยาที่สอง คือ



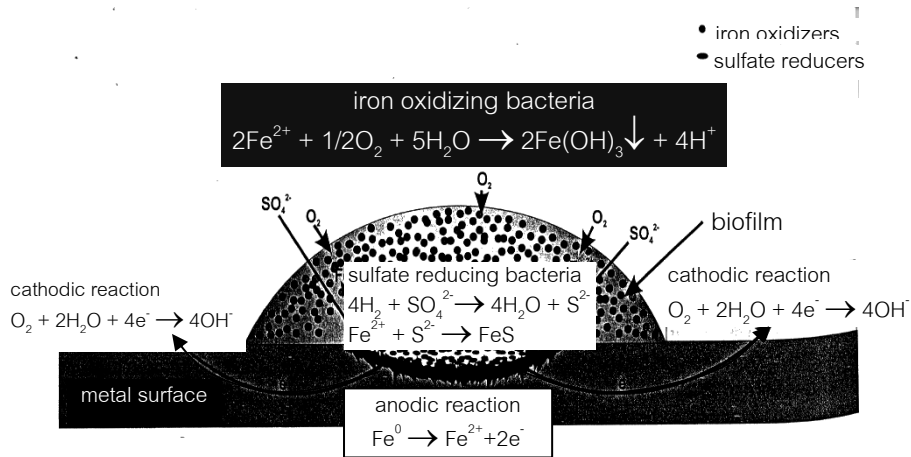
SRB เช่น *Desulfovibrio desulfuricans* จะใช้  $\text{H}_2$  ที่เกิดขึ้นเป็น electron donor ปฏิกริยา คือ



ซึ่งกิจกรรมนี้ของ SRB จะทำให้  $\text{H}_2$  ที่ขั้วบวกหมดไป ปรากฏการณ์นี้ จะเร่งให้เกิดการปล่อยประจุลบของขั้วลบมากยิ่งขึ้น ทำให้กัฏกร่อนมากยิ่งขึ้น สุดท้ายของปฏิกริยาจะได้ เหล็กซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) เกิดขึ้น ซึ่งคือสนิมเหล็กนั่นเอง และในขณะเดียวกันบริเวณของของ biofilm ที่ติดกับอากาศจะเกิดปฏิกริยาของ iron-oxidizing bacteria ทำให้เกิดเหล็กไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกริยากับออกซิเจนได้  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นสนิมเหล็กอีกเช่นเดียวกัน รวมปฏิกริยาของการกัดกร่อนโลหะคือ



การเกิดการกัดกร่อนของโลหะโดยแบคทีเรียแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การเกี่ยวข้องกับกำกรัดกร่อนโลหะของ iron-oxidizing bacteria และ SRB  
 ที่มา: Maier, Pepper and Gerba (2008)

### เอกสารอ้างอิง

มันลิน ตันทุลเวศน์ และไพพรรณ พรประภา. (2540). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศิริพรรณ สารินทร์. (2550). จุลชีววิทยาลิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด สามีลดดา.

วิษณุ เซ็นบัว. (2557). ความหลากหลายทางชีวภาพของเชื้อราที่ปนเปื้อนสภาพจิตรกรรมฝาผนังในแหล่งโบราณสถาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.

- Abdull-Hussein, M.M. and Mason, C.F. (1988). The Phytoplankton Community of a Eutrophic Reservoir. *Hydrobiologia*, 169, 265-277.
- Alexander, M.M., Longabucco, P. and Phillips, D.M. (1981). The Impact of Oil on Marsh Communities in the St. Lawrence River. *Oil Spill Conference* (pp.333-340). Washington DC : American Petroleum Institute.
- Artwatch UK online. (2012). *The "World's Worst Restoration" and the Death of Authenticity*. Retrieved August 9, 2016, from <http://www.artwatch.org.uk/tag/pinin-barcilon/>
- Curtis, E.J.C., Delves-Broughton, J. and Harrington, D.W. (1971). Sewage Fungus: Studies of Sphaerotilus Slime Using Laboratory Recirculating Channels. *Water Res.*, 5, 267-279.
- Cutler, N.A. Viles, H.A., Ahmad, S., McCabe, S. and Smith, B.J. (2013). Algal "Greening" and the Conservation of Stone Heritage Structures. *Environ.*, 442, 152-164.
- Gazzano, C., Favero-Longo, S.E., Lacomussi, P. and Piervittori, R. (2013). Biocidal Effect of Lichen Secondary Metabolites Against Dwelli Microcolonial Fungi, Cyanobacteria and Green Algae. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 84, 300-306.
- Hynes, H.B.N. (1970). *The Ecology of Running Waters*. Liverpool: Liverpool University Press.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker, J. (1999). *Brock Biology of Microorganisms*. (9th ed.). New Jersey: Prentice-Hall.Inc.

Maier, M.R., Pepper, L.I. and Gerba, P.C. (2008). *Environmental Microbiology*. (2nd ed.). Massachusetts: Academic Press.

Mason, C.F. (1994). *Biology of Freshwater Pollution*. (2nd ed.). Singapore: Longman Singapore Publishers Pte Ltd.

Pepe, O., Palomba, S., Sannino, L., Bloaiotta, G., Ventrino, V., Moschetti, G. and Villani, F. (2010). Characterization in the Archaeological Excavation Site of Heterotrophic Bacteria and Fungi of Deteriorated Wall Painting of Herculaneum in Italy. *J. Environ. Biol.*, 32, 241-250.

Vernam, H.A. (2000). *Environmental Microbiology*. Spain: Manson Publishing Ltd.

## บทที่ 4

# จุลินทรีย์กับการเกิดมลพิษจากโลหะหนัก

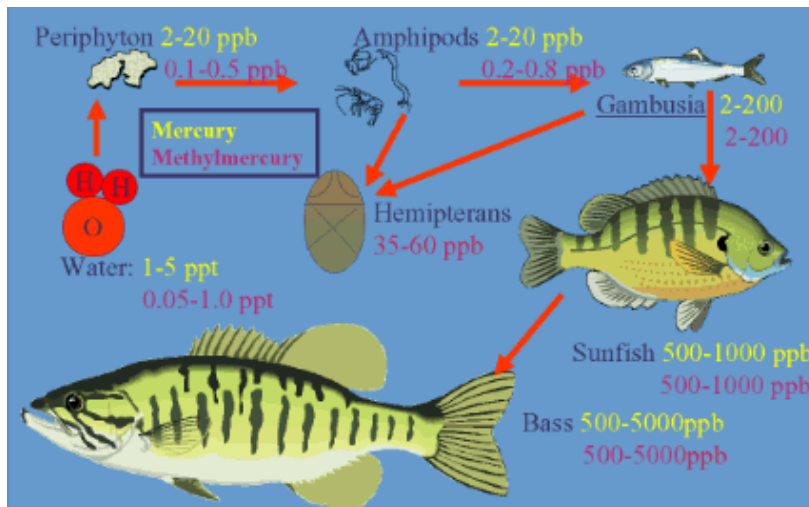


ในระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางชนิด จะมีการผลิตสารจากกระบวนการเมแทบอลิซึมที่ทำให้เปลี่ยนสารบางชนิดให้เป็นรูปที่เป็นพิษได้ หรือสารที่เกิดขึ้นทำให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไปเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต สารดังกล่าวนี้ คือ โลหะ โดยเฉพาะโลหะหนัก ซึ่งมีการใช้ประโยชน์กันอย่างมากในปัจจุบัน ถ้าสารเหล่านี้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ในบางครั้งอาจเป็นอันตรายอย่างรุนแรงจนถึงแก่ชีวิต ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม จึงควรที่จะตระหนักเพื่อป้องกันแก้ไขต่อไป

### 4.1 การเปลี่ยนรูปโลหะให้เป็นสารพิษ

การเปลี่ยนรูปของโลหะ (metal transformation) โดยจุลินทรีย์ ทำให้โลหะมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม มีหลายปฏิกิริยา เช่น การเกิดการละลายของโลหะออกมาจากสารประกอบแร่ (solubilization) โดยการผลิตกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย chemoautotroph ชนิด *Acidithiobacillus ferrooxidans* การเกิดการจับกันของโลหะหนักกับกรดอินทรีย์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (chelation) แล้ว

เปลี่ยนรูปเป็นโมเลกุล metallorganic และการเกิด oxidation เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนรูปดังกล่าวนี้อาจทำให้โลหะหนักมีความเป็นพิษมากขึ้นหรือน้อยลงแต่มีการเปลี่ยนรูปที่เรียกว่า “การเติมหมู่เมทิล (methylation)” จะเพิ่มสภาพพิษของโลหะเพราะเพิ่มคุณสมบัติในการละลายไขมัน (lipophilicity) จึงสามารถสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันของสิ่งมีชีวิต ทำให้พิษของโลหะเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นในห่วงโซ่อาหาร (biomagnification)



รูปที่ 4.1 การเพิ่มของปริมาณปรอทที่สะสมในสิ่งมีชีวิตของห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน้ำทะเล  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Madigan *et al.* (2014)

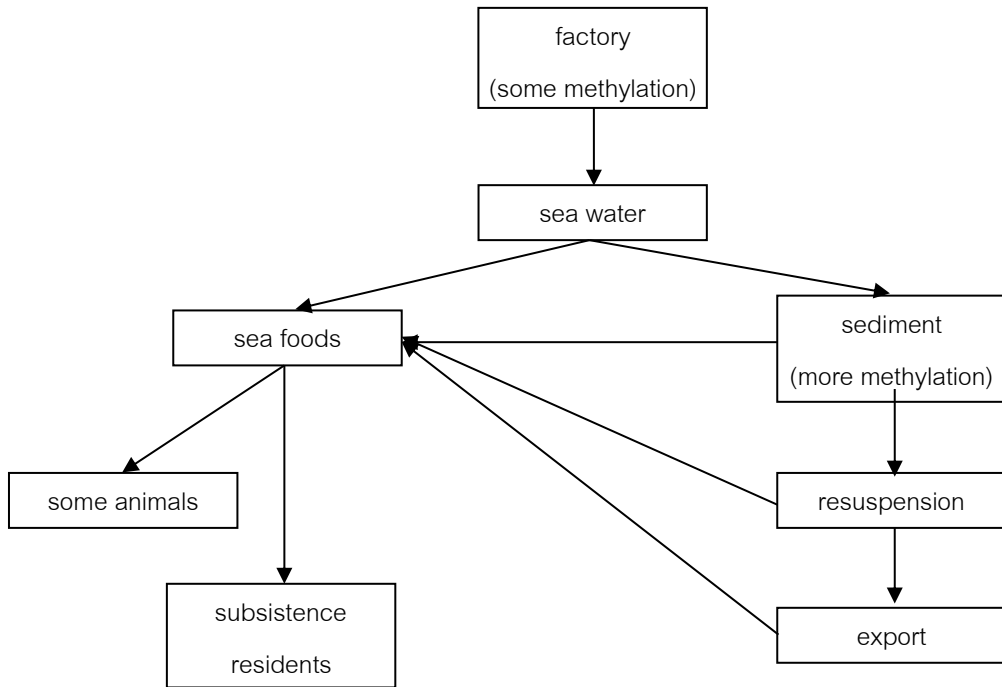
### 1. ปรอท (Mercury, Hg)

ปรอทเป็นโลหะที่พบในดินทั่วไปในรูปสารประกอบซัลเฟอร์ในสินแร่ cinnabar (HgS) และสามารถพบได้ในรูปธาตุซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว เป็นโลหะหนักที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้า ทอผ้า ชุบ

โลหะ สีทาบ้ำน ชักแห้ง คลอรีนและโซดาไฟ กระจาดาช ยารักษาโรคพันตกรรม อุปกรณ์ถ่ายภาพ และการเกษตร ซึ่งใช้สารประกอบปรอทเป็นสารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และสารกำจัดเชื้อรา เป็นต้น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ ถ้าไม่ได้รับการบำบัดอาจมีการปนเปื้อนของสารประกอบปรอทออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ในธรรมชาติปรอทจะอยู่ในรูปปรอทอินทรีย์ หรือไม่ละลายน้ำ เช่น ปรอทซัลไฟด์ (mercury sulphide, HgS) พิษจะไม่ร้ายแรงเท่ากับปรอทอินทรีย์ แต่เมื่อใช้ในอุตสาหกรรม และ/หรือปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำจะมีกระบวนการทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์เป็นตัวเปลี่ยนรูป (transform) ให้เป็นสารประกอบปรอทอินทรีย์ ซึ่งละลายน้ำได้ และละลายได้ดีในไขมัน ทำให้เกิด biomagnification (รูปที่ 4.1) จากรูปจะเห็นการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของปรอทเมทิล (methyl mercury) จากผู้ผลิตที่มีปริมาณต่ำสุดไปจนถึงมีปริมาณความเข้มข้นสูงสุดในผู้บริโภคระดับบนสุดของระบบนิเวศน้ำทะเล พิษของปรอทอินทรีย์ที่ร้ายแรงที่สุดก็คือการทำให้เกิดโรค “มินามาตะ” (Minamata) ในปี ค.ศ. 1953 – 1960 ที่บริเวณอ่าวมินามาตะ ของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมเคมีผลิตพลาสติกแล้วปล่อยน้ำทิ้งลงสู่ทะเล ทำให้มีจำนวนประชากรตายไป 116 คน และประชากรโดยเฉพาะผู้หญิงและเด็กในบริเวณดังกล่าวป่วยเป็นโรคสมองพิการและเดินไม่ได้เป็นจำนวนมาก สาเหตุมาจากการบริโภคปลาและหอยที่มีปรอทสะสมอยู่เข้าไป โดยในปลาและหอยจะพบปรอทในรูปของ methyl mercury ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ) และ dimethyl mercury [ $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ] ซึ่งเป็นปรอทอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษรุนแรงที่สุด มักจะสะสมได้ดีในปลาที่มีไขมันมาก และบางชนิดสะสมในเนื้อได้ถึง 2,000 เท่าของระดับปกติ เช่น ปลาตาบ ปลาหน้าดอกไม้ ปลากะพง และปลาทูแดง เป็นต้น สำหรับอาการเฉียบพลัน หากได้รับไอปรอทจากการสูดดมหรือหายใจเข้าไป คือ ระคายเคืองในระบบหายใจอย่างรุนแรง ซาตามมีอตามชาและริมฝีปาก ทำให้พูดไม่ชัด ปวดท้อง หูตึง และเสียการทรงตัว หากได้รับเรื้อรังจะมีผลต่อระบบประสาท เพราะส่วนใหญ่ไปสะสมอยู่ที่ไขมันในสมองทำให้เกิดอาการทรงตัวไม่อยู่

ตัวสั้นเท็ม อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ความจำเสื่อม ซึมเศร้า หากได้รับขณะตั้งครรภ์ พรอทจะทำลายสมองทารก ทำให้ทารกในครรภ์สมองพิการและมีรูปร่างผิดปกติ เพราะสามารถซึมผ่านรกได้ ซึ่งก็คืออาการของโรคมีนามาตะนั่นเอง แผนภาพการส่งผ่านพรอทที่มีนามาตะแสดงในรูปที่ 4.2

พรอทอินทรีย์มีวาเลนซ์ได้ 3 สถานะ คือ 0, +1, +2 โดยพรอทจะระเหยกลายเป็นไอเมื่อความชื้นในดินสูงขึ้น รูปที่พบในดินมากคือ รูป +2 พบอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับแอนไอออนต่างๆ เช่น  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$  และกับสารชีวมีส การเกิดสารประกอบพรอทอินทรีย์จากกระบวนการ methylation ทำให้พรอทเคลื่อนที่ได้มาก จึงกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ในขณะที่พรอทอินทรีย์ในรูป methylmercury chloride ถูกดูดซับได้สูงที่ประมาณ pH 7 โดยดินอินทรีย์จะมีปริมาณพรอทสูงกว่าดินอนินทรีย์เพราะสารชีวมีสในดินมีส่วนทำให้เกิดกระบวนการนี้ โดยปลดปล่อยกลุ่มเมทิลมาทำปฏิกิริยากับพรอท นอกจากนั้นธาตุพรอทยังถูก oxidize เป็นไอออนพรอท ( $\text{Hg}^{2+}$ ) แต่อาจถูก reduce จากไอออนพรอทเป็นธาตุพรอท ( $\text{Hg}^0$ ) โดยทั้งการเกิด methylation, oxidation และ reduction เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์ทั้งชนิดแบคทีเรีย ยีสต์และรา ทั้งในสภาพมีอากาศหรือไม่มีอากาศ



รูปที่ 4.2 การส่งผ่านปรอทในระบบนิเวศที่อ่าวมินามาตะ

ที่มา: Atlas and Philp (2005)

สำหรับปฏิกิริยาของปรอทในน้ำ พบว่าจุลินทรีย์ในน้ำและตะกอนก้นน้ำสามารถเติมหมู่เมทิล (methyl) ให้กับปรอท และยังมีโลหะหนักอีกหลายชนิดเกิด methylation ทั้งในดินและน้ำได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

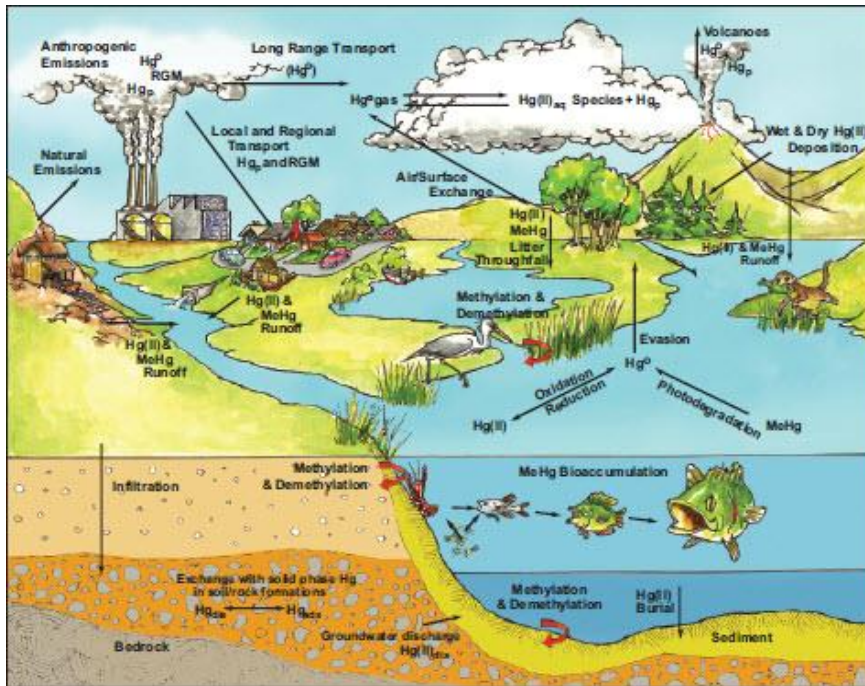
ตารางที่ 4.1 โลหะหนักที่สามารถเกิดการเติมหมู่เมทิลในธรรมชาติ

รายชื่อ	ตัวย่อ	methylation species
นิกเกิล (Nickel)	Ni	$C_{16}H_{13}N_3Ni$ (methyl-2,2':6'.2 <sup>11</sup> -terpyridine-nikal(II))
ดีบุก (Tin)	Sn	$(CH_3)_4Sn$ , $(CH_3)_2SnH_2$ , $CH_3SnH_3$
พลวง (Antimony)	Sb	$(CH_3)_3Sb$ , $(CH_3)_3SbO$ , $(CH_3)_2SbH$ , $CH_3SbH_2$
ปรอท (Mercury)	Hg	$(CH_3)_2Hg$ , $CH_3Hg^+$ , $CH_3HgH$
ตะกั่ว (Lead)	Pb	$(CH_3)_4Pb$ , $(CH_3)_3PbH$
สารหนู (Arsenic)	As	$(CH_3)_4As_2$ , $(CH_3)_3As$ , $(CH_3)_3AsO$ , $(CH_3)_2AsH$ , $CH_3AsH_2$ , $CH_3AsO(OH)_2$ , $CH_3AsO_2(OH)$
ซีลีเนียม (Selenium)	Se	$(CH_3)_2Se_2$ , $(CH_3)_2Se$ , $(CH_3)_2SeS$ , $(CH_3)_2SeH$
เจอร์เมเนียม (Germanium)	Ge	$(CH_3)_3GeH$ , $(CH_3)_2GeH_2$ , $CH_3GeH_3$ , $(CH_3)_2Ge^{2+}$ , $CH_3Ge^{3+}$
แคดเมียม (Cadmium)	Cd	$(CH_3)_2Cd$ , $CH_3Cd^+$

ที่มา: ดัดแปลงจาก Maier, Peper and Gerba (2008)

สารประกอบปรอทอินทรีย์สามารถระเหยได้มากกว่าละลายน้ำ และละลายในไขมันได้ดี จึงทำให้เกิดการสะสมสารพิษเพิ่มมากขึ้นตามลำดับในห่วงโซ่อาหาร ก่อให้เกิดอันตรายอย่างมากในระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การระเหย ยังเป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ การเกิด methylation จึงเป็นการเพิ่มพิษของปรอทและแพร่กระจายปรอทเข้าสู่ระบบนิเวศ (รูปที่ 4.3) อย่างไรก็ตาม การที่จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปปรอทให้เป็นสารระเหยทำให้สามารถกำจัดปรอทจากดินและน้ำได้ โดยปรอทระเหยออกจากดินและน้ำ ต่อจากนั้นน้ำไอปรอทที่ระเหยไปกำจัดต่อได้

การละลายในไขมันของปรอทอินทรีย์เกิดจากการจับอย่างล้มพรรคภาพ (electron affinity) กับหมู่ไทออลในโปรตีนและบริเวณที่เป็นไขมัน ในขณะที่เดียวกันการทนต่อปรอทของจุลินทรีย์ที่เกิด methylation เกี่ยวข้องกับการรีดิวซ์ไอออนปรอท ( $Hg^{2+}$ ) ไปเป็นธาตุปรอท ( $Hg^0$ ) โดยเอนไซม์ mercuric reductase

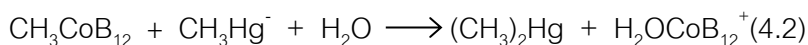
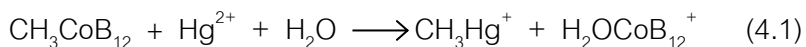


รูปที่ 4.3 การแพร่กระจายของปรอทในสิ่งแวดล้อม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madigan *et al.* (2014)

ปฏิกิริยา methylation ปรอทโดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะมีอากาศและไร้อากาศ แต่อัตราการเกิดในสภาวะไร้อากาศจะมากกว่า แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้อง คือ methanogen

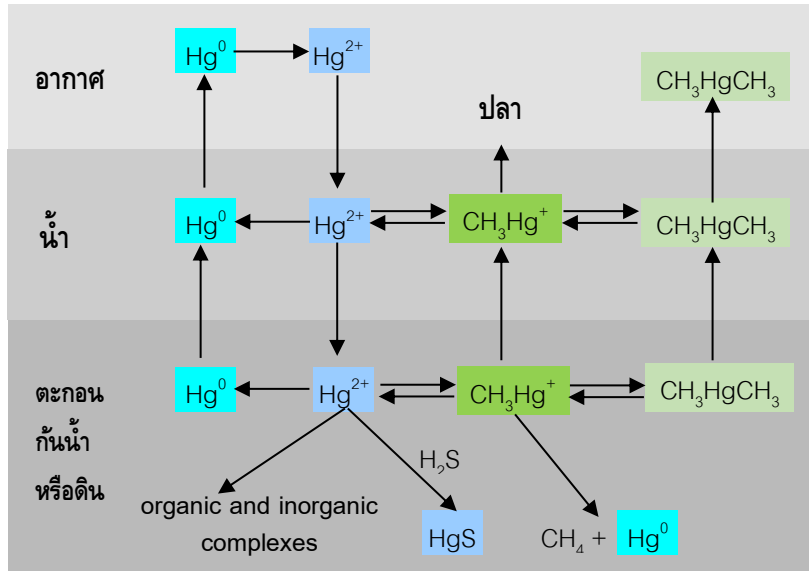
และ sulfate - reducing bacteria (SRB) การเกิดปฏิกิริยาจะต้องมี methylcobalamine (methyl - vitamin B<sub>12</sub>) เป็นตัวให้ methyl group แก่ไอออนปรอท (Hg<sup>2+</sup>) ในสภาวะที่สิ่งแวดล้อมมี pH ต่ำ มีคาร์บอนและสารอินทรีย์จำนวนมาก และมีการเติมหมู่เมทิลทั้ง 1 และ 2 โมเลกุล การเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้ (Bager *et al.*, 1983)



แบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา เช่น *Pseudomonas fluorescens*, *E. coli*, *Clostridium*, *Neurospora*, *Enterobacter* เป็นต้น รา เช่น *Aspergillus niger*, *Saccharomyces cerevisiae* เป็นต้น

นอกจาก methylation แล้ว จุลินทรีย์ยังมีบทบาทตรงกันข้าม คือ เปลี่ยนรูป Hg<sup>2+</sup> หรือปรอทอินทรีย์อื่นๆ (methyl mercury, phenyl mercuric acetate, ethyl mercuric phosphate) ให้เป็นรูปธาตุปรอท (Hg<sup>0</sup>) ซึ่งจะมีพิษน้อยกว่าปรอทอินทรีย์

แผนภาพการเปลี่ยนรูปของปรอทในสิ่งแวดล้อมแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 methylation และวงจรปรอทในสิ่งแวดล้อม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madigan, Martinko and Parker (2008)

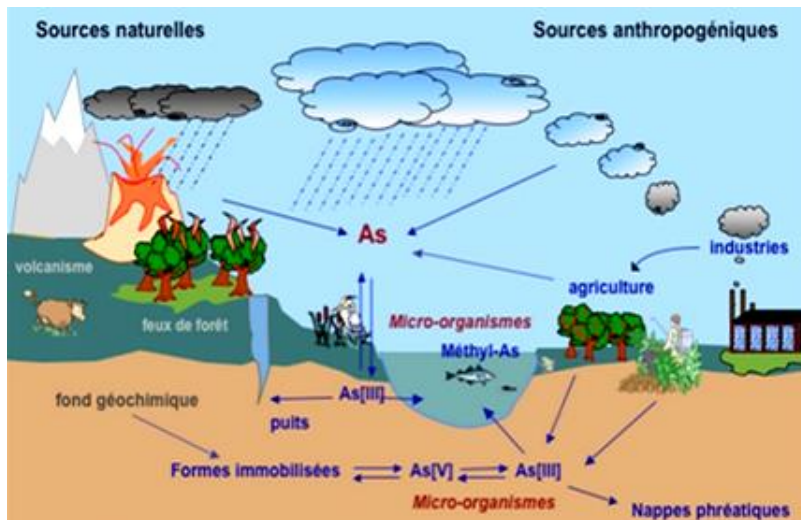
จากรูปปกติธาตุปรอท ( $Hg^0$ ) จะอยู่ในสภาวะไอระเหยในบรรยากาศ แล้วถูกออกซิไดซ์โดยแสงแดดได้ไอออนปรอท ( $Hg^{2+}$ ) ซึ่งจะละลายลงสู่ น้ำและตะกอนก้นน้ำ โดยจุลินทรีย์บริเวณนี้ ได้แก่ methanogen และ SRB จะ methylate ให้เปลี่ยนรูปเป็น  $CH_3Hg^+$  ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก แต่ละลายในไขมันจึงสะสมในปลา ถ้ามีการเปลี่ยนรูปต่อไป เป็น  $CH_3HgCH_3$  ก็จะมีคุณสมบัติระเหยได้ง่ายจึงระเหยกระจายไปในอากาศ การเปลี่ยนรูปอื่นๆ ถ้าตะกอนก้นน้ำมีดินเป็นกรดและปราศจากออกซิเจนจะพบในรูป  $HgS$  ซึ่งตกตะกอน แต่เมื่อได้รับอากาศ  $HgS$  จะถูกใช้โดยแบคทีเรียกลุ่ม Thiobacilli ทำให้เกิดไอออนปรอท ( $Hg^{2+}$ ) กลับคืนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเกิด methyl mercury ได้อีกต่อไป

## 2. สารหนูหรืออาร์เซนิก (Arsenic, As)

อาร์เซนิกเป็นโลหะที่พบมากในหินตะกอนที่เป็น argillaceous ในธรรมชาติมักไม่พบในรูปของธาตุ แต่จะอยู่ในรูปของสินแร่ เช่น orpiment ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), realgar ( $\text{AsS}$ ) และ arsenolite ( $\text{AsO}_3$ ) เป็นต้น และในรูปสารประกอบโดยเฉพาะในรูป arsenate ( $\text{As}, \text{As}^{5+}$ ) ถึงประมาณ 60% อาร์เซนิกเป็นโลหะที่ใช้ในการเกษตร โดยใช้ผลิตสารป้องกันและกำจัดแมลง กำจัดวัชพืช ใช้ในการผลิตสารรักษาสภาพเนื้อไม้ และใช้ผสมอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมโลหะผสม อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก ยารักษาโรค และปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่ใช้ผลิตสารกึ่งตัวนำ (gallium arsenide semi-conductor) ซึ่งใช้ในระบบโทรคมนาคมและใช้ในการผลิตเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปจากมีพิษน้อย (arsenate,  $\text{As}^{5+}$ ) ให้เป็นรูปมีพิษมาก (arsenite,  $\text{As}^{3+}$ ) และสารประกอบที่ละลายน้ำได้จะมีพิษมากกว่าสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เพราะดูดซึมเข้าไปในร่างกายได้ดีกว่า arsenite สะสมได้ในเนื้อเยื่อ โดยรวมตัวกับโปรตีนในเนื้อเยื่อของตับ กล้ามเนื้อ ฝม เล็บ ผิวหนัง และเม็ดเลือดขาว ที่ผิวหนังจะแสดงอาการเป็นตุ่มแข็งใสพองหรือผิวแข็งดำ โดยเฉพาะที่ฝ่าเท้า ฝ่ามือ ผิวหนังอาจหลุดหรือเป็นจุดสีๆ โรคนี้เคยเกิดในประเทศไทยที่ อ.ร้อนพินุลย์ จ.นครศรีธรรมราช เนื่องจากชาวบ้านบริโภคน้ำในบ่อน้ำตื้นที่เคยเป็นเหมืองเก่า จึงมีอาร์เซนิกปนเปื้อนอยู่ถึง 2.47 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการเบื่ออาหาร อ่อนเพลีย ขับถ่ายผิดปกติ ชาบริเวณปลายมือ ปลายเท้า อาการเท้าตก นิ้วเหน็บ มีจุดดำขึ้นตามตัว แห้งกร้าน ซึ่งต่อไปจะเป็นมะเร็งผิวหนัง อาการเหล่านี้ชาวบ้านเรียกว่า “ไข้ดำ” นอกจากนี้ยังมีผลต่อระบบประสาท ทำให้ปลายประสาทอักเสบ แขนขาอาจเป็นอัมพาตได้ และจากกรณีการปนเปื้อนของอาร์เซนิกจากเหมืองทองของบริษัทอัคราไมนิ่งจำกัด ในจังหวัดพิจิตรในปี 2559 โดยการสุ่มตรวจชาวบ้าน 1,004 คน พบอาร์เซนิกเกินค่า

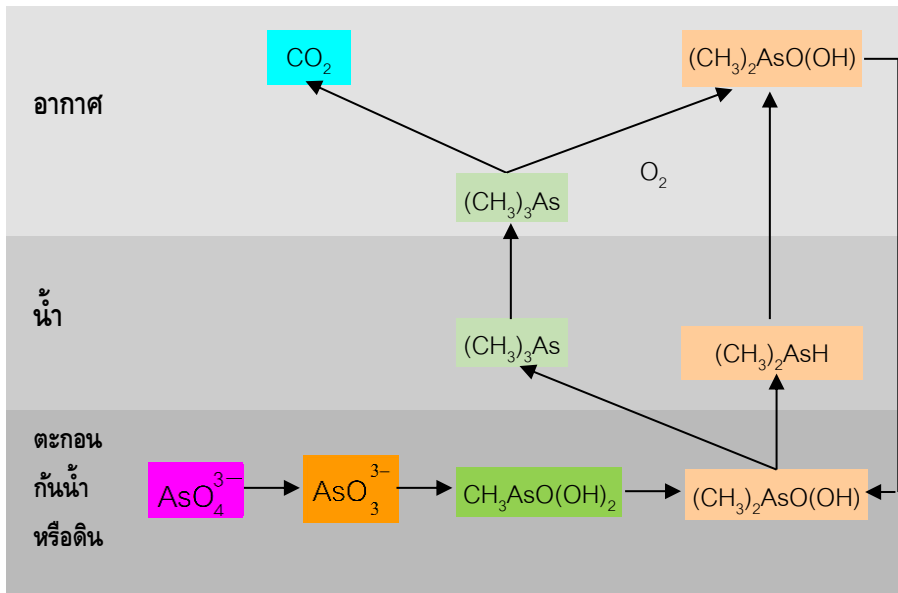
มาตรฐาน 196 คน (กรมอนามัย, 2559) จากการปนเปื้อนในน้ำอยู่ถึง 0.01-0.15 มิลลิกรัม/ลิตร การสะสมของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมแสดงในรูปที่ 4.5

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ คือ *Methanobacterium*, *Desulfovibrio* สามารถเปลี่ยน arsenate ไปเป็น dimethyl arsine, *Micrococcus* สามารถรีดิวซ์ arsenate ไปเป็น arsenite ในสภาพที่มีออกซิเจนจำกัด ราชบางชนิด เช่น *Aspergillus*, *Fusarium*, *Scopulaviopsis brevicaulis* เป็นต้น สามารถ methylate อาร์เซนิกให้เป็น mono -, di -, และ trimethylarsine โดยมี 3 - adenosylmethionium หรือ methylcobalamine เป็นตัวให้ methyl group แผนภาพการเปลี่ยนรูปของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 การแพร่กระจายของอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม

ที่มา : ดัดแปลงจาก Madigan, Martinko and Parker (1999)

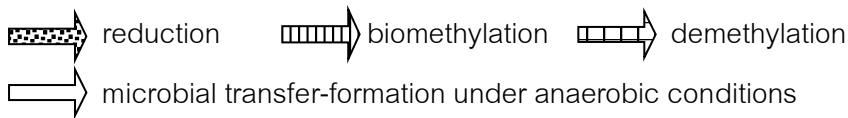
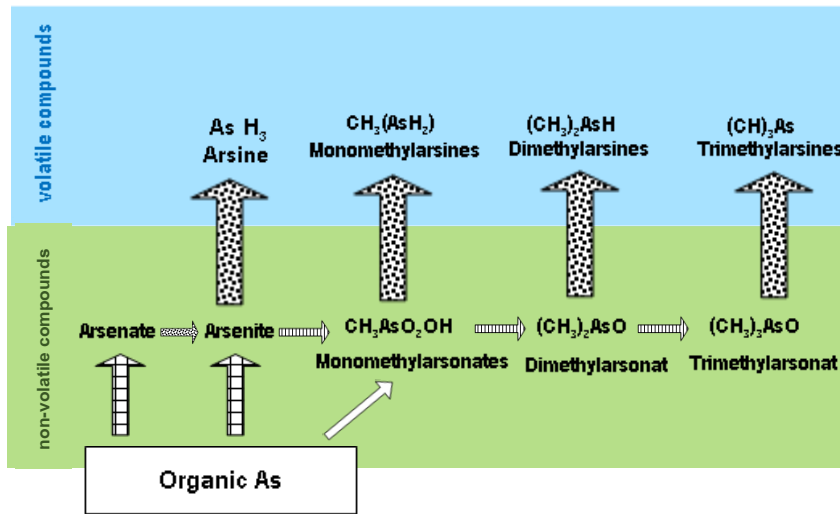


รูปที่ 4.6 methylation และวงจรอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madigan, Martinko and Parker (1999)

จุลินทรีย์สามารถ methylate สาร arsenate เป็น mono -  $(\text{CH}_3\text{AsH}_2)$ , di -  $[(\text{CH}_3)_2\text{AsH}]$ , trimethylarsine  $[(\text{CH}_3)_3\text{As}]$  ในดินตะกอนก้นน้ำ ภายในบ้านที่มีกระดาษติดผนัง (wallpaper) ซึ่งต้องมีอาร์เซนิกเป็นส่วนประกอบ จุลินทรีย์สามารถ methylate ได้ไฮระเหยของ methylarsonic acid  $[\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2]$  สารนี้เป็นอันตรายต่อระบบหายใจ ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบ และไปสะสมที่ปอด อาจจะมีผลทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด และอาร์เซนิกอินทรีย์ยังสะสมในไขมันเกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหาร ในพืช เช่น radish จะสะสมอาร์เซนิกในรูป  $\text{As}_{\text{org}} > \text{As}^{5+} > \text{As}^{3+}$  โดยการเรียงลำดับความเป็นพิษของสารประกอบอาร์เซนิกจากมากไปน้อย คือ trimethylarsine  $[(\text{CH}_3)_3\text{As, volatile}] > \text{dimethylarsinic}$  หรือ

cacodylic acid  $[(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})]$  และ dimethylarsine  $[(\text{CH}_3)_2\text{AsH}] >$  methylarsonic acid หรือ methanearsonic acid  $[\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2] >$  arsenite  $(\text{AsO}_3^{3-}, \text{As}^{3+}) >$  arsenate  $(\text{AsO}_4^{3-}, \text{As}^{5+})$  โดยที่  $\text{As}^0$  และ  $\text{As}^{3+}$  จะพบในสภาพแวดล้อมที่ขาดออกซิเจน ส่วน  $\text{As}^{5+}$  พบในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน อาร์เซนิกอินทรีย์ในธรรมชาติจะพบน้อยกว่าอาร์เซนิกอนินทรีย์ ถ้าพบมากแสดงว่าเกิดจากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนรูปต่างๆ ทำให้มีอาร์เซนิกมีความสามารถในการระเหย จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงการทำให้เกิดไอระเหยของอาร์เซนิกโดยจุลินทรีย์ในดิน คือราชนิด *Penicillium* และ *Aspergillus* สามารถระเหยอาร์เซนิกทั้งในรูปอินทรีย์และอนินทรีย์ ส่วน *Pseudomonas* ระเหยเฉพาะอาร์เซนิกอนินทรีย์



รูปที่ 4.7 วิธีการระเหยอาร์เซนิกโดยจุลินทรีย์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Frankenberger (1998)

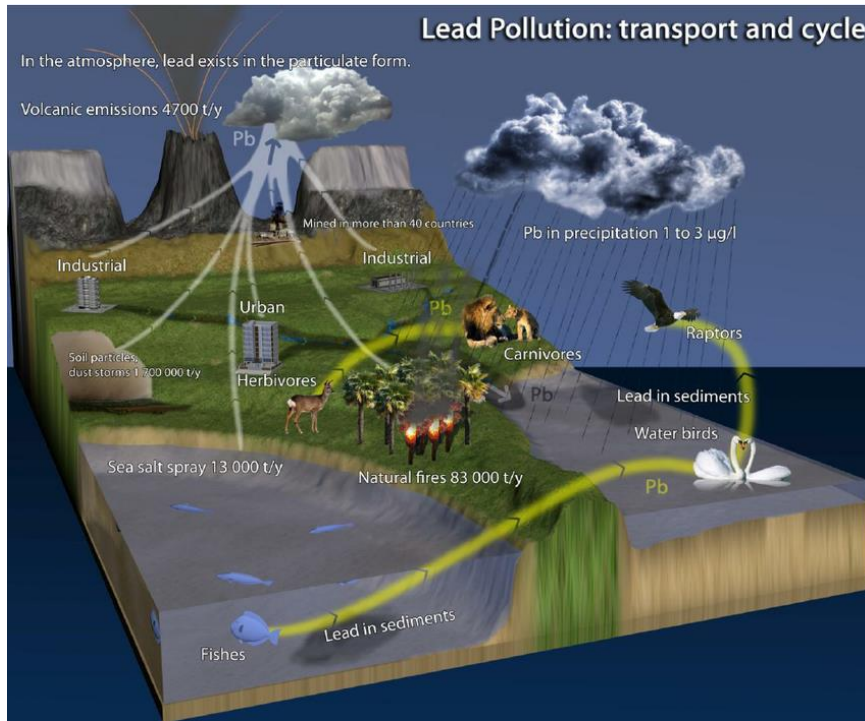
### 3. ตะกั่ว (Lead, Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะที่พบในรูปของสินแร่หลายชนิดได้แก่ galena (Pbs), cerrussite (PbCO<sub>3</sub>), anglesite (PbSO<sub>4</sub>) เป็นโลหะที่มีเนื้ออ่อนมาก ง่ายต่อการตัดขึ้นรูปและยังทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ง่าย จึงทำให้พบได้ในน้ำ พืช สัตว์ อากาศ แต่ก็ทำให้มีประโยชน์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมน้ำมันและเชื้อเพลิงและ อุตสาหกรรมแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังใช้ทำของใช้ เช่น ฉนวนหุ้มสายเคเบิล แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย กระจกเงา สีทาบ้านและสีของเล่น โดยตะกั่วที่ใช้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ตะกั่วอนินทรีย์ (inorganic lead) เช่น  $Pb_3O_4$ ,  $CaPbO_4$  และ  $PbCrO_2$  ใช้ผสมสีให้สีแดง หรือ  $2PbCO_3$  และ  $Pb(OH)_2$  ให้สีขาว ใช้เป็นสีทาบ้าน แต่มีการนำมาใช้เป็นสีของเล่นเด็ก หรือดินสอซึ่งเป็นอันตรายต่อเด็กมาก และตะกั่วอินทรีย์ (organic lead) เช่น tetramethyl lead  $[(CH_3)_4Pb, PbMe_4]$  และ tetraethyl lead  $[(C_2H_5)_4Pb, PbMe_5]$  ใช้ผสมน้ำมันในการเพิ่มค่า octane ในน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์เดินเรียบ (antiknock compounds) เมื่อเครื่องยนต์เกิดการเผาไหม้ ตะกั่วจะถูกปลดปล่อยออกมากับไอเสีย ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการใช้น้ำมันไร้สารตะกั่ว แต่ก็ยังมีตะกั่วในควันจากรถยนต์ในรูปเกลือ halide (halide salt) เช่น  $PbBr$ ,  $PbBrCl$ ,  $Pb(OH)Br$  และ  $(PbO)_2PbBr_2$  เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีตะกั่วอนินทรีย์ที่ใช้ในสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ เช่น สารฆ่าแมลง lead hydrogen arsenate ( $PbHASO_4$ ) ตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดี สามารถกระจายไปตามอวัยวะต่างๆ โดย ร้อยละ 70 จะสะสมที่กระดูกและร้อยละ 30 จะสะสมตามเนื้อเยื่ออ่อน (soft tissue) เช่น สมอง ตับ ม้าม ปอด ไชกระดูกและเส้นผม เป็นต้น ตะกั่วที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทำให้คนมีโอกาสได้รับจากการรับประทานอาหาร น้ำดื่ม หรือหายใจ กลุ่มที่เสี่ยง เช่น คนงานในโรงผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ คนที่อาศัยอยู่ใกล้โรงงานที่มีตะกั่วเป็นวัตถุดิบ ตำรวจจราจรและคนที่อยู่บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นเป็นเวลานาน เด็กอาจได้รับสารตะกั่วจากการหยิบสิ่งที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนเข้าปาก หรือรับจากนมมารดา หรือแม้แต่เป็นทารกในครรภ์ก็ได้รับผ่านสายสะดือได้ ในประเทศไทยได้มีการห้ามใช้เครื่องทำน้ำเย็นเชื่อมด้วยตะกั่วและรณรงค์ให้มีการใช้หม้อต้มก๋วยเตี๋ยวไร้สารตะกั่ว ตั้งแต่ปี 2552 (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2552) เนื่องจากความเป็นพิษของตะกั่วต่อระบบประสาทส่วนกลางและสมอง ทำให้เกิดโรคสมองเสื่อมจากพิษตะกั่วพบในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ มีอาการหงุดหงิดง่าย กระวนกระวาย ซึม เวียนศีรษะ (central and peripheral nervous system) ส่วนการได้รับแบบเฉียบพลันรุนแรงอาจมีอาการสั้นเวลาเคลื่อนไหว ชัก

หมดสติและเสียชีวิตได้ (acute lead encephalopathy) ส่วนอาการที่พบได้บ่อยที่สุดคือ มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน นอกจากนี้ยังมีความผิดปกติที่ระบบเลือด ระบบไต ระบบประสาทและระบบสืบพันธุ์

ตะกั่วในดินจะอยู่ในรูป hydroxide, phosphate หรือ carbamate หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความชื้นของดินทำให้สภาพละลายได้ของตะกั่วเพิ่มขึ้น จุลินทรีย์ในตะกอนดินใต้น้ำ เช่น *Pseudomonas* และ *Desulfovibrio* สามารถเปลี่ยนรูปตะกั่วอินทรีย์ และตะกั่วอนินทรีย์ โดยเฉพาะ  $Pb(NO_3)_2$ ,  $PbCl_2$  และ  $PbO_2$  ให้เป็นรูป tetramethyl lead ( $PbMe_4$ ) ได้ การเกิด methylation นี้ ทำให้ตะกั่วจากดินระเหยไปสู่อากาศและละลายในน้ำ เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในน้ำทำให้เกิด biomagnification เพราะเพิ่มความสามารถในการละลายในไขมัน ไอระเหยของ  $PbMe_4$  จะดูดซึมได้ดีทั้งในเซลล์พืช ลัตว์และคน  $PbMe_4$  เข้าสู่พืชทางใบจะสะสมอยู่ที่ cell membrane, mitochondria และ chloroplast ส่วนทางรากจะสะสมที่รากฝอยและรากขนาดเล็ก ซึ่งจะมีผลยับยั้งการสังเคราะห์แสง การเจริญของรากและใบ และยืดเวลาการงอกจากเมล็ด โดยตะกั่วจะสะสมในรากได้มากที่สุดและจะเคลื่อนย้ายมายังส่วนเหนือดินในปริมาณน้อย การสะสมและเคลื่อนย้ายของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การแพร่กระจายของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

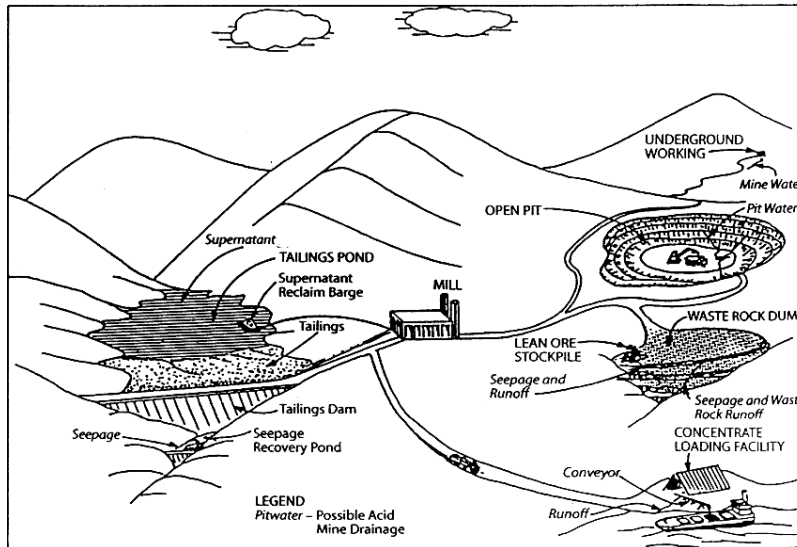
ที่มา : Madigan *et al.* (2014)

#### 4.2 การเปลี่ยนรูปโลหะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหมืองแร่มีการใช้น้ำเป็นจำนวนมาก การชะของน้ำเหล่านี้ และ/หรือ การชะล้างของน้ำฝนที่ไหลผ่านบริเวณที่เคยทำเหมืองแร่ ทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดอย่างแรง เนื่องจากมีสินแร่โลหะปนอยู่แล้วเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กับสินแร่ ทำให้เกิดการตกค้างของโลหะหนักในน้ำธรรมชาติ (รูปที่ 4.9) เรียกว่าน้ำที่มีลักษณะสมบัติดังกล่าวว่า “acid mine drainage (AMD)” ซึ่งแหล่งกำเนิดของ AMD จะมาจากส่วนต่างๆ ของการทำเหมือง

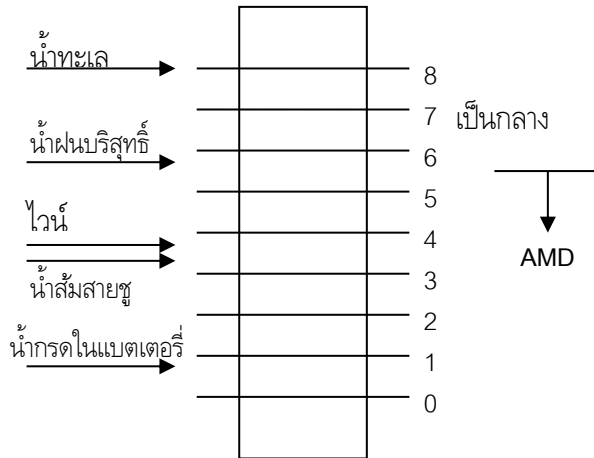
ผลกระทบของน้ำที่เป็นกรดทำให้ปลาและสัตว์น้ำตาย ความแรงของกรดเมื่อเทียบกับน้ำที่เป็นกรดอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 และจากภาพจะเห็นว่า ความเป็นกรดมี pH ตั้งแต่ 5.5 ลงมา ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของแร่ และลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณโดยรอบเหมืองนั้นๆ แหล่งน้ำเป็นกรดเช่นนี้จะใช้อุปโภคบริโภคไม่ได้ และยังเต็มไปด้วยสารละลายของโลหะหลายชนิด นอกจากนี้ยังเกิดตะกอนสีเหลืองขึ้น ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ตามปกติ ผลกระทบที่เกิดขึ้นนอกจากกับแหล่งน้ำผิวดินแล้ว ยังมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดิน ตะกอนก้นน้ำ และน้ำใต้ดินอีกด้วย ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ AMD แสดงดังตารางที่ 4.2

สินแร่โลหะที่เกิดปฏิกิริยานี้ได้จะเป็นโลหะที่เป็นสารประกอบของซัลไฟด์ (sulfide mineral) ซึ่งมีหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 แหล่งกำเนิดของ AMD บริเวณเหมืองแร่โลหะ

ที่มา: Lottermoser (2003)



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ pH ของ AMD กับน้ำที่เป็นกรดอื่นๆ

ที่มา: Lottermoser (2003)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติหลักของน้ำ AMD และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ลักษณะ	สารเคมี	ระดับเฉลี่ย	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
ความเป็นกรด	H <sup>+</sup>	pH < 4.5	พืชและสัตว์น้ำตาย น้ำไม่สามารถอุปโภคบริโภคได้ โลหะหนักละลายได้มากขึ้น กัดกร่อนเครื่องใช้ อุปกรณ์ต่างๆ
การตกตะกอนของเหล็ก	Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe(OH) <sub>3(s)</sub>	100 ถึง 1-9 x10 <sup>3</sup> mg/l	น้ำเกิดสีสนิมเหล็ก และความขุ่นจากเกลือเฟอร์ริก รบกวนการหายใจของสัตว์หน้าดิน อุดตันเหมืองกบปลา ลดการส่องผ่านของแสงลงสู่ น้ำ เกิดคราบสนิมกับเครื่องใช้ อุปกรณ์ต่างๆ
การละลายของโลหะ	Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Ni, Hg, As, Sb	0.01 ถึง 1-9 x10 <sup>3</sup> mg/l	พืชและสัตว์น้ำตาย เกิดการสะสมโลหะในสิ่งมีชีวิตในน้ำและห่วงโซ่อาหาร น้ำไม่สามารถอุปโภคบริโภคได้ ดินและตะกอนก้นน้ำปนเปื้อนโลหะ
TDS	Ca, Mg, K, Na, Fe, Al, Si, Mn, sulfate	100 ถึง มากกว่า 1-9 x10 <sup>3</sup> mg/l	น้ำไม่สามารถอุปโภคบริโภคได้ เกิดคราบกับเครื่องใช้ อุปกรณ์ต่างๆ จากเกลือของ TDS ดินและตะกอนก้นน้ำปนเปื้อน TDS

ที่มา: Lottermoser (2003)

ตารางที่ 4.3 สิวแร่โลหะซัลไฟด์ชนิดต่างๆ และสูตรโมเลกุล

ชื่อแร่	สูตรโมเลกุล
Arsenopyrite	FeAsS
Bornite	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>
Chalcocite	Cu <sub>2</sub> S
Chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub>
Cinnabar	HgS
Cobaltite	CoAsS
Covellite	CuS
Cubanite	CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
Enargite	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>
Galena	PbS
Mackinawite	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
Marcasite	FeS <sub>2</sub>
Melnikovite	Fe <sub>3</sub> S <sub>4</sub>
Millerite	NiS
Molybdenite	MoS <sub>2</sub>
Orpiment	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
Pentlandite	(Ni,Fe) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
Pyrite	FeS <sub>2</sub>
Pyrrhotite	Fe <sub>1-x</sub> S

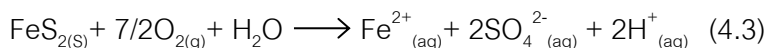
ตารางที่ 4.3 สินแร่โลหะซัลไฟด์ชนิดต่างๆ และสูตรโมเลกุล (ต่อ)

ชื่อแร่	สูตรโมเลกุล
Realgar	AsS
Stibnite	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
Sphalerite	ZnS
Tennantite	(Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
Tetrahedrite	(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
Violarite	FeNi <sub>2</sub> S <sub>4</sub>

ที่มา: Lottermoser (2003)

ปฏิกิริยาการเกิดกรดและตะกอนเป็นดังนี้ โดยยกตัวอย่างสินแร่ไพไรต์ (pyrite, FeS<sub>2</sub>)

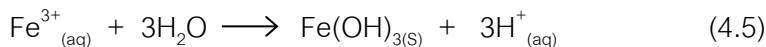
1. ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์สินแร่ FeS<sub>2</sub> ให้เป็นไอออน ferrous



2. ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไอออน ferrous ให้เป็นไอออน ferric

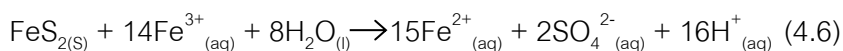


3. ปฏิกิริยาการตกตะกอนของไอออน ferric



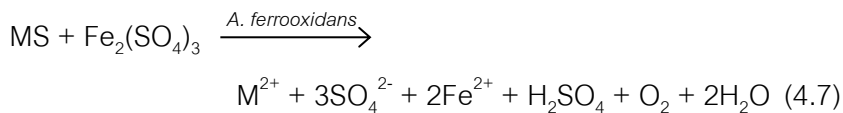
ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 เกิดขึ้นโดยแบคทีเรีย เช่น *Acidithiobacillus ferrooxidans* เป็นต้น Fe(OH)<sub>3</sub> เป็นตะกอนที่ค่อนข้างคงตัวไม่ละลายน้ำ เมื่อ AMD ไหลลงสู่แหล่งน้ำ

ธรรมชาติ จากการที่มีผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  และ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งอาจมีเป็นจำนวนมาก ภายใต้สภาวะแวดล้อมเช่นนี้จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเฟอร์ริกซัลเฟตและเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ เรียกว่า “jarosite” [ $\text{HFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ] ซึ่งจะเห็นเป็นตะกอนสีเหลืองหรือน้ำตาลแดง และถ้ามีการไหลของน้ำจะเห็นเป็นรอยเปื้อนสีเหลืองเป็นทางยาวไปตามลำน้ำ ซึ่งกรรมกรเหมืองแร่ในอเมริกาจะเรียกว่า “yellow boy” จากปฏิกิริยาในข้อ  $3 \text{Fe}^{3+}$  ที่เกิดขึ้นจำนวนมากจะทำปฏิกิริยากับ pyrite ได้อีก คือ



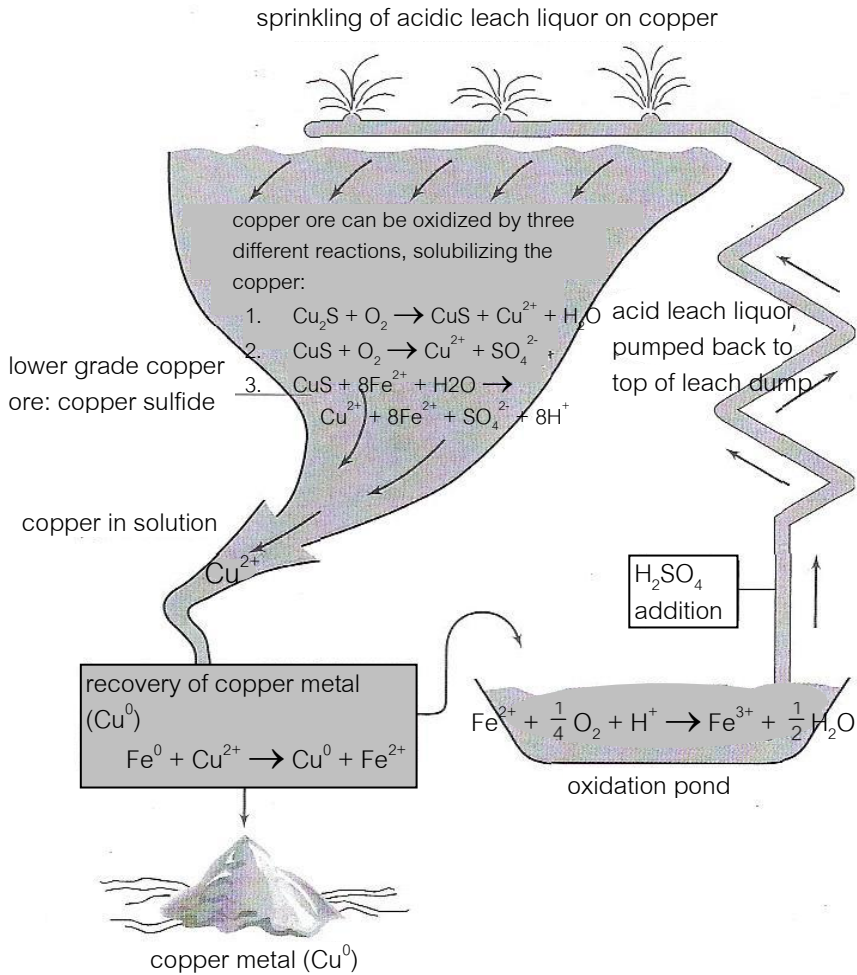
ปฏิกิริยานี้จะทำให้ได้ออออนเฟอร์ริก และกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เพิ่มมากขึ้น และสามารถเกิดในช่วง pH สูงขึ้น และเกิดขึ้นเองโดยไม่มีจุลินทรีย์เกี่ยวข้อง เฟอร์ริกในสารละลายที่เป็นกรดนี้จะมีคุณสมบัติในการชะล้างสินแร่ โดยการเปลี่ยนค่า oxidation no. (oxidation number) ของโลหะ จากสภาพที่ไม่ละลายน้ำเป็นละลายน้ำได้ จึงแยกโลหะออกจากสินแร่ได้ ซึ่งประโยชน์อันนี้ในปัจจุบันได้นำไปประยุกต์ใช้กับการสกัดแร่เกรดต่ำโดยใช้จุลินทรีย์ (bioleaching) ซึ่งการสกัดทางเคมีไม่คุ้มทุน

ปฏิกิริยาการเกิด bioleaching คือ



เมื่อ M คือ bivalent metal

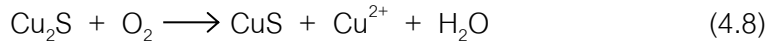
ตัวอย่างการสกัดแร่โดยใช้จุลินทรีย์แสดงในรูปที่ 4.11



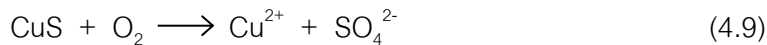
รูปที่ 4.11 การสกัดแร่ทองแดงจาก  $\text{Cu}_2\text{S}$  โดยวิธี bioleaching

ที่มา: Madigan, Martinko and Parker (1999)

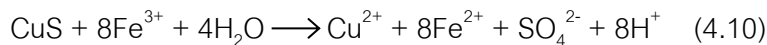
ทองแดงที่จะสกัดอยู่ในสินแร่ chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) ปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้น คือ



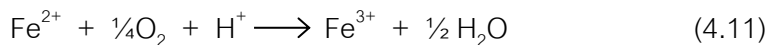
ในขั้นนี้ Cu ใน  $\text{Cu}_2\text{S}$  ซึ่งมีเลข oxidation no. เท่ากับ +1 จะถูกออกซิไดซ์ด้วย *Acidithiobacillus ferrooxidans* ทำให้  $\text{Cu}^+$  เปลี่ยนเป็น  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งละลายน้ำได้ และทำให้  $\text{Cu}_2\text{S}$  เปลี่ยนเป็น CuS เรียกว่า “covellite” มีเลข oxidation no. เท่ากับ +2 CuS ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปโดยแบคทีเรียเช่นเดียวกัน ได้เป็น  $\text{Cu}^{2+}$  ละลายน้ำออกมาอีก และไอออนซัลเฟต ปฏิกิริยาดังสมการที่สอง คือ



สำหรับปฏิกิริยาที่สามซึ่งสำคัญมาก เพราะเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเอง โดยไม่ต้องใช้แบคทีเรีย เป็นการออกซิไดซ์สินแร่ทองแดงด้วยไอออนเฟอร์ริก ปฏิกิริยาดังสมการ



ปฏิกิริยาต้องการไอออนเฟอร์ริกจำนวนมาก ซึ่งจะได้จากการออกซิไดซ์ของ *Thiobacillus ferrooxidans* เช่นกัน ปฏิกิริยาดังสมการ



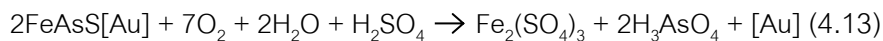
จากรูปที่ 4.11 ไอออนเฟอร์รัสที่ได้จากการ recovery ไอออนทองแดงในสารละลาย ให้ได้เป็นโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^0$ ) ปฏิกิริยาดังสมการ



ไอออนเฟอร์รัสที่ได้จะอยู่ในรูปสารละลายส่งต่อมายังบ่อบำบัดกลางแจ้ง (oxidation pond) เพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ ได้ไอออนเฟอร์ริก (สมการ 4.11) และมีการ

เติมกรด  $H_2SO_4$  ลงไปในบ่อเพื่อให้ค่า pH ให้ต่ำอยู่ตลอดเวลา เพราะถ้า pH สูง ไอออนเพอร์ริกจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็นไอออนเฟอร์รัส ทำให้จำนวนไอออนที่ต้องการลดลง ซึ่งจะยับยั้งปฏิกิริยาการสกัดแร่ หลังจากนั้นสารละลายที่เข้มข้นด้วยไอออนเพอร์ริกจะถูกสูบไปโปรยบริเวณที่มีสินแร่  $Cu_2S$  เกิดปฏิกิริยาสกัดแร่ดังสมการ 4.10 ต่อไป สำหรับภายในเหมืองแร่ที่อาจมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งจะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของ *Acidithiobacillus ferro-oxidans* เพราะเป็นแบคทีเรีย mesophile เจริญในอุณหภูมิปกติ บริเวณนี้จะใช้ iron oxidizing bacteria ที่ทนอุณหภูมิสูงได้ คือ thermophilic iron-oxidizing bacteria เช่น *Sulfolobus* ที่ทนอุณหภูมิสูงได้ถึง >40 องศาเซลเซียส ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา oxidation

การสกัดแร่ทางชีวภาพในแร่อื่นๆ เช่น การสกัดทอง [Au] ในสินแร่ที่มีส่วนประกอบของอาร์เซนิกและไฟไรต์ ปฏิกิริยาดังสมการ



การสกัดนี้จะแตกต่างจากการสกัดทองแดง เพราะจะทำได้ถึงปฏิกิริยาขนาดเล็ก แบคทีเรียที่ใช้จะเป็น mix culture ของ *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* และ *Leptospirillum ferrooxidans*

สารกัมมันตรังสีก็สามารถสกัดได้ด้วยวิธีนี้ เพราะ *Acidithiobacillus ferrooxidans* ทนรังสีได้ เช่น การสกัดยูเรเนียม (U) ปฏิกิริยาดังสมการ



$USO_4$  จะละลายน้ำออกมา แล้วทำการ recovery ให้ได้  $U^0$  ต่อไป

จุลินทรีย์ที่มีบทบาทต่อการเกิด AMD มีหลายชนิด แต่ที่เป็นกลุ่มใหญ่มี 2 ชนิด คือ iron-oxidizing bacteria และ sulfur-oxidizing bacteria

1. iron-oxidizing bacteria แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้ 5 กลุ่ม คือ

(1.1) Haplobacteria รูปร่างเป็นแท่งสั้น แกรมลบ ไม่สร้างสปอร์ ชนิดที่สำคัญคือ *Acidithiobacillus ferrooxidans* สามารถสังเคราะห์อาหารเองได้ (autotroph) และต้องเจริญในที่ที่มีไอออนเฟอร์รัสและ pH 2.2 – 4.6 ปฏิกิริยาของการออกซิไดซ์เหล็กจะเกิดในช่วง 2.4 – 3.5 เท่านั้น ไม่มีเหล็กห่อหุ้ม แต่ไอออนเฟอร์ริกจะตกตะกอนอยู่ในน้ำ การที่แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถอาศัยอยู่ในสภาพเป็นกรดสูง เป็นเพราะเอนไซม์ iron oxidase ในเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียชนิดนี้จะพบเมื่อแบคทีเรียอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มี pH ต่ำ

กลุ่มนี้ชนิดอื่น เช่น :

*Siderocapsa* รูปร่างกลม เซลล์เดี่ยว อาจเรียงเป็นเส้น และมี capsule ห่อหุ้ม สะสมเหล็กหรือแมงกานีสไว้ในแคปซูลหรือเมือกที่ขับออกนอกเซลล์

*Naumanniella* รูปร่างเป็นแท่ง และสะสมเหล็กเป็นวงแหวนแข็ง

(1.2) sheathed bacteria ชนิดที่สำคัญคือ *Sphaerotilus* รูปร่างเป็นแท่ง เรียงเป็นเส้นสายอาจมีการแตกแขนง และมีซีทหุ้ม ทำให้เห็นเป็นเส้น โดยเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ จะสะสมไว้ที่ซีท ทำให้มีสีเหลืองน้ำตาล ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ ต้องการสารอินทรีย์จากภายนอก (heterotroph) และ pH 5.8 – 8.5 (รูปที่ 4.12)

กลุ่มนี้ชนิดอื่น เช่น :

*Leptotrix*, *Crenotrix* มีรูปร่างแตกต่างจาก *Sphaerotilus* เล็กน้อย โดย *Crenotrix* จะยาวเป็นเส้นถึง 1 เซนติเมตร และซีทประกอบด้วย แมงกานีส และ/หรือเหล็ก (รูปที่ 4.12)

(1.3) stalked bacteria ชนิดที่สำคัญคือ *Gallionella ferruginea* มีรูปร่างคล้ายเมล็ดถั่วหรือไต โดยมีก้านซึ่งห่อหุ้มด้วยเหล็ก (เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์) เป็นส่วนที่ไม่มีชีวิต ดำรงชีวิตแบบ autotroph และที่มี pH 6.0 (รูปที่ 4.12)

กลุ่มนี้ชนิดอื่น เช่น :

*Metallogenium* มีรูปร่างไม่แน่นอนชัดเจน แต่จะมีลักษณะเซลล์ซ้อนกันเรียงเป็นเส้นสาย และห่อหุ้มด้วยไอออนเฟอร์ริก เจริญในที่ที่มี pH 4.0 – 6.8

(1.4) anoxygenic phototrophic bacteria กลุ่มนี้จะออกซิไดซ์ไอออนเฟอร์รัสในสภาพไร้ออกซิเจน มีแสง และ  $H_2S$  จึงเกิดบริเวณตะกอนก้นน้ำ ทำให้เห็นเป็นตะกอนสีเหลืองส้มอยู่ใต้น้ำ โดยสารที่ให้ไอออนเฟอร์รัส ได้แก่  $FeCO_3$  และ  $FeS$  (รูปที่ 4.12)

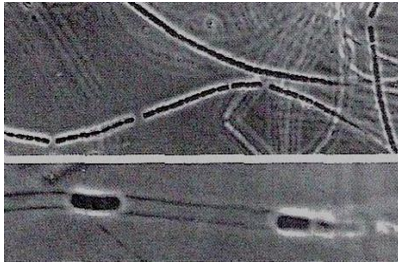
กลุ่มนี้ชนิดอื่น เช่น :

green sulfur bacteria เช่น *Chlorobium* เป็นแบคทีเรียสีเขียว รูปร่างมีหลายแบบ ทั้งรูปไข่ รูปถั่ว และรูปแท่ง สะสมเม็ดกำมะถันนอกเซลล์ ต้องการแสงน้อยกว่า purple sulfur bacteria ไม่ทนต่อปริมาณออกซิเจน (strict anaerobe) แต่ทน  $H_2S$  ที่เข้มข้นสูงได้

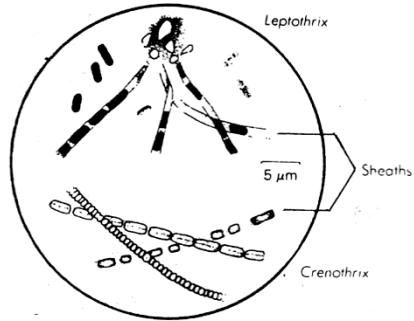
purple sulfur bacteria เช่น *Chromatium* เป็นแบคทีเรียสีม่วง รูปร่างตั้งแต่รูปไข่จนถึงรูปแท่ง สะสมเม็ดกำมะถันในเซลล์ ต้องการแสงมากกว่า green sulfur bacteria ทนต่อปริมาณออกซิเจนได้บ้าง (facultative) แต่ไม่ทนต่อ  $H_2S$  ที่เข้มข้นสูง

(1.5) extreme thermophilic bacteria ชนิดที่สำคัญ คือ *Sulfolobus* มีรูปร่างกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.7 - 1.0  $\mu m$  ได้พลังงานจากการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส หรือบางสายพันธุ์ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ สามารถดำรงชีวิตและเจริญเติบโตที่

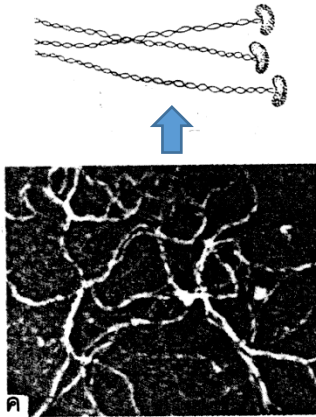
อุณหภูมิสูงประมาณ 60 – 80 องศาเซลเซียส จึงมักพบในน้ำพุร้อน และ pH 2 – 3 เป็นแบคทีเรียแกรมบวก สร้างสปอร์ได้ เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ pH 3 เช่น *Bacillus acidocaldarius* แบคทีเรียชนิดนี้มีความพิเศษ นอกจากจะทนกรดแล้วยังทนอุณหภูมิสูงได้ อาจเป็นเพราะผนังเซลล์ประกอบด้วยไขมันหลายชนิด เช่น กรดไขมัน cyclohexyl จะช่วยรักษาอุณหภูมิที่เซลล์เมมเบรน และส่วนที่เป็น neutral lipids จะช่วยรักษาสภาพความเป็นกรดหรือการกำจัดกรด ( $H^+$ ) ของเซลล์เมมเบรน



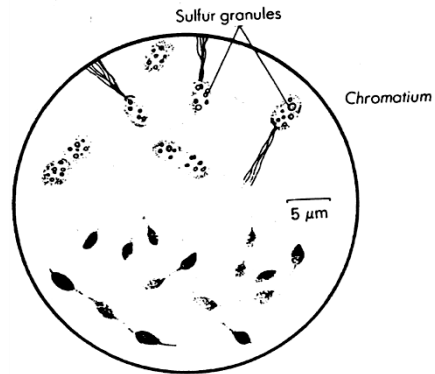
a. *Sphaerotilus*



b. *Leptothrix* และ *Crenothrix*



c. *Gallionella*



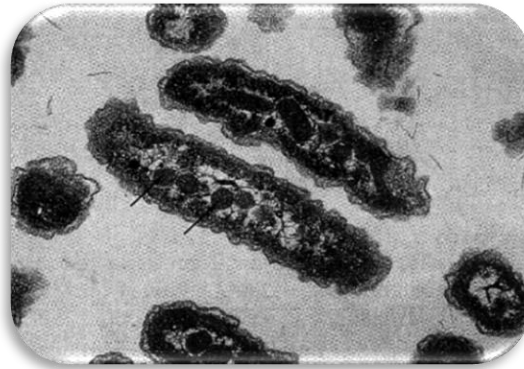
d. *Chromatium*

รูปที่ 4.12 iron-oxidizing bacteria บางชนิด

ที่มา: นงลักษณ์และปรีชา (2544) และ Madigan, Martinko and Parker (1999)

2. sulfur-oxidizing bacteria (รูปที่ 4.13) สามารถทำปฏิกิริยากับสินแร่โลหะซัลไฟด์ได้ทุกชนิด ยกเว้นที่มีเหล็กอยู่ด้วยในสินแร่ นั้นจะเป็นกลุ่ม iron-oxidizing bacteria แทน บางครั้งจึงจัดให้ iron-oxidizing bacteria บางชนิดอยู่ในกลุ่ม sulfur-oxidizing bacteria ด้วย

กลุ่มนี้ที่สำคัญ คือ *Acidithiobacillus thiooxidans* รูปร่างเป็นแท่งสั้น สามารถออกซิไดซ์สารประกอบซัลเฟอร์และโลหะซัลไฟด์ เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต สามารถดำรงชีวิตในอุณหภูมิ 10 – 37 องศาเซลเซียส ชอบ pH ในช่วง 4 – 6 ถ้าต่ำกว่า 0.5 จะยับยั้งการเจริญเติบโต



รูปที่ 4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ sulfur-oxidizing bacteria ชนิด

*Thiobacillus neapolitanus*

โดยลูกศรชี้ให้เห็น polyhedral bodies (carboxysomes) กระจายอยู่ทั่วเซลล์

ที่มา: Madigan, Martinko and Parker (1999)

ตัวอย่างแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากบริเวณที่เกิด AMD พบว่า มีจำนวนหลายชนิดและหลายกลุ่ม เช่น บริเวณที่เกิด AMD จากเหมืองในเมือง Rio Tinto ประเทศสเปน มี

จำนวนถึง 1,300 สายพันธุ์ ที่พบเป็นจำนวนมาก ได้แก่ *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Metallogenium*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Ferrobacillus sulfooxidans*, *Thiobacillus concretivorus*, *Thiobacillus thioparus* และ *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* (Lottermoser, 2003)

เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีหลายชนิดมาก จึงมีการจัดแบ่งตามสารอาหารที่ใช้ และสารที่ให้อิเล็กตรอน ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ลักษณะการใช้อาหารและสารให้อิเล็กตรอนของ sulfur-oxidizing bacteria แต่ละชนิด

กลุ่มแบคทีเรีย	Inorganic electron donor	pH สำหรับการเจริญเติบโต
<i>Thiobacillus</i> species growing poorly if at all in organic media:		
<i>T. thioparus</i>	H <sub>2</sub> S, sulfides, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6-8
<i>T. denitrificans</i>	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6-8
<i>T. neapolitanus</i>	S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6-8
<i>A. thiooxidans</i>	S <sup>0</sup>	2-4
<i>A. ferrooxidans</i>	S <sup>0</sup> , metal sulfides, Fe <sup>2+</sup>	2-4
<i>Thiobacillus</i> species growing well in organic media:		
<i>T. novellus</i>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6-8
<i>T. intermedius</i>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	3-7

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการใช้อาหารและสารที่ให้อิเล็กตรอนของ sulfur-oxidizing bacteria แต่ละชนิด (ต่อ)

กลุ่มแบคทีเรีย	Inorganic electron donor	pH สำหรับการเจริญเติบโต
Filamentous sulfur chemolithotrophs:	$H_2S, S_2O_3^{2-}$	6-8
<i>Beggiatoa</i>	$H_2S$	6-8
<i>Thiothrix</i>	$H_2S, S^0$	-
<i>Thioploca</i>		
Other genera:		
<i>Thiomicrospira</i>	$S_2O_3^{2-}, H_2S$	6-8
<i>Thiosphaera</i>	$H_2S, S_2O_3^{2-}, H_2$	6-8
<i>Thermothrix</i>	$H_2S, S_2O_3^{2-}, SO_3^-$	6.5-7.5
<i>Thiovulum</i>	$H_2S, S^0$	6-8

ที่มา: Madigan, Martinko and Parker (1999)

### เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์. (2552). รายงานผลการตรวจสอบปริมาณไซยาไนด์ และโลหะหนักในแหล่งน้ำผิวดิน บ่อน้ำใช้ของประชาชน และตะกอนดินบริเวณหมู่บ้าน ใกล้เคียงเหมืองแร่ทองคำของบริษัททุ่งคำ จำกัด. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์.
- กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. (2552). หม้อก๋วยเตี๋ยวไร้สารตะกั่ว. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข.

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2560). *ผลกระทบต่อสุขภาพจากการปนเปื้อนสารพิษ และโลหะหนักจากเหมืองทองอัครา*. กรุงเทพฯ: กระทรวงสาธารณสุข.

วีรานุช หลาง. (2554). *จุลชีววิทยาสังแวดล้อม*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริพรรณ สารินทร์. (2550). *จุลชีววิทยาสังแวดล้อม*. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด สามลดดา.

สุภัณฑิต นิมรัตน์. (2552). *จุลชีววิทยาและการจัดการมลภาวะทางน้ำและดิน*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อลิสตา วั่งโน. (2553). *การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Atlas, R.M. and Philp, J., 2005. *Bioremediation: Applied Microbial Solutions for Real-World Environmental Cleanup*. Washington, DC:ASM Press.

Bager, M., Inniss, W., Mayfield, C., P, Wang and Chau, Y. (1983). Effect of pH on the Methylation of Mercury and Arsenic by Sediment Microorganisms. *Environ. Technol Lett.*, A: 89-100.

Frankenberger, W. (1998). Effects of Trace Elements on Arsenic Volatilization. *Soil Biol. Biochem.* 30: 324-364.

Hallberg, K.B. (2010). New Perspectives in Acid Mine Drainage Microbiology. *Hydrometallurgy*, 104: 448-453.

Lottermoser, B. (2003). *Mine Wastes*. Berlin: springer.

Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker. J. (1999). *Brock Biology of Microorganisms*. (9th ed.). New Jersey: Prentice-Hall.Inc.

Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H. and Stahl, D.A.

(2014). *Brock Biology of Microorganisms*. (14th ed.). London:

Pearson.

Maier, M.R., Pepper, L.I. and Gerba, P.C. (2008). *Environmental*

*Microbiology*. (2nd ed.). Massachusetts: Academic Press.

Newsome, L., Morris, K. and loyd, J.R. (2014). The Biogeochemistry and

Bioremediation of Uranium and Other Priority Radionuclides. *Chemical*

*Geology*, 363: 164-184.

Weager, W., (1999). Oxidation of Arsenite to Assenate by a Bacterium Isolated

from an Aquatic Environment. *Biometals*, 12: 34-52.

## บทที่ 5

# บทบาทของจุลินทรีย์ในการบำบัดสารมลพิษอินทรีย์ และโลหะหนัก



ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากสารอินทรีย์และโลหะหนักที่ถูกสร้างขึ้นหรือจากกระบวนการอุตสาหกรรม รวมทั้งสารที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์แล้ว กลับถูกทิ้งลงสู่ธรรมชาติให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยไม่มีการบำบัดและบางครั้งมีอันตรายมากกว่าเดิมจากกระบวนการผลิตหรือจากการกระทำตามธรรมชาติของจุลินทรีย์ดังที่กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้านี้ การไม่ใส่ใจต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากสารมลพิษเหล่านี้ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาภายหลังทั้งปัญหามลพิษทางน้ำ ทั้งต่อน้ำใต้ดิน ผิวดิน ปัญหारेื่องกลิ่นเหม็น การแพร่กระจายของเชื้อโรค การสะสมสารพิษในดิน การสูญเสียที่ดินทางการเกษตร ในอดีตที่ผ่านมาการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี สามารถกระทำได้อาจะมีประสิทธิภาพบ้างตามมาเพราะมีสารตกค้างเนื่องจากการบำบัด แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงการย่อยสลายตามธรรมชาติของสารเหล่านี้โดยจุลินทรีย์ พบว่าสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนักสามารถย่อยสลายได้ โดยการนำไปใช้เป็นแหล่งอาหารหรือแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายคือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำหรือสารอื่นๆ ที่มี

โมเลกุลขนาดเล็กที่ไม่เป็นอันตรายและจุลินทรีย์ทั่วไปย่อยสลายได้ จึงนำมาประยุกต์กับการบำบัดสารมลพิษต่างๆ ได้เป็นอย่างดี จัดเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดปลอดภัยและเหมาะสม

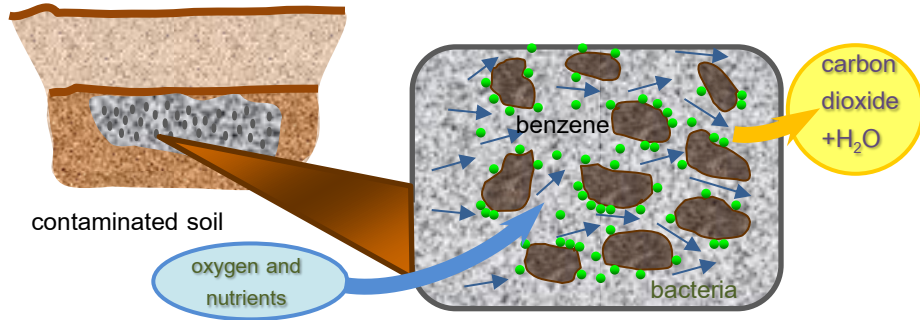
### 5.1 กระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนัก

การย่อยสลายเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน ในสภาวะที่มีออกซิเจนนั้น ในกรณีสารมลพิษอินทรีย์ สารมลพิษจะถูกออกซิไดซ์และสูญเสียอิเล็กตรอน (electron donor, e-donor) ให้กับออกซิเจน (electron acceptor, e-acceptor) คาร์บอนจากสารมลพิษอินทรีย์จะนำไปใช้สร้างเซลล์ใหม่ของแบคทีเรียและคาร์บอนไดออกไซด์ และได้โมเลกุลของน้ำจากออกซิเจน สรุปปฏิกิริยาการย่อยสลายแสดงในสมการที่ 5.1

aerobe + organic pollutants (e-donor) + O<sub>2</sub>(e-acceptor) →

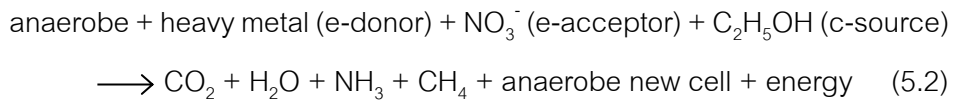


ตัวอย่างการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์แบบใช้อากาศ เช่นการย่อยสลายเบนซีน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในขณะเดียวกันก็เกิดการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมทั้งดินและน้ำ จากรูปที่ 5.1 แสดงถึงการปนเปื้อนในดิน เบนซีนจัดเป็นสารมลพิษที่มีโมเลกุลที่เสถียรมากจากการมีโครงสร้างพันธะระหว่างคาร์บอนถึง 6 ตัว ทำให้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานโดยเฉพาะการยึดเกาะติดกับอนุภาคดิน แต่การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่สามารถใช้อากาศและสารอาหารที่มีตามธรรมชาติในดินช่วยในการย่อยสลาย ทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนแตกออกได้ (cleavage) และจุลินทรีย์นำคาร์บอนนั้นไปใช้สร้างเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การย่อยสลายเบนซีนที่ปนเปื้อนในดินโดยจุลินทรีย์ (แบคทีเรีย)

สำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตัวอย่างเช่นการย่อยสลายโลหะหนักเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำ จุลินทรีย์จะรีดิวซ์โลหะหนัก โดยมีสารอนินทรีย์ เช่นไนเตรต แมงกานีส เพอร์ริค เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน (ตารางที่ 5.1) และมีการใช้สารให้คาร์บอน (c-source) เพื่อการสร้างเซลล์ของ anaerobe ด้วย เช่น  $C_2H_5OH$  (รูปที่ 5.2) สรุปปฏิกิริยาย่อยสลายแสดงในสมการที่ 5.2

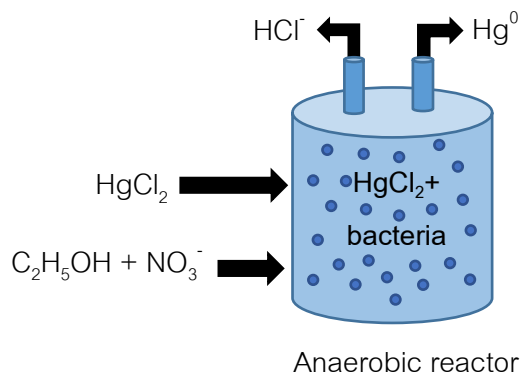


ตารางที่ 5.1 การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนักแบบใช้ออกภาคและไม่ใช้ออกภาค  
ผลิตภัณฑ์ที่ได้และตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการต่างๆ

Process	Reaction	Electron acceptor	Metabolic Product
Aerobic:	$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$	$O_2$	$H_2O$
Anaerobic:			
Denitrification	$2NO_3^- + 10e^- + 12H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O$	$NO_3^-$	$N_2$
Manganese IV reduction	$MnO_2 + 2e^- + 4H^+ \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	$Mn^{4+}$	$Mn^{2+}$
Iron III reduction	$Fe(OH)_3 + e^- + 3H^+ \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	$Fe^{3+}$	$Fe^{2+}$
Sulfate reduction	$SO_4^{2-} + 8e^- + 10H^+ \rightarrow H_2S + 4H_2O$	$SO_4^{2-}$	$H_2S$
Methanogenesis	$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	$CO_2$	$CH_4$

หมายเหตุ : ตัวให้อิเล็กตรอนคือสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนัก

ที่มา: ดัดแปลงจาก Madigan *et al.* (2014)



รูปที่ 5.2 การย่อยสลายเมอคิวริกคลอไรด์ในน้ำด้วยแบคทีเรีย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Atlas and Philp (2005)

การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์และโลหะหนัก นอกจากจะใช้กระบวนการย่อยสลายใน ภาวะมีหรือไม่มีอากาศแล้ว ยังมีกระบวนการเมแทบอลิซึมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีก ดังนี้

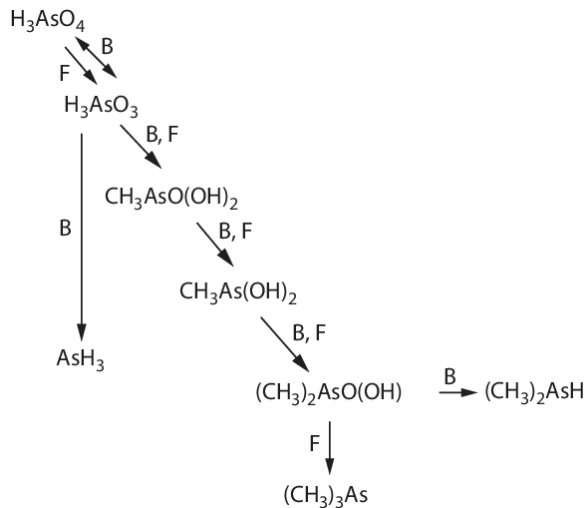
(1) Detoxification เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารมลพิษ ให้มีความเป็นพิษลดลงหรือไม่มีพิษอีกต่อไป ซึ่งเมแทบอลิซึมดังกล่าวอาจจะนำไปใช้หรือ เป็นประโยชน์ต่อการเจริญของจุลินทรีย์หรือไม่ก็ได้ เช่นการย่อยสลายสารฆ่าแมลงกลุ่ม organophosphate, มาลาไทออน (malathion) ของแบคทีเรีย *Pseudomonas* จะได้ สาร 2 ชนิด คือ เอสเทอร์ (ester) และแอลกอฮอล์ ซึ่งมีพิษน้อยกว่ามาลาไทออน คือเอสเทอร์ และไม่มีพิษคือแอลกอฮอล์

(2) Mineralization เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารมลพิษที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนให้มีขนาดเล็กและซับซ้อนน้อยลง จนอยู่ในรูปที่ทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ สามารถ ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนหรือแหล่งพลังงานเพื่อการเจริญได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ปล่อยสู่ สิ่งแวดล้อมคือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

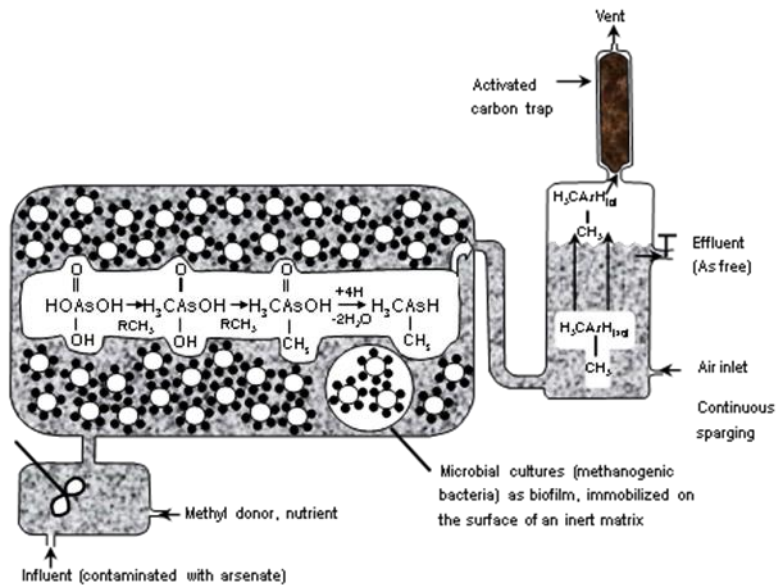
(3) Co-metabolism หมายถึงเมแทบอลิซึมร่วม หมายถึงการย่อยสลายสารมลพิษ โดยใช้เอนไซม์ร่วมกับการย่อยสลายสารเหยี่ยวน้ำ (สารกระตุ้น) ที่ให้เพื่อการกระตุ้นให้ จุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์มาย่อยสลายสารเหยี่ยวน้ำซึ่งเอนไซม์นี้ที่มีคุณสมบัติย่อยสลายมลพิษ ได้ด้วย กระบวนการที่ใช้เมแทบอลิซึมนี้จุลินทรีย์จะไม่สามารถใช้สารมลพิษหรือผลิตภัณฑ์มา เป็นอาหารหรือสร้างพลังงานได้ ตัวอย่างเช่นในการย่อยสลาย trichloroethylen (TCE) ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการล้างไขมันออกจากโลหะ เนื่องจากเป็นสารพิษอินทรีย์ที่ได้จากการ ล้างเครื่องขึ้น แบคทีเรีย *Methylomonas* ไม่สามารถย่อยสลายได้ การทำให้เกิดการย่อย สลายทำได้โดยกระบวนการ co-metabolism โดยการใส่สารเหยี่ยวน้ำคือมีเทน เพื่อให้ *Methylomonas* ผลิตเอนไซม์ methane monooxygenase (MMO) ขึ้นมาย่อยสลาย มีเทน โดย MMO มีคุณสมบัติสามารถย่อยสลาย TCE ได้ ดังนั้นจึงเกิดการย่อยสลายทั้ง



ที่เกาะติดกับอนุภาคดินเกิด methylation เปลี่ยนรูปเป็น dimethylarsine ซึ่งมีสถานะเป็น ก๊าซระเหยออกไปจากดิน หลังจากนั้นสารในรูปก๊าซจะถูกกำจัดโดยถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้รา ชนิด *Scopulariopsis brevicaulis*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Peacilomyces*, and *Candida humicola* ก็สามารถทำให้เกิด methylation เพื่อให้เกิด การระเหยของอาร์เซนิกได้เช่นเดียวกันและมีประสิทธิภาพมากกว่าแบคทีเรีย (Frankenberger, 2002) รูปแบบเลขของอาร์เซนิกที่เปลี่ยนแปลงโดยแบคทีเรียและรา แสดงใน รูปที่ 5.4 และกระบวนการ bioremediation อาร์เซนิกที่ปนเปื้อนในน้ำ แสดงในรูปที่ 5.5 โดย สามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ สำหรับสภาวะไม่มีออกซิเจน จะทำ stimulation โดยการเติมสารให้ c-source เช่น methanol



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนรูปแบบเลขของอาร์เซนิก โดย (B) แบคทีเรีย และ (F) รา  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Frankenberger (2002)



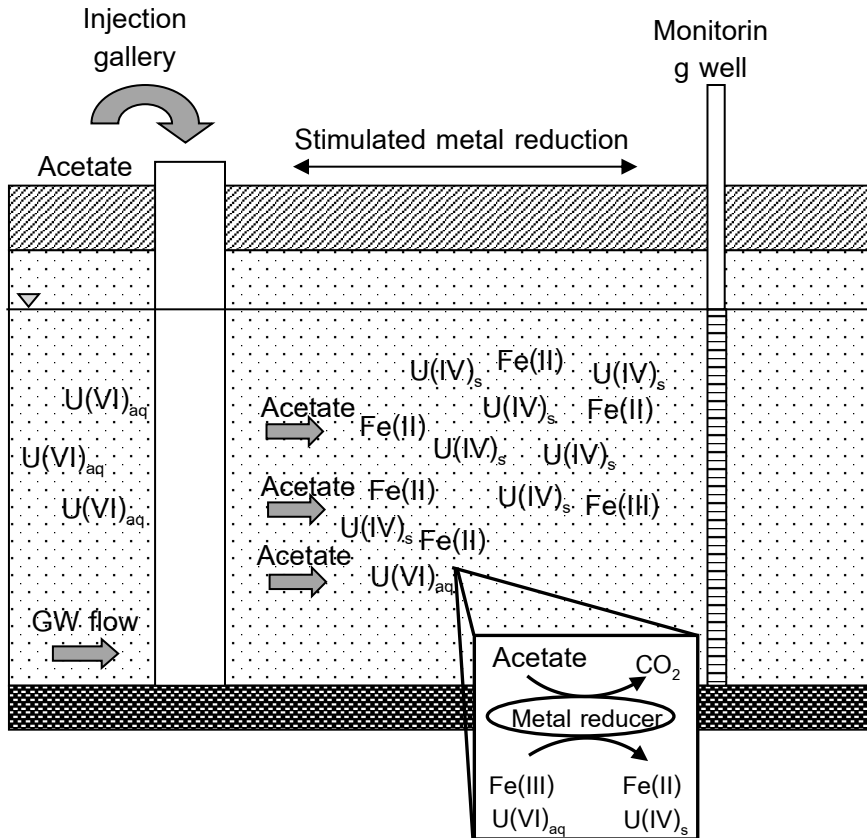
รูปที่ 5.5 แผนภาพการทำ in situ bioremediation อาร์เซนิกที่ปนเปื้อนในดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Frankenberger (1998)

### 5.2.2 การกำจัดยูเรเนียมที่ปนเปื้อนในน้ำ

การใช้จุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ทนกำมะถันสภาพรังสีได้ เปลี่ยนโลหะยูเรเนียมในรูปที่ละลายน้ำได้ให้เป็นรูปไม่ละลายน้ำเพื่อตกตะกอนให้ยูเรเนียมแยกออกมาจากการปนเปื้อนในน้ำที่จัดการทำเหมืองแร่ยูเรเนียมในรัฐโคโลราโด (Colorado) และนิวแม็กซิโก (New Mexico) ประเทศสหรัฐอเมริกา การบำบัดนี้จะใช้แบคทีเรียในกลุ่ม Geobactereaceae ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถ reduce  $\text{Fe}^{3+}$  (Fe(III)-reducing microorganism) และการ reduce จะไปเปลี่ยน oxidation no. ยูเรเนียมจาก +6 ที่ละลายน้ำเป็น +4 ที่ไม่ละลายน้ำ จึงกำจัดยูเรเนียมโดยตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ จากรูปที่ 5.6 เป็นการทำให้ bioremediation

น้ำที่ปนเปื้อนยูเรเนียม โดยมีการเติมสารอาหารเพื่อให้ C-source กับแบคทีเรียคือ acetate การทนต่อกัมมันตรังสีของ Geobacteraceae ทำให้สามารถนำไปใช้กำจัดสารกัมมันตรังสีอื่นๆ เช่น โครเมียม (Cr), เทคนีเชียม (Tc) และ วาเนเดียม (V) ได้อีกด้วย (Atlas and Philp, 2005)



รูปที่ 5.6 แผนภาพการทำ in situ bioremediation ยูเรเนียมที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ที่มา: Atlas and Philp (2005)

### เอกสารอ้างอิง

- Atlas, R.M., Philp, J. (2005). *Bioremediation: Applied Microbial Solution for Real World Environmental Cleanup*. Washington: ASM Press.
- Chulalaksananukul, S., Gadd, G.M., Sangvanich, P., Sihanonth, P., Piapukiew, J., Vangnai, A.S. (2006). Biodegradation of benzo[a]pynene by a newly isolated *Fusarium* sp. *FEMs. Microbiol. Lett.* 262: 99-106.
- Cunningham, C.J., Iushina, I.B., Lozinsky, V.I., Kukukina, M.S., Philp, J.C. (2004). Bioremediation of diesel-contaminated soil by microorganisms immobilized in a polyvinyl alcohol. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 54: 167-174.
- Das, S. (2014). *Microbial Biodegradation and Bioremediation (Elsevier Insights)*. (1st ed.). USA: Elsevier.
- Frankenberger, W. (1998). Effects of Trace Elements on Arsenic Volatilization. *Soil Biol. Biochem.* 30: 324-364.
- Kirchman, D.L., Maxwell P. and Mildred H. (2018). *Process in Microbial Ecology*. Oxford: Oxford University Press.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Bender, K.S., Buckley, D.H. and Stahl, D.A. (2014). *Brock Biology of Microorganisms*. (14th ed.). London: Pearson.
- Maier, M.R., Pepper, L.I. and Gerba, P.C. (2008). *Environmental Microbiology*. (2nd ed.). Massachusetts: Academic Press.