

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 10

ชีวเคมีประยุกต์เพื่อการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม

หัวข้อเนื้อหา

1. สารมลพิษ
2. การบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ
3. กลยุทธ์การบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ
4. การบำบัดสารไฮโดรคาร์บอนทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์
5. สรุป

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อผู้เรียนศึกษาบทเรียนนี้แล้วสามารถ

1. เข้าใจและระบุปัจจัยที่จำเป็นของการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์
2. อธิบายกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารมลพิษได้
3. ระบุข้อดีและความจำเป็นในการเลือกใช้วิธีการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพได้
4. จัดการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์ในหัวข้อสิ่งแวดล้อมและการบำบัดทางชีวภาพได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน

1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย โดยบรรยายเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ และหลักเมแทบอลิซึมของสารมลพิษอินทรีย์

1.2 อภิปราย สรุปประเด็นสำคัญที่เกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีทางชีวภาพ

2. กิจกรรมการเรียนการสอน

2.1 ให้สืบค้นงานวิจัยหรือตัวอย่างการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพในเหตุการณ์ต่างๆ ของต่างประเทศ

2.2 จัดการอภิปรายกลุ่มเกี่ยวกับปัญหามลพิษในประเทศไทยและเสนอแนวทางการบำบัด

2.3 ออกแบบกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในเรื่องสิ่งแวดล้อมและการบำบัดทางชีวภาพที่เหมาะสมกับผู้เรียนระดับต่าง ๆ

สื่อการเรียนการสอน

1. เครื่องคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ต
2. เพาเวอร์พอยต์ฟรีเซนต์ชัน เรื่องชีวเคมีประยุกต์เพื่อการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม
3. สำเนาเอกสารคำสอนรายวิชาชีวเคมีประยุกต์

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตการตอบคำถามในชั้นเรียน
2. สังเกตจากการอภิปรายโต้ตอบ ซักถาม และการแสดงความคิดเห็น
3. สังเกตพฤติกรรมความกระตือรือร้นในการร่วมกิจกรรม
4. ประเมินคุณภาพของงานที่มอบหมาย

บทที่ 10

ชีวเคมีประยุกต์เพื่อการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม

การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ เป็นหนึ่งทางเลือกในการแก้ไขปัญหามลพิษตกค้างในพื้นที่ชุมชนอุตสาหกรรม พื้นที่การเกษตร ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม การบำบัดความเป็นพิษของสารมลพิษเหล่านี้ให้น้อยลงสามารถทำได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย และการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ถือเป็นความนิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการบำบัดแบบอื่น ๆ ส่งผลเสียน้อยกว่าและมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ชีวเคมีสามารถอธิบายกลไกของกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้มีความเป็นพิษน้อยลงหรือจนกระทั่งสารเปลี่ยนรูปในกระบวนการสุดท้ายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

สารมลพิษ

สารมลพิษเป็นสารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมนั้น สารมลพิษมีแหล่งที่มาจากทั้งแหล่งธรรมชาติเองหรือจากการสร้างขึ้นโดยมนุษย์ โดยสารประกอบที่อยู่ในธรรมชาติสามารถจัดเป็นสารมลพิษได้หากสารนั้นมีอยู่ในระดับความเข้มข้นสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต สารมลพิษที่สร้างขึ้นโดยมนุษย์มีทั้งจากการปล่อยออกจากแหล่งอุตสาหกรรมอย่างตั้งใจหรือปนเปื้อนตกค้างเนื่องมาจากการใช้สารเคมีในกิจกรรมอื่น ๆ เช่น การใช้สารประกอบเคมีในการเกษตร หรือ การใช้สารประกอบเคมีในการสงคราม เป็นต้น สารประกอบที่เป็นพิษเหล่านี้ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติและมีความคงทนในธรรมชาติสูง การปนเปื้อนและตกค้างของสารมลพิษเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ทั้งนี้สารประกอบที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์อาจใช้คำว่า ซิโนไบโอติก (xenobiotic) ซึ่งในความหมายหนึ่งหมายถึงสารประกอบเคมีที่เป็นสิ่งแปลกปลอมต่อสิ่งมีชีวิตซึ่งโดยปกติแล้วมักจะไม่มีพบในสิ่งมีชีวิต เช่น ยาปฏิชีวนะ ยารักษามะเร็ง ซึ่งโดยปกติแล้วร่างกายมนุษย์จะไม่สามารถสร้างยาเหล่านี้ขึ้นได้เอง และคำว่า ซิโนไบโอติกในอีกในอีกความหมายหนึ่ง หมายถึงสารมลพิษหรือของเสียอันตรายที่สิ่งมีชีวิตและมนุษย์ได้รับเข้าไปในร่างกายและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตนั้นๆ ตัวอย่างของสารซิโนไบโอติกที่เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์สูง เช่น ไดออกซิน (dioxin) เบนโซเอไพเร็น (Benzo [a] pyrene) สารปราบศัตรูพืชต่าง ๆ เป็นต้น (อลิสซา วังใน, 2553 : 24-25 ; เกษม จันทรแก้ว, 2558 : 225-226 และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, 2558 : 6-9)

1. ลักษณะของสารมลพิษที่มีความสำคัญ

สารมลพิษที่มีความสำคัญ (priority pollutant) เป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตสูง สารมลพิษในกลุ่มนี้จะถูกจำแนกจากลักษณะดังนี้ (เกษม จันทรแก้ว, 2558 : 233-240 และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, 2558 : 14-21)

1.1 มีปริมาณของสารมลพิษที่มีการผลิตและ/หรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณสูง เช่นสารกลุ่มเบนซีน (benzene) และคลอโรเบนซีน (chlorobenzene) รวมถึงสารกำจัดศัตรูพืชและวัชพืชในการเกษตร

1.2 มีความคงทนต่อการย่อยสลายและตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน (persistent organic pollutants; POPs) ได้แก่ สารประกอบคลอรีนและสารประกอบที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารปราบศัตรูพืชอัลดริน (aldrin) คลอเดน (chlordane) ดีดีที (DDT) ไดเอลดริน (dieldrin) เอนดริน (endrin) เฮปตาคลอร์ (heptachlor) ไมเร็กซ์ (mirex) เฮกซาคลอโรเบนซีน (hexachlorobenzene) เป็นต้น

1.3 มีการสะสมสารมลพิษในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) เช่น สารปรอทในรูปของเมทิลเมอร์คิวรี (methylmercury) เมื่อมนุษย์ถูกปนเปื้อนด้วยสารมลพิษนี้และดูดซับสารนี้เข้าสู่ร่างกาย สารมลพิษนี้จะถูกลำเลียงไปส่วนต่าง ๆ ของร่างกายรวมทั้งสะสมอยู่ในอวัยวะต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น ไต ตับ และสมอง การสะสมสารมลพิษนี้ในสมองส่งผลให้เกิดภาวะปรอทเป็นพิษ (mercury poisoning) ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบประสาทของมนุษย์ในที่สุด

1.4 ความเป็นพิษของสารมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม (toxicity) ความเป็นพิษของสารแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหรือระดับความเข้มข้นของสารมลพิษที่สิ่งมีชีวิตได้รับ (dose-dependent) ความเป็นพิษของสารมลพิษที่มีต่อมนุษย์สามารถพิจารณาได้จากค่า LD₅₀ (lethal dose 50) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารมลพิษที่ทำให้สิ่งมีชีวิตที่ตรวจสอบตายในอัตราร้อยละ 50 หน่วยของค่า LD₅₀ คือ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งหมายถึงมิลลิกรัมสารมลพิษที่ทำให้อัตราการตายของสิ่งมีชีวิตเป็นร้อยละ 50 เมื่อคิดเทียบต่อกิโลกรัมน้ำหนักของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ

สารมลพิษที่มีความสำคัญเหล่านี้มักจะมีแหล่งกำเนิดมาจาก สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย สารเคมีเหลือใช้ในครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรม และปนเปื้อนไปยังแหล่งต่าง ๆ ของสิ่งแวดล้อม เช่นพื้นดิน แหล่งน้ำ และอากาศ ส่งผลต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และเมื่อมีปริมาณสะสมมากเกินไปก็อาจเกิดอันตรายต่อสุขภาพ อนามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์ สัตว์ และพืช (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา และคณะ, 2559 : 1-5)

การบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ

การบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ (bioremediation) เป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางชีวภาพของพืชหรือจุลินทรีย์ในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูป (transform) สารมลพิษเพื่อบำบัดความเป็นพิษของสารมลพิษดังกล่าวให้น้อยลงหรือหมดไป (อลิสซา วังใน, 2553 : 84-85) การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพอาจทำได้ด้วยหลายเทคนิค เช่น การบำบัดสารพิษทางชีวภาพประกอบ อาศัยความสามารถของเชื้อรา (mycoremediation) การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพประกอบ อาศัยความสามารถของพืช (phytoremediation) เทคนิคที่ใช้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำให้โลหะที่อยู่ในสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำสามารถละลายออกมาในรูปของสารละลาย (bioleaching) เป็นต้น (สุบัญญัติ นิर्मรัตน์, 2552 : 9 ; เกษม จันทร์แก้ว, 2558 : 264-265 และ นัยนันท์ อริยกานนท์, 2558 : 3-8)

1. จุลินทรีย์และเอนไซม์ในการบำบัดทางชีวภาพ

หลักการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมและจุลินทรีย์ที่เติมลงไปเพื่อการย่อยสลายสารมลพิษให้ลดความเป็นพิษลง สารมลพิษเหล่านี้จะเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ ดังนั้นองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญของการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพได้แก่ ชนิดและคุณสมบัติของจุลินทรีย์ รวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเจริญและเอนไซม์ของจุลินทรีย์เหล่านั้น

จุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของกระบวนการบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ กระบวนการนี้อาศัยเอนไซม์ในจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ (biocatalyst) ในวิถีการย่อยสลายสารมลพิษเป้าหมาย ประเภทของปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปและการย่อยสลายสารมลพิษรวมทั้งประสิทธิภาพของการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมด้วยกระบวนการชีวภาพนั้นขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่แตกต่างชนิดกันจะมีการสร้างเอนไซม์จะมีการสร้างเอนไซม์ที่มีลักษณะสมบัติที่แตกต่าง ชนิดของเอนไซม์มีผลต่อประเภทของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษเป้าหมายและมีผลต่อวิถีเอนไซม์ของจุลินทรีย์นั้นต่อสารมลพิษซึ่งในที่นี้หมายถึงวิถีการย่อยสลายสารมลพิษนั่นเอง (สุบัญญัติ นิर्मรัตน์, 2552 : 10 และ อลิสซา วังใน, 2553 : 86-87)

การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์ตามลักษณะของวิถีเอนไซม์สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลักตามประเภทของแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ชนิดของตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในจุลินทรีย์ ดังตาราง 10.1 การที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถในการใช้แหล่งคาร์บอน แหล่งพลังงานและตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและมีวิถีการย่อยสลายสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้แตกต่างกันด้วย สำหรับสารมลพิษที่ถูกออกซิไดซ์นั้นหากถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย และในระหว่าง

ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะมีการกำจัดไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนออกจากโครงสร้าง อิเล็กตรอนที่ถูกขับออกดังกล่าวจะถูกผ่านไปยังวิถีการขนส่งอิเล็กตรอนเพื่อสร้างพลังงานให้กับเซลล์ สำหรับจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในการเจริญจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายในวิถีขนส่งอิเล็กตรอน ในขณะที่จุลินทรีย์ที่เจริญโดยไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้าย ซึ่งความแตกต่างทางชีวภาพของจุลินทรีย์เหล่านี้เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการบำบัดสารมลพิษ (สัจฉิต นิมรัตน์, 2552 :11-12 ; อลิสสา วังไฉ, 2553 : 86-89 และ อลิสสา วังไฉ, 2560 : 22-24)

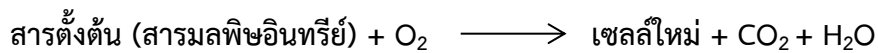
ตาราง 10.1 กลุ่มจุลินทรีย์และความสามารถในการใช้แหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน

กลุ่มของจุลินทรีย์	แหล่งพลังงานไฮโดรเจนอิเล็กตรอนและคาร์บอน	ตัวอย่างจุลินทรีย์
Photoautotroph (Photolithotroph)	แสง สารอนินทรีย์ที่ให้ไฮโดรเจน/อิเล็กตรอน (H/e ⁻) คาร์บอนไดออกไซด์	Algae , Purple and green bacteria, cyanobacteria
Photoautotroph (Photoorganotroph)	แสง สารอนินทรีย์ที่ให้ไฮโดรเจน/อิเล็กตรอน (H/e ⁻) สารอินทรีย์ที่ให้คาร์บอน	Purple non-sulfur bacteria, Green sulfifer bacteria
Chemoautotroph (Chemolithotroph)	สารอนินทรีย์แหล่งพลังงาน สารอนินทรีย์ที่ให้ไฮโดรเจน/อิเล็กตรอน (H/e ⁻) คาร์บอนไดออกไซด์	Sulfur-oxidizing bacteria, Hydrogen bacteria, Nitrifying bacteria
Chemoautotroph (Chemooorganotroph)	สารประกอบอินทรีย์ที่ให้พลังงาน สารอินทรีย์ที่ให้ไฮโดรเจน/อิเล็กตรอน(H/e ⁻) สารอินทรีย์ที่ให้คาร์บอน	Most bacteria, fungi , protozoa

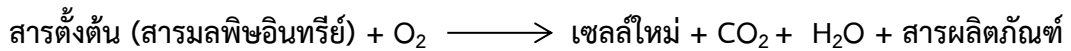
ที่มา : Pearson education Inc. (2008) ; อ้างถึงใน Rittner (n.d.)

2. การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์และสารมลพิษอินทรีย์ในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย จุลินทรีย์จะนำคาร์บอนและพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายนั้นไปใช้ในการดำเนินวิถีเมแทบอลิซึมของเซลล์ การเจริญและการสร้างเซลล์ใหม่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารมลพิษ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเซลล์ใหม่ การย่อยสลายสารอินทรีย์และสารมลพิษอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์จะเรียกว่ากระบวนการมีเนอรัลไลเซชัน (mineralization) แสดงได้ดังสมการนี้ (อลิสา วังโน, 2553 : 88)

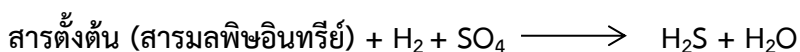
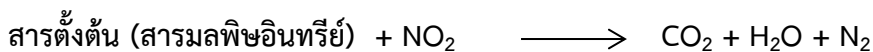
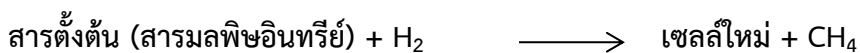
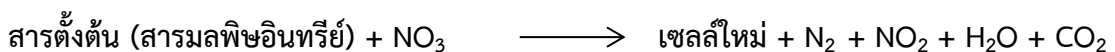


หากกระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์นั้นเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ กระบวนการนี้จะเรียกว่ากระบวนการเปลี่ยนรูป (biotransformation) โดยสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ถูกสะสมอยู่ในเซลล์หรือถูกขับออกนอกเซลล์ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยไม่สมบูรณ์ ได้แก่ สารจำพวกแอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน หรือกรดอินทรีย์ เช่น กรดไพรูวิก กรดซิติริก กรดไกลโคลิก เป็นต้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายอย่างไม่สมบูรณ์แสดงได้ ดังสมการนี้ (อลิสา วังโน, 2553 : 89)



3. การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (strict anaerobe) หรือจุลินทรีย์ใช้หรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้ (facultative anaerobe) ตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายที่มีความสำคัญ ได้แก่ ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต ซัลไฟด์ (SO_3) เป็นต้น จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเหล่านี้ได้แก่ ซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย (sulfate-reducing bacteria) หรือแบคทีเรียจำพวกเมทาโนเจน ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายอื่นแทนการใช้ออกซิเจนแสดงได้ ดังสมการดังนี้ (อลิสา วังโน, 2553 : 89)



5. ชนิดของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษ

จุลินทรีย์ในธรรมชาติบางชนิดมีความสามารถในการปรับตัวของเซลล์ให้ทนทานต่อความเป็นพิษของสารมลพิษและในเวลาเดียวกันก็เหนียวแน่นเพื่อสร้างเอนไซม์และวิถีเมแทบอลิซึมที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารเหล่านี้เพื่อนำมาใช้เป็นอาหารในการเจริญสร้างเซลล์ใหม่และสร้างพลังงาน จุลินทรีย์ที่มีความสามารถและมีลักษณะสมบัติที่ดีดังกล่าวนี้สามารถพบได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไป (pristine environment) หรือในสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษ (contaminated environment) เช่น ดิน น้ำ น้ำบาดาล เป็นต้น ตัวอย่างสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถย่อยสลายสารมลพิษชนิดต่าง ๆ ที่แยกได้จากสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนแสดงดังตาราง 10.2 นอกเหนือจากการที่จุลินทรีย์มีวิถีเมแทบอลิซึมในการย่อยสลายสารมลพิษเพื่อให้ได้เป็นสารอาหารแล้ว ในบางกรณีจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ให้หมดไป แต่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปสารผลิตภัณฑ์อื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลงและวิถีเมแทบอลิซึมของการเปลี่ยนรูปสารดังกล่าวเรียกว่าวิถีเมแทบอลิซึมร่วม (co-metabolism) ซึ่งเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของสารมลพิษในวิถีนี้ถูกสร้างขึ้นจากการเหนียวแน่นด้วยวิถีเมแทบอลิซึมหลักอีกวิถีหนึ่งซึ่งเป็นวิถีเมแทบอลิซึมของการใช้สารอาหารเพื่อการเจริญและการสร้างพลังงานให้เซลล์ (สับบัติน นิมรัตน์, 2552 : 55-58 และ อลิสา วังไฉน, 2553 : 192-195) ตัวอย่างสายพันธุ์จุลินทรีย์ลักษณะนี้แสดงดังตาราง 10.3 และสารมลพิษที่ถูกเปลี่ยนเป็นสารตัวกลางชนิดต่าง ๆ แสดงดังตาราง 10.4

ตาราง 10.2 ตัวอย่างชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารมลพิษ

สารมลพิษ	จุลินทรีย์	ที่มา
Atrazine	<i>Pseudomonas</i> sp. (ADP)	Newcombe and Crowley (1999 : 877-882)
Chlorpyrifos	<i>Enterobacter</i> strain B-14	Singh <i>et al.</i> (2004 : 4855-4863)
Dibenzothiophene (DBT)	<i>Rhizobium meliloti</i>	Frassinetti <i>et al.</i> (1998 : 289-297)
Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX)	<i>Acetobacterium paludosum</i> <i>Clostridium acetobutylicum</i>	Sherburne <i>et al.</i> (2006 : 539-547) Zhang and Hughes (2003 : 665-671)
Poly aromatic hydrocarbon (PAHs)	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Pycnoporus sanguineus</i> , <i>Coriolus versicolor</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Fomitopsis palustris</i> , <i>Daedalea elegans</i>	Arun <i>et al.</i> (2008 132-142)
Polychlorinated biphenyl (PCB)	<i>Rhodococcus erythropolis</i> TA421 <i>Rhizobium</i> sp.	Chung <i>et al.</i> (1994 : 2111-2113) Damaj and Ahmad (1996 : 908-915)
Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)	Fungi	Atagana (2009 : 5780-5789)

ตาราง 10.3 ตัวอย่างกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการใช้วิถีเมแทบอลิซึมร่วมเพื่อการย่อยสลายสารมลพิษ

ประเภทจุลินทรีย์		
แบคทีเรีย		รา
<i>Arthrobacter sp.</i>	<i>Micrococcus cerificans</i>	<i>Aspergillus niger</i>
<i>Azotobacter chroococcum</i>	<i>Micrococcus sp.</i>	<i>Trichoderma viride</i>
<i>Azotobacter vinelandii</i>	<i>Nocardia erythropolis</i>	
<i>Bacillus magaterium</i>	<i>Nocardia sp.</i>	
<i>Bacillus sp.</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	
<i>Brevibacterium sp.</i>	<i>Pseudomonas putida</i>	
<i>Flavobacterium sp.</i>	<i>Streptomyces aureofaciens</i>	
<i>Hydrogenomonas sp.</i>	<i>Vibrio sp.</i>	
<i>Methanotrophs</i>	<i>Xanthomonas sp.</i>	

ที่มา: Vogel et al. (1987) ; อ้างถึงใน อลิสา วังโน (2553 : 96)

ตาราง 10.4 สารมลพิษอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนรูปด้วยวิถีเมแทบอลิซึมร่วมและสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

สารมลพิษอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนรูปได้ด้วยวิถีเมแทบอลิซึมร่วม	สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
อีเทน	กรดอะซิติก
โพรเพน	กรดโพรพิโอนิก, อะซิโตน
บิวเทน	กรดบิวทานอิก, เมธิว-เอธิว-คีโตน
เมตา-คลอโรเบนโซเอต	4-คลอโรเคตาคอล 3-คลอโรเคตาคอล
ออโร-ฟลูออโรเบนโซเอต	3-ฟลูออโรเคตาคอล ฟลูออโรอะซิเตต
2-ฟลูออโร-4-ไนโตรเบนโซเอต	กรด2-ฟลูออโรโพรโคติชูอิก
4-คลอโรเคตาคอล	2-ไฮดรอกซี-4-คลอโร-มิวโคนิค เซมิอัลดีไฮด์
3,5-ไดคลอโรเคตาคอล	2-ไฮดรอกซี-3,5-ไดคลอโร-มิวโคนิค เซมิอัลดีไฮด์
3-เมธิวเคตาคอล	2-ไฮดรอกซี-3-เมธิวมิวโคนิค เซมิอัลดีไฮด์
ออโร-ไซลีน	กรดออโร-โทลูอิก
พารา-ไซลีน	กรดพารา-โทลูอิก

ที่มา: Vogel et al. (1987) ; อ้างถึงใน อลิสา วังโน (2553 : 97)

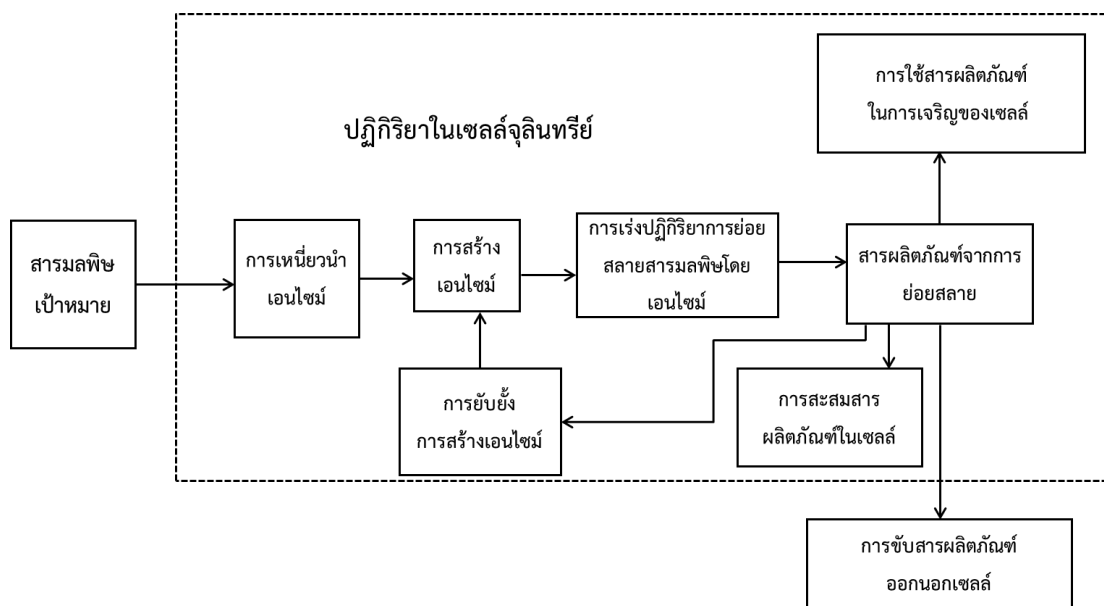
ตาราง 10.4 (ต่อ)

สารมลพิษอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนรูปได้ด้วย วิถีเมแทบอลิซึมร่วม	สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
บิวทิวเบนซีน	กรดฟีนิลอะซิติก
เอทิวเบนซีน	กรดฟีนิลอะซิติก
โพรพิวเบนซีน	กรดซินนามิก
พารา-โพรพิวโทลูอิน	พารา-โพรพิวเบนโซเอต
บิวทิวไซโคลเฮกเซน	กรดไฮโคลเฮกเซนอะซิติก
2,3,6-ไตรคลอโรเบนโซเอต	3,5-ไดคลอโรเคตาคอล
กรด 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอกซีอะซิติก	3,5-ไดคลอโรเคตาคอล
ไดคลอโรไดฟีนิลมีเทน	พารา-คลอโรฟีนิลอะซิเตต
1,1-ไดฟีนิล-2,2,2-ไตรคลอโรมีเทน	กรด 2-ฟีนิล-3,3,3-ไตรคลอโรโพรพิโอนิก
1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน	1,2-ไดคลอโรอีเทน
บิวทิวเบนซีน	กรดฟีนิลอะซิติก
เอทิวเบนซีน	กรดฟีนิลอะซิติก
โพรพิวเบนซีน	กรดซินนามิก

ที่มา: Vogel *et al.* (1987) ; อ้างถึงใน อลิสซา วังใน (2553 : 97)

6. ปฏิกริยาในการย่อยสลายสารมลพิษที่เร่งโดยเอนไซม์

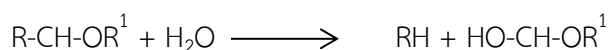
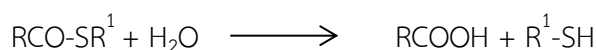
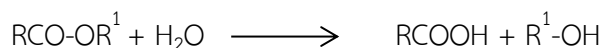
ประเภทของปฏิกริยาการเปลี่ยนรูปหรือการย่อยสลายสารมลพิษในวิถีเมแทบอลิซึมในจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะสมบัติของเอนไซม์ที่จุลินทรีย์นั้น ๆ สร้างขึ้น เอนไซม์ดังกล่าวนี้อาจถูกย่อยจากการเหนี่ยวนำอย่างจำเพาะต่อสารมลพิษเป้าหมายนั้น อาจได้เป็นสารผลิตภัณฑ์ หรือให้พลังงานแก่จุลินทรีย์ในการทำไปใช้ประโยชน์ต่อการเจริญเติบโต หรือถ้าบางกรณีสารผลิตภัณฑ์ไม่ได้สะสมอยู่ในเซลล์ก็จะขับออกข้างนอก แสดงดังภาพประกอบ 10.2 (อลิสซา วังใน, 2553 : 168 และ อลิสซา วังใน, 2560 : 46)



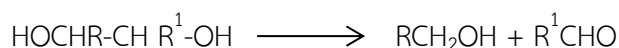
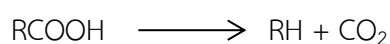
ภาพประกอบ 10.2 วิธีการย่อยสลายสารมลพิษโดยการเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ในจุลินทรีย์
ที่มา : อลิสา วังโน (2553 : 98)

ประเภทของปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปหรือการย่อยสลายสารมลพิษในวิถีเมแทบอลิซึม
ในจุลินทรีย์ที่เร่งโดยเอนไซม์สามารถแบ่งออกได้ 6 ประเภท ดังนี้ (อลิสา วังโน, 2553 : 99)

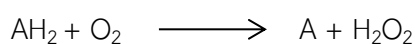
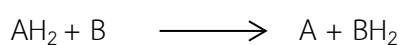
6.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)



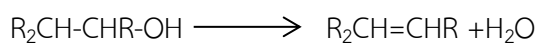
6.2 ปฏิกิริยาการแตกตัว (cleavage)



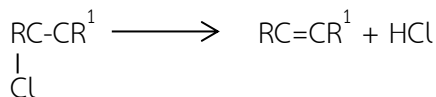
6.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน (oxidation reduction)



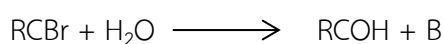
6.4 ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation)



6.5 ปฏิกริยาดีไฮโดรฮาโลจีเนชัน (dehydrohalogenation)



6.6 ปฏิกริยาการแทนที่ (substitution)

**กลยุทธการบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพ**

กระบวนการบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นการประยุกต์ใช้ความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารมลพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมโดยมีกลยุทธหลักของกระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ 3 แบบ ดังนี้

1. การบำบัดสารมลพิษตามธรรมชาติ

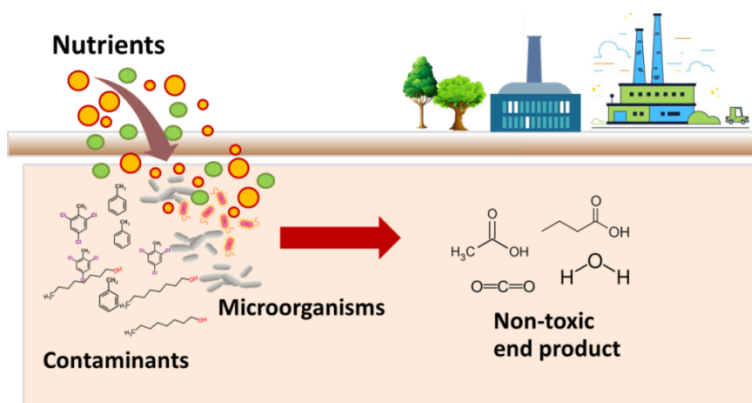
การบำบัดสารมลพิษตามธรรมชาติ (natural attenuation) เป็นการบำบัดในพื้นที่ (*in situ* treatment) ซึ่งอาศัยความสามารถของธรรมชาติในการเข้ามาช่วยในการบำบัดสิ่งแปลกปลอมที่ปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในธรรมชาติอย่างมากเกินสมดุล ในการบำบัดสารมลพิษนี้ประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ได้แก่ การเจือจาง (dilution) การกระจายตัว (dispersion) การซับ (sorption) การระเหย (volatilization) การสร้างเสถียรภาพของสารมลพิษด้วยวิธีทางเคมีและชีวภาพ (chemical and biological stabilization) การเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ (biotransformation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การใช้จุลินทรีย์และกระบวนการต่าง ๆ ในธรรมชาติการบำบัดสารมลพิษตามธรรมชาติเป็นวิธีการบำบัดที่มีการควบคุมสถานะที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดการบำบัดสารมลพิษอย่างจำเพาะและอยู่ในระยะเวลาการบำบัด (อลิสซา วังไฉ, 2553 : 133)

2. การบำบัดสารมลพิษโดยการกระตุ้นทางชีวภาพ

การบำบัดสารมลพิษโดยการกระตุ้นทางชีวภาพ (biostimulation) เป็นการเติมสารกระตุ้นทางชีวภาพให้แก่จุลินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ สารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ธรรมชาติ (growth substrate) สารกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ในวิถีการย่อยสลายสารมลพิษ (enzyme inducer) เป็นต้น รวมทั้งการปรับสถานะให้มีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายสารทาง

ชีวภาพ เช่น การให้อากาศและ/หรือการให้ออกซิเจนแก่จุลินทรีย์ธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งการเติมสารกระตุ้นทางชีวภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารมลพิษโดยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ลดระยะเวลาการปรับตัวของเซลล์จุลินทรีย์ รวมทั้งการเร่งอัตราการย่อยสลายสารมลพิษ (ภาพประกอบ 10.3) (สุบัญญัติ นิมิตรณ์, 2552 : 59-62 และ อลิสา วังโน, 2553 : 159-162)

เมื่อสารพิษปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมและจุลินทรีย์ธรรมชาติได้รับสารพิษนั้นจะเกิดการปรับตัวต่อสารนั้น หากไม่สามารถทนต่อสารพิษได้ก็จะมีการลดจำนวนลงและตายในที่สุด แต่หากจุลินทรีย์นั้นสามารถทนต่อสารพิษได้ก็จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ซึ่งจะมีการตอบสนองต่อสารพิษ 2 แบบ คือ จุลินทรีย์ที่ทนต่อความเป็นพิษได้แต่ไม่สามารถเจริญได้ไม่สามารถย่อยสลายสารพิษจะอยู่ในสภาพนิ่ง (vegetative state) ส่วนจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งที่มีศักยภาพในการย่อยสลายสารมลพิษได้แต่ต้องอาศัยระยะเวลาในการปรับตัว (acclimatization period) ในช่วงเวลาที่จุลินทรีย์มีการปรับตัวต่อสารมลพิษจุลินทรีย์จะยังไม่มีการย่อยสลายสาร และจะมีอัตราการเจริญที่ต่ำ ดังนั้น ความเข้มข้นของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมในระยะนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อพบว่าจุลินทรีย์มีการปรับตัวต่อสารมลพิษนี้แล้ว จะเริ่มมีการย่อยสลายสารพิษโดยอัตราการย่อยสลายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และอัตราการเจริญก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย (ภาพประกอบ 10.4) ซึ่งระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์จะมีระยะเวลาที่สั้นหรือยาวไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปัจจัยโดยรอบด้วย เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณอากาศและ/หรือออกซิเจน ปริมาณสารอาหาร ชนิดและความเข้มข้นของสารพิษ จำนวนครั้งของการปนเปื้อนของสารมลพิษ เป็นต้น (Crawford and Crawford, 2005 : 35-42)

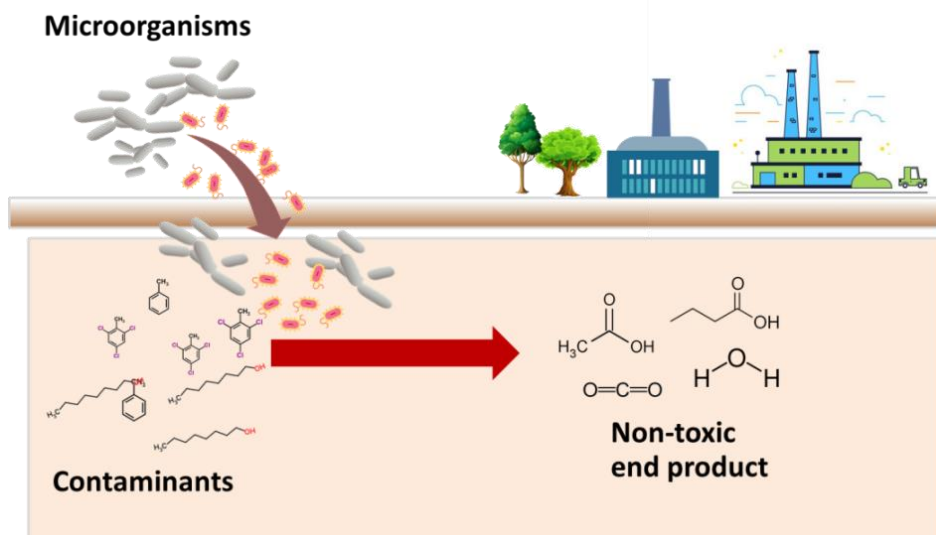


ภาพประกอบ 10.3 การเติมสารอาหารเพื่อการเจริญของจุลินทรีย์ธรรมชาติในรูปของสารละลายเพื่อบำบัดสารมลพิษด้วยวิธีการกระตุ้นทางชีวภาพ (biostimulation)

ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์เหล่านี้ในสภาวะแวดล้อมจริงอินทรีย์เหล่านี้ต้องผ่านการศึกษาในด้านความเสถียรของการเจริญ การปรับตัว การเอาตัวรอด ความอดทนต่อสภาพแวดล้อมและความสามารถในการทำงานในการย่อยสลายสารมลพิษในตัวกลางสิ่งแวดล้อมจริงด้วย (Koukkou, 2011 : 265-268 and Singh and Ward, 2011 : 159-163)

กลยุทธ์การเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อบำบัดสารมลพิษนี้เป็นกระบวนการบำบัดที่มีศักยภาพสูง หากใช้ควบคู่กับระบบบำบัดชีวภาพประกอบ เหมาะสมและมีการควบคุมที่ดี รวมทั้งมีการตรวจติดตามกระบวนการทำงานอย่างสม่ำเสมอ (Tongarun *et al.*, 2008 : 182-188) ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงแบบเซลล์แขวนลอยด้วยปริมาณเซลล์เริ่มต้นมากลงในบริเวณการปนเปื้อนที่ต้องการบำบัดหรือการเติมจุลินทรีย์ในรูปแบบเซลล์ตรึง เช่น เซลล์ดักจับแบบเม็ด (entrapped cell bead) ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาระบบการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนตกค้างของสารมลพิษให้เป็นระบบที่มีความเสถียรและมีความยั่งยืนมากขึ้น การเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงนี้สามารถเติมลงไปในพื้นที่บริเวณรอบรากพืช ทั้งนี้จุลินทรีย์สามารถใช้สารอาหารจากสารหลังจากรากพืชในการเจริญและควบคู่ไปกับการทำงานย่อยสลายสารพิษตกค้างในดิน เป็นต้น (อลิสวา วังโน, 2553 : 186-190)



ภาพประกอบ 10.5 การเติมจุลินทรีย์ที่ผ่านการศึกษาว่ามีคุณสมบัติย่อยสลายสารมลพิษ หรือ จุลินทรีย์ตัดแต่งพันธุกรรมเพื่อบำบัดสารมลพิษ (bioaugmentation)

ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

4. ข้อดีและข้อด้อยของการบำบัดสารมลพิษโดยใช้จุลินทรีย์

การบำบัดสารมลพิษโดยใช้จุลินทรีย์และกระบวนการทางธรรมชาติมีจุดเด่นที่สำคัญคือเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดของเสียจากการบำบัดต่ำ เนื่องจากเป็นกระบวนการปรับตัวของธรรมชาติและเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในที่บำบัดนั้น (*in situ*) จึงเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงอื่น ๆ และไม่ทำลายธรรมชาติของแหล่งที่จะบำบัด (non-destructive method) สามารถช่วยลดอัตราเสี่ยงของมนุษย์ต่อการสัมผัสสารมลพิษเพื่อ และพิจารณาต้นทุนทางเศรษฐกิจจะพบว่ามีต้นทุนโดยรวมต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ (อลิสซา วังใน, 2553 : 233-235)

ในขณะที่ข้อด้อยของการบำบัดสารมลพิษโดยใช้จุลินทรีย์และกระบวนการทางธรรมชาติจะพบว่าเป็นกระบวนการระยะเวลาในการบำบัดนานกว่าวิธีอื่น ๆ การดำเนินการจะต้องมีการสำรวจ การศึกษาวิจัยอย่างสมบูรณ์ถึงลักษณะสมบัติของแหล่งที่จะทำการบำบัด ซึ่งการสำรวจและศึกษาวิจัยอย่างสมบูรณ์นี้อาจมีค่าใช้จ่ายที่ควบคุมยากและใช้เวลานาน และเพื่อให้การบำบัดตามธรรมชาติเกิดในระยะเวลาที่เหมาะสมจึงต้องมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ อย่างเหมาะสม การบำบัดวิธีนี้มีควมจำเป็นที่ต้องมีการตรวจติดตาม (monitoring) อย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งระดับของการปนเปื้อนของสารมลพิษอยู่ในระดับที่กำหนดของการบำบัด เนื่องจากเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ หากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิศาสตร์ต่าง ๆ เช่น สภาวะการไหลของน้ำ (hydrology) หรือภาวะธรณีเคมี (geochemical conditions) เป็นต้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกลยุทธ์นี้ (Singh and Ward, 2011 : 187-192)

การบำบัดสารไฮโดรคาร์บอนทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์

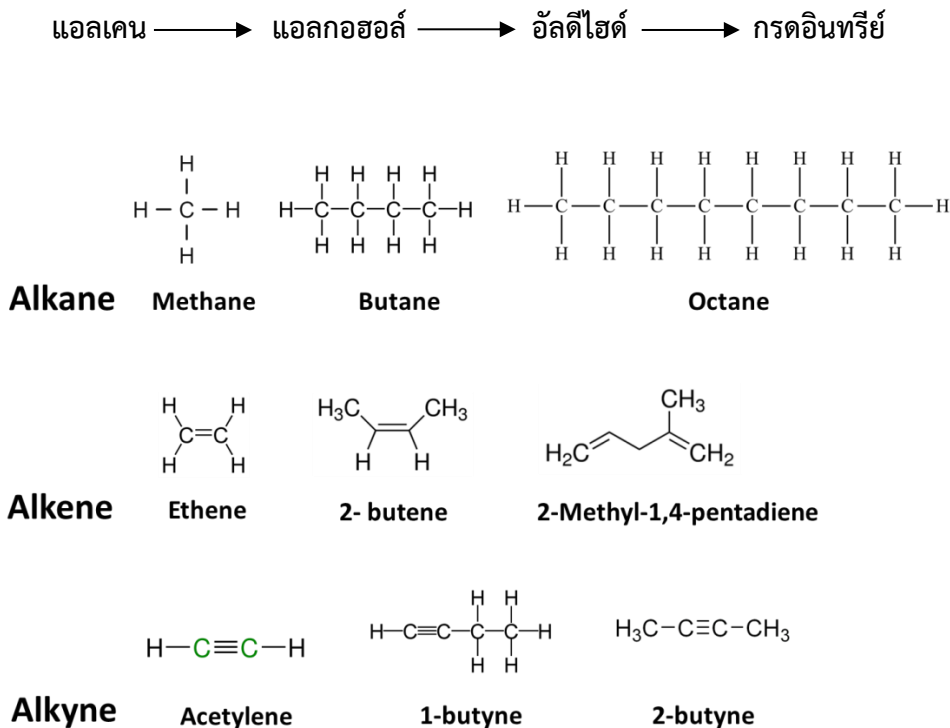
สารประกอบไฮโดรคาร์บอนคือสารประกอบอินทรีย์ที่มีเฉพาะธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ในธรรมชาติพบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดในแหล่งต่าง ๆ เช่น ยางไม้ ถ่านหิน ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม มีการใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมตัวทำละลายอินทรีย์ และอนุพันธ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีการเติมหมู่ฮาโลเจนนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์กำจัดแมลงศัตรูพืช การย่อยสลายทางชีวภาพของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ จะมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกัน แต่ในกรณีศึกษานี้จะแสดงตัวอย่างของการย่อยสลายสารอะลิฟาติกและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

1. การย่อยสลายสารอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) คือสารที่ภายในโมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นโซ่ในลักษณะปลายเปิด ซึ่งอาจเป็นโซ่ตรง (straight chain) หรือโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา (branched chain) และพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมอาจเป็นพันธะเดี่ยว พันธะคู่ หรือพันธะสาม หรือมีพันธะมากกว่าหนึ่งชนิด ผสมกันก็ได้ อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แบ่ง

ออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แอลเคน (alkane) แอลคีน (alkene) และ แอลไคน์ (alkyne)
(ภาพประกอบ 10.6)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจหรือสัมผัสผิวหนังเนื้อเยื่อของร่างกายเช่น เยื่อปอดเยื่อตา ทำให้มีอาการวิงเวียนศีรษะ หัวใจเต้นแรง เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เกิดอาการมีนเมา สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีมากมายหลายชนิดในรูปแบบที่แตกต่างกัน ทำให้ผลกระทบที่เกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีความแตกต่างกันหลายรูปแบบ บางชนิดอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ เกิดอาการผดผื่นต่อระบบทางเดินหายใจ เกิดอาการแสบตา แสบจมูก น้ำตาไหล น้ำมูกไหล และบางชนิดอาจทำให้เกิดอันตรายได้มาก หากได้รับต่อเนื่องในปริมาณมากและเป็นเวลานาน อาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ เช่น สารเบนโซไพรีน สารนี้เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของไนโตรเจนในอากาศเกิดเป็นก๊าซต่าง ๆ ทำให้เกิดหมอกควัน (photochemical smog) ที่ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจและตาได้ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของการย่อยสลายอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนโดยจุลินทรีย์จะได้สารผลิตภัณฑ์ดังนี้



ภาพประกอบ 10.6 ตัวอย่างสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน 3 ประเภท คือ แอลเคน แอลคีน และแอลไคน์

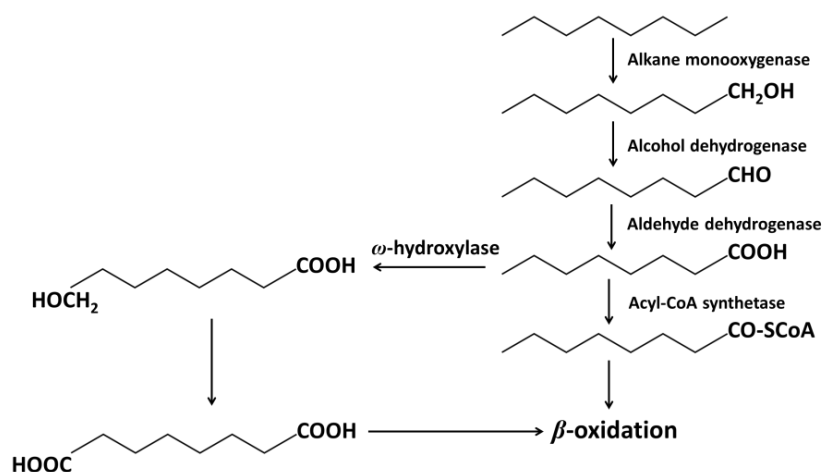
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

2. การย่อยสลายแอลเคนแบบใช้ออกซิเจน

วิธีการย่อยสลายแอลเคนแบบใช้ออกซิเจนแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักคือ เทอร์มินัลไฮดรอกซิเลชัน (terminal hydroxylation) และซับเทอร์มินัลไฮดรอกซิเลชัน (subterminal hydroxylation) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแอลเคนที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 2 อะตอมเป็นต้นไป ดังนี้ (Abbasian *et al.*, 2015 : 670-699)

2.1 การย่อยสลายแอลเคนแบบเทอร์มินัล ไฮดรอกซิเลชัน

วิธีการย่อยสลายแอลเคนแบบเทอร์มินัล ไฮดรอกซิเลชัน เริ่มจากปฏิกิริยาการออกซิเดชันของหมู่เมทิลที่ปลายสุดของโครงสร้างตั้งต้น (terminal methyl group) ให้สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohol) โดยมีเอนไซม์มอนออกซิเจเนส (monooxygenase) หรือเอนไซม์แอลเคนไฮดรอกซิเลส (alkane hydroxylase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของแอลกอฮอล์ปฐมภูมิได้เป็นแอลดีไฮด์โดยมีเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Das and Chandran, 2011 : 1-14 and Banerjee, *et al.*, 2016 : 1303-1313) ต่อมาเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลดีไฮด์ได้เป็นกรดอินทรีย์และ/หรือกรดไขมัน โดยมีเอนไซม์แอลดีไฮด์ดีไฮโดรจีเนส (aldehyde dehydrogenase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรดไขมันจะเกิดปฏิกิริยาควบคู่กันของไขมันกับ CoA โดยมีเอนไซม์เอซิล-โคเอ ซินเทส (acyl-CoA synthetase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเข้าสู่วิถีเบตาออกซิเดชัน (β -oxidation) เพื่อสร้างเอซิทิล-โคเอ เป็นสารตัวกลางก่อนเข้าสู่วิถีเมตาบอลิซึมกลางของเซลล์ต่อไป (ภาพประกอบ 10.7)



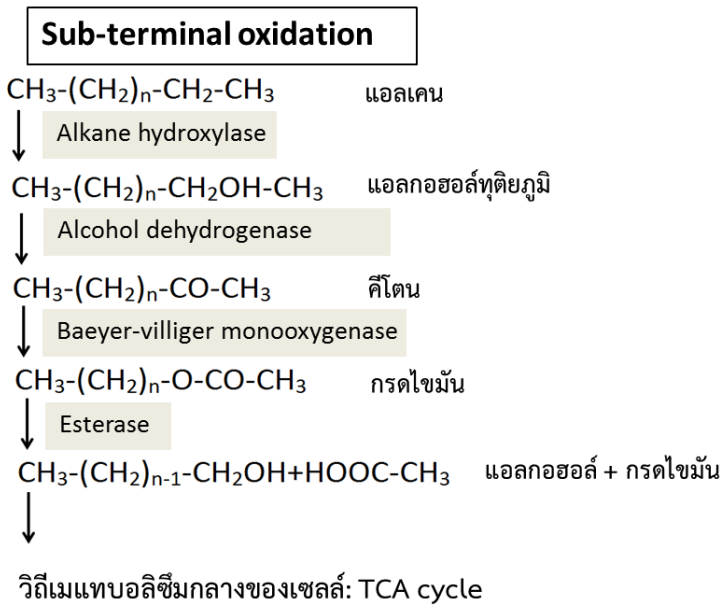
ภาพประกอบ 10.7 วิธีการย่อยสลายแอลเคนแบบ terminal oxidation

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rojo (2009 : 2478)

2.2 การย่อยสลายแอลเคนแบบซับเทอร์มินัล ไฮดรอกซิเลชัน

วิธีการย่อยสลายแอลเคนแบบซับเทอร์มินัล ไฮดรอกซิเลชันโดยมีลำดับ

ปฏิกิริยาเริ่มจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนตำแหน่งที่สองนับจากปลายสุดจากโครงสร้างสารตั้งต้น ให้สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohol) โดยมีเอนไซม์มอนออกซิจีเนสหรือเอนไซม์แอลเคนไฮดรอกซิเลสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลกอฮอล์ทุติยภูมิได้เป็นคีโตนโดยมีเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารคีโตนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของได้เป็นเอสเทอร์โดยมีเอนไซม์เบเยอร์-วิลลิเกอร์มอนออกซิจีเนส (Baeyer-Villiger monooxygenase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และในขั้นตอนสุดท้ายเกิดปฏิกิริยาไฮโดรโมนอไลซิสของเอสเทอร์โดยมีเอนไซม์เอสเทอเรสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นกรดไขมันและแอลกอฮอล์ (Das and Chandran, 2011 : 1-14 and Banerjee, *et al.*, 2016 : 1303-1313) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นสารตัวกลางที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่วิถีเมแทบอลิซึมกลางของเซลล์ต่อไป (ภาพประกอบ 10.8)

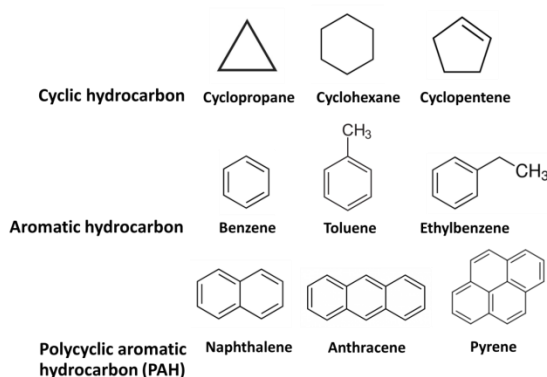


ภาพประกอบ 10.8 วิธีการย่อยสลายแอลเคนแบบ sub-terminal hydroxylation

ที่มา : อลิซา วังใน (2560 : 311)

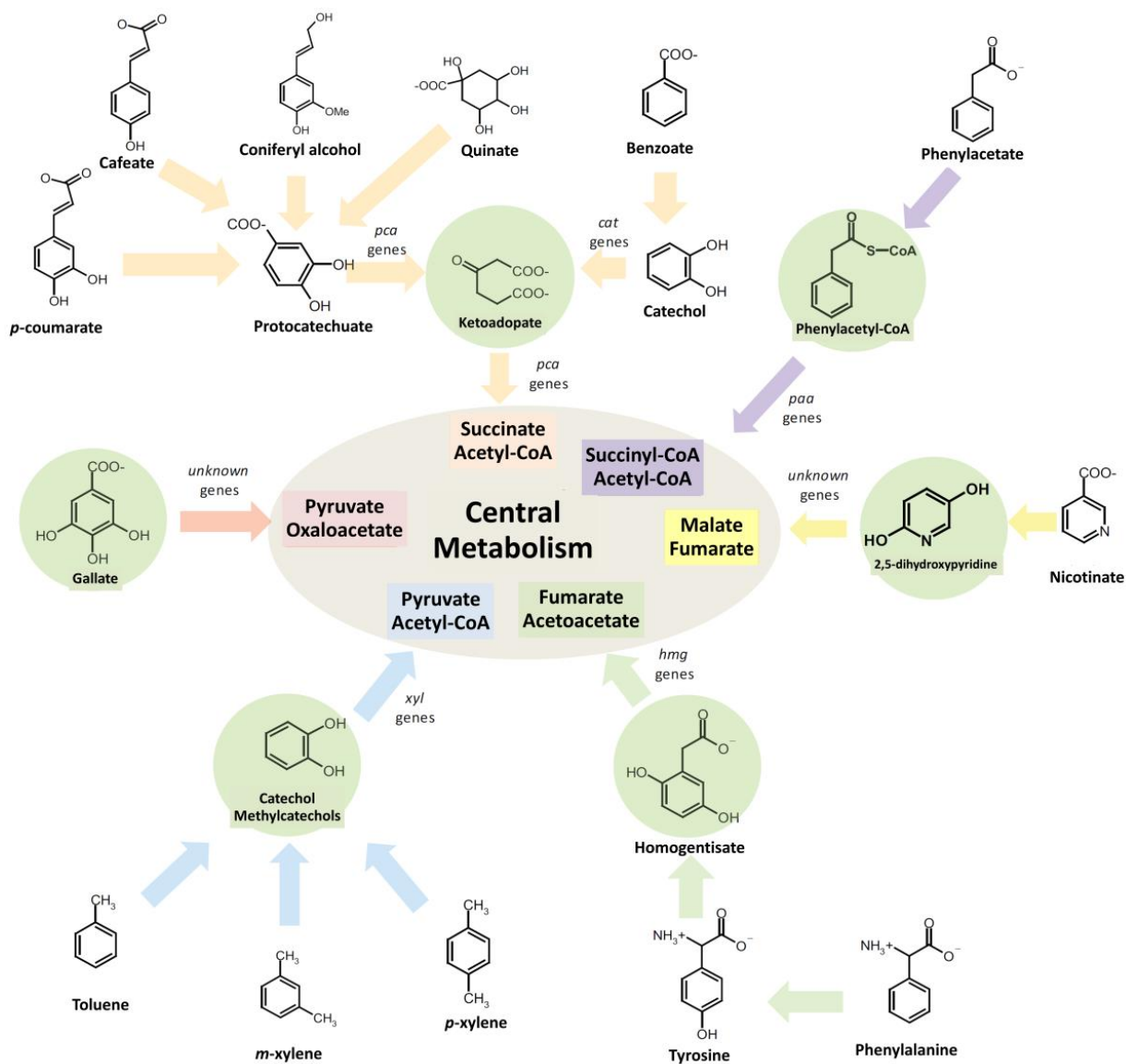
3. การย่อยสลายสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่คาร์บอนต่อกันเป็นวง พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมที่ต่อกันเป็นวง มีความยาวพันธะอยู่ระหว่างพันธะเดี่ยวกับพันธะคู่และมีความยาวพันธะเท่ากัน สารประกอบนี้แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารมอนอไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (monocyclic aromatic hydrocarbon; MAH) ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเพียง 1 วง เช่น เบนซีน (benzene) โทลูอิน (toluene) ฟีนอล (phenol) และ เอทิลเบนซีน (ethyl benzene) เป็นต้น และอีกกลุ่มคือสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbon; PAH) ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนมากกว่า 1 วง ขึ้นไป เช่น แนพทาลีน (naphthalene) แอนทราซีน (anthracene) และ ไพรีน (pyrene) เป็นต้น (ภาพประกอบ 10.9) หลักการที่สำคัญของการย่อยสลายสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนคือ การทำให้โครงสร้างมีความซับซ้อนน้อยลงเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ ปฏิกริยาที่ทำให้ความซับซ้อนนั้นน้อยลงนั้น ได้แก่ ปฏิกริยาการเติมหมู่ออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุล (oxygenation) ตามด้วยการแตกวง (ring cleavage) ของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนให้กลายเป็นสายตรง ปฏิกริยาการตัดหมู่ไซข้างออกและปฏิกริยาการย่อยสลายสารไฮโดรคาร์บอนสายตรงให้มีขนาดเล็กลง เอนไซม์ที่ช่วยเร่งปฏิกริยาการเติมโมเลกุลของหมู่ออกซิเจนหนึ่งโมเลกุล ได้แก่ มอนอออกซิจีเนส (monooxygenase) และการเติมออกซิเจนสองโมเลกุล ได้แก่ เอนไซม์ไดออกซิจีเนส (dioxygenase) สารตัวกลางสำคัญที่ทำให้เกิดการย่อยสลายอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ แคตติคอล (catechol) และโปรโตแคตชูเอต (protocatechuate) (ภาพประกอบ 10.10) จากนั้นไฮโดรคาร์บอนสายตรงจะเกิดปฏิกริยาการย่อยสลายเป็นลำดับจนได้เป็นสารออกซาโลอะซิเตต (oxaloacetate) และไพรูเวต (pyruvate) ก่อนเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ในที่สุด (อลิสตา วังไ, 2560 : 385-394)



ภาพประกอบ 10.9 สารประกอบไซคลิกไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)



ภาพประกอบ 10.10 ภาพรวมของเมแทบอลิซึมของสารประกอบอะโรมาติกชนิดต่าง ๆ

ที่มา : Nogales *et al.* (2008 : 5)

สรุป

การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ (bioremediation) โดยจุลินทรีย์เป็นการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปสารมลพิษที่ปนเปื้อนตกค้างในสิ่งแวดล้อมให้มีความเป็นพิษน้อยลงหรือหมดไป โดยมีกลยุทธ์หลักของกระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ 3 วิธี ได้แก่ การบำบัดสารมลพิษตามธรรมชาติ (natural attenuation) ซึ่งเป็นการอาศัยกลไกตามธรรมชาติ ได้แก่ กลไกทางเคมี กลไกทางชีวภาพในการบำบัดสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อม การบำบัดสารมลพิษโดยการกระตุ้นทางชีวภาพ (biostimulation) ซึ่งเป็นการเติมสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ต่าง ๆ เช่น อาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สารเหนียวน้ำให้เกิดการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษรวมทั้งการปรับสมบัติของสภาวะแวดล้อม และการเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อบำบัดสารมลพิษ (bioaugmentation) ซึ่งเป็นการเร่งอัตราการย่อยสลายสารมลพิษโดยการเติมจุลินทรีย์และอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ที่พิสูจน์แล้วว่าสามารถย่อยสลายสารมลพิษเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ ความรู้ทางชีวเคมีสามารถอธิบายกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือสารอินทรีย์ที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ อีกทั้งการศึกษาในระดับพันธุกรรมจะช่วยให้ทราบยีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลาย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคนิควิธีต่าง ๆ ที่จะช่วยบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายความแตกต่างของการย่อยสลายสารมลพิษทางชีวภาพแบบ mineralization และแบบ co-metabolism
2. จงยกตัวอย่างสารพิษประเภทไฮโดรคาร์บอนที่พบเห็นปนเปื้อนในชุมชน
3. จงอธิบายขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง
4. สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะมีขั้นตอนการย่อยสลายต่างจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงอย่างไร
5. จงระบุข้อดีของการใช้จุลินทรีย์ในการช่วยบำบัดสารมลพิษ
6. หากพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษที่ต้องการบำบัดมีสภาพไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จะมีวิธีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนนั้นได้อย่างไร
7. กระบวนการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพหากไม่ใช้จุลินทรีย์ จะมีการใช้สิ่งมีชีวิตชนิดใดในการบำบัดแทน จงอภิปรายและเสนอแนวคิด
8. พันธุวิศวกรรมในจุลินทรีย์มีความเกี่ยวข้องอย่างไรกับการบำบัดสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารมลพิษ
9. จงยกตัวอย่างสายพันธุ์จุลินทรีย์และแผนผังเมแทบอลิซึมการย่อยสลาย (degradation pathway) สารประกอบอินทรีย์ที่มีคลอรีนในโมเลกุล
10. จงค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีด้วยวิธีทางชีวภาพ

เอกสารอ้างอิง

- เกษม จันทร์แก้ว. (2558). **วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัยนันท์ อริยกานนท์. (2558). **การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยพืช**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัย.
- ศุภมาศ พินิจศักดิ์พัฒนา ชัยสิทธิ์ ทองจุ และแสงดาว เขาแก้ว. (2559). **มลพิษทางดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัญญา สิริวิทยาปกรณ์. (2558). **การจัดการสารพิษและกากของเสียอันตราย**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภัณฑิต นิมิตรณ์. (2552). **จุลชีววิทยาและการจัดการมลภาวะทางน้ำและดิน**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อลิสซา วังไ. (2553). **การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ: ส. เอเชียเพรส (1998).
- อลิสซา วังไ. (2560). **เอนไซม์ในวิธีการย่อยสลายสารมลพิษ**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abbasian, F., Lockington, R., Mallavarapu, M., and Naidu., R. (2015). **A comprehensive review of aliphatic hydrocarbon biodegradation by bacteria**. Applied biochemistry and biotechnology. 176(3): 670-699.
- Arun, A., Raja, P.P., Arthi, R., Ananthi, M., Kumar, K.S., Eyini, M. (2008). **Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) biodegradation by basidiomycetes fungi, Pseudomonas isolate, and their cocultures: comparative *in vivo* and *in silico* approach**. Applied Biochemistry and Biotechnology. 151(2-3): 132–142.
- Atagana, H.I. (2009). **Biodegradation of PAHs by fungi in contaminated-soil containing cadmium and nickel ions**. African Journal of Biotechnology. 8 (21): 5780-5789.
- Banerjee, A., Roy, A., Dutta, S., and Mondal, S. (2016). Bioremediation of hydrocarbon – A review. **International Journal of Advanced Research**. 4(6): 1303-1313.
- Chung, S.Y., Maeda, M., Song, E., Horikoshij, K., and Kudo, T. (1994). **A Gram-positive polychlorinated biphenyl-degrading bacterium, *Rhodococcus erythropolis* strain ta421, isolated from a termite ecosystem**. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. 58 (11): 2111-2113.

- Crawford, R.L., Crawford, D.L. (2005). **Bioremediation: Principles and applications (Biotechnology research)**. Cambridge University Press.
- Damaj, M., and Ahmad, D. (1996). **Biodegradation of polychlorinated biphenyls by rhizobia: a novel finding**. *Biochem Biophys Res Commun*. 26;218(3): 908-915.
- Das, N., and Chandran, P. (2011). **Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview**. *Biotechnology Research International*. 2011, ID 941810. doi:10.4061/2011/941810. 1-14.
- Frassinetti, S., Setti, L., Corti, A., Farrinelli, P., Montevecchi, P., and Vallini, G. (1998). **Biodegradation of dibenzothiophene by a nodulating isolate of *Rhizobium Meliloti***. *Canadian Journal of Microbiology*. 44(3) : 289-297.
- Koukkou, A.I. (2011). **Microbial bioremediation of non-metals: Current research**. Caister Academic Press.
- Newcombe, D.A., and Crowley, D.E. (1999). **Bioremediation of atrazine-contaminated soil by repeated applications of atrazine-degrading bacteria**. *Appl Microbiol Biotechnol*. 51(6): 877-882.
- Nogales, J., Palsson, B., and Thiele, I. (2008). **A genome-scale metabolic reconstruction of *Pseudomonas putida* KT2440: iJN746 as a cell factory**. *BMC Systems Biology*. 2:79. 1-20.
- Rittner (n.d.). **Unit 5: Metabolism**. Retrieved May 4, 2017, from 9th Grade Biology. Available URL: <https://mrrittner.weebly.com/unit-5-metabolism.html>
- Rojo, F. (2009). **Degradation of alkanes by bacteria**. *Environmental Microbiology* 11(10): 2477-2490.
- Sherburne, L.A., Shrout, J.D., and Alvarez, P.J.J. (2006). **Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) degradation by *Acetobacterium paludosum***. *Biodegradation* 16(6): 539-547.
- Singh, A. and Ward, O.P. (2011). **Applied bioremediation and phytoremediation**. Springer-Verlag.
- Singh, B.K., Walker, A., Morgan, J.A., and Wright, D.J. (2004). **Biodegradation of chlorpyrifos by enterobacter strain B-14 and its use in bioremediation of contaminated soils**. *Appl Environ Microbiol*. 70(8): 4855-4863.

- Tongarun, R., Luepromchai, E., and Vangnai, A. (2008). **Natural attenuation, biostimulation, and bioaugmentation in 4-chloroaniline-contaminated soil.** *Current Microbiology* 56(2): 182-188.
- Zhang, C., and Hughes, J.B. (2003). **Biodegradation pathways of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) by *Clostridium acetobutylicum* cell-free extract.** *Chemosphere*. 50(5): 665-671.

