











## บทที่ 2

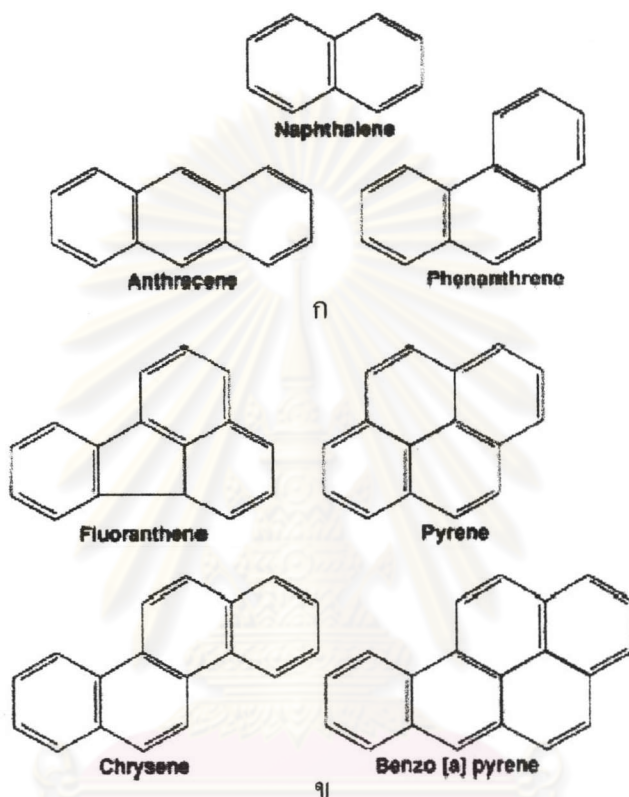
### วารสารปริทัศน์

สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) เป็นสารประกอบอินทรีย์เคมีอันตราย ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนและไนโตรเจนที่รวมกันเป็นอะโรมาติกเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปเชื่อมต่อกันแบบเส้นตรง (linear) มุมงอ (angular) และแบบกลุ่ม (cluster) ความสามารถในการละลายน้ำของสารกลุ่มนี้จะลดลงเมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งสมบัติการละลายน้ำต่ำนี้ทำให้สาร PAHs มีความคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อม (Cerniglia, 1992)

**ตารางที่ 2.1** โครงสร้างเคมี และสมบัติทางกายภาพ ของสารประกอบ PAHs  
(Macky, Shiu และ Ma, 1992)

สารประกอบ	โครงสร้าง	มวลโมเลกุล	สมบัติการละลายน้ำ ที่ 25 °ซ.(มก./ลิตร)
Naphthalene (NPH)		128	31
1-Methylnaphthalene (1MN)		142	28
2-Methylnaphthalene (2MN)		142	25
Acenaphthene (ACE)		154	3.8
2-Ethynaphthalene (2EN)		156	8.0
Fluorene (FLR)		166	1.9
Phenanthrene (PHN)		178	1.1
Anthracene (ANTH)		178	0.05
Fluoranthene (FLN)		202	0.26
Pyrene (PYR)		202	0.13

การเชื่อมต่อกันของวงแหวนเบนซีนภายใน โมเลกุลสาร PAHs มีผลต่อความทนทานในการย่อยสลาย ดังเช่น โมเลกุลที่เชื่อมต่อดวงแหวนแบบเส้นตรงจะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า โมเลกุลที่เป็นมุม ส่วน โมเลกุลที่เป็นกลุ่มจะมีความทนทานมากที่สุด (Cerniglia, 1992) โดยสาร PAHs ที่มีจำนวนวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 4 วงขึ้นไปจะมีความคงทนต่อการย่อยสลาย แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารประกอบ PAHs ชนิดที่ย่อยสลายได้รวดเร็ว (ก)

และชนิดที่มีความทนทานต่อการย่อยสลาย (ข) ในสิ่งแวดล้อม (Suthersan, 1999)

ความเป็นพิษของสาร PAHs จะเพิ่มขึ้นตามขนาด โมเลกุล เช่น แนพธาซีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มักก่อให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต เช่น สัตว์น้ำชนิดต่างๆที่ได้รับสารนี้อาจเสียชีวิตได้ทันที สำหรับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหลายชนิดเช่น เบนโซ [เอ] ไพรีน และ ไดเบนซ์ [เอ, เอช] แอนทราซีน มีผลแบบเรื้อรังโดยพบว่ามีคุณสมบัติในการเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogens) และสารก่อการกลายพันธุ์ (mutagen) ในสิ่งมีชีวิต จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตชั้นสูง (Wilson และ Jones, 1993)

Cerniglia (1992) และ Wilson และ Jones (1993) ได้สรุปแหล่งกำเนิดและวิธีในการเข้าสู่สิ่งแวดล้อมของสาร PAHs ไว้ดังต่อไปนี้

กระบวนการแยกและแปรสภาพธรรมชาติก๊าซธรรมชาติจากเชื้อเพลิงฟอสซิล  
 การใช้แหล่งพลังงานและความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล  
 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบ  
 กระบวนการผลิตถ่านโค้ก (coke production)  
 การผลิตและการใช้คาร์บอนแบล็ค (carbon-black)  
 การผลิตและการใช้แอสฟัลท์ (asphalt)  
 กระบวนการรักษาเนื้อไม้ (wood-treatment process)  
 การผลิตผลิตภัณฑ์ถนอมเนื้อไม้ที่ใช้ครีโอสอ (creosote) เป็นองค์ประกอบหลัก  
 การเก็บ การขนส่ง กระบวนการผลิต การใช้และการกำจัดน้ำมันเชื้อเพลิง  
 การกำจัดสิ่งปฏิกูลโดยการฝังดิน (land fill)  
 การเผาไหม้ของถ่านหินในระบบแบบเปิด  
 การเผาส่งปฏิกูล (incineration)  
 การซึมของน้ำมันดิบในธรรมชาติ  
 การรั่วไหลที่เกิดจากอุบัติเหตุจากเรือบรรทุกน้ำมันและเรือชนิดอื่น  
 การแพร่กระจายของน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

การเปลี่ยนแปลงของ PAHs เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมจะเกิดกระบวนการต่างๆดังนี้

การกลายเป็นไอ (volatilization)  
 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแสง (photooxidation)  
 ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (chemicaloxidation)  
 การสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation)  
 การดูดซับโดยอนุภาคของดิน (adsorption)  
 การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (microbial degradation)

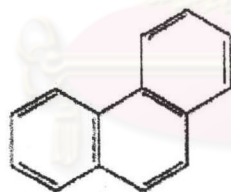
การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวทำให้สารพิษส่วนหนึ่งลดปริมาณลง แต่อย่างไรก็ตาม การปนเปื้อนของสารเคมีอันตรายต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมยังคงมีปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงก็ยังคงตกค้างในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากละลายน้ำได้น้อยมาก และถูกดูดซับโดยอนุภาคดินจึงทำให้ยากต่อการถูกทำลาย (Cerniglia,1992)

ขั้นตอนการบำบัดสารพิษในสิ่งแวดล้อมจะต้องทราบถึงองค์ประกอบของสารที่ปนเปื้อน เพื่อให้สามารถคัดเลือกและกำหนดวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการ โดยอาจใช้วิธีการทำลายฤทธิ์ด้วยการบำบัดทางเคมีฟิสิกส์ (chemical - physical treatment) การเผาที่อุณหภูมิสูง

(incineration) และกำจัดกากที่เหลือโดยวิธีฝังกลบ (land disposal) ในที่สุด แต่อาจมีสารพิษชนิดอื่นหรือมีผลเสียเกิดขึ้นมาจากการทำลายด้วยวิธีดังกล่าวได้ ทำให้ต้องมีการกำจัดในขั้นต่อไป ข้อดีของวิธีใช้สารเคมีคือใช้ประโยชน์ได้ในกรณีที่สารเคมีแพร่กระจายไปสู่บริเวณข้างเคียงอย่างรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือสารเคมีนั้นอาจก่อให้เกิดมีสารพิษชนิดใหม่ขึ้นได้ และขั้นตอนการบำบัดยังเสียค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย (Lee, 1995)

การบำบัดสาร PAHs โดยวิธีชีวภาพจำเป็นต้องทราบ โครงสร้าง โมเลกุล และสมบัติทางเคมีของสารที่ต้องการบำบัดเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสาร PAHs ในดิน และเพื่อประเมินศักยภาพของการบำบัดโดยวิธีชีวภาพเนื่องจากสาร PAHs แต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่จำเพาะแตกต่างกัน โดยที่จำนวนและการจัดเรียงตัวของวงแหวนเบนซีนมีผลต่อความคงทน การละลาย และการระเหยของสารนี้ในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีผลต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Trejo และ Quentero, 2000) ในการทดลองนี้ได้คัดเลือกสาร PAHs 3 ชนิดมาศึกษาการย่อยสลาย ได้แก่ ฟิแนนทริน ฟลูออแรนธรีน และ ไพรีน ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติทางเคมีดังต่อไปนี้

ฟิแนนทริน(Phenanthrene) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย วงเบนซีน 3 วงเชื่อมต่อกันเป็นมุม (angular arrangement) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

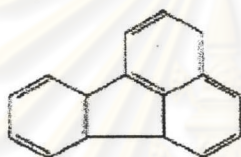


ฟิแนนทริน

รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของฟิแนนทริน (Suthersan, 1999)

สมบัติของฟีนแอนทริน มีสูตรโมเลกุล  $C_{14}H_{10}$  น้ำหนักโมเลกุล 178.23 ความถ่วงจำเพาะ 1.025 อุณหภูมิหลอมเหลว  $100^{\circ}\text{C}$ . อุณหภูมิกลายเป็นไอ  $339^{\circ}\text{C}$ . ความหนาแน่น 1.179 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ที่  $25^{\circ}\text{C}$ .) ความดันไอ 1 มม.ปรอท (ที่  $118.3^{\circ}\text{C}$ .) และละลายได้น้อยในน้ำ (น้อยกว่า 1 มก. ต่อลิตร ที่  $26^{\circ}\text{C}$ .) ละลายได้ปานกลางในแอลกอฮอล์ (ละลายในเอทานอลได้มากกว่า 100 มก. ต่อลิตร ที่  $26^{\circ}\text{C}$ .) ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์เช่น เบนซีน คลอโรฟอร์ม โทลูอิน อีเทอร์ เฮกเซน กรดแกลซีลลิกและซีดริก และคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Verschueren, 1977)

ฟลูออแรนธรีน (Fluoranthene) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย วงแหวนอะโรมาติก 4 วง เชื่อมต่อกัน แสดงดังรูปที่ 2.3

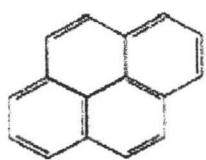


ฟลูออแรนธรีน

รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของฟลูออแรนธรีน (Suthersan, 1999)

สมบัติของฟลูออแรนธรีน มีสูตรโมเลกุล  $C_{16}H_{10}$  น้ำหนักโมเลกุล 202 อุณหภูมิหลอมเหลว  $107^{\circ}\text{C}$ . อุณหภูมิกลายเป็นไอ  $250^{\circ}\text{C}$ . ละลายได้น้อยในน้ำ (0.265 ส่วนในล้านส่วน ที่  $25^{\circ}\text{C}$ .) ในน้ำทะเลละลายได้ 0.1 ส่วนในล้านส่วน ที่ อุณหภูมิ  $22^{\circ}\text{C}$ . ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์เช่น เบนซีน และอีเทอร์ (Verschueren, 1977)

ไพรีน (pyrene) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย วงเบนซีน 4 วง เชื่อมต่อกันเป็นกลุ่ม (cluster) แสดงดังรูปที่ 2.4



ไพรีน

#### รูปที่ 2.4 โครงสร้าง โมเลกุลของไพรีน (Suthersan, 1999)

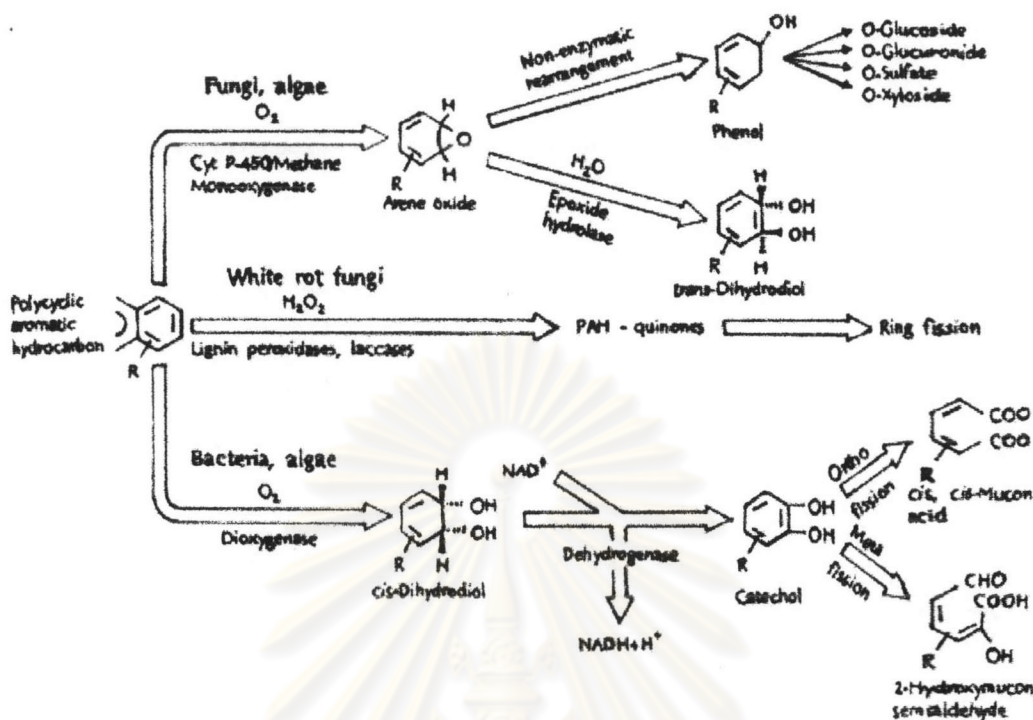
สมบัติของไพรีน เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่มีสี สารละลายให้สีฟ้าอ่อน สูตรโมเลกุล  $C_{16}H_{10}$  น้ำหนักโมเลกุล 202.24 ความถ่วงจำเพาะ 1.271 ที่อุณหภูมิ 23°C. อุณหภูมิหลอมเหลว 156°C. อุณหภูมิกลายเป็นไอ 404°C. ละลายได้น้อยในน้ำ (0.13 มก. ต่อลิตร ที่ 25°C.) ผลกระทบทางชีวภาพโดยมีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ต่อมนุษย์ (Verschuieren, 1977)

การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เป็นกระบวนการหลักที่ใช้บำบัดสาร PAHs ในดิน การเข้าใจถึงกลไกการย่อยสลาย และปัจจัยที่ควบคุมเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อให้การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นผลสำเร็จ

#### การย่อยสลายสาร PAHs โดยจุลินทรีย์

จุลินทรีย์มีการปรับตัว (acclimatisation) เพื่อให้สามารถย่อยสลายสาร PAHs โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารนี้จะพบจากบริเวณที่มีการปนเปื้อน (Wilson และ Jones, 1993)

การย่อยสลายสาร PAHs ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปเอนไซม์จะมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้น ซึ่งการบำบัดดินที่ปนเปื้อน PAHs โดยวิธีชีวภาพนั้นการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (aerobic biodegradation) มีความสำคัญที่สุด ในขั้นแรก จะเกิดการออกซิเดชันของ PAHs โดยใช้เอนไซม์ออกซิจีเนส ได้แก่ โมโนออกซิจีเนส (monooxygenase) หรือ ไดออกซิจีเนส (dioxygenase) ซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาการตรึงออกซิเจน โดยมีวิถีการย่อยสลายของจุลินทรีย์แต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีการย่อยสลาย PAHs โดยจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ (Cerniglia, 1992)

รา โดยทั่วไปจะผลิตเอนไซม์โมโนออกซิเจเนส ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 อะตอมเข้าไปในซับซ้อนเพื่อสร้างเอรีนออกไซด์(arene oxides) จับกับตำแหน่งนิวคลีโอฟิลิกในดีเอ็นเอ และตามด้วยการเติมน้ำที่เร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์จึงได้ ทราน-ไดไฮโดรไดออล(trans-dihydrodiols) และฟีนอล (phenols) (Wilson และ Jones, 1993)

แบคทีเรีย จะผลิตเอนไซม์ไดออกซิเจเนสทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 2 อะตอม เข้าไปในซับซ้อนเพื่อสร้างไดออกซิแทน แล้วถูกออกซิไดส์กลายเป็น ซิส-ไดไฮโดรไดออล และ ไดไฮดรอกซี ซึ่งการย่อยสลายสาร PAHs อาจมี หรือ ไม่มีการสะสมสารมัธยันต์ โดยตัวอย่างสารมัธยันต์ได้แก่ คะทีคอล โพรโตคาทาคูอิก และเจนทิลิก (Wilson และ Jones, 1993)

ราไวท์รอต มีเอนไซม์ย่อยสลายลิกนิน ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเปอร์ออกซิเดส แมงกานีสเปอร์ออกซิเดส และแลคเคส โดยจะผลิตเอนไซม์เหล่านี้เมื่อเข้าสู่ระยะที่มีการเจริญเต็มที่หรือในภาวะที่จำกัดปริมาณคาร์บอน ในโตรเจน หรือซัลเฟอร์ (Kotterman และคณะ, 1994) เอนไซม์ในกลุ่มนี้ไม่มีความจำเพาะต่อสารตั้งต้นจึงสามารถย่อยสลายลิกนิน ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงอะโรมาติกซับซ้อน และสามารถย่อยสลายสาร PAHs ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ โดยเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินต้องการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาออกซิเดชันสารลิกนิน (Wilson และ Jones, 1993)

การย่อยสลายสาร PAHs โดยจุลินทรีย์นั้นอาจเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสาร PAHs เพียงแหล่งเดียวเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน หรือจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารแบบโคเมตาบอลิซึม (cometabolism) เนื่องจากมีเอนไซม์ที่สลายสาร PAHs เพื่อใช้ในการเจริญ และสามารถสลายสาร PAHs ที่ไม่ได้ใช้ในการเจริญร่วมด้วย การย่อยสลายแบบโคเมตาบอลิซึมนี้มีผลต่อการเร่งสลายสาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น สาร PAHs ที่มีวงแหวนเบนซินตั้งแต่ 4 วงขึ้นไป (Wilson และ Jones, 1993) Sim และคณะ (1988) รายงานว่าสาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลสูงเมื่ออยู่เป็นสารบริสุทธิ์ในดินเพียงสารเดียว จะมีความต้านทานการย่อยสลายมากกว่าสาร PAHs หลายชนิดที่อยู่รวมกันอย่างซับซ้อนในดิน

สาร PAHs ที่มีมวลโมเลกุลต่ำที่ปนเปื้อนในดิน นั้นมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายโดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และพลังงานได้ เช่น แบคทีเรีย และราหลายสายพันธุ์ที่สามารถสลายสารพีแนทรีนได้ ขณะที่สาร PAHs มวลโมเลกุลสูงที่มีวงแหวนเบนซินตั้งแต่ 4 วงขึ้นไป ซึ่งมีสมบัติละลายน้ำได้น้อย และมีความคงทนสูง เช่น ฟลูออแรนธิน ไพรีนนั้นมีรายงานแบคทีเรีย และราน้อยชนิดที่สามารถย่อยสลายสารนี้ได้สมบูรณ์โดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน ซึ่งรายงานส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแบบโคเมตาบอลิซึม (Wilson และ Jones, 1993)

Walter และคณะ (1991) รายงานว่า *Rhodococcus* sp. สามารถย่อยสลายสารไพรีน และไครซิน ได้

Mueller และคณะ (1990) รายงานว่า *Pseudomonas paucimobilis* สามารถสลายสารฟลูออแรนธินได้

Weissenfels และคณะ (1990) รายงานว่า *Alcaligenes denitrificans* สามารถสลายสารฟลูออแรนธินได้

Geiselbrecht และคณะ (1998) รายงานว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ *Cycloclasticus* ซึ่งแยกเชื้อมาได้จากตะกอนในทะเลนั้นสามารถสลายสารฟลูออแรนธิน และไพรีนแบบโคเมตาบอลิซึมได้ เมื่อมีการเติมสารพีแนทรีน

Churchill, Harper และ Churchill (1999) รายงานว่า *Mycobacterium* sp. strain CH1 ที่แยกได้จากตะกอนดินที่ปนเปื้อน PAHs สามารถสลายฟลูออแรนธิน และไพรีนได้ โดยใช้ไพรีนเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน

แต่การเติมจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้ลงในแหล่งดินปนเปื้อนต้องคำนึงถึงปัญหาสำคัญคือ ความอยู่รอดของจุลินทรีย์ที่เติมเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น การจำกัดการเจริญจากการแก่งแย่งจากจุลินทรีย์กลุ่มอื่น การตายของจุลินทรีย์ และการมีสารตั้งต้นที่ใช้ได้ง่ายกว่าสาร PAHs



## การบำบัดสาร PAHs ในดินโดยวิธีทางชีวภาพ (bioremediation)

จุดประสงค์ของการบำบัดดินด้วยวิธีทางชีวภาพนั้นต้องการให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารเคมีอันตรายอย่างสมบูรณ์ จนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ หรือความเป็นพิษของสารหมดลง โดยการปรับปรุงสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ในดิน เช่น ความเป็นกรดค่า ความชื้น การให้อากาศ และการเติมสารอาหารลงในดิน เป็นต้น Trejo และ Quintero (2000) ได้สรุปเทคโนโลยีการบำบัดดินโดยวิธีทางชีวภาพ ไว้ดังต่อไปนี้

Bioaugmentation	การเติมเชื้อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนลงในแหล่งดิน
Biostimulation	การกระตุ้นการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดิน โดยการเติมสารอาหาร สารอินทรีย์
Biofilters	การใช้คอลัมน์ยาวที่มีจุลินทรีย์อยู่ภายในเพื่อบำบัดสารปนเปื้อนที่กระจายออกสู่บรรยากาศ
Bioreactor	การย่อยสลายในภาชนะหรือถังหมักโดยใช้บำบัดดินในรูปของเหลว หรือ โคลน (slurry)
Bioventing	วิธีการบำบัดดินที่ปนเปื้อน โดยมีการให้ออกซิเจนผ่านลงในดินเพื่อกระตุ้นการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์
Composting	การบำบัดโดยใช้ออกซิเจน และอุณหภูมิสูง ร่วมกับการเติมปุ๋ยหมักที่เตรียมจากเศษพืช และเศษวัสดุต่างๆ ลงในดินที่ปนเปื้อน
Land farming	ระบบบำบัดดิน ณ บริเวณปนเปื้อน โดยการปรับปรุงดินด้วยการใส่ปุ๋ย ให้น้ำ ควบคุมความเป็นกรดค่า บางครั้งอาจมีการเติมจุลินทรีย์ และสารลดแรงตึงผิว

ความสำเร็จของการบำบัดสาร PAHs ทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยในสิ่งแวดล้อม ดังต่อไปนี้

1. การมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสาร PAHs ได้
2. จุลินทรีย์สามารถสลายสาร PAHs ได้ง่าย โดยที่นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและคาร์บอนได้
3. การมี inducer เพื่อสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อสาร PAHs
4. การมีตัวให้และรับอิเล็กตรอน (electron acceptor-donor) ที่เหมาะสม
5. ความสมดุลของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ในการเข้าย่อยสลาย เช่น ความชื้น และความเป็นกรดค่า

6. สารอาหารที่จำเป็นเพื่อสนับสนุนการเจริญ และการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

7. ช่วงอุณหภูมิที่สนับสนุนกิจกรรมของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาการสลายสาร PAHs

8. การไม่มีสารพิษในระบบจากสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้น

9. มีจุลินทรีย์ที่สลายสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้น

10. มีจุลินทรีย์ที่ป้องกันการสร้างสารมัธยันต์ที่เป็นพิษ

11. สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม มีการแก่งแย่งโดยจุลินทรีย์น้อย

(Baker, 1994 อ้างถึงใน Trejo และ Quintero, 2000)

### ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการย่อยสลายสาร PAHs โดยจุลินทรีย์

สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการบำบัดสาร PAHs ดังนั้นจึงได้มีการปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมก่อนการบำบัด เช่น ความเป็นกรดด่าง อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P ratio) ในดิน โดยการเติมวัสดุที่เหมาะสมเช่น ปุ๋ยขี้วัว สารอาหาร และปุ๋ยเคมี ลงในดิน รวมทั้งการปรับความชื้น การพรวนดินเพื่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Sims, Sims และ Matthews, 1990) และการให้ออกซิเจนโดยตรงหรือใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่ไม่มากเกินไปเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงนั้นเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

Dibble และ Bartha (1979) ได้รายงานปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันในดินโดยใช้ความชื้น 30-90 เปอร์เซ็นต์ ความเป็นกรดด่าง 7.5 – 7.8 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N) เท่ากับ 60 : 1 คาร์บอนต่อฟอสฟอรัส (C : P) เท่ากับ 800 : 1 และใช้อุณหภูมิ 20 °ซ.

Bauer และ Capone (1985) รายงานการใช้ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารแอนทราซีน และแนพทาลินในตะกอนดินจากทะเลควรมีออกซิเจนอยู่ในช่วง 10 – 40 เปอร์เซ็นต์

Sims, Sims และ Matthews (1990) ได้สรุปสภาวะของสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสาร PAHs ในดินไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะของสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดิน  
โดยวิธีบำบัดทางชีวภาพ

พารามิเตอร์	ช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์
ความชื้นของดิน	25 - 85 % ของค่าความจุสูงสุดในการอุ้มน้ำ
ความเป็นกรดด่างของดิน	5.5 - 8.5
ปริมาณออกซิเจน	สภาวะใช้ออกซิเจน ควรมีออกซิเจนมากกว่า 10 % สภาวะใช้ออกซิเจน ควรมีออกซิเจนต่ำกว่า 1 %
ปริมาณสารอาหาร	มีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่จำเป็นต่อการเจริญ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P) เท่ากับ 120 : 10 : 1
อุณหภูมิ (°ซ.)	24 - 30

ต่อมา Hupe และคณะ (2001) ได้สรุปแนะนำการจัดการบำบัดสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดินให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การบำบัดสาร PAHs ในดินให้มีประสิทธิภาพ

พารามิเตอร์	สถานะที่เหมาะสม
น้ำ	35 – 65 % ของค่าความจุในการอุ้มน้ำสูงสุด (สำหรับการบำบัดที่ไม่มีการกวนผสม) 35 – 55 % ของความจุในการอุ้มน้ำสูงสุด (สำหรับการบำบัดที่มีการกวนผสม)
อุณหภูมิ	10 – 30 °ซ. (ขึ้นกับสมบัติของสารปนเปื้อน เช่น การระเหย การละลาย)
ออกซิเจน	มากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรในดิน หรือ เติมวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มช่องว่างในดิน ทำให้มีการระบายน้ำ และการถ่ายเทอากาศ
ค่าความเป็นกรดด่าง	ช่วง 6 – 7.5 ปูนขาว : ช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างสำหรับดินกรด มีสารอินทรีย์สูง และมีสมบัติเป็นบัฟเฟอร์สูง ปุ๋ยหมัก : ช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่าง และควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง สำหรับดินที่เป็นกรดอ่อน มีสารอินทรีย์ต่ำ และมีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ
สารอาหาร	คาร์บอน ต่อ ไนโตรเจน ต่อ ฟอสฟอรัส (C:N:P) เท่ากับ 100 : 8 : 2 (C:N ต่ำกว่า 20 : 1 , C :P ประมาณ 50 : 1) โดยสามารถเติมสารอาหารในรูปสารละลาย หรือปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยหมัก ซึ่งช่วยปรับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนได้
การร่อน และบด การผสม	คัดแยกสิ่งแปลกปลอม และวัสดุหยาบที่มีขนาดมากกว่า 20 มม. ผสมก่อนการบำบัดเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน การส่งผ่านอากาศดีขึ้น และลดการรวมตัวเป็นก้อนกลม
การเติมวัสดุ	การส่งผ่านอากาศดีขึ้น เช่น เติมปุ๋ยหมัก

Mahro และคณะ (1994) ได้รายงานว่าการเติมปุ๋ยหมักลงในดินสามารถเร่งสลายสาร PAHs ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการเติมปุ๋ยอินทรีย์ (fertilizer) หรือการเติมแบคทีเรียที่มีความสามารถในการสลายสาร PAHs Hupe และคณะ (1996) รายงานการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน โดยการเติมปุ๋ยหมัก ซึ่งพบว่า การเติมปุ๋ยหมักช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยเป็นผลมาจากคุณสมบัติของปุ๋ยหมักที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ปุ๋ยหมักช่วยเพิ่มการส่งผ่านออกซิเจนในดิน
2. ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งของจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลาย
3. ช่วยควบคุมความเป็นกรดด่างของดิน ไม่ให้เปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีสมบัติเป็น buffering capacity และช่วยให้ดินอุ้มน้ำได้ดีขึ้น
4. เป็นแหล่งสารอาหารและแร่ธาตุ ที่สำคัญ โดยเฉพาะ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
5. ปฏิกริยาของอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักกับสารปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนรวมตัวกับฮิวมัสในดิน

นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังช่วยลดความเป็นพิษของน้ำมันที่ปนเปื้อนในดิน โดยทดสอบจากกิจกรรมของแบคทีเรีย สาหร่าย และพืช

Margesin และ Schinner (1997) ได้รายงานว่าการเติมปุ๋ยอินทรีย์ (C/N/P ratio = 100:10:2) ลงในดินที่ปนเปื้อนน้ำมันดีเซล สามารถเร่งสลายน้ำมันดีเซลที่ปนเปื้อนได้ โดยให้ผลการย่อยสลายที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเติมจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายน้ำมันดีเซลโดยตรง

Wagner และ Zablotowicz (1997) ได้คัดเลือกสารอินทรีย์เพื่อใช้บำบัดสาร cyanazine และ fluometuron สารในกลุ่ม chloro-s-triazine และ phenylureas ซึ่งเป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลงที่ปนเปื้อนในดิน โดยสารอินทรีย์ที่ใช้คือ คอร์นมีล (corn meal) หญ้าไรย์ (rye grass) เศษหญ้า และเศษวัสดุจากกรงสัตว์ปีก (poultry litter) เติมลงในดินร่วนปนทรายที่ทำให้ปนเปื้อนด้วยสารฆ่าแมลง พบว่า สารอินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ช่วยในการเร่งการย่อยสลายสาร cyanazine และให้การสะสมสารเมตาบอไลต์ที่แตกต่างกัน ส่วนสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเร่งการสลายสาร fluometuron คือ หญ้าไรย์

Carmichael และ Pfaender (1997) รายงานผลของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ช่วยเร่งสลายสารพีแนนทรินและไพรีน โดยจุลินทรีย์ในดิน และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งการย่อยสลายสาร PAHs ขึ้นกับ ชนิดของสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่เติมลงในดิน สมบัติทางกายภาพของดิน ประวัติการปนเปื้อน และปริมาณสาร PAHs ในดิน

## บทบาทของชนิด และจำนวนจุลินทรีย์ในดินที่ปนเปื้อนสาร PAHs

ดินนั้นเป็นแหล่งที่มีความหลากหลายของจุลินทรีย์มากที่สุดในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ แบคทีเรีย ไชยาโนแบคทีเรีย สาหร่าย รา และ โปรโตซัว

แบคทีเรีย และราในดินมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสาร PAHs ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่สามารถใช้ PAHs ในการเจริญ นั้นเป็นพวกแบคทีเรียแกรมลบ และใช้ออกซิเจนในการเจริญ ส่วนราที่พบส่วนใหญ่จะออกซิไดซ์ สาร PAHs แบบ โคเมตาบอลิซึม โดยไม่สามารถใช้ในการเจริญได้ (Bossert และ Bartha, 1984)

ไชยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายสามารถสลายสาร PAHs ได้บางชนิด แต่พบว่ามีบทบาทน้อยมากในดินชั้นต่างๆ เนื่องจากมีปริมาณอยู่น้อย ส่วน โปรโตซัวนั้นมีความสำคัญโดยทำหน้าที่จับกินแบคทีเรียและยีสต์ที่ย่อยสลาย PAHs ในดิน โดยมีรายงานพบน้ำมันดิบในเวคิวโอลอาหาร (food vacuoles) ของ โปรโตซัว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ PAHs จำนวนของแบคทีเรียที่ย่อยสลาย PAHs และจำนวนโปรโตซัวที่กินแบคทีเรียที่ย่อยสลาย PAHs ในดินนั้นแปรผันตามกัน ขณะที่จำนวนราจะคงที่ไม่แปรผันตามสภาวะ (Bossert และ Compeau, 1995)

การบำบัดทางชีวภาพโดยการเติมจุลินทรีย์ต่างถิ่นที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารพิษได้ลงในดิน (bioaugmentation) นั้นต้องคำนึงถึงปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ต่างถิ่น การสูญเสียความสามารถในการย่อยสลายสารพิษ โดยมีสาเหตุมาจากการคัดเลือกทางนิเวศน์วิทยา (ecological selectivity) ปัจจัยทางชีวภาพ และปัจจัยทางกายภาพในดินที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ (Van Veen และคณะ, 1995) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยทางชีวภาพ และกายภาพที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในดิน  
(Van Veen และคณะ, 1997)

ปัจจัย	ผลกระทบ
<p>ทางชีวภาพ</p> <p>สภาวะพรีเดชัน (predation)</p> <p>การแก่งแย่ง</p> <p>การเจริญของรากพืช</p>	<p>การลดลงของประชากรแบคทีเรียเนื่องจากถูกจับกินโดยสัตว์ในธรรมชาติ ได้แก่ โปรโตซัว</p> <p>การลดลงของประชากรแบคทีเรียเนื่องจากการแย่งอาหารระหว่างแบคทีเรียที่เดิมลงไปกับแบคทีเรียประจำถิ่นในดิน ซึ่งอาจมีการสร้างสารพิษออกมาทำลายกันและกัน</p> <p>การปลดปล่อยสารอินทรีย์บางชนิดจากรากพืช ซึ่งแบคทีเรียนำไปใช้ในการเจริญได้ ทำให้มีการเพิ่มจำนวนประชากรแบคทีเรีย</p>
<p>ทางกายภาพ</p> <p>แร่ธาตุในดินเหนียว (clay minerals)</p> <p>ความตึงผิวของน้ำ (water tension)</p> <p>สารอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon)</p>	<p>ป้องกันแบคทีเรียจากการถูกจับกินโดยโปรโตซัว</p> <p>ความตึงผิวของน้ำสูงทำให้สภาวะการขาดแคลนน้ำ และมีความดันออสโมติกสูง</p> <p>ความตึงผิวน้ำต่ำ ทำให้ในดินขาดอากาศ (anaerobism) แต่ช่วยทำให้การแพร่กระจายสารอาหารในดินดีขึ้น</p> <p>ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถใช้คัดเลือกชนิดของแบคทีเรียที่ต้องการได้ โดยที่การขาดสารอินทรีย์คาร์บอนชนิดที่ต้องการจะทำให้การเจริญของแบคทีเรียหยุดชะงัก และมีกิจกรรมลดลง</p>

## ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ปัจจัย	ผลกระทบ
ทางกายภาพ (ต่อ) สารอาหารอนินทรีย์	การขาดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จะทำให้การเจริญของแบคทีเรียหยุดลง
ความเป็นกรดด่าง (pH)	ระดับความเป็นกรดด่างสามารถคัดเลือกกลุ่มของแบคทีเรียได้รวมทั้งอาจมีผลต่อการปลดปล่อยสารอาหารบางชนิดในดิน เช่น ฟอสฟอรัส หรือปลดปล่อยสารพิษในดิน เช่น อลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ )
อุณหภูมิ	มีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม และกิจกรรมของแบคทีเรีย
สารเคมีที่เป็นพิษ	สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ไวต่อสารชนิดนั้น ซึ่งจะคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความต้านทาน และสามารถย่อยสลายสารเคมีชนิดนั้นได้

สมบัติของดินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการบำบัดสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดิน โดยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งคุณสมบัติของดิน ได้แก่ อินทรีย์วัตถุ โครงสร้างของดิน และอนุภาคดิน ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสาร PAHs ในสิ่งแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Wilson และ Jones, 1993)



การติดตามสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดิน

สาร PAHs ที่ปนเปื้อนในดินเป็นระยะเวลาานานจะถูกจับอยู่ในอนุภาคดินในรูปแบบต่างๆ Weissenfels, Klewer และ Langhoff (1992) พบว่าเมื่อสาร PAHs จับอยู่ในอนุภาคดิน จุลินทรีย์จะไม่สามารถนำ PAHs มาใช้ได้ทำให้สาร PAHs ไม่ถูกย่อยสลาย

Verstraete และ Devliegher (1996) ได้สรุปรูปแบบสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดินที่มีความแตกต่างทางฟิสิกส์-เคมี ดังรูปที่ 2.6

แบบฟิสิกส์		แบบเคมี	
1  อนุภาคของแข็งปะปนในดิน	4  ถูกขมับอยู่ภายในอนุภาคดิน	7  เกิดพันธะเคมีกับดิน	
2  ฟิล์มของเหลวเคลือบอยู่ที่อนุภาคดิน	5  อยู่ในชั้นน้ำตามช่องว่างของอนุภาคดิน		
3  ถูกติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดิน	6  รูปของแข็งหรือของเหลวในช่องว่างของดินที่มีขนาดเล็ก		
สกัดออกได้ง่าย	สกัดได้ยาก สามารถสกัดออกได้ (ปนเปื้อนเป็นเวลานาน)	ไม่สามารถสกัดได้	
การเข้าจับของสารปนเปื้อน			
สูง			ต่ำ
การนำไปใช้ประโยชน์ (bioavailability)			

รูปที่ 2.6

รูปแบบสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน แสดงความแตกต่างทางฟิสิกส์-เคมีของสารเมื่ออยู่ร่วมกับอนุภาคดิน (อนุภาคดิน, สารอินทรีย์ปนเปื้อน) (Verstraete และ Devliegher, 1996)

จากรูปที่ 2.7 การปนเปื้อนสาร PAHs หรือสารอินทรีย์อันตรายในดินจะมีรูปแบบการอยู่ร่วมกันกับอนุภาคดิน หรือฮิวมัสที่แตกต่างกัน โดยการปนเปื้อนที่อยู่ในอนุภาคดินแบบฟิสิกส์ได้แก่อยู่ในรูปแบบของแข็งปะปนในอนุภาคดิน ในรูปแบบฟิล์มของเหลวล้อมรอบอนุภาคดิน หรือในรูปแบบที่คูดคูดอยู่กับอนุภาคดิน รูปแบบทั้ง 3 แบบนี้สามารถสกัดสารปนเปื้อนออกได้ง่าย แต่เมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง และเมื่อมีการปนเปื้อนอยู่ในดินเป็นระยะเวลานาน สารปนเปื้อนจะถูกดูดซึมอยู่ภายในอนุภาคดิน อยู่ในชั้นน้ำตามช่องว่างของดิน อยู่ในรูปของแข็ง หรือของเหลวภายในช่องว่างของดินที่มีขนาดเล็ก การจับกันกับอนุภาคดินแบบนี้จะสกัดสาร PAHs หรือสารอินทรีย์ปนเปื้อนอื่นๆ ออกมาได้ยากเมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่อาจสกัดได้โดยใช้วิธีการกลั่น (refluxing) ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เป็นเวลา 8 -24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้ไคคลอโรมีเทนที่อุณหภูมิ 40 °ซ. หรือ ไดเอทิลอีเทอร์ ที่อุณหภูมิ 34 °ซ. โดยการใช้ soxhlet apparatus แต่ Alexander (1995) รายงานว่าถึงแม้ว่าสารปนเปื้อนจะอยู่ในอนุภาคดินที่สกัดได้ยาก แต่ถ้าใช้ตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดสกัดด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพก็จะสามารถสกัดสารปนเปื้อนออกมาได้

ส่วนรูปแบบการปนเปื้อนสาร PAHs หรือสารอินทรีย์ชนิดอื่นในดินที่ไม่สามารถสกัดออกมาได้เลยนั้นจะเป็นการจับกันด้วยพันธะเคมี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติเคมีของ โมเลกุลทำให้สารอยู่ในรูป bound residues หรืออาจเกิดจากสารประกอบตัวแรกที่ปนเปื้อน หรือจากผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลาย โดยจะเข้าร่วมกับกากที่เหลือจากกระบวนการภายในดิน โดยทางกายภาพและทางเคมี ซึ่ง bound residues ที่เกิดขึ้นนี้ จุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่ารูปแบบอื่น แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการปนเปื้อนของสาร PAHs หรือสารอินทรีย์ในดินนี้นอกจากมีผลต่อการสกัดแล้วยังมีผลต่อการนำสารปนเปื้อนไปใช้โดยจุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิต (bioavailability) ที่อยู่ในดิน

การจับกันระหว่างสาร PAHs กับฮิวมัสในดิน แบบ bound residues นอกจากจะทำให้สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้น้อยลงแล้ว ยังทำให้สารปนเปื้อนนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งพบว่าเป็นผลดีเนื่องจากทำให้สารปนเปื้อนที่เป็นพิษไม่ถูกชะล้าง ช่วยป้องกันการปนเปื้อนสารอินทรีย์อันตรายลงสู่แหล่งน้ำ (Verstraete และ Devliegher, 1996) แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดทางชีวภาพนั้นมีความต้องการให้เกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ไม่ก่อให้เกิดพิษในสิ่งแวดล้อม

Kastner และคณะ (1995) รายงานว่าการเติมปุ๋ยหมักลงในดินที่ปนเปื้อนจะทำให้สารแอนทราซีน และ เฮกซะเคแคน ลดลง เนื่องจากการย่อยสลาย หรืออาจสร้างสารประกอบที่ไม่สามารถสกัดได้จากกระบวนการเกิดฮิวมัสในดิน

Eschenbach และคณะ (1998) อ้างถึงใน Stegmann และคณะ (2001) ปริมาณ การเกิด bound residues ในดินที่ทำให้ปนเปื้อนไพรีน เท่ากับ 56% ส่วนดินที่เติมปุ๋ยหมัก มีปริมาณการเกิด น้อยกว่า คือ 21 %

Kastner และคณะ (1999) ได้ศึกษาการย่อยสลายสาร [ $9-^{14}\text{C}$ ] แอนทราซีน โดยจุลินทรีย์ใน ดินระยะเวลา 176 วัน พบว่าได้คาร์บอนไดออกไซด์ 43.8 % และ bound residue 45.4 % ส่วนดิน ผสมปุ๋ยหมักได้คาร์บอนไดออกไซด์ 67.2 % และ bound residue 20.7 % แสดงให้เห็นว่าการเติม ปุ๋ยหมักลงในดินจะทำให้การย่อยสลายเกิดได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเกิด bound residues น้อยกว่า ในดินที่ไม่เติมปุ๋ยหมัก

การลดลงของสาร PAHs ในดินไม่ได้เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์เท่า นั้น แต่เกิดจากการจับของสาร PAHs อยู่ในอนุภาคดิน เป็นผลให้ไม่สามารถตรวจพบได้โดยการ สกัดด้วยตัวทำละลาย จึงเป็นข้อจำกัดในการศึกษาการย่อยสลายสาร PAHs ในดิน โดยการศึกษา การย่อยสลายอาจทำได้เมื่อติดฉลากสาร PAHs ด้วย  $^{14}\text{C}$  เพื่อติดตามคาร์บอนไดออกไซด์ และ bound residues ที่เกิดจากการย่อยสลายสาร PAHs (Eschenbach และคณะ, 2001)

Kastner และคณะ (1999) ได้สรุปสาเหตุการเกิด bound residues ไว้ดังนี้

1. สารเมตาบอไลต์ที่ได้จากการย่อยสลาย จะถูกออกซิไดซ์เข้ารวมกับสารประกอบพีโนลิก เกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่คล้ายกับสารฮิวมิคในดิน
2. การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสาร PAHs อย่างสมบูรณ์ลงในดิน เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน
3. สาร PAHs ที่ปนเปื้อนตั้งแต่เริ่มต้น จะถูกดูดซับอยู่ในอนุภาคดิน ไม่สามารถสกัดออกมา ได้ทั้งหมด

โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้ bound residues มีปริมาณเพิ่มขึ้นในดินขึ้นอยู่กับ ความสามารถ ของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการย่อยสลายสาร PAHs รวมถึงลักษณะองค์ประกอบของดิน Hatzinger และ Alexander (1995) ได้หาปริมาณสารพีแนทรีน และ 4-ไนโตรฟินอล (4-nitrophenol) ที่ สกัดด้วยบิวทานอล ต่ำกว่า 1 ซม. จากดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุแตกต่างกัน คือ 4 % และ 19% หลังจากที่ทำให้ปนเปื้อนระยะเวลาหนึ่งภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ พบว่า ที่ระยะการปนเปื้อน 84 วัน ในดินที่มีอินทรีย์วัตถุ 4 % และ 19% สกัดพีแนทรีน ได้ 87 % และ 61% ตามลำดับ ส่วนไนโตรฟินอล ที่ระยะเวลา 103 วัน สกัดได้ 56% และ 45 % แสดงให้เห็นว่าเมื่อในดินมีอินทรีย์ วัตถุมากจะสกัดสารทั้ง 2 ชนิดนี้ได้ น้อย เนื่องจากมีการดูดซับที่ผิวของอินทรีย์วัตถุ หรือเข้าไปใน ช่องว่างขนาดเล็ก และถูกดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคดิน

การดูดซับอยู่กับอนุภาคดิน (adsorption) โดยไม่มีการสร้างพันธะ โควาเลนต์ โดยที่ความ แรงของการดูดซับนี้ขึ้นกับสมบัติความมีขั้ว และ ไม่มีขั้ว (hydrophilic/hydrophobic properties) ของ สารเคมี และองค์ประกอบของดิน ได้แก่ แร่ธาตุในดิน อนุภาคดินเหนียว และปริมาณอินทรีย์วัตถุ

แร่ธาตุ และคินเหินยวจะดูดติดกับสารประกอบที่มีขั้ว ขณะที่อินทรีย์วัตถุจะดูดติดกับสารที่มีขั้วและไม่มีขั้วได้ เนื่องจากอินทรีย์วัตถุประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว หรือมีสมบัติเป็นสารที่ชอบไขมัน (lipophilic chemical) ทำให้การดูดติดในดินที่มีอินทรีย์วัตถุนั้นมีพื้นที่ผิว และค่าการแลกเปลี่ยนประจุสูงกว่าดินชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามส่วนที่ไม่สามารถสกัดได้ จากการดูดติดที่ผิวของอินทรีย์วัตถุในดินนี้ จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายได้ หากเซลล์ของจุลินทรีย์สัมผัสกับสาร PAHs ได้ถ้ามีแบคทีเรียอยู่ในสถานที่และเวลาเดียวกัน กับสาร PAHs ที่ถูกจับไว้ (Verstrate และ Devliegher, 1996)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้หลักการจับกันของอนุภาคดิน และสารอินทรีย์ดังกล่าวมาใช้เป็นปัจจัยในการที่จะศึกษาการใช้สารอินทรีย์ที่เหมาะสมเพื่อให้ประโยชน์ในการนำไปใช้บำบัดการปนเปื้อนของสารประกอบ PAHs ในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย