บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ดินที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นไม่มีประวัติการปนเปื้อน PAHs มาก่อน เมื่อทดสอบด้วย HPLC แล้วไม่พบสาร PAHs และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะเนื้อดินจัดเป็นดินทราย (sandy soil) และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P) เท่ากับ 123 :10 : 2 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการบำบัดสาร PAHs ในดิน ใกล้เคียงกับรายงานของ Hupe และคณะ (2001) ที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 100 : 8 : 2 โดยนำดินนี้มาทำให้ปนเปื้อนสารไพรีนและฟีแนนทรีน ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้เศษใบไม้ที่ร่วงหล่นจากต้นไม้กลุ่มพืชตระกูลถั่ว ได้แก่ ต้นจามจุรี ต้นมะขาม และต้นนนทรี ซึ่งเป็นไม้ยืนต้น มักปลูกเป็นไม้ประดับให้ร่มเงาริมถนนและใบมีปริมาณมากมักใช้ในการหมักทำปุ๋ย (วชิรพงศ์ หวลบุตตา, 2542) ซึ่งใบไม้เป็นวัสดุตามธรรมชาติที่พบได้มาก

เมื่อนำใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรี ผสมกับดินในอัตราส่วน 1 : 9 แล้วนำมาคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P) พบว่าในดินผสมใบจามจุรีเท่ากับ 520 : 6 : 1, ในดินผสมใบมะขามเท่ากับ 647 : 6 : 1, ในดินผสมใบนนทรีเท่ากับ 399 : 5 : 1 ซึ่งการเติมใบไม้ทั้ง 3 ชนิดนี้จะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์คาร์บอน สารไนโตรเจน รวมทั้งจุลินทรีย์ท้องถิ่นจากใบไม้ลงในดิน แม้ว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสจะแตกต่างจากรายงานของ Hupe และคณะ (2001) แต่จุลินทรีย์บนใบไม้ที่เติมลงไปยังสามารถย่อยสลายไพรีนและฟีแนนทรีนได้ หากการทดลองต่อไปมีการเติมแหล่งฟอสฟอรัสลงไปเพื่อให้มีสัดส่วนฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับรายงานของ Hupe และคณะ (2001) แล้ว อาจช่วยให้การย่อยสลายเกิดได้มากขึ้น

ดินที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นแหล่งดินเดียวกับที่ นารีรัตน์ เจริญช่าง (2544) ใช้ในการทดลอง จากการทดลองพบว่าสิ่งมีชีวิตในดิน หรือจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดินที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถย่อยสลายสารไพรีนและฟีแนนทรีนได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารไพรีนและฟีแนนทรีนที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกับดินที่ทำให้ปราศจากเชื้อ สอดคล้องกับรายงานของ นารีรัตน์ เจริญช่าง (2544) ซึ่งได้ทดลองเติมสารอาหารและสารอินทรีย์จากวัสดุการเกษตรที่ปราศจากเชื้อลงในดินก็ไม่สามารถทำให้เกิดการย่อยสลายสาร PAHs ได้ ทั้งนี้แสดงว่าตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งเก็บมาจากในป่า ไม่เคยมีการปนเปื้อนสาร PAHs มาก่อน เป็นผลให้จุลินทรีย์ท้องถิ่นในดินไม่มีความคุ้นเคยกับสาร PAHs และปรับตัวเพื่อย่อยสลายสาร PAHs ได้ช้า หรือไม่มีจุลินทรีย์ที่สามารถปรับตัวให้มีกิจกรรมการย่อยสลายสาร PAHs ได้ แต่จำนวนแบคทีเรียทั้งหมดและราจะเพิ่มสูงกว่าในดินที่ไม่เติมสารอาหารจากวัสดุการเกษตร ซึ่งสารอาหารจากวัสดุการเกษตรนี้จะกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์ในดินได้

จากผลการทดลองนำใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรี ที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อ หรือมีปัจจัยทางชีวภาพคือมีจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติเติมลงในดิน พบว่าช่วยทำให้สารไพรีนและฟีแนนทรีนลดลงอย่างรวดเร็วจากการเปรียบเทียบผลกับชุดการทดลองที่ฆ่าเชื้อ และดินตามธรรมชาติ โดยที่ใบมะขามช่วยให้ปริมาณสารไพรีนและฟีแนนทรีนลดเร็วที่สุด ซึ่งการลดลงอาจมีสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น แหล่งสารอาหารจากใบไม้ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้สามารถย่อยสลายสาร PAHs ได้ หรือใบไม้อาจเป็นแหล่งจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลาย PAHs ในดินได้ หรือการดูดซับสาร PAHs เข้าสู่ใบไม้ทำให้ไม่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ธรรมดาที่ใช้ในการทดลอง จึงตรวจไม่พบสาร PAHs ด้วยวิธี HPLC (นารีรัตน์ เจริญช่าง, 2544)

การลดลงของสาร PAHs เมื่อผสมใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรีลงในดินในสภาวะปลอดเชื้อนั้นเกิดจากการดูดซับสาร PAHs เข้าไปอยู่ในอนุภาคดินและสารอินทรีย์จากใบไม้ทั้ง 3 ชนิดและการระเหย แต่เนื่องจากปริมาณสาร PAHs ที่สกัดได้จากดินผสมใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรีได้ปริมาณสูงกว่าดินที่ไม่ได้เติมใบไม้ จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรีช่วยลดการจับกันระหว่างสาร PAHs กับอนุภาคดินทำให้สกัดได้ง่าย

เหตุผลอีกข้อหนึ่งที่ใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรีช่วยลดการจับกันระหว่างสาร PAHs และอนุภาคดิน คือการที่มีการแย่งที่บริเวณที่ตำแหน่งจับบนอนุภาคดิน โดย Kastner และ Mahro (1996) แสดงปริมาณสาร PAHs ที่สกัดได้จากดินผสมปุ๋ยหมักในชุดควบคุมจะมีปริมาณสูงกว่าที่สกัดได้จากดินอย่างเดียว เนื่องจากปุ๋ยหมักช่วยลดการจับกันระหว่างสาร PAHs กับอนุภาคดิน โดยเข้าจับแทนที่บริเวณตำแหน่งที่เข้าจับบนอนุภาคดิน

ปริมาณสาร PAHs ที่สกัดได้ (extractability) จากดินปลอดเชื้อผสมใบมะขามปลอดเชื้อและใบนนทรีปลอดเชื้อจะสูงกว่าปริมาณ PAHs ที่สกัดได้จากดินปลอดเชื้อผสมใบจามจุรีปลอดเชื้อ แสดงว่าการจับสาร PAHs ของใบจามจุรีอยู่ในรูปแบบที่สกัดออกมาได้ยากกว่าใบมะขามและใบนนทรี ทั้งนี้อาจเนื่องจากใบจามจุรีมีลักษณะใบหนาเป็นมัน และแข็งกว่าใบมะขามและใบนนทรี ซึ่งมีความบางน้อยกว่า ใบจามจุรีจึงอาจมีชั้นแวกซ์ที่ผิวด้านนอกมากกว่าใบมะขามและใบนนทรี อาจจะทำให้สะสม PAHs ได้มากกว่าและสกัดออกมายากกว่า ในขณะที่สาร PAHs ส่วนใหญ่ น่าจะอยู่ที่ผิวของใบมะขามและใบนนทรี ทำให้สกัดได้ง่ายกว่า นอกจากนี้องค์ประกอบของแวกซ์ที่ผิวใบและสภาพสิ่งแวดล้อมยังส่งผลต่อการสะสม PAHs ที่ใบอีกด้วย (Jouraeva และคณะ, 2002) ปริมาณสาร PAHs ที่สกัดออกได้นี้ จะเป็นปริมาณที่จุลินทรีย์ในดินสามารถนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมได้ ใบมะขามและใบนนทรีเมื่อผสมลงในดินจะทำให้ดินมีค่า bioavailability สูงกว่าใบจามจุรีที่ผสมในดิน

แต่อย่างไรก็ตาม การเติมใบไม้ลงไปในดินก็มีข้อดีเช่นเดียวกับการเติมปุ๋ยหมักที่เตรียมได้มาจากเศษของพืชผักต่าง ๆ คือช่วยเพิ่มการส่งผ่านออกซิเจน เป็นแหล่งจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลาย สามารถควบคุมความเป็นกรดด่างในดิน และช่วยอุ้มน้ำได้ดี ดังรายงานของ OCCTC (2003)

ผลการทดลองตรวจนับแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนและฟีแนนทรีนบนใบไม้แต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลองและพบว่าใบมะขามและใบนนทรีมีแบคทีเรียที่ย่อยสลาย PAHs เนื่องจากสามารถตรวจพบได้ในวันเริ่มต้นของการทดลอง อาจสรุปได้ว่าการเติมใบไม้ลงในดิน คือการเติมแบคทีเรียท้องถิ่นที่มีความคุ้นเคยกับสาร PAHs และสามารถปรับตัวย่อยสลายไพรีนและฟีแนนทรีนได้ โดยปกติในธรรมชาติ จุลินทรีย์จะไม่สามารถย่อยสลายสาร PAHs ที่ปนเปื้อนในระยะแรกได้ แต่จะใช้เวลาในการปรับตัวระยะหนึ่งเพื่อให้สามารถย่อยสลายสาร PAHs ได้ (Trejo และ Quintero, 2000)

จำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนที่ตรวจพบในช่วงท้ายของการทดลองเมื่อเทียบกับปริมาณ PAHs ที่ลดลง มีข้อสังเกตคือ ตรวจพบแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนสูงในวันที่ 14 และ 28 ตามลำดับ และมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดลอง ในขณะเดียวกันสารฟีแนนทรีนลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกย่อยสลายและลดต่ำมากจนเกือบตรวจไม่พบในวันหลัง ๆ และสารไพรีนซึ่งมีวงเบนซีนสูงกว่าฟีแนนทรีนถูกย่อยสลายได้ช้ากว่าฟีแนนทรีนแต่ปริมาณไพรีนก็มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับฟีแนนทรีน ซึ่งปริมาณฟีแนนทรีนและไพรีนที่ลดลงอาจเกิดการเปลี่ยนไปเป็นสารมัธยันต์ ในทางทฤษฎีจำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนที่ตรวจพบควรลดลงแปรผันตามปริมาณฟีแนนทรีนและไพรีนที่เหลือ แต่ที่ตรวจพบปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนมีแนวโน้มสูงคงที่ตลอดการทดลอง อาจเป็นเพราะแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนที่เหลืออยู่ในหลอดทดลองอาจย่อยสลายสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานต่อไป และปริมาณฟีแนนทรีนและไพรีนที่เหลือเพียงเล็กน้อยจากการย่อยสลายในหลอดทดลองอาจสามารถกระตุ้นการย่อยสลายสาร PAHs ของแบคทีเรียบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อได้ ทำให้ตรวจพบแบคทีเรียย่อยสลายสลายฟีแนนทรีนและแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนสูงในช่วงท้ายของการทดลอง นอกจากนี้แล้วจุลินทรีย์ที่อยู่ในหลอดทดลองยังสามารถใช้สารอินทรีย์ที่ได้จากดินและใบไม้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานนอกเหนือจาก PAHs ได้อีก โดยที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในดินผสมใบไม้ทั้งสามชนิดนั้น มีสัดส่วนของไนโตรเจนสูงกว่าที่มีในรายงานของ Hupe และคณะ (2001) แต่ไพรีนและฟีแนนทรีนที่เติมลงไปจะไปเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนมากขึ้น

จุลินทรีย์ในใบมะขามมีความพร้อมที่จะย่อยสลายสาร PAHs ได้มากกว่าจุลินทรีย์จากใบนนทรีและใบจามจุรีตามลำดับ โดยที่ตรวจพบจุลินทรีย์ย่อยสลายไพรีนและฟีแนนทรีนจากใบมะขามในวันเริ่มต้นของการทดลอง และจุลินทรีย์ในใบจามจุรีจะใช้เวลาในการปรับตัวเพื่อย่อยสลายสาร PAHs มากที่สุด โดยจะพบแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนในวันที่ 14 ของการทดลอง แม้ว่าในภายหลังจำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและแบคทีเรียย่อยสลายไพรีนในใบมะขาม ใบนนทรีและใบจามจุรีจะเพิ่มขึ้นสูงใกล้เคียงกันตลอดการทดลองก็ตาม ซึ่งปริมาณแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นสูงนี้สอดคล้องกับรายงานของ Maier(2000) ที่กล่าวว่าเมื่อเหนี่ยวนำการย่อยสลายด้วยสารปนเปื้อนเป็นเวลานาน จนจุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้คุ้นเคยได้แล้ว จะเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารเหล่านั้นและมีการเจริญและเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น ในขณะที่จำนวนแบคทีเรียในใบไม้ทั้ง 3 ชนิดใกล้เคียงกัน แต่จุลินทรีย์ในใบมะขามจะมีกิจกรรมการย่อยสลายดีกว่า สามารถย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนหมดภายใน 56 วัน ในขณะที่ยังมีฟีแนนทรีนและไพรีนเหลือในดินผสมใบนนทรีและใบจามจุรี การที่ยังตรวจพบฟีแนนทรีนและไพรีนในช่วงวันหลังๆ ของการทดลอง ทั้งที่ปริมาณแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนสูงคงที่ตลอดการทดลอง อาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ลดกิจกรรมการย่อยสลายลงในในช่วงวันหลัง ๆ ของการทดลอง มีสาเหตุหลายประการ ได้แก่ จุลินทรีย์มีสารอาหารเพียงพอต่อการเจริญแล้ว เพราะในช่วงวันแรก ๆ ของการทดลอง จุลินทรีย์ต้องการแหล่งคาร์บอน อัตราการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนในช่วงแรกจึงสูงมาก และย่อยสลายได้เป็นสารมัธยันต์ ซึ่งมีเพียงพอต่อการเจริญต่อไป จึงอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องเร่งย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีน ทำให้ตรวจพบปริมาณฟีแนนทรีนและไพรีนในช่วงวันหลัง ๆ ของการทดลอง นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายที่ลดลงอาจเกิดจาก PAHs บางส่วนถูกดูดซับอยู่ในอนุภาคดิน ทำให้จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายยาก และอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของจุลินทรีย์หรือ PAHs ที่อยู่ในดิน

การที่ตรวจพบแบคทีเรียย่อยสลายสารไพรีนและฟีแนนทรีนได้จากการเติมใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรีลงในดินที่ปนเปื้อนสาร PAHs อาจเนื่องมาจากใบไม้ทั้ง 3 ชนิดอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนสาร PAHs จึงทำให้มีจุลินทรีย์ที่คุ้นเคยและสามารถปรับตัวในการย่อยสลาย PAHs ได้ สำหรับใบจามจุรีนั้นเก็บมาจากบริเวณเดียวกับที่ นารีรัตน์ เจริญช่าง (2544) ใช้ทำการทดลอง โดยมาจากบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นตลอดทั้งปีมาเป็นระยะเวลานาน ใบจามจุรีที่หล่นเป็นใบแก่และหลังจากนั้นจะถูกเก็บกวาดจากบริเวณที่หล่นไปทิ้ง ส่วนใบนนทรีเก็บมาจากบริเวณเดียวกับใบจามจุรี แต่จะมีความผุพังมากกว่าใบจามจุรีเนื่องจากไม่ได้มีการเก็บกวาดทุกวันเหมือนใบจามจุรี ส่วนใบมะขามเก็บจากบริเวณการจราจรหนาแน่นน้อยกว่า แต่ใบมะขามจะมีความเก่า ผุพังมากกว่าใบจามจุรีและใบนนทรีเพราะหล่นสะสมบนดินรอบโคนต้นมาเป็นเวลานานเชื้อจุลินทรีย์จากบริเวณแวดล้อมที่เป็นดินจะส่งผลให้ใบมะขามที่สะสมในบริเวณนั้น

มีปริมาณและชนิดของแบคทีเรียมากกว่าใบจามจุรีและใบนนทรี ซึ่งการที่ใบมะขามหล่นลงบริเวณดิน เป็นโอกาสให้ได้รับจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายสูง โอกาสที่กลุ่มจุลินทรีย์จะมีแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนปะปนอยู่จะมีมากกว่าใบจามจุรีและใบนนทรี จุลินทรีย์บนผิวใบมะขามจึงมีแหล่งที่มาจากทั้งอากาศและดินในบริเวณนั้น

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมปัจจัยทางชีวภาพลงไปในดินที่ปนเปื้อนฟีแนนทรีนและไพรีน ได้แก่ ใบจามจุรี ใบมะขามและใบนนทรี จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนได้ โดยฟีแนนทรีนและไพรีนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้น และพบว่าบริเวณที่มีอากาศปนเปื้อนด้วยสาร PAHs มากไม่ได้เป็นปัจจัยในการกระตุ้นการย่อยสลายสาร PAHs เพียงอย่างเดียว และเป็นไปได้ที่มีปัจจัยหลาย ๆ ประการร่วมกัน เช่น ระยะเวลาที่ใบไม้ร่วงหล่นสะสมที่พื้นดิน ปิยะวรรณ เพชราภา (2545) รายงานว่าการเติมใบจามจุรีและใบประดู่ที่เก็บจากบริเวณที่มีการปนเปื้อนเข่มาและควันรถยนต์ในอากาศน้อย แต่ปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานแล้ว จะกระตุ้นการย่อยสลายไพรีนโดยแบคทีเรียจากใบจามจุรีและใบประดู่ได้ดีกว่าใบจามจุรีและใบประดู่จากแหล่งที่มีการปนเปื้อนในอากาศสูงแต่ปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลาสั้น และปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่บริเวณที่ใบไม้ร่วงหล่นลงไปสะสม เช่น ถ้าเป็นดินจะมีปริมาณจุลินทรีย์ธรรมชาติมากกว่าบริเวณที่เป็นถนน เป็นผลให้มีความหลากหลายของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในดิน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของใบไม้ที่จะเอื้อต่อการเก็บกักจุลินทรีย์จากสิ่งแวดล้อม รวมถึงองค์ประกอบของใบไม้ด้วย โดยที่ใบพืชมีลิกนินเป็นส่วนประกอบนอกเหนือจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและไซแลน ซึ่งลิกนินมีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกคล้ายคลึงกับ PAHs ดังนั้นจุลินทรีย์ที่เจริญบนใบพืช จึงอาจย่อยสลายลิกนินได้ เกิดการชักนำให้จุลินทรีย์ย่อยสลาย PAHs ได้ด้วย Juhasz และ Naidu (2000) ได้คัดแยกกลุ่มจุลินทรีย์จากใบและเปลือกของต้นยูคาลิปตัสและต้นสนที่มีการย่อยสลายบางส่วน (semi-decomposed) พบว่าสามารถย่อยสลายฟีแนนทรีน สารประกอบคลอรีน และ nitroaromatic เช่น ดีดีที และสารมัธยันต์ได้ เขาคิดว่าสารประกอบธรรมชาติในพืชอาจกระตุ้นยีนของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารประกอบเหล่านี้ Gilbert และ Crowley (1997) ได้พิสูจน์ว่าส่วนประกอบของพืช เช่น *l* – carvone, limonene, *p* – cymene และ isoprene ซึ่งมีโครงสร้างไม่อิ่มตัว *para*- menthane สามารถกระตุ้นให้ *Arthrobacter* sp. สายพันธุ์ B1B ย่อยสลายสาร polychlorinated biphenyl (PCBs) แบบโคเมแทบอลิซึมได้ ดังนั้นการเติมใบไม้ที่มีการย่อยสลายบางส่วน จึงเป็นการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีการชักนำให้ย่อยสลาย PAHs ลงในดินที่ปนเปื้อนได้ด้วย

แต่ในบางชุดการทดลองจะตรวจพบปริมาณ PAHs เพิ่มสูงขึ้น อาจเป็นเพราะความไม่สม่ำเสมอของเชื้อหรือ PAHs ที่อยู่ในดิน และอาจเป็นเพราะ PAHs ติดข้างหลอด ทำให้จุลินทรีย์บนใบไม้ที่เติมลงไปเข้าย่อยสลายได้ยาก

สารไพรีน เป็นสารที่มีวงแหวนเบนซีน 4 วง ละลายน้ำได้น้อยและมีความคงทนสูง แต่ก็มีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ แบคทีเรียส่วนใหญ่และเชื้อราที่ย่อยสลายได้มักมีการย่อยสลายแบบโคเมแทบอลิซึม (Wilson และ Jones, 1993) แต่อย่างไรก็ตาม การอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์ (microbial consortium) ทำให้เกิดการเข้าย่อยสลายสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่มีปริมาณมากได้ดี ซึ่งจุลินทรีย์เพียงชนิดเดียวอาจย่อยสลาย PAHs ได้ไม่สมบูรณ์ การย่อยสลายอย่างสมบูรณ์นั้นมีผลมาจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่อยู่ร่วมกัน โดยการดำรงชีพแบบพึ่งพาและการย่อยสลายแบบโคเมแทบอลิซึม (Trejo และ Quintero, 2000)

การย่อยสลายสาร PAHs ในดินที่เติมใบไม้อาจเปรียบเทียบได้กับการย่อยสลายสาร PAHs ในดินที่เติมปุ๋ยหมัก ดังรายงานของ Kastner และ Mahro (1996) ว่าการใช้ปุ๋ยหมักเร่งการย่อยสลายสาร PAHs (ฟีแนนทรีน แอนทราซีน ฟลูออแรนทรีน และไพรีน) เกิดขึ้นโดยการย่อยสลายแบบโคเมตาบอลิซึมหรือการย่อยสลายแบบออกซิเดชันที่ไม่มีความจำเพาะต่อสับสเตรท (unspecified oxidative metabolism) ของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในปุ๋ยหมัก

นารีรัตน์ เจริญช่าง (2544) รายงานว่าราอาจไม่มีบทบาทชัดเจนในการย่อยสลาย PAHs เนื่องจากตรวจพบราเพิ่มจำนวนขึ้นในชุดดินที่ไม่ฆ่าเชื้อแต่ปริมาณสาร PAHs ก็ไม่ลดลง ในขณะที่แบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนเพิ่มจำนวนขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณฟีแนนทรีนที่ลดลง นอกจากนี้ Kastner และคณะ (1995) รายงานการย่อยสลายสารแอนทราซีนของจุลินทรีย์ทั้งราและแบคทีเรียในดินผสมปุ๋ยหมัก พบว่าเมื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียจะไม่มีการย่อยสลายสารแอนทราซีน และเมื่อยับยั้งการเจริญของรา การย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงว่าแบคทีเรียมีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายแอนทราซีนที่ปนเปื้อนในดินผสมปุ๋ยหมัก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงตรวจนับแต่จำนวนแบคทีเรียย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีน แต่อย่างไรก็ตามการย่อยสลายแบบโคเมแทบอลิซึมของรากลุ่มไวท์รอท (White rot fungi) นั้นยังมีความสำคัญ เนื่องจากมีการปล่อยเอนไซม์ที่ไม่จำเพาะต่อสับสเตรท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร PAHs ที่มีวงแหวนเบนซีน 5-6 วงได้ (Dhawale และคณะ, 1992)

จุลินทรีย์ในใบมะขามใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเพื่อย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนในการทดลองน้อยและมีความสามารถย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนได้รวดเร็วกว่าจุลินทรีย์ในใบจามจุรีและใบนนทรี ดังนั้นจึงคัดเลือกใบมะขามมาทดลองหาความเข้มข้นของฟีแนนทรีนและไพรีนสูงสุดที่สามารถย่อยสลายได้ดี ซึ่งการทดลองของนารีรัตน์ เจริญช่าง (2544) พบว่าจุลินทรีย์ในใบจามจุรีมีกิจกรรมการย่อยสลายฟีแนนทรีน ฟลูออแรนธีน และไพรีนที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อกรัมดินได้ดี ตรวจไม่พบฟีแนนทรีน และไพรีน ในวันที่ 28 และ 42 ตามลำดับ การทดลองนี้จึงได้เพิ่มความเข้มข้นของเริ่มต้นของฟีแนนทรีน และไพรีนจาก 0.1 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเป็น 1.0 มิลลิกรัมต่อกรัมดิน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในใบจามจุรี

ใบมะขามและใบนนทรี โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร PAHs ความเร็วในการย่อยสลายจะลดลงตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเป็นความเข้มข้นสาร PAHs ที่จุลินทรีย์ในดินผสมใบมะขามย่อยสลายได้รวดเร็วที่สุดและตรวจไม่พบหลังจาก 56 วัน และเมื่อความเข้มข้นของสาร PAHs เพิ่มขึ้นจนถึง 4.0 มิลลิกรัมต่อกรัมดินแล้ว การย่อยสลายไพรีนเกือบไม่เกิดขึ้น ปริมาณไพรีนที่เหลือในวันสุดท้ายของการทดลองยังคงใกล้เคียงกับวันแรก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าในดินอาจมีการจำกัดการใช้สารอาหารเนื่องจากความเข้มข้นของคาร์บอนที่มีอยู่ในแหล่งดินนั้นสูงเกินไป (Bowlen และ Kosson, 1995) หรือความเข้มข้นของสาร PAHs ที่สูงเกินไปเป็นพิษต่อเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยเพิ่ม permeability ของเซลล์เมมเบรน ทำให้เซลล์แตก (Sikkenma และคณะ, 1995) แต่เหตุผลประการหนึ่งที่ใช้สาร PAHs ความเข้มข้นสูงเติมลงไปในดินเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลายสาร PAHs และการหาค่าสูงสุดของปริมาณ PAHs ที่ย่อยสลายได้ดี นำไปสู่การรู้ว่าค่า bioavailability ที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในดินควรจะเป็นอย่างไร เพราะความเข้มข้นของสารเป็นปัจจัยสำคัญที่มีต่อการเข้าย่อยสลายสารของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ PAHs ที่เติมลงไปในดินบางส่วนจะถูกดูดซับไว้กับเนื้อดินทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ได้ มีรายงานการทดลองเติมฟีแนนทรีนลงในปุ๋ยหมักที่ทำจากวัสดุเพาะเห็ด ช่วยทำให้จุลินทรีย์ท้องถิ่นในปุ๋ยหมักใช้สารอาหารได้ดีขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นการย่อยสลายจากฟีแนนทรีนความเข้มข้นสูงที่เติมลงไป (Reid และคณะ, 2002) แต่ถ้าความเข้มข้นของสาร PAHs น้อยอาจไม่กระตุ้นการย่อยสลายสารเคมีอาจมีความคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ในปริมาณต่ำ ๆ อาจเป็นปัญหาสำคัญหากสะสมและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตโดยเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Boethling และ Alexander, 1979)

ปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการจำกัดจำนวนและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ความชื้นในดิน ซึ่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินในสภาวะที่มีอากาศจะเกิดได้เมื่อสามารถใช้ความชื้นในดินได้ (Loehr, 1992) ซึ่งความชื้นในดินจะช่วยให้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์แพร่กระจายทั่วถึงในดินได้มากขึ้น ดังนั้นดินจึงต้องมีการปรับปรุงดินให้มีความชื้นที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการบำบัดด้วยวิธีการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (King และคณะ,1998) ซึ่งการเติมใบไม้ลงไปเป็นการการปรับปรุงลักษณะเนื้อดินจะส่งผลต่อความชื้นในดินได้ (Riser-Roberts, 1992) โดยเพิ่มช่องว่างในดิน ทำให้รักษาความชื้นและออกซิเจนในดินปนเปื้อนได้ดีขึ้น จากการทดลองพบว่าความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ของความจุสูงสุดของการอุ้มน้ำ เป็นความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อกรัมดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้จุลินทรีย์จากใบมะขาม แต่การย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนที่ความชื้น 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิดขึ้นได้แต่ช้ากว่าที่ความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ King และคณะ (1998) ที่รายงานว่าความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายในสภาพมีอากาศจะอยู่

ในช่วง 10-25 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักดิน หรือ 20-70 เปอร์เซ็นต์ของความจุสูงสุดของการอุ้มน้ำ แต่ในการทดลองนี้ ความชื้น 60เปอร์เซ็นต์ของความจุสูงสุดของการอุ้มน้ำ ยังทำให้การย่อยสลายไม่ดีพอ เนื่องจากปริมาณน้ำที่นำไปใช้ได้น้อยกว่าปริมาณที่เหมาะสมอาจจะจำกัดการละลายของสารอาหารที่ส่งผ่านเข้าสู่เซลล์ และที่ความชื้น 80เปอร์เซ็นต์ของความจุสูงสุดของการอุ้มน้ำอาจสูงเกินไป การย่อยสลายลดลงอาจเพราะการส่งผ่านออกซิเจนอาจถูกจำกัดได้ (Loehr, 1992)

เมื่อได้ความชื้นที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของความจุสูงสุดของการอุ้มน้ำที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟีแนนแนนทรีนและไพรีนความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อกรัมดิน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้จุลินทรีย์จากใบมะขามแล้ว จึงนำมาปรับสภาพอุณหภูมิในการบ่ม โดยเพิ่มเป็น 35 และ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสทำให้จุลินทรีย์ในใบมะขามย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนที่ความชื้น 70 เปอร์เซ็นต์ได้ดีที่สุด สอดคล้องกับรายงานของ OCCTC (2003) ที่พบว่าเมื่อเติมจุลินทรีย์ที่มีการปรับตัวให้คุ้นเคยลงในดินที่ปนเปื้อนแล้วควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นมากกว่าดินที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งอุณหภูมิที่อบอุ่นจะทำให้จุลินทรีย์มีกิจกรรมการย่อยสลายสูงสุด (Ensley และ DeFlaun, 1995) อาจเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสาร PAHs ในการทดลองนี้ได้ใช้ชุดทดลองที่มีขนาดเล็ก (ดิน 2 กรัม) ความร้อนที่เกิดจากการทับถมของดินจึงไม่เกิด ดังนั้นในการทดลองที่มีขนาดใหญ่จะมีความร้อนเกิดขึ้นจากการทับถมของดินปริมาณมาก จึงเป็นการแสดงว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัดจริง ควรควบคุมให้อยู่ในช่วง 35 องศาเซลเซียส

เมื่อได้ความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในใบมะขามในการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนแล้ว จึงทดลองปรับการให้อากาศ โดยการเปิดฝาเกลียวให้อากาศและเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าการเปิดฝาเกลียวให้อากาศ 1 หรือ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ ไม่ทำให้การย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับรายงานของ Findlay และคณะ (1995) ที่ได้ศึกษาผลของความถี่ในการให้อากาศโดยการเปิดให้อากาศ พบว่าการย่อยสลาย PAHs ในการทดลองที่ไม่ให้อากาศแล้วมีการสกัดในวันที่ 6 และการทดลองที่เปิดให้อากาศทุก 2 วัน แล้วสกัดในวันที่ 4 มีอัตราการย่อยสลาย PAHs ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการให้อากาศ 1 ครั้งต่อสัปดาห์จึงเพียงพอต่อการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนในหลอดทดลอง และปริมาตรของดินผสมใบมะขามในหลอดทดลองมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดหลอดทดลอง (1/7 ของขนาดหลอดทดลอง) ทำให้ที่ว่างที่เหลืออยู่มีปริมาตรอากาศภายในหลอดที่อาจมีเพียงพอต่อการย่อยสลายภายในช่วงเวลาหนึ่งสัปดาห์ และดินมีความพรุนเพิ่มขึ้นจากการเติมใบมะขามลงไปทำให้ช่วยรักษาปริมาณออกซิเจนได้ดี และการให้ออกซิเจนโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.01 0.03 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไม่ทำให้การย่อยสลาย

ฟีแนนทรีนและไพรีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมน้อยเกินไปจนไม่เห็นความแตกต่าง อาจสลายเป็นน้ำและออกซิเจนก่อนเติมในตัวอย่างดิน และการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมีการย่อยสลายใกล้เคียงกับการเปิดฝาเกลียวให้อากาศ แต่ปริมาณฟีแนนทรีนและไพรีนในวันสุดท้ายของการทดลองเหลือมากกว่าการทดลองเปิดฝาเกลียวให้อากาศเล็กน้อย ซึ่งการให้อากาศโดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เกิดการสลายเป็นออกซิเจนภายในดินที่ปนเปื้อนอาจไม่เห็นผลการกระตุ้นการย่อยสลายที่ชัดเจนนั้น อาจเป็นเพราะปริมาตรของดินผสมใบมะขามในหลอดทดลองมีขนาดเล็ก จุลินทรีย์ที่อยู่ในดินปนเปื้อนผสมใบมะขามสามารถใช้อากาศที่อยู่ภายในหลอดเพื่อการย่อยสลายได้เพียงพอ จึงอาจไม่ต้องการออกซิเจนเพิ่มเติมจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไปอาจทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในดินและใบมะขามอย่างรวดเร็ว เกิดการสลายตัวเป็นออกซิเจนอย่างรวดเร็ว จุลินทรีย์จึงอาจไม่จำเป็นต้องใช้ใช้ออกซิเจนที่มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้

อาจกล่าวได้ว่า การปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิในการบ่ม และการให้อากาศก่อนการย่อยสลายฟีแนนทรีนและไพรีนโดยจุลินทรีย์ในใบมะขามจะช่วยให้อัตราย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้นกว่าการไม่ปรับพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยในการทดลองนี้พบว่าความชื้นและอุณหภูมิในการบ่มเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กระตุ้นให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากเป็นการทดลองที่มีขนาดเล็ก การให้อากาศจึงยังไม่เห็นผลอย่างชัดเจนในการกระตุ้นการย่อยสลาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย