บทที่ 2

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีปัจจัยพื้นฐานในด้านต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องมากมายกับการนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่การเกษตร ในทางด้านบวกและด้านลบ โดยปัจจัยพื้นฐานที่จะบ่งบอกให้ทราบถึงศักยภาพความเป็นประโยชน์ของกากตะกอน มีดังต่อไปนี้

- **จุลินทรีย์ดิน** มีความเกี่ยวข้องอย่างมาก ในกระบวนการเปลี่ยนแร่ธาตุอาหาร และ อินทรีย์สารต่างๆ ในกากตะกอนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพื่อให้ได้แร่ธาตุซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืช อีกทั้งยังเป็นสิ่งมีชีวิตกลุ่มสำคัญชั้นต้นของระบบห่วงโซ่อาหาร

- **กากตะกอนเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ดิน** อินทรีย์สารในกากตะกอนเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญต่อจุลินทรีย์ดิน

- **กากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน** กระบวนการเกิดกากตะกอน ตลอดจนวิธีการนำกากตะกอนไปใช้ในพื้นที่การเกษตร

- **อิทธิพลของโลหะหนักในกากตะกอนที่มีต่อจุลินทรีย์ดิน** โลหะหนักชนิดต่างๆ ที่พบบ่อยในกากตะกอน และอาจมีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ดิน ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว สังกะสี

- **เชื้อก่อโรคต่าง ๆ ในกากตะกอน** กากตะกอนมีเชื้อก่อโรคหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อซาลโมเนลลา เนื่องจากเชื้อชนิดนี้ได้มีการแพร่ระบาดอย่างกว้างขวางตั้งแต่สัตว์ชั้นต่ำ จนกระทั่งในคน

จุลินทรีย์ดิน

ดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ และเป็นตัวกำหนดคุณภาพ และปริมาณของผลผลิตทางการเกษตรทางหนึ่ง ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง จึงเป็นที่ต้องการของเกษตรกร

ในสภาพธรรมชาติ ดินจะมีกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่มีความสำคัญ คือ จุลินทรีย์ดินซึ่งมีบทบาทต่อความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารในดิน โดยเป็นผู้ย่อยสลายซากพืช และซากสัตว์ที่ประกอบไปด้วยสารเคมีธรรมชาติ ทั้งนี้จุลินทรีย์ดินจะประกอบไปด้วยกลุ่มต่างๆ ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีความสามารถในการย่อยสลายแตกต่างกันไป

1. กลุ่มของจุลินทรีย์ดินที่สำคัญในการหมุนเวียนธาตุอาหาร

จุลินทรีย์ดินแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มหลักคือ แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท รา สาหร่าย และโปรโตซัว (Alexander, 1977) จุลินทรีย์ดินเหล่านี้มีชนิดและจำนวนแตกต่างกันออกไปโดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ของบริเวณที่อยู่อาศัยอันได้แก่

- ปัจจัยทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณอากาศ ความพรุนของดิน โครงสร้างของดิน แสงสว่าง
- ปัจจัยทางเคมี เช่น ปริมาณน้ำหรือความชื้น ความเป็นกรดหรือด่าง สารละลายในดิน
- ปัจจัยทางสิ่งมีชีวิต เช่น ความใกล้ไกลบริเวณรากพืช สภาพการแข่งขันระหว่างกลุ่มสิ่งมีชีวิต

ในการกล่าวถึงการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยทั่วไป มักพิจารณาจุลินทรีย์ดิน 3 กลุ่ม คือ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท เชื้อแต่ละกลุ่มจะมีบทบาทในการย่อยสลายแตกต่างกันไป กล่าวคือ

1) แบคทีเรีย

ดินทั่วไปมักพบกลุ่มจุลินทรีย์ดินที่มีจำนวนมากคือ แบคทีเรีย **(ตารางที่ 2.1)** แม้ว่าแบคทีเรียมีขนาดเล็กกว่าจุลินทรีย์ดินกลุ่มอื่นๆ แต่ด้วยมีเป็นปริมาณมาก และมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากกับการเป็นพวกที่ได้รับแหล่งพลังงาน และคาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์สาร (สมศักดิ์ วังใน, 2528)

แบคทีเรียในดินอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะความต้องการคาร์บอน ได้แก่ เฮทเทอโรทรอฟ และออโตทรอฟ พวกออโตทรอฟที่พบ เช่น พวกที่สร้างไนไตรท์ ไนเตรต พวกซัลเฟอร์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย พวกไอรอนออกซิไดเซอร์ และกลุ่มที่ใช้ไฮโดรเจน เป็นต้น (Foth, 1978)

ในการศึกษาถึงอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ กลุ่มเฮทเทอโรทรอฟจะถูกนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับของกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน ซึ่งสามารถวัดในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา

หรือปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการย่อยสลาย ตลอดจนการวัดปริมาณการลดลงของอินทรีย์วัตถุโดยตรงหรือจากการหายไปของเซลลูโลส ลิกนิน หรือเฮมิเซลลูโลส (Alexander, 1977)

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของอินทรีย์วัตถุโดยน้ำหนักแห้งและจำนวนจุลินทรีย์ดิน ในพื้นที่ 1 เฮกตาร์ ที่ความลึกของดิน 15 เซนติเมตรในบริเวณเขตร้อนชื้น (Foth, 1978)

ชนิด	น้ำหนักแห้ง		จำนวนเฉลี่ยในแต่ละชนิด
	%	kg/ha	
อินทรีย์วัตถุ (ซากพืชซากสัตว์และจุลินทรีย์ดิน)	6	120,000	-
อินทรีย์วัตถุ ส่วนที่เป็นซากพืชซากสัตว์	5.28	105,400	-
รากพืชชั้นสูง	0.5	10,000	-
จุลินทรีย์ (กลุ่มโปรตีสท์)		2,000	
แบคทีเรีย	0.10	2,600	2×10^{18}
รา	0.10	2,000	8×10^{16}
แอคติโนมัยซีท	0.01	220	6×10^{17}
สาหร่าย	0.0005	10	3×10^{14}
โปรโตซัว	0.005	100	7×10^{16}

2) รา

ในดินทั่วไปอาจกล่าวได้ว่า ราเป็นจุลินทรีย์ดินกลุ่มใหญ่กลุ่มหนึ่ง ถึงแม้ว่าราจะไม่ใช่กลุ่มที่มีจำนวนมากที่สุด แต่ด้วยรามีขนาดใหญ่และเป็นสายใยยาว จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มสัดส่วนของชีวมวลในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง หรือดินในบริเวณป่า จะพบว่าราเป็นกลุ่มเด่นที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายลิตเตอร์ แม้กระทั่งในดินที่เป็นกรด พบว่าราเป็นกลุ่มที่สำคัญที่สุดในการย่อยสลาย (Foth, 1978)

ราได้คาร์บอนจากอินทรีย์โมเลกุล ด้วยมีความสามารถในการนำคาร์บอนจากแหล่งต่างๆ มาใช้ เช่น จากน้ำตาล กรดอินทรีย์ ไดแซคคาไรด์ แป้ง เพคติน เซลลูโลส ไขมัน และลิกนิน นอกจากนี้รายังสามารถนำไนโตรเจนจากสารประกอบเชิงซ้อนของอินทรีย์ไนโตรเจนมาใช้ได้ด้วย ดังนั้นในอินทรีย์สารซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลต่างๆซึ่งมีขนาดใหญ่และซับซ้อน เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน แป้ง และลิกนิน พวกรายังคงเจริญได้ดี (Alexander, 1977)

3) แอคติโนมัยซีท

แอคติโนมัยซีทมีลักษณะอยู่ระหว่างแบคทีเรียและรา เช่น มีโครงสร้างและขนาดภาพตัดขวางของเซลเหมือนแบคทีเรีย แต่มีเส้นใยที่แตกแขนงพันกันอย่างหนาแน่นและมีการสร้างสปอร์เช่นเดียวกับรา (Foth, 1987)

กลุ่มของแอคติโนมัยซีทเป็นกลุ่มใหญ่จึงแบ่งได้เป็นหลายกลุ่มย่อย แอคติโนมัยซีทมักพบมากเมื่อสภาพความสมบูรณ์ของอาหารเริ่มมีขีดจำกัด และอิทธิพลของการแก่งแย่งระหว่างจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ลดลง เช่น เมื่อมีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในระยะแรกๆ จะพบแอคติโนมัยซีทน้อย แล้วจะค่อยๆ พบมากขึ้น เมื่อจุลินทรีย์ชนิดอื่นเริ่มลดต่ำลง

แอคติโนมัยซีทเป็นกลุ่มที่สามารถใช้คาร์บอนจากสารประกอบที่มีความซับซ้อนต่ำตลอดจนสารประกอบที่มีความซับซ้อนมาก ดังเช่น สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ โปรตีน ไขมัน แป้ง อินซูลิน และไคติน ได้

กลุ่มแอคติโนมัยซีท มีลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่แตกต่างจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ คือ ไคตินไฮดรอไลซีส ซึ่งมักพบคุณสมบัตินี้ในพวกสเตรบโตมัยซีท และจัดว่าเป็นกลุ่มใหญ่ในพวกแอคติโนมัยซีทชนิดต่างๆ (Foth, 1978)

นอกจากนี้แอคติโนมัยซีท ยังได้รับความสนใจจากวงการแพทย์ และวงการอุตสาหกรรม เพราะจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะสร้างสารยับยั้งการเจริญจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ โดยสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย รา และยีสต์ได้ (Alexander, 1977)

ในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดนี้ (แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท) แต่ละกลุ่มจะมีบทบาทหน้าที่แตกต่างกันไป เช่น การนำพืชอวบน้ำมาทำปุ๋ยหมัก จุลินทรีย์กลุ่มแรกที่พบว่า มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นคือ แบคทีเรีย เนื่องจากมีธาตุอาหารและสภาพแวดล้อมเหมาะสม หลังจากนั้นจำนวนแบคทีเรียก็จะค่อยๆ ลดลง และกลุ่มราเจริญเพิ่มจำนวนขึ้น เนื่องจากรามีเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ๆ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โพลีแซคคาไรด์ และพบการเพิ่มขึ้นของกลุ่มแอคติโนมัยซีท เพราะสิ่งมีชีวิตกลุ่มนี้สามารถย่อยสลายลิกนิน ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ และซับซ้อนได้ ดังนั้นในดินหนึ่งกรัมจึงพบว่ามีจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ และมีจำนวนอย่างมากมายซึ่งในแต่ละกลุ่มจะมีความเกี่ยวข้อง มีการพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน เพราะมีข้อจำกัดในการสร้างเอนไซม์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากต่อการย่อยสลาย (Alexander, 1977)

ในการแบ่งกลุ่มของจุลินทรีย์ดิน ยังสามารถแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ ตามลักษณะของการย่อยสลายอินทรีย์สาร

เนื่องจากการย่อยสลายอินทรีย์สาร ต้องอาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ดินมากมายหลายชนิด และแต่ละชนิดมีความสามารถของเอนไซม์ค่อนข้างจำกัด (Paul and Clark, 1989) เมื่ออินทรีย์วัตถุอยู่ในดิน ก็จะมีสิ่งมีชีวิตกลุ่มหนึ่งหรือหลายกลุ่มเข้าทำการย่อยสลายต่อไป จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินทั่วไปนั้น อาจแบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. จุลินทรีย์ที่ใช้หรือได้พลังงาน และคาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุที่ใส่ลงไปโดยตรง
2. จุลินทรีย์ที่ใช้อินทรีย์สารที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัว (intermediate product) ของอินทรีย์วัตถุที่ใส่ลงไป
3. จุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ หรือได้รับพลังงาน และคาร์บอนจากโปรโตพลาสซึม ของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่หนึ่ง และกลุ่มที่สอง (สมศักดิ์ วังใน, 2528)

2 เอนไซม์ที่มีความเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ดิน

เอนไซม์ที่มีความเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ดิน สามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

1. อินทราเซลลูลาเอนไซม์ เป็นเอนไซม์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์
2. เอ็กทราเซลลูลาเอนไซม์ เป็นเอนไซม์ที่ผลิตขึ้น และปลดปล่อยออกมานอกเซลล์

เอนไซม์ชนิดนี้เป็นเอนไซม์ที่สำคัญกับการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ

3 บทบาทสำคัญของกิจกรรมจุลินทรีย์ดินต่อการเกษตร

1) หมุนเวียนธาตุอาหารในดิน

ในดินจะประกอบด้วย จุลินทรีย์ดินหลายชนิดที่เข้าทำการย่อยสลายอินทรีย์สาร โดยผลของกระบวนการย่อยสลายก่อให้เกิดความสำคัญทางการเกษตร ทั้งในด้านที่เป็นประโยชน์ และด้านที่เป็นโทษ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการย่อยสลายที่เกิดขึ้น

2) ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดิน

อินทรีย์วัตถุในดิน หมายถึง ส่วนของสิ่งมีชีวิตซึ่งรวมหมายถึง ซากพืช ซากสัตว์ จุลินทรีย์ดิน และสสารที่สร้างขึ้นโดย สิ่งมีชีวิตในดิน (Cannadian Department of Agriculture, 1972)

การย่อยสลาย หมายถึง การแตกออกของอินทรีย์สารให้อยู่ในรูปของอินทรีย์สารที่มีองค์ประกอบอย่างง่ายๆ (Schnitezer and Khan, 1983)

จุลินทรีย์ดินย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญและเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ใหม่ เมื่อใส่อินทรีย์วัตถุลงในดิน สิ่งที่เกิดขึ้น คือ อินทรีย์วัตถุเหล่านี้จะถูกย่อยสลายกลายเป็นอินทรีย์สารในรูปง่ายๆ มีหน่วยเล็กลงและถูกนำเข้าสู่เซลล์ อินทรีย์สารที่ผ่านการย่อยสลายในครั้งแรกจะถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์ที่อยู่ภายในเซลล์ เพื่อนำธาตุอาหารโมเลกุลเล็กมาเป็นแหล่งพลังงานและสร้างเป็นเซลล์ใหม่ ผลของกระบวนการย่อยสลายจะได้ผลผลิตตามมา คือ คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ หรืออัลกอฮอล์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน

ในดินที่มีอินทรีย์สารโมเลกุลขนาดใหญ่เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โพลีแซคคาไรด์ จุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารประกอบเหล่านี้ผ่านผนังเซลล์เข้าไปได้ จึงมีการสร้างเอนไซม์ออกมาย่อยสารประกอบขนาดใหญ่เหล่านี้ให้มีขนาดเล็กแล้วนำผ่านเข้าเซลล์ โมเลกุลของสารประกอบที่นำเข้าสู่

เซลล์จะถูกนำไปเป็นแหล่งพลังงานและเป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนคาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุจะถูกเปลี่ยนเป็นโปรโตพลาสมิคคาร์บอนของเซลล์จุลินทรีย์ กระบวนการนี้เรียกว่า คาร์บอนแอสสิมิเลชัน (Alexander, 1977)

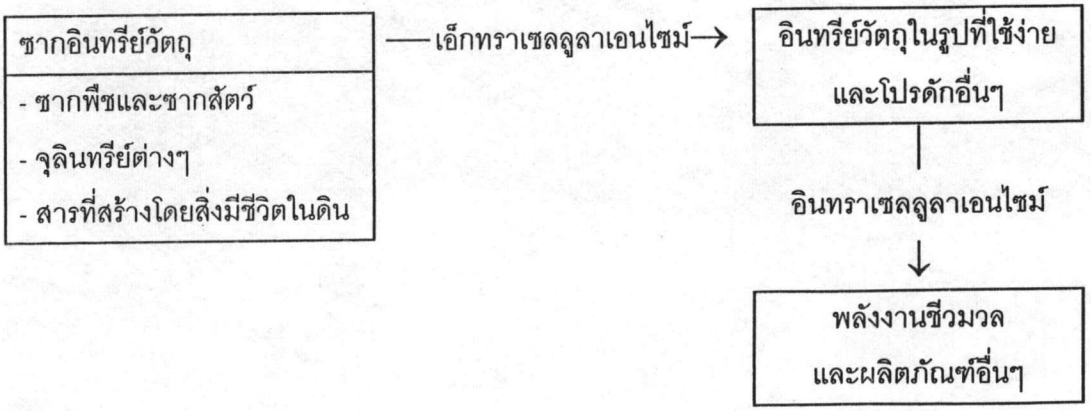
หากในดินใดเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชันสูง การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นน้อย และจุลินทรีย์จำพวกรา จะเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชันสูงกว่าพวกแบคทีเรีย โดยที่ราเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชัน 30 - 40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มใช้ออกซิเจนเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชัน 5 -10 เปอร์เซ็นต์ (Alexander, 1977)

การนำสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็กๆ มาสร้างเป็นชีวมวลของเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งเกิดภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจึงสามารถดูได้จากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา โดยที่การเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชัน จะเป็นผลให้การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณน้อยลง (Sabba Rao, 1982)

การเกิดคาร์บอนแอสสิมิเลชัน เพื่อสร้างโปรโตพลาสซึมของเซลล์ใหม่ จะนำธาตุอาหารอื่นๆ ที่เชื่อมกับคาร์บอนในโมเลกุลเข้าสู่เซลล์ด้วย ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม กำมะถัน เป็นการเกิดแอสสิมิเลชันของอนินทรีย์สารควบคู่กับการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน เรียกกระบวนการนี้ว่า อิมโมบิไลเซชัน ซึ่งเป็นกลไกที่จุลินทรีย์ดินลดปริมาณของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์กับพืชในดิน (Alexander, 1977; Sabba Rao, 1982)

จากองค์ประกอบต่างๆ ในอินทรีย์วัตถุ พบว่า ธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ก่อนแล้วสารประกอบที่มีโมเลกุลซับซ้อน เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน จึงถูกนำไปใช้ โดยเฉพาะลิกนินซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน และทนทานต่อการย่อยสลายที่สุดแม้ในสภาพที่มีออกซิเจนยิ่งไปกว่านั้นในสภาพที่ไร้ออกซิเจนอาจถือได้ว่า ลิกนินไม่ถูกย่อยสลายเลย (Alexander, 1977)

แม้ว่าดินมีองค์ประกอบต่างๆ ทำให้ยากต่อการศึกษากลไกของการย่อยสลาย แต่สามารถสรุปขั้นตอนต่างๆ ดังนี้



ขบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่เกิดขึ้นในดินมีความสลับซับซ้อนมาก กลไกต่างๆ จะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันและต่อเนื่อง ดังนั้นในดินที่เวลาใดเวลาหนึ่งจะพบอินทรีย์วัตถุที่ผ่านการย่อยสลายเป็นบางส่วน กรดอะมิโนต่างๆ น้ำตาล เอนไซม์ และสารประกอบอื่นๆ อีกมากมายซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การศึกษากลไกการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในธรรมชาติเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากการค้นคว้าทดลองในอนาคต

3) ปรับปรุงคุณภาพดิน

จุลินทรีย์ดินจะช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน เช่น ช่วยในการจับเป็นกลุ่มอนุภาคดิน โดยเมือกที่สร้างจากจุลินทรีย์ซึ่งเป็นผลให้ศักยภาพในการอุ้มน้ำของดินเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ผลผลิตที่ได้จากจุลินทรีย์ในดินบางชนิด ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินมีการเปลี่ยนแปลง เช่น แบคทีเรียที่ให้กรดอินทรีย์ เป็นต้น

4. <u>ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ</u>

อินทรีย์วัตถุที่ใส่ลงในดิน จะเกิดการย่อยสลายได้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ความซับซ้อนขององค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ

อินทรีย์วัตถุมีโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนทำให้ยากต่อการย่อยสลาย ส่วนอินทรีย์วัตถุที่มีองค์ประกอบทางเคมี หรือมีโมเลกุลไม่ซับซ้อนจะถูกย่อยสลายได้รวดเร็วกว่า ดังตัวอย่างของพืชที่มีอายุมากขึ้น จะมีระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่าในพืชที่มีอายุอ่อนกว่า เนื่องจากเมื่ออายุของพืชเปลี่ยนไป องค์ประกอบต่างๆ ในพืชจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยปริมาณสัดส่วนของไนโตรเจน โปรตีน และสารละลายต่างๆ ลดลง แต่สัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โดยเฉพาะลิกนิน ซึ่งเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนกลับเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ปริมาณลิกนินเป็นดัชนีทำนายความเร็วของการย่อยสลายได้ทางหนึ่ง (Alexander, 1977)

2) สัดส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนในอินทรีย์วัตถุ

องค์ประกอบทางเคมีของอินทรีย์วัตถุ ที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการย่อยสลาย คือ ปริมาณไนโตรเจน โดยทั่วไปสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในเซลล์จุลินทรีย์มีค่าประมาณ 10 ต่อ 1 เมื่อเติมอินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ถ้าปริมาณไนโตรเจนในอินทรีย์วัตถุที่จะถูกย่อยสลายมีมากและธาตุอาหารนั้นอยู่ในรูปที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ อัตราการย่อยสลายก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการมีไนโตรเจนในสิ่งแวดล้อมสูง ทำให้ปริมาณคาร์บอน-ไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยมากขึ้น

การเติมอินทรีย์วัตถุที่ขาดไนโตรเจนลงในดิน เป็นผลให้เกิดการแก่งแย่งไนโตรเจนระหว่างพืชกับจุลินทรีย์ดิน ดังในกรณีที่เติมเศษไม้ซึ่งมีไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่ำ (Ballen and Glennie, 1961 ; Kaarik, 1974) ลงในดินจะเกิดการขาดไนโตรเจน เนื่องจากอนินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกดูดซึมเข้าสู่

เซลล์เพื่อสร้างเซลล์ใหม่ (Ballen and Lu, 1957) การเติมขี้เลื่อยก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน โดยขี้เลื่อยมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนประมาณ 400 จุลินทรีย์จะเข้าทำการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุพร้อมทั้งนำคาร์บอนและไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ โดยคาร์บอนส่วนหนึ่งถูกนำมาเป็นชีวมวล และอีกส่วนหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องขณะเกิดเซลล์ใหม่ จนกระทั่งอัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนต่อปริมาณไนโตรเจนมีระดับใกล้เคียงกับปริมาณของเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้นในดินที่ขาดไนโตรเจนสามารถเพิ่มไนโตรเจนได้โดยเติมอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณไนโตรเจนมาก

แม้ว่าการเพิ่มไนโตรเจนจะช่วยเร่งอัตราของการย่อยสลาย โดยที่การเพิ่มไนโตรเจนช่วยให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนเร็วขึ้น แต่ในที่สุดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าเท่ากับที่ไม่ได้เติมไนโตรเจน

3) อุณหภูมิดิน

ปัจจัยของสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ระดับอุณหภูมิ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ในจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงใช้ระดับอุณหภูมิแบ่งกลุ่มจุลินทรีย์และพบว่า ที่อุณหภูมิสูง การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเกิดได้ดีกว่าในที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่ทั้งนี้ช่วงกว้างของอุณหภูมิต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับกลุ่มจุลินทรีย์นั้นๆ เช่น แอคติโนมัยซีทกลุ่มมีโซไฟล์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส แต่พวกเทอร์โมไฟล์ จะเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า คือ ประมาณ 55-65 องศาเซลเซียส เชื้อแอคติโนมัยซีทที่ชอบอุณหภูมิสูงนี้มักพบได้ทั่วไปในดินกองปุ๋ย เป็นต้น

4) สภาพของการมีหรือไม่มีออกซิเจน

จุลินทรีย์พวกที่ต้องการใช้ออกซิเจน จะมีอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และสร้างพลังงานได้มากกว่าพวกที่ไม่ต้องการใช้ออกซิเจน

5) ความเป็นกรดด่างของดิน

ความเป็นกรดด่างของดินเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ โดยความเป็นกรดด่างมีผลต่อการสร้างเอนไซม์ของจุลินทรีย์แต่ละชนิด และความเป็นกรดด่างยังเป็นตัวกำหนดชนิดของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรคาร์บอนด้วย การย่อยสลายจะเกิดขึ้นในสภาพที่เป็นกลาง หรือเป็นด่างเล็กน้อยได้ดีกว่าในสภาพที่เป็นกรด

6) ความชื้นในดิน

ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุนั้น พบว่ามีความชื้นที่พอเหมาะเข้ามาประกอบด้วย ในดินที่มีความชื้นสูงมากๆ จะลดกิจกรรมของจุลินทรีย์ เนื่องจากน้ำเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอากาศทำให้ปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นตัวรับอิเลคตรอนลดลง นอกจากนี้น้ำยังมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับการละลายของสารละลายต่างๆ ในดิน ดังนั้นถ้าความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของคาร์บอน-

ไดออกไซด์ลดลง ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะก่อให้เกิดขบวนการหายใจของจุลินทรีย์มากที่สุดอยู่ที่ระดับความชื้น 60 - 80 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการอุ้มน้ำในดินนั้น

7) ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เช่น ความลึกของชั้นดิน เพราะความลึกของชั้นดินที่แตกต่างกันก็มีผลทำให้การดำรงชีวิตของกลุ่มจุลินทรีย์ดินแตกต่างกัน ดังแสดงใน**ตารางที่ 2.2** ซึ่งจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักอยู่อาศัยในบริเวณดินชั้นบน เนื่องจากมีธาตุอาหารและสภาพแวดล้อมเหมาะสมในการเจริญ นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ได้แก่ ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ ประเภทของสารละลายในดิน การมีหรือไม่มีของสารยับยั้ง เช่น แทนนิน ปริมาณเกลือที่มากเกินความต้องการ ยาปราบศัตรูพืช และแอนตีไบโอติก เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 การแพร่กระจายของจุลินทรีย์ในดิน ณ ระดับความลึกต่างๆ (Alexander,1977 อ้างถึงใน Starc, 1942)

ความลึก (เซนติเมตร)	เซลล์ ต่อ กรัมดิน x 10^3				
	แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน	แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน	แอคติโนมัยซีท	รา	สาหร่าย
3 - 8	7800	1950	2080	119	25
20 - 25	1800	379	245	50	5
35 - 40	472	98	49	14	0.5
65 - 75	10	1	5	6	0.1
135 - 145	1	0.4	-	3	-

กากตะกอนเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ดิน

1 <u>แหล่งที่มาของกากตะกอน</u>

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภท โดยแบ่งตามลักษณะของแหล่งให้กำเนิดกากตะกอน คือ

1) กากตะกอนที่เป็นอนินทรีย์สาร เช่น กากตะกอนที่เกิดจากขบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

2) กากตะกอนที่เป็นอินทรีย์สาร ได้แก่ กากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีววิทยา เช่น ระบบแอคติเวเตดสลัดจ์ ระบบทริกกลิงฟิลเตอร์ ระบบไบโอโลจิคอลดิสส์ และระบบถังหมัก เป็นต้น กากตะกอนประเภทอินทรีย์สารนี้เป็นที่น่าสนใจในการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอินทรีย์สาร และมีธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช

2 กากตะกอนจากชุมชนหรือบ้านเรือน

กากตะกอนที่ได้จากโรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชน จะมีลักษณะสมบัติและองค์ประกอบแตกต่างกันไป ขึ้นกับกิจกรรมการใช้น้ำของประชาชนในบริเวณนั้น (Alloway and Jackson 1991) โดยทั่วไปแล้ว กากตะกอนมีอินทรีย์สารประมาณ 50 - 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณไนโตรเจนประมาณ 2.5 - 5.0 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 1.5 - 2.0 เปอร์เซ็นต์ และโปตัสเซียม 0.02 - 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง (Bungting, 1963)

จากองค์ประกอบในกากตะกอนที่สามารถนำไปเป็นแหล่งธาตุอาหารพืชได้ จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอากากตะกอนไปใช้เป็นปุ๋ย (Sommer, 1977) และการนำกากตะกอน ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรเป็นที่ยอมรับทั่วไปในต่างประเทศ (Hall and William, 1984)

3 กากตะกอนเป็นแหล่งอินทรีย์สาร

กากตะกอนจากชุมชนมีส่วนประกอบสำคัญคือ อินทรีย์สาร และคุณสมบัติที่สำคัญของอินทรีย์สารคือมีความสามารถในการดูดซับสูง เช่น ดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในดิน ซึ่งจากการศึกษาของ Allowayและ Jackson (1991) พบว่าอินทรีย์สารจากกากตะกอน จะประกอบไปด้วยอินทรีย์ สารในส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งเป็นแหล่งรวมของโลหะต่างๆ และอินทรีย์สารในส่วนที่เป็นสารละลายซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ในส่วนของอินทรีย์สารที่เป็นสารละลายนี้จะเกิดกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ดินได้เป็นอินทรีย์โมเลกุลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสามารถละลายได้

นอกจากนี้ Fletcher และ Backett (1987) พบว่า อินทรีย์สารในรูปสารละลายที่ได้จากกากตะกอนแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามบริเวณที่เกิดการแลกเปลี่ยน โดยกลุ่มแรกจับกับแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี นิเกิล โคบอลท์ แมงกานีส แคดเมียม ตะกั่ว เหล็ก และกลุ่มหลังจับเฉพาะทองแดง ตะกั่ว ไฮโดรเจน

Dudly McNeal และ Baham (1987) ใช้เวลา 30 สัปดาห์ ในการติดตามอินทรีย์สารที่ละลายน้ำได้ ซึ่งปลดปล่อยจากกระบวนการย่อยสลายกากตะกอน โดยที่นิเกิลเข้าจับกับอินทรีย์สารได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการทดลองแล้วปรากฏว่านิเกิลจับกับอินทรีย์สารและ

อนินทรีย์สารในเวลาต่อมา ส่วนทองแดงจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอินทรีย์สารตลอดระยะเวลา 30 สัปดาห์ ขณะที่สังกะสีจะเกิดอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับอนินทรีย์สารตลอดการทดลอง 30 สัปดาห์

Breaker และ Sopper (1988) สังเกตการใช้กากตะกอนเพื่อปรับสภาพดินเหมืองแร่ พบว่าในปีแรก การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต่ำสุด แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นในระยะเวลา 5 ปีที่ศึกษา

นอกจากนี้ มีการศึกษาดินที่มีการใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นเวลานานหลายปี พบว่า มีกรดฟัลวิคถูกปลดปล่อยจากกากตะกอนมากกว่าปลดปล่อยจากดิน (Sposito, Lund and Chang,1982) อีกทั้ง Webber (1988) พบว่าอินทรีย์วัตถุจะให้กรดฮิวมิคออกมาด้วย กรดทั้งสองชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการจับกับสารอื่นได้เป็นอนุภาคเชิงซ้อน แต่บางส่วนของอินทรีย์สารยังคงเหลืออยู่

Gerritse และ van Driel (1984) พบว่าอินทรีย์สารในกากตะกอนช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้ดิน ทำให้ดินจับจุลธาตุอาหารต่างๆ ได้ดี แต่อย่างไรก็ตามอินทรีย์สารที่ดูดซับโลหะหนักต่างๆ เป็นผลให้สารประกอบเชิงซ้อนนี้ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Petruzzelli, Guili,and Lubrano, 1986)

การจับกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับอินทรีย์สารให้ผลแตกต่างกันไป เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความแตกต่างของชนิดดิน ความเป็นกรดด่าง ตลอดจนปริมาณกรดฮิวมิค และกรดฟัลวิคที่อยู่ในดิน (Stevenson, 1977) ซึ่งการจับกันของโลหะกับอินทรีย์สารได้อนุภาคเชิงซ้อนที่มีความเสถียร เป็นผลให้การเคลื่อนย้ายของโลหะหนักต่างๆ ในดินน้อยลง Ram และ Vertoo (1985) ให้คำอธิบายที่สอดคล้องกับ Neal และ Sposito (1985) ว่า เมื่อใส่กากตะกอนเพิ่มขึ้น ดินจะมีความสามารถในการจับกับโลหะได้มากขึ้น จากเหตุผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความสามารถในการจับกับโลหะต่างๆ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเติมกากตะกอน โดยอินทรีย์สารทำให้สิ่งที่มีความสามารถในการจับโลหะที่ต่ำกว่าหมดไป

4 <u>การย่อยสลายอินทรีย์สารในกากตะกอนโดยจุลินทรีย์ดิน</u>

จากการที่อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งกำหนดอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ กล่าวคือ อินทรีย์วัตถุที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนไม่สูงกว่า 10 ต่อ 1 จุลินทรีย์ดินจะสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ดี โดยไม่ต้องดึงไนโตรเจนจากดินซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นอนินทรีย์สาร โดยจุลินทรีย์ดินเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าอยู่ในช่วงประมาณ 10 ต่อ 1 ดังนั้น การนำกากตะกอนมาใช้ในพื้นที่การเกษตรจึงไม่ทำให้เกิดการขาดแคลนไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (ศิราณี, 2535 อ้างจาก Follett และคณะ,1981)

5 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการเติมกากตะกอน

กากตะกอนมีอินทรีย์วัตถุในปริมาณสูง เมื่อเกิดการย่อยสลายโดยกระบวนการทางจุลินทรีย์ คือได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปลดปล่อยออกมา โดยทั่วไปการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะเกิดขึ้นช้าเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการย่อยสลายจะเกิดเร็วขึ้น มีคาร์บอนไดออกไซด์ปลดปล่อยออกมามาก ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส โดยที่ช่วงอุณหภูมินี้จะมีอัตราการย่อยสลายค่อนข้างคงที่

กากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน

1 แหล่งของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน

1) แหล่งกำเนิด

ในแหล่งน้ำธรรมชาติ กลไกการกำจัดของเสียเพื่อให้เกิดการปรับตัวเข้าสู่สมดุลย์ตามธรรมชาตินั้นคือ จุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญมากในการที่จะย่อยสลายจนอินทรีย์สารเหล่านั้นมีอณูขนาดเล็ก และผ่านผนังเซลล์เข้าไป หลังจากนั้นก็จะนำไปใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญเติบโตและเป็นแหล่งของคาร์บอน เพื่อสร้างเป็นเซลล์ใหม่ ทั้งนี้เซลล์ของจุลินทรีย์จะประกอบด้วย คาร์บอนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (สมศักดิ์ วังใน, 2528 ; Alexander, 1977) บทบาทในการช่วยกำจัดของเสียในแหล่งน้ำของจุลินทรีย์นี่เอง ที่ช่วยรักษาสภาพของแหล่งน้ำนั้นไว้ไม่ให้เน่าเสีย

แต่ปัจจุบันนี้ความเป็นเมืองกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเป็นเมืองจะทำให้ของเสียจากบ้านเรือนเพิ่มมากขึ้น (Fresques, Francis, and Dennis, 1990) ประกอบกับได้มีการใช้เทคโนโลยี่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ดังนั้น ของเสียที่ทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ จึงมิได้มีเพียงเฉพาะอินทรีย์สารซึ่งย่อยสลายได้ดังเช่นแต่ก่อน แต่มีความแตกต่างทั้งในด้านปริมาณของเสียรวมทั้งชนิดของของเสียที่ทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ ปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังเป็นสิ่งที่ย่อยสลายยาก และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนี้ จึงเกินความสามารถของแหล่งน้ำที่จะแบกรับภาระในการกำจัดของเสียเหล่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เกินความสามารถของจุลินทรีย์ที่จะย่อยสลายได้ทัน จึงปรากฏให้เห็นในสภาพของน้ำเน่า หรือน้ำเสียในปัจจุบัน

เนื่องจากปัญหาน้ำเน่าเสียได้ทวีความรุนแรงขึ้นทุกขณะ จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ การบำบัดน้ำเสียก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ

2) หลักการบำบัดน้ำเสีย

หลักการบำบัดน้ำเสียคือ การแยกเอาส่วนของเสียต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำออกมาแล้วปล่อยน้ำดีที่ผ่านการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำ ของเสียที่แยกออกมาซึ่งเรียกว่า กากตะกอน อาจก่อให้

เกิดปัญหาที่ตามมาคือ จะกำจัดอย่างไร หรือดำเนินการอย่างไร จึงจะไม่ก่อปัญหาขึ้นต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ต่อไป

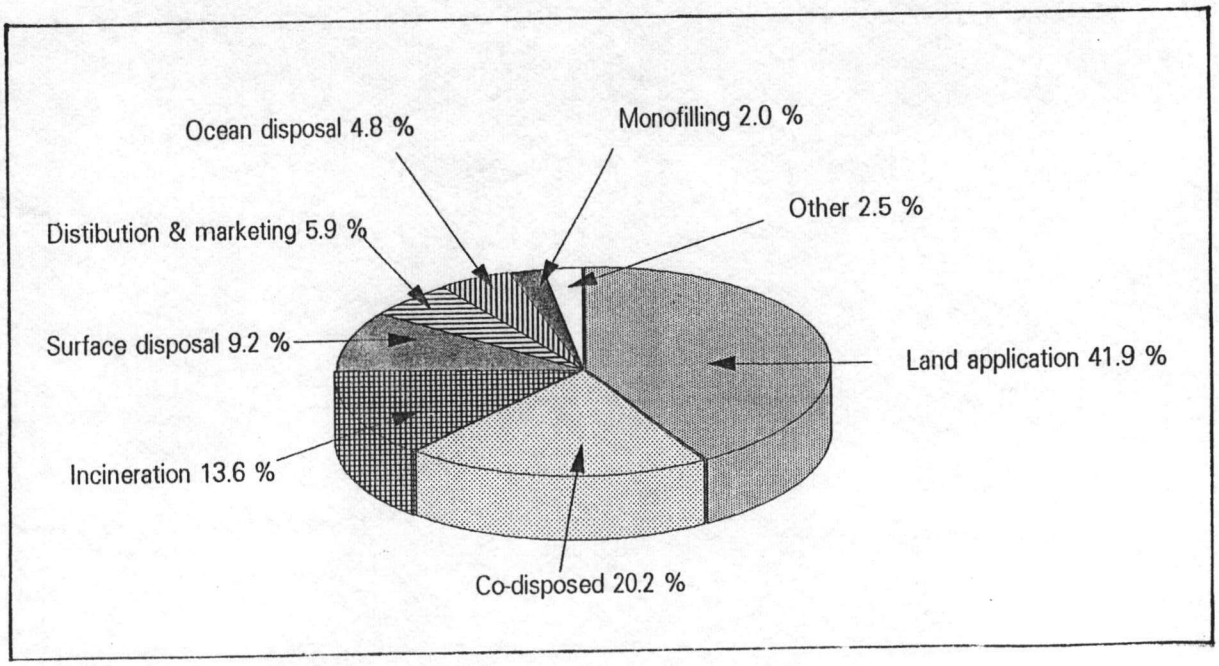
กากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสีย จะมีความผันแปรของลักษณะสมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอน เพราะโอกาสการปนเปื้อนของสารพิษจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันและจากสิ่งแวดล้อมได้เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้น กากตะกอนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำเสียจึงมีลักษณะสมบัติแปรเปลี่ยนไปตามคุณภาพ และลักษณะของน้ำที่เข้าสู่ระบบบำบัด

3) แนวโน้มของปริมาณกากตะกอน

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2532) ได้ประเมินไว้ว่า ประชากร 1 คนจะก่อให้เกิดกากตะกอนประมาณ 60 กรัม กากตะกอนแห้งต่อวัน และได้มีการประมาณอัตราการเกิดกากตะกอนในประเทศกำลังพัฒนาในรูปน้ำหนักแห้งได้เท่ากับ 25-40 กิโลกรัมต่อคนต่อปี หรือประมาณ 800 กิโลกรัมต่อคนต่อปีในรูปน้ำหนักเปียก (น้ำ 95 เปอร์เซ็นต์) (ศิราณี 2535 อ้างจาก Chongrak Polprasert, 1989)

4) การจัดการกากตะกอน

การจัดการกากตะกอนมีอยู่หลายวิธี โดยรูปแบบของการจัดการต้องคำนึงถึงความปลอดภัย และการยอมรับของประชาชนเป็นหลักภายใต้การจัดการที่เหมาะสม เช่น นำไปถมที่ นำไปผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน หรือเผาภายใต้ความร้อนสูงๆ เพื่อทำเป็นก้อนอิฐ การจัดการกากตะกอนในประเทศต่างๆ จะมีวิธีการต่างๆ กัน ดังเช่น ในกรณีของประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการจัดการกับกากตะกอน โดยมีการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่ 41.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา **ดังรูปที่ 2.1**



รูปที่ 2.1 การจัดการกากตะกอนในประเทศสหรัฐอเมริกา (Hasbach, 1991)

การจัดการเพื่อกำจัดกากตะกอนให้เป็นไปโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องจัดรูปแบบวิธีการจัดการให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่นั้นๆ และประการสำคัญคือ ต้องเป็นที่ยอมรับของประชาชน สำหรับประเทศไทยการจัดการเกี่ยวกับกากตะกอน อาจถือได้ว่าเป็นของใหม่ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อหาแนวทางการจัดการที่เหมาะสมกับประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อให้การขจัดปัญหาทำได้ครบวงจร ไม่ใช่เป็นเพียงการย้ายปัญหาจากน้ำมาสู่พื้นดิน

2 การนำกากตะกอนไปใช้ในพื้นที่การเกษตร

แนวทางหนึ่งของการจัดการคือ การนำกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ความเป็นไปได้ในการพิจารณา คือ ลักษณะสมบัติ และปริมาณธาตุอาหารของพืชที่มีอยู่ในกากตะกอน ค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นต้องคิดเป็นค่าใช้จ่ายเพื่อการลงทุนในการแก้ไข ปัญหาต่อเนื่องของปัญหามลภาวะทางน้ำ ทั้งนี้การนำกากตะกอนมาใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อพืช และมนุษย์ รวมทั้งพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ของพืชด้วย (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2532)

1) ลักษณะสมบัติของกากตะกอนที่เอื้อประโยชน์ทางการเกษตร

แนวคิดที่ใช้ประโยชน์กากตะกอนกำลังเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ได้มีการศึกษาถึงประโยชน์และโทษของการใช้ประโยชน์กากตะกอนในระบบการเกษตร (Elliott, 1986; Sommers, 1977) ซึ่งประโยชน์ของการใช้กากตะกอนในทางการเกษตรมีหลายประการ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพดิน ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ การเพิ่มผลผลิตพืช ตลอดจนการให้ผลประโยชน์ทางอ้อมอื่นๆ (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2529 ; Heckman, Agle, and Changey, 1986,1987; Robert และคณะ, 1988)

ก. เป็นแหล่งธาตุอาหารพืช

จากการศึกษาการเพิ่มธาตุอาหารแก่พืชโดยการนำกากตะกอนใส่ในบริเวณทุ่งหญ้าที่ค่อนข้างแห้งแล้งพบว่า ธาตุอาหารพืช อันได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม เพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่กากตะกอน (Fresquez, Francis, and Dennis, 1990) และได้มีศึกษาการใช้กากตะกอนกับป่าไม้ โดยเป็นการเพิ่มแหล่งไนโตรเจนในดินบริเวณป่าก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านชีวภาพ อีกทั้งมีการนำไนโตรเจนเข้าสู่วัฏจักรหมุนเวียน หรือมีการสูญเสียไนโตรเจนจากระบบด้วย (Cole, 1986) นอกจากนี้ Aschmann และคณะ (1990) พบว่าหลังการใช้กากตะกอน 2 ปี ในป่าสนพบว่าปริมาณไนโตรเจนในลิตเตอร์มีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการใส่กากตะกอน

ข. ช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน

มีการใช้กากตะกอนในพื้นที่การเกษตร นอกจากจะเป็นประโยชน์ทางตรงต่อพืชโดยการเพิ่มธาตุอาหารแก่พืชแล้ว ยังมีประโยชน์ในด้านช่วยปรับปรุงคุณภาพ และสมบัติบางประการในดิน (Khaleel และคณะ, 1981) โดย Fresquez และคณะ (1990) พบว่าหลังจากการใส่กากตะกอนใน

ฤดูกาลเพาะปลูกที่สอง มีอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น และความเป็นกรดด่างลดลงเล็กน้อย คือ จาก 7.8 เป็น 7.5 นอกจากนี้ในการใส่กากตะกอนยังสามารถเพิ่มค่าวอเตอร์รีเทนชั่น ไฮดรอลิคคอนดัคติวิตี ค่าความเสถียรของการรวมเป็นก้อน ค่าความหนาแน่นทั้งหมด (Chang, Page, and Warneke, 1983 ; Epstein, 1975) นอกจากนี้ได้มีบางงานวิจัยที่ใช้กากตะกอนร่วมกับอินทรีย์วัตถุอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น May และคณะ (1990) ได้ใช้ขยะผสมกับกากตะกอน ทำให้ดินภายหลังการเติมสิ่งทดลองมีค่าความหนาแน่นทั้งหมดลดลง

2) ลักษณะสมบัติของกากตะกอนที่พึงระมัดระวัง

การใช้กากตะกอนได้มีการศึกษาถึงความเป็นประโยชน์ และอันตรายจากกากตะกอน เนื่องจากกากตะกอนนอกจากจะมีส่วนที่เป็นธาตุอาหารสำหรับพืชแล้ว ยังมีส่วนที่เป็นข้อจำกัดการใช้ เช่น โลหะหนัก และเชื้อโรคตลอดจนพยาธิต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

ก. กากตะกอนเป็นแหล่งของโลหะหนักต่างๆ

ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนมีอยู่กว้างขวางแตกต่างกันไป เนื่องจากในส่วนของน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบบำบัด จากกิจกรรมของมนุษย์มีความหลากหลายเช่น ของเสียจากคน เครื่องสำอางค์ สารทำความสะอาด รวมทั้งของเสียจากครัว

โลหะหนักที่มักพบในกากตะกอนได้แก่ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี แม้ว่า ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี จะจัดว่าเป็นจุลธาตุอาหารของพืช แต่ต้องกำหนดให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ส่วนแคดเมียม ตะกั่ว ยังไม่ทราบถึงความเป็นประโยชน์ต่อพืช และได้ถูกจัดเป็นพิษต่อพืช (Kim และคณะ,1988) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แคดเมียม ซึ่งจัดว่าเป็นโลหะหนักที่มีอันตรายที่สุด เมื่อมีการใช้ประโยชน์กากตะกอน (Ryan และคณะ,1982)

โลหะหนักเหล่านี้นอกจากจะเป็นพิษโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต เช่น คน สัตว์ พืช หรือจุลินทรีย์ดินแล้ว ยังมีการเก็บสะสมและเพิ่มความเข้มข้นในแต่ละขั้นของห่วงโซ่อาหาร ในระบบนิเวศน์ โดยเฉพาะการเก็บสะสมในจุลินทรีย์ ซึ่งจัดว่าเป็นสิ่งมีชีวิตขั้นต้นของระบบ และมีความสำคัญอย่างมากในด้านการหมุนเวียนธาตุอาหารในดิน

ข. กากตะกอนเป็นแหล่งของเชื้อโรค และพยาธิต่างๆ

การใช้กากตะกอนในพื้นที่การเกษตร อาจเป็นการนำอันตรายมาสู่แหล่งอาหารได้ โดยสิ่งมีชีวิตก่อโรค โดยทั่วไปแล้ว สิ่งมีชีวิตก่อโรคที่ใช้เป็นดัชนีบ่งถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพคือ กลุ่มเชื้อซาลโมเนลลา และพยาธิ (WHO Working Group, 1981) โดยระดับความหนาแน่นที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดอันตรายของซาลโมเนลลา คือ 10^5 เซลล์ต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งอาหาร (Willis and Lekmann, 1983)

อิทธิพลของโลหะหนักในกากตะกอนที่มีผลต่อจุลินทรีย์ดิน

แม้ว่าการใช้กากตะกอนในพื้นที่การเกษตรจะมีประโยชน์อย่างมาก อีกทั้งยังเป็นการกำจัดกากตะกอนให้หมดไป แต่เนื่องจากส่วนประกอบของกากตะกอนมิได้มีเพียงส่วนที่เป็นธาตุอาหารพืชเท่านั้น กากตะกอนยังประกอบไปด้วยโลหะหนักมากมายหลายชนิด โลหะหนักบางชนิดมีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโต แต่บางชนิดมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศได้ แม้ว่าจะมีในปริมาณน้อยๆ ก็ตาม จึงทำให้การใช้ประโยชน์กากตะกอนทางด้านการเกษตรมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ และยังมีความไม่แน่ใจในความปลอดภัยจากเชื้อโรคต่างๆ จากกากตะกอนด้วย จึงต้องมีการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาผลกระทบของโลหะหนักในกากตะกอนต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ซึ่งมีแนวโน้มที่ได้รับความสนใจมากขึ้น

เนื่องจากจุลินทรีย์มีประโยชน์อย่างมากทางด้านการเกษตรกรรม และมีบทบาทสำคัญในการหมุนเวียนธาตุอาหารพืช อีกทั้งยังเป็นสิ่งมีชีวิตขั้นต่ำซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตอันดับแรกๆของห่วงโซ่อาหาร และยังมีความสามารถจับกับโลหะหนักแล้วนำโลหะหนักเข้าสะสมในเซลล์ได้ (Blairและคณะ, 1982 ; Hassett, Jenett, and Smith, 1981 ; Kurek, Czaban, and Bollag, 1982 ; Maxaskie and Dean, 1982) จึงเป็นที่เกรงว่าการใช้กากตะกอนจะเป็นการเพิ่มโลหะหนักเข้าสู่ระบบห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ (Leland, Luama, and Fielden, 1982; Wriht, 1987)

1 <u>ผลกระทบของโลหะหนักต่อจำนวนจุลินทรีย์</u>

อิทธิพลของโลหะหนักต่อจำนวนจุลินทรีย์ขึ้นกับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่ม ชนิดและปริมาณของโลหะหนัก รวมถึงสิ่งแวดล้อม (Duxbery, 1985) ดังอย่างเช่นในบริเวณใกล้กับโรงถลุงแร่สังกะสี พบว่ามีจำนวนจุลินทรีย์อันได้แก่ แอคติโนมัยซีท รา และแบคทีเรีย ลดจำนวนลง (Jordan and Lechevalier, 1975) จากการสังเกตของ Freedman และ Hutchinson (1980) พบว่าดินที่อยู่ในบริเวณใกล้กับโรงถลุงแร่ทองแดงและนิเกิล จำนวนราที่พบต่ำกว่าที่บริเวณไกลออกไป แต่ไม่ให้ค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาของ Bisessar (1983) พบว่าทองแดงมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดินน้อยกว่าแคดเมียม และตะกั่ว อีกทั้งพบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีผลกระทบโดยตรงต่อการลดจำนวนของแบคทีเรียเพียงอย่างเดียว ขณะที่แคดเมียมและตะกั่วมีผลกระทบโดยตรงต่อการลดจำนวนของแบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท และรา Nordgren Baath และ Soderstrom (1983) พบว่า จำนวนราลดลงเมื่อความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น

จากการทดลองของ Hattori (1989) พบว่าจำนวนแบคทีเรีย และแอคติโนมัยซีทลดลงโดยที่จำนวนราเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียม และเสนอว่าในพื้นที่ทำการเกษตร ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ละลายน้ำควรน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อกรัมดิน

2 อิทธิพลของโลหะหนักต่อความหลากหลายของจุลินทรีย์

การศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักต่อจุลินทรีย์แต่ประการเดียวยังไม่เพียงพอ เนื่องจากการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่ในสภาพธรรมชาติ จึงมีการศึกษาถึงสภาพกดดันต่างๆ ที่เกิดเนื่องจากสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตชั้นสูงกว่า หรือการเพิ่มการปนเปื้อนโลหะหนัก ล้วนมีผลกระทบต่อการลดความหลากหลายของจุลินทรีย์ทั้งสิ้น (Carter, 1978; Hartman, 1976; Ruhling และคณะ, 1984; Whittaker, 1975)

เนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระบบนิเวศหนึ่งๆ มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน ดังนั้นการศึกษาถึงการสูญหายไป หรือการมีปริมาณเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ดินอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในบริเวณนั้นเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาด้วย ดังตัวอย่างการศึกษาแบคทีเรียที่บริเวณผิวใบไม้ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก พบว่ามีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าบริเวณควบคุม (Bewley, 1980; Bewley and Campbell, 1980) โดย Bewley และ Campbell (1980) พบว่า Sporobomyces roscus ได้หายไปเมื่อใบไม้ปนเปื้อนโลหะหนัก ส่วน Bewley (1980) นั้นพบว่า Aurebasidium pullulans และ Cladosporium sp. ให้ผลตรงข้ามกัน คือมีปริมาณเพิ่มขึ้น

William McNeilly และ Wellington (1977) ได้ศึกษาประชากรรา พบว่า Mortierella sp. และ Verticillium sp. ไม่สามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์ได้จากดินพลาสเจอร์ แต่สามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์ได้จากของเสียจากเหมือง และลิตเตอร์ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก ส่วน Penicillium sp. ไม่พบในดินที่มีการปนเปื้อนแต่พบในลิตเตอร์ทั้งที่มีการปนเปื้อนและไม่มี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับ Nordgren และคนอื่นๆ (1983) โดยพบว่า ความเข้มข้นของโลหะที่เพิ่มขึ้นจะแยกเชื้อบริสุทธิ์ Penicillium sp. ได้น้อยลงและยังพบว่าทั้ง Penicillium sp. และ Oidiodendron sp. มีจำนวนลดลงเป็นเส้นตรงกับล็อกของความเข้มข้นของทองแดง ส่วน Paecilomyces farinosus จะสามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์ได้ในดินที่มีความเข้มข้นของทองแดงมากกว่า 1000 พีพีเอ็ม. เท่านั้น

Ruhling และ Tyler (1973) พบว่า ทองแดง และสังกะสี ที่ความเข้มข้นของสูงๆ ในดินที่อยู่บริเวณรอบๆ โรงถลุงแร่ทองเหลือง มีผลกระทบต่อความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่อยู่ในบริเวณนั้น

จากการตรวจเอกสารของ Rai Gaur และ Kumar (1981)ได้ข้อสรุปไว้ว่า การมีโลหะหนักเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงชนิดกลุ่มของสาหร่าย เช่น พบว่าทองแดงที่มีความเข้มข้น 0.008 - 0.014 พีพีเอ็ม ทำให้แบคทีเรียเซลล์ทรงกลม และไซยาโนแบคทีเรียเจริญได้ดี แต่มีการยับยั้งการเจริญของ Anabaena flos-aquae (Effler และคณะ, 1980) นอกจากนี้ยังพบว่าทองแดงมีผลทำให้พวก ไดโนแฟลกเจลเลตตาย แต่สิ่งมีชีวิตบางกลุ่มเจริญเพิ่มมากขึ้น เช่น ไดอะตอม และสิ่งมีชีวิตที่มีแฟลกเจลเลตขนาดเล็ก (Sander Ryther and Batchelder, 1981)

การศึกษาผลกระทบต่อจุลินทรีย์ เนื่องจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในสภาพแวดล้อมนั้นเป็นการยากที่จะบ่งบอกได้ว่าเนื่องมาจากสาเหตุอะไร ที่ทราบแน่ชัดในขณะนี้คือ โลหะหนัก

สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ และชนิดของจุลินทรีย์ แต่ก็เป็นการยากที่จะระบุได้ว่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ระดับเท่าใดจึงจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง และไม่สามารถบอกได้ว่าสิ่งมีชีวิตกลุ่มใดที่จะเจริญเติบโต เพิ่มจำนวนเป็นกลุ่มเด่น จนสามารถใช้เป็นดัชนีบอกความปนเปื้อนของโลหะหนัก (Marchall, 1975)

อีกทั้งการศึกษาความเป็นพิษของโลหะหนักยากที่จะกำหนด ความสัมพันธ์ของความเป็นพิษในแต่ละธาตุ เนื่องจากแต่ละธาตุมีความเกี่ยวพันกันสูงและเกิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ดังนั้นการพิจารณาผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในดิน จึงควรพิจารณาโดยภาพรวม แม้ว่าแต่ละธาตุนั้นจะให้ผลกระทบต่อจุลินทรีย์แตกต่างกัน แต่การศึกษาความเป็นพิษของโลหะหนักโดยแยกศึกษาทีละธาตุจึงเป็นการทราบผลกระทบอย่างคร่าวๆ เท่านั้น (Nordgren, 1986)

3 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกิจกรรมจุลินทรีย์

การศึกษาผลกระทบของโลหะหนักต่อกิจกรรม และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีหลายวิธี ได้แก่ การวัดอัตราการหายใจ การนับจำนวนจุลินทรีย์ การวัดเอนไซม์บางชนิด (Alexander, 1977; Chaney, Kelly, and Strickland, 1978; Frankenbreger and dick, 1983) ทั้งนี้ Alexander (1977) ได้เสนอแนะไว้ว่า การวัดกิจกรรม เช่น วัดอัตราการหายใจ วิเคราะห์เอนไซม์ ควรใช้ร่วมกับการนับจำนวนจุลินทรีย์ เพราะจุลินทรีย์ในดินหลายชนิดอาจอยู่ในสภาพนิ่งเฉยช่วงเวลาหนึ่ง

1) ผลกระทบของโลหะหนักต่ออัตราการหายใจของจุลินทรีย์

วิธีการวัดอัตราการหายใจของจุลินทรีย์เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงระดับกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยวัดในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมา (Anderson and Domsch, 1973; Hattori, 1989, 1991, 1992; Tate, 1991; Witkamp, 1973) Witkamp (1973) พบว่า การย่อยสลายลิตเตอร์มีความสัมพันธ์อย่างมากกับอัตราการหายใจในดิน นอกจากนี้ Macfadyen (1971) ก็ใช้อัตราการหายใจเป็นดัชนีบ่งชี้ ถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่ในดิน อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มโลหะหนักทำให้อัตราการหายใจลดลง แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของโลหะหนักตลอดจนชนิดของดินด้วย ซึ่งการลดลงของอัตราการหายใจนี้อาจเนื่องมาจากโลหะหนัก จับกับบางส่วนของอินทรีย์สาร และสารอื่นๆ ในดิน (cf. Haanstra, Doelman, and Oude Voshaar, 1985; Mathur, 1981)

อัตราการหายใจ และจุลินทรีย์ที่พบให้ผลแตกต่างกันไปขึ้นกับสภาวะที่ศึกษา เช่น ในดินที่มีการใช้ขี้เถ้า หากเติมกากตะกอนลงไปจะช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ อัตราการหายใจ และการวิเคราะห์เอนไซม์ให้ผลเพิ่มขึ้น แต่ยกเว้นในกรณีที่ดินนั้นมีการเติมขี้เถ้าสูงมาก (Pichtel and Hayes, 1990)

โลหะหนักชนิดต่างๆ มีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในดินโดยเฉพาะจุลินทรีย์พวกที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรไนโตรเจน เช่น กลุ่มตรึงไนโตรเจนอิสระ และกลุ่มแอมโมนิฟายอิงแบคทีเรีย โดยพบ

ว่าแคดเมียมจากกากตะกอนสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เหล่านี้ อีกทั้งยังพบว่าอัตรา การหายใจลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีการเพิ่มการปนเปื้อนของโลหะหนัก (Jordan and Lechevalier, 1975) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่พบว่าผลกระทบเนื่องจากโลหะหนักมีความสอดคล้องกัน คือ ก่อให้เกิดการลดลงของอัตราการหายใจและอัตราการเกิดขบวนการไนโตรเจนมินเนอรัลไลเซชัน (Belwley and Stotzky, 1983; Chang and Broadbent 1982; Yamada, Imaizumi, and Sano, 1983)

2) ผลกระทบของโลหะหนักต่อการยังยั้งเอนไซม์

อีกแนวทางหนึ่งในการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์คือ การใช้เอนไซม์เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ และการยับยั้งเอนไซม์โดยโลหะหนักให้ผลแตกต่างกันไปตามสภาพการทดลอง ตัวอย่างเช่น Tyler (1975, 1976) พบว่าทองแดงสามารถยับยั้งเอนไซม์ได้ดีกว่า สังกะสี และตะกั่ว อีกทั้งยังพบว่า อิออนของเงิน แมกนีเซียม และทองแดง มีความสามารถยับยั้งเอนไซม์ฟอสเฟตได้ (Tyler, 1977) ส่วน Ebregt และ Boldewijn (1977) พบว่าตะกั่ว แคดเมียม เป็นธาตุที่ก่อผลกระทบต่อเอนไซม์อะไมเลสมากที่สุด นอกจากนี้ Tyler (1974, 1981) พบว่าเอนไซม์ยูรีเอสในดินมีความอ่อนไหวต่อโลหะหนัก ซึ่งเอนไซม์ยูรีเอสที่อยู่ในดินนั้นเชื่อว่าถูกสร้างมาจากจุลินทรีย์ แต่ก็เชื่อว่าเป็นไปได้ที่เอนไซม์นี้มาจากพืชด้วย (Mulvaney and Bremer, 1981)

Tyler (1981) ได้สรุปว่าสาเหตุที่เอนไซม์ลดลงเนื่องจากโลหะหนัก อาจไปก่อให้เกิดผลกระทบในขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- โลหะหนักไปบังหรือขวางกั้นกลุ่มแอคทีฟของเอนไซม์
- โลหะหนักไปทำลายเอนไซม์
- โลหะหนักไปรบกวนการสร้างเอนไซม์
- โลหะหนักไปแทนที่อิออนของโลหะที่มีหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากโลหะหนักมีอยู่หลายชนิด เช่น ฟอสฟาเทส ซัลฟาเทส ดีไฮโดรจิเนส อินเวอร์เทส และคะตะเลส เป็นต้น แต่การเลือกใช้เอนไซม์ตัวใดตัวหนึ่งในการศึกษาจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะสมบัติของเอนไซม์ที่ศึกษาเสียก่อน และการวัดกิจกรรมของจุลินทรีย์ทำได้ยากเนื่องจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลายสูง และวิธีการทดลองยังมีข้อจำกัดที่จะอธิบายถึงสภาพการณ์ต่างๆ ได้อย่างสมบูรณ์

การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนัก ที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตยังเกิดคำถามว่า พารามิเตอร์ตัวใดที่เป็นดัชนีบ่งบอกถึงความเป็นพิษของโลหะหนักได้ดีที่สุด ซึ่งในการศึกษาของนักวิจัยต่างๆเป็นไปในทิศทางที่กระจัดกระจาย มีความแตกต่างในด้านการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตลอดจนสิ่งที่นำมาเป็นดัชนีบ่งบอกถึงความเป็นพิษ จึงเป็นการยากที่จะนำเอาผลการทดลองต่างๆ มาสรุปเพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังมีสาเหตุจากความซับซ้อนของระบบธรรมชาติ การศึกษาในห้องปฏิบัติการจึงเป็นการศึกษาที่สภาวะหนึ่งเท่านั้น

ซาลโมเนลลาในกากตะกอน

สิ่งที่หวั่นเกรงในการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนนอกเหนือจากโลหะหนัก อีกประการหนึ่งคือ เชื้อก่อโรคที่ปนเปื้อนมากับกากตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อซาลโมเนลลา ด้วยเกรงว่าการนำกากตะกอนมาใส่ในพื้นที่การเกษตร จะเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อเชื้อโรค ทั้งนี้ Jones (1983) ได้สรุปไว้ว่า ซาลโมเนลลาอาจปนเปื้อนสู่พืชต่างๆ ที่ปลูกอยู่ในบริเวณที่มีการใช้มูลสัตว์ หรือกากตะกอน

1 การแพร่ระบาด

ซาลโมเนลลาเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบบาซิลลัส และจัดอยู่ในกลุ่มเอนเทอโร-แบคทีเรีย มีความสามารถในการก่อโรคซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ เอนเทริคฟีเวอร์ และแกสโตรเอนเตอริทีส ซึ่งได้รับเชื้อจากอาหาร และน้ำ

โดยทั่วไปซาลโมเนลลาจะเจริญในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมซาลโมเนลลาจะตายภายในเวลาไม่กี่วัน และจะไม่มีการเพิ่มจำนวนเมื่ออยู่ภายนอกสิ่งมีชีวิต แต่โดยทั้งนี้การมีชีวิตอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมได้นานเพียงใดขึ้นอยู่กับจำนวนซาลโมเนลลาที่มีอยู่เริ่มแรกในแหล่งนั้น วิธีการแยกเชื้อบริสุทธิ์ ซึ่งวิธีการแยกเชื้อที่ต่างกันจะได้ปริมาณเชื้อที่ต่างกัน รวมถึงสภาพของแหล่งที่แยกเชื้อออกมา เช่นจากแหล่งน้ำ จากกากตะกอน เป็นต้น (Jone, 1983)

ซาลโมเนลลาก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ในสัตว์หลายชนิดซึ่งสัตว์เหล่านี้ สามารถเป็นแหล่งแพร่เชื้อให้กับคนได้ เช่น ในสัตว์ที่เป็นอาหารของคนได้แก่ หมู วัว ควาย เป็ด ไก่ เมื่อคนกินสัตว์ที่เป็นโรคเหล่านี้ก็จะรับเอาเชื้อเข้าไปด้วย นอกจากนี้ซาลโมเนลลายังติดเชื้อได้ในกลุ่มสัตว์ฟันแทะ โดยเชื้อจะปนมากับมูลสัตว์เหล่านี้ และปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ แหล่งอาหารอื่นๆ

Salmonella Cholere-suis เป็นเชื้อซาลโมเนลลาชนิดหนึ่งที่มักพบในหมู ส่วน Salmonella enteritidis ซึ่งมีหลายสายพันธุ์ สามารถติดเชื้อได้ในสัตว์ทั่วไป โดยตรงข้ามกับ Salmonella typhi ซึ่งไม่ก่อโรคในสัตว์ชั้นต่ำอื่นๆ พบการติดเชื้อเฉพาะในคนเท่านั้น (Burrow, 1985)

ในสัตว์จำพวกหนู พบว่า Salmonella enteritidis สามารถอยู่ร่วมกับสัตว์พาหะเหล่านี้ โดยไม่เกิดโรค ส่วนในสัตว์พวกนก ก็พบว่าซาลโมเนลลาสามารถก่อโรคได้เช่น สัตว์เศรษฐกิจจำพวก เป็ด ไก่ ไก่งวง พบการติดเชื้อของ Salmonella typhimurium จึงก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพ และปัญหาทางเศรษฐกิจทางหนึ่ง (Burrow, 1985) นอกจากนี้ในปลา เต่า และสัตว์น้ำอื่นๆ สามารถพบการก่อโรคของเชื้อซาลโมเนลลาได้ ในประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อปี ค.ศ. 1970 มีผู้ป่วยจากเชื้อซาลโมเนลลาประมาณ 280,000 คน เนื่องจาก ได้รับเชื้อจากเต่าที่เลี้ยงไว้ (Cohen และคณะ, 1980)

สัตว์จำพวกแมลงโดยเฉพาะอย่างยิ่ง แมลงวัน แมลงสาป สามารถติดเชื้อซาลโมเนลลา

ได้เช่นกัน พบว่าแมลงสาปจะให้เชื้อซาลโมเนลลาออกมากับมูล มากกว่า 21 วัน หลังจากได้รับการติดเชื้อ (Klowden, and Greenberg, 1976)

ส่วนการรับเชื้อซาลโมเนลลาในคน เกิดจากการได้รับอาหาร น้ำ ซึ่งมีการปนเปื้อนเชื้อซาลโมเนลลา (Burrow, 1985; Hsu, 1989; Joklik, 1980)

2 ปริมาณซาลโมเนลลาในสิ่งโสโครกจากคนและสัตว์

ประมาณว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ของประชากรทั้งหมด จะให้ซาลโมเนลลาออกมาปนเปื้อน และอัตรานี้จะสูงขึ้นในสิ่งโสโครกจากบ้านเรือนที่ทำปศุสัตว์ ดังนั้น จึงมักแยกเชื้อซาลโมเนลลาได้จากสิ่งโสโครกจากคนและสัตว์ ซึ่งในอุจจาระของผู้ป่วยและผู้ที่เป็นพาหะ 1 กรัม อาจพบเชื้อซาลโมเนลลามากกว่า 10^{10} เซลล์ (Jone, 1983)

แม้ว่าจะพบปริมาณเชื้อซาลโมเนลลามากกว่า 10^4 ออกานิซึมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจากมูลสัตว์ตลอดจนจากอุจจาระคน แต่ผลของการเจือจาง รวมทั้งกระบวนการบำบัดและกระบวนการกักเก็บ จะทำให้สิ่งโสโครกที่ปนเปื้อนเชื้อซาลโมเนลลามีปริมาณเชื้อลดลงเหลือน้อยกว่า 100 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Jones and Matthews, 1975; Jones และคณะ, 1976)

3 การรอดชีวิตอยู่ในสิ่งแวดล้อมของเชื้อซาลโมเนลลา

มีการพบเชื้อซาลโมเนลลาจากบ่อเก็บสิ่งโสโครก จากสัตว์ และจากกากตะกอน แม้ว่าปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมจะเอื้อต่อการดำรงอยู่ของเชื้อซาลโมเนลลา เช่น มีแหล่งธาตุอาหารที่สมบูรณ์ ความเป็นกรดด่างเหมาะสม แต่ไม่พบว่าเชื้อซาลโมเนลลามีการเจริญเพิ่มจำนวน และมักตายในที่สุด (Doran, Ellis, and McCalla, 1976) แต่ก็มีการพบเชื้อซาลโมเนลลาสามารถมีชีวิตอยู่ได้นานถึง 1069 วันในอุจจาระ (Henning, 1956)

แม้ว่าเชื้อซาลโมเนลลาจะสามารถอยู่รอดในสิ่งแวดล้อมได้เป็นปี แต่การมีชีวิตอยู่รอดของเชื้อซาลโมเนลลาในสิ่งแวดล้อมได้นานเพียงใดนั้น ขึ้นกับสภาวะต่างๆ ในบริเวณนั้น เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสงแดด สภาพการมีออกซิเจน ความเป็นกรดด่าง สิ่งที่เป็นพิษ และจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ รวมทั้งปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาเริ่มต้น (Jone, 1983)

ในด้านที่มีการปนเปื้อนกากตะกอน พบว่าเชื้อซาลโมเนลลาอยู่ได้นานแตกต่างกันไป โดยพบตั้งแต่ 11 วัน จนถึง 9 เดือน อีกทั้งสภาพแวดล้อมที่ทำการสังเกตจะแตกต่างกันไป จึงทำให้จำนวนซาลโมเนลลาที่พบมีความหลากหลาย เช่น สามารถพบเชื้อซาลโมเนลลาตั้งแต่ 0 -125 เซลล์ในดิน 100 กรัม (Thomas, 1967) จนถึงพบที่ปริมาณ 120 เซลล์ในดิน 1 กรัมเท่านั้น (Jones,1983อ้างถึงใน Kampelmacher and Jansen, 1974)

4 ความสามารถในการติดเชื้อซาลโมเนลลาในสภาพธรรมชาติ

จากการระบาดของโรคที่เกิดจากเชื้อซาลโมเนลลาในหลายๆ ครั้ง สาเหตุหนึ่งของการระบาดคือ สัตว์ในทุ่งหญ้ากินหญ้าในบริเวณที่มีการปนเปื้อนกากตะกอน ทั้งนี้พบว่าสามารถแยกเชื้อซาลโมเนลลาจากวัวเมื่อโตเต็มวัยได้มากขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการใช้กากตะกอน โดยวัวที่กินหญ้าในทุ่งหญ้าที่มีการใช้ประโยชน์กากตะกอนสามารถพบเชื้อ 5.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวัวที่กิน หญ้าในที่ไม่มีการปนเปื้อนกากตะกอนไม่พบเชื้อซาลโมเนลลา ทั้งนี้ผลการทดลองได้ผลสอดคล้องกันในประเทศเยอรมัน ฮอลแลนด์ และอังกฤษ (Bicknell, 1972)

แต่ก็มีผลการทดลองที่แสดงว่า โอกาสการติดเชื้อซาลโมเนลลาของสัตว์ที่กินหญ้า ซึ่งปนเปื้อนกากตะกอนมีต่ำ เนื่องจากการระบาดของโรคนั้นมีหลายสาเหตุ เช่น แพร่ระบาดโดย นก แมลง หรือจากการที่สิ่งโสโครกได้ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ (Jone, 1984)

5 ปริมาณการติดเชื้อซึ่งก่อให้เกิดโรค

จากการศึกษาของนักวิจัยต่างๆ ที่ต้องการทราบถึงจำนวนเชื้อซาลโมเนลลาที่สามารถก่อโรคในสิ่งมีชีวิต เช่น พบว่าจำนวนซาลโมเนลลาที่ก่อให้เกิดโรคได้ในวัวจะอยู่ในช่วง 10^5 - 10^{11} เซลล์ ส่วนในวัวโตเต็มวัยพบว่าจำนวนซาลโมเนลลาประมาณ 10^{11} เซลล์จึงก่อให้เกิดโรคได้ และในแกะมีค่าประมาณ 10^8 เซลล์ (De Jong and Ekdahl, 1965; Gronstol, Osborne, and Pethiyagoda, 1974; Jones, 1984)

แม้ว่าสัตว์ที่กินหญ้าในบริเวณที่ใช้ประโยชน์กากตะกอนจะมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ แต่เป็นการยากที่จะทราบถึงปริมาณที่แท้จริงในการติดเชื้อซาลโมเนลลาของสัตว์กินหญ้าเหล่านั้น เนื่องจากการติดเชื้อซึ่งก่อโรคได้ นอกจากจะขึ้นกับปริมาณเชื้อที่รับเข้าไปแล้ว ยังมีปัจจัยร่วมอื่นๆ เช่น สายพันธุ์ของเชื้อซาลโมเนลลา พันธุ์สัตว์ ความแข็งแรงของสัตว์ในขณะนั้น เป็นต้น

การทิ้งพื้นที่ไว้ที่ช่วงเวลาหนึ่งภายหลังการเติมกากตะกอน เพื่อลดปริมาณเชื้อซาลโมเนลลา แต่ทั้งนี้การรอย่อมหมายถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายของการใช้ประโยชน์กากตะกอนแทนปุ๋ย ต้องประเมินร่วมกับค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแปลงวิธีการปฏิบัติรวมทั้งต้องพิจารณารวมถึงค่าใช้จ่ายอันเนื่องจากการแพร่ระบาดของโรคที่อาจเกิดขึ้น (Jones, 1984)

แนวทางในการปฏิบัติเมื่อนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์เป็นการลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อที่อาจเกิดขึ้น แต่ไม่ใช่เป็นการทำให้ปราศจากการติดเชื้อโดยสิ้นเชิง นอกจากกากตะกอนที่นำมาใช้ประโยชน์นั้นจะผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อมาก่อน เช่น การทำปราศจากเชื้อซาลโมเนลลาในกากตะกอนโดยพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสีย เช่น การใส่สารส้ม หรือการนำกากตะกอนไปผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ หรือการนำกากตะกอนไปตากแห้งกลางแสงแดดจัด เป็นต้น (Codfree และคณะ 1983; Schreiber-Rothschild, 1980)