หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

ซาลโมเนลลา

ซาลโมเนลลา สามารถก่อโรคได้ในสัตว์หลายชนิด ตลอดจนกระทั่งคน (Burrow,1985) และที่สำคัญคือ การแพร่ระบาดของโรคที่เกิดจากเชื้อซาลโมเนลลาในสัตว์สามารถก่อให้เกิดการระบาดในคนได้ แม้ว่าซาลโมเนลลาจะไม่เจริญเมื่ออยู่นอกสิ่งมีชีวิต (Burrow, 1985; Hsu, 1989; Joklik และคณะ, 1980; Jone,1983)

1 ซาลโมเนลลาในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการทดลองหาปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาในน้ำทิ้งก่อนการบำบัด และในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวางพบว่า ปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาในน้ำทิ้งก่อนการบำบัด มีมากกว่าในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วถึง 3 เซลล์ต่อ 100 มิลลิลิตร **(ตารางที่ 4.1)** แสดงว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนห้วยขวางสามารถลดปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาได้บางส่วน แต่ไม่สามารถทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วปราศจากเชื้อซาลโมเนลลาได้ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงยังไม่เหมาะที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เนื่องจากยังมีเชื้อซาลโมเนลลาเกินค่ามาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคซึ่งกำหนดไม่ให้มีเชื้อซาลโมเนลลาอยู่เลย (WHO, Geneva, 1984 อ้างถึงใน Tebbutt, 1988)

ด้วยเหตุที่กระบวนการบำบัดน้ำเสียไม่สามารถกำจัดเชื้อซาลโมเนลลาให้หมดได้ จึงมีเชื้อซาลโมเนลลาส่วนหนึ่งตกค้างอยู่ในกากตะกอน ดังตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาในกากตะกอนที่ได้จากส่วนต่างๆ ของกระบวนการบำบัดโดยทำการตรวจสอบจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย 8 แห่ง ซึ่งสามารถพบเชื้อซาลโมเนลลาในกากตะกอนที่ได้จากส่วนต่างๆ ของกระบวนการบำบัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกากตะกอนสดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ กากตะกอนชนิดมีโซฟิลลิคไดเจสเต็ดสลัดจ์ที่หมักในสภาพไร้ออกซิเจน และกากตะกอนชนิดคอนโซลิเดตแอคติเวตเต็ดสลัดจ์สามารถพบเชื้อซาลโมเนลลาในปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 194.0 171.4 และ 114.0 เซลล์ต่อ 100 มิลลิลิตร ทั้งนี้กากตะกอนทั้งสามชนิดสามารถพบเชื้อซาลโมเนลลาในปริมาณสูงกว่ากากตะกอนชนิดอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด (Jone และคณะ, 1980 อ้างถึงใน Jone, 1983)

ตารางที่ 5.1 ปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาจากกระบวนการบำบัดของโรงงานบำบัดน้ำเสีย 8 แห่ง (Jone และคณะ, 1980 อ้างถึงใน Jone, 1983)

Sample	Sample positive (%)	Mean MPN 100 cm^{-3}
Settled sewage	85	20.7
Final effluent	24	1.9
Raw sludge	87	194.0
Mesophilic digested sludge (anaerobic)	96	171.4
Mesophilic digested sludge (aerobic)	38	0.3
Filter press cake	100	56.2
Belt filter press cake	93	14.1
Consolidated activated sludge	92	114.0
Vacuum filter cake	80	1.7
Centrifuge cake	78	16.9
Centrifuge cake	77	22.4
Drying bed cake	69	NT
Consolidated digested sludge	67	3.9
Stockpiled filter press cake	62	9.5
Lagooned sludge (<2 years old)	45	NT
Drying bed cake	33	46.5
Lagooned sludge (<2 years old)	25	NT
Lagooned sludge (>2 years old)	4	NT
Filter press cake (lime + coperas)	0	0.0

หมายเหตุ NT หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

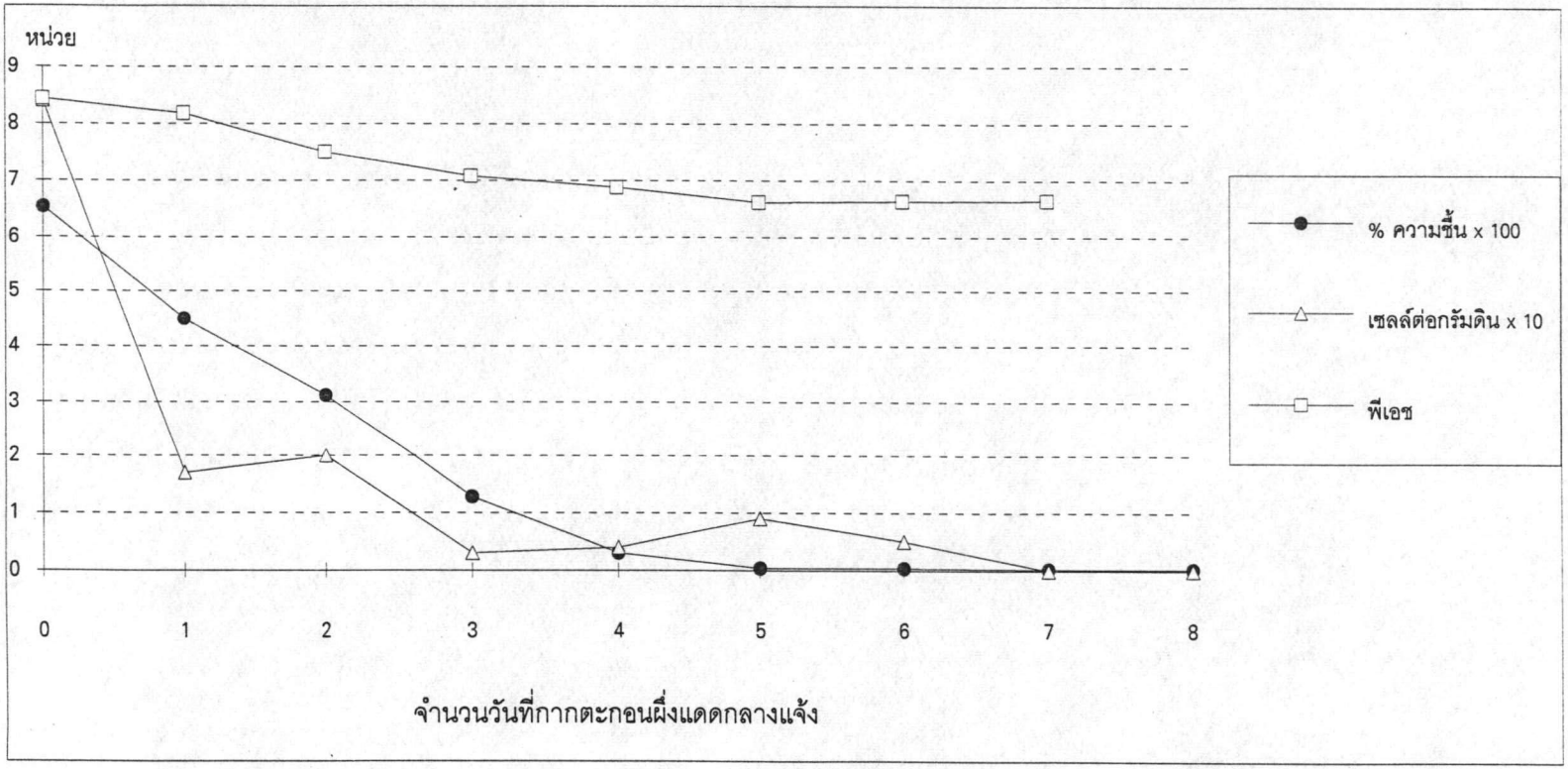
2 ซาลโมเนลลาในกากตะกอนก่อนนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์

เนื่องจากกากตะกอนที่ผ่านกระบวนการบำบัดยังคงมีเชื้อซาลโมเนลลาอยู่ ซึ่งการมีชีวิตรอดของซาลโมเนลลาเป็นปัจจัยหนึ่งที่ระบุถึงความเป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยปริมาณซาลโมเนลลาที่อนุญาตให้มีสูงสุด คือ 10^5 เซลล์ต่อน้ำหนักแห้ง 1 กิโลกรัม (Wallis and Lehman, 1983) หรือเท่ากับ 100 เซลล์ต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณซาลโมเนลลาในกากตะกอนที่นำมาจากโรงงานบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนห้วยขวางพบว่า กากตะกอนขณะที่ยังไม่ผ่านการตากแดดในที่กลางแจ้งมีปริมาณซาลโมเนลลาเท่ากับ 84 เซลล์ต่อกรัมกากตะกอน ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น **(ตารางที่ 4.2)** ซึ่งยังมีปริมาณซาลโมเนลลาอยู่ในเกณฑ์ที่อนุญาตให้มีได้ในกากตะกอน

แต่จากสภาพธรรมชาติพบว่า ปริมาณซาลโมเนลลาที่ทำให้วัวควายในวัยที่เติบโตเต็มที่เกิดโรคได้เมื่อได้รับเชื้อ Salmonella mbandakg น้อยกว่า 3 เซลล์ ต่อน้ำหนักอาหาร 1 กรัม (Jone และคณะ 1982) เช่นเดียวกับในคนที่เป็นโรคเนื่องจากกินช็อคโกแล็ตที่มีเชื้อ Salmonella napoli และ Salmonella eastbourne จำนวน น้อยกว่า 2 หรือ 3 เซลล์ต่ออาหาร 1 กรัม (Craven และคณะ, 1975; Gill และคณะ, 1983 อ้างถึงใน Jone, 1983)

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการยากที่จะระบุได้ว่า ซาลโมเนลลาปริมาณเท่าใดที่สิ่งมีชีวิตรับเข้าสู่ร่างกายแล้วจึงก่อให้เกิดโรค ได้มีการทดลองเพื่อหาปริมาณซาลโมเนลลาที่สามารถก่อให้เกิดโรคของวัวควาย พบว่า อยู่ในช่วง 10^5-10^{11} เซลล์(De Jong and Ekdahl, 1965; Jone และคณะ, 1982; Nazer and Osborne, 1976) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณที่เข้าสู่ร่างกายแล้วทำให้เกิดโรคมีความหลากหลายสูง ทั้งนี้เป็นเพราะมีอีกหลายปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับการก่อให้เกิดโรคในสิ่งมีชีวิต เช่น ความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์ของเชื้อซาลโมเนลลาที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิต สภาพความแข็งแรงของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับเชื้อ รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่สิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ เป็นต้น

ดังนั้นก่อนการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ จึงควรลดปริมาณซาลโมเนลลาที่มีอยู่ในกากตะกอนซึ่งการลดปริมาณซาลโมเนลลาสำหรับประเทศเขตร้อนอย่างเมืองไทยที่น่าสนใจคือแสงแดด ด้วยเหตุผลที่ว่า แสงแดดเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดปริมาณซาลโมเนลลาลงได้ (Jone , 1983; Wallis and Lehman, 1983) จาก**รูปที่ 5.1** จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การนำกากตะกอนไปตากในที่ กลางแจ้งสามารถทำให้ปริมาณซาลโมเนลลาที่มีอยู่เดิมในกากตะกอนลดลงอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถตรวจพบเชื้อซาลโมเนลลาเลยในวันที่ 7 ของการตากกากตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาลดลงควบคู่กับการลดลงของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดและสอดคล้องกับ Jone (1983) ที่ได้ระบุถึง ความชื้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปริมาณเชื้อซาลโมเนลลา จึงอาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการตากกากตะกอนโดยผึ่งแดดเพื่อลดความเสี่ยงต่อเชื้อซาลโมเนลลาคือ 7 วัน เพราะไม่สามารถตรวจพบเชื้อซาลโมเนลลาในกากตะกอน



รูปที่ 5.1 ปริมาณซาลโมเนลลา พีเอชและเปอร์เซ็นต์ความชื้นในกากตะกอนเมื่อนำมาตากในที่กลางแจ้ง

อิทธิพลของโลหะหนักจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน

1 ลักษณะสมบัติของดินและสิ่งทดลองก่อนการทดลอง

ก ลักษณะสมบัติของดิน

จากผลการทดลอง ลักษณะคุณภาพของดินและสิ่งทดลอง **(ตารางที่ 4.3)** เมื่อพิจารณาที่พีเอชของดินเหนียวและดินร่วน จัดว่ามีสภาพเป็นกลางซึ่งเป็นระดับพีเอชที่ยังเหมาะสมสำหรับการเกษตร (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2530) ส่วนอินทรีย์คาร์บอนของดินทั้ง 2 ชนิด พบว่าดินเหนียวมีค่าอินทรีย์คาร์บอนน้อยกว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินร่วน แต่ดินเหนียวมีอินทรีย์ไนโตรเจนมากกว่าดินร่วน ดังนั้น หากพิจารณาถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนซึ่งเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่บ่งบอกถึง ความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินของจุลินทรีย์ พบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินเหนียวมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินร่วน แต่ทั้งนี้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินทั้งสองชนิดยังมีค่าใกล้เคียง 10 ซึ่งถือว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในระดับที่จะไม่ก่อให้เกิดสภาพขาดอาหารของพืช อันเนื่องจากการเกิดแอสสิมิเลชันโดยจุลินทรีย์ดิน (สมศักดิ์ วังใน, 2528) เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างของดินทั้งสองพบว่า จากระดับเคลย์ ซิลท์ แซนด์ ได้จัดดินเหนียวอยู่ในดินประเภท ซิลตีเคลย์ และดินร่วนอยู่ในประเภท แซนดีโลม (Brady, 1990)

ข ลักษณะสมบัติของสิ่งทดลอง

สิ่งทดลองที่เติมได้แก่ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอน พบว่า สิ่งทดลองส่วนใหญ่มีสภาพค่อนข้างเป็นกรด คือมีพีเอช ต่ำกว่า 6.5 เล็กน้อย โดยปุ๋ยเคมีมีสภาพความเป็นกรดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองด้วยกัน ส่วนค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสิ่งทดลองทั้งสามชนิดมีค่าต่ำกว่า 10 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่จะเติมลงดินเพื่อเป็นปุ๋ยและไม่เกิดปัญหาจากกระบวนการแอสสิมิเลชันโดยจุลินทรีย์ดิน

ค ปริมาณโลหะหนักในดินและสิ่งทดลองก่อนดำเนินการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้จากดินและสิ่งทดลอง(**ตารางที่4.4)** พบว่า แคดเมียม ทองแดง และตะกั่ว สกัดได้ปริมาณมากที่สุดจากปุ๋ยอินทรีย์ ส่วนแมงกานีส และนิเกิล สกัดได้ปริมาณมากที่สุดจากกากตะกอน ส่วนเหล็กสกัดได้ปริมาณมากที่สุดจากดินร่วน แต่ปริมาณโลหะหนักทุกชนิดที่สกัดได้พบว่ามีปริมาณต่ำกว่าปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมรับให้มีในกากตะกอนของกลุ่มประเทศยุโรป **(ตารางที่จ1)** ทั้งนี้ปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้จากตัวอย่างต่างๆ แตกต่างกันไปเนื่องจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น กิจกรรมการใช้น้ำ ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิต ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ เป็นต้น

เนื่องจากยังไม่พบงานวิจัยสำหรับสภาพเมืองไทยที่ระบุถึงปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอน เมื่อเติมลงดินแล้วไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อจุลินทรีย์ดิน ดังนั้นปริมาณ

โลหะหนักที่วิเคราะห์ได้จากดินและสิ่งทดลอง จึงเป็นการบอกถึงเพียงระดับปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้ขณะก่อนทำการทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการอธิบายถึง ปริมาณโลหะหนักในดินภายหลังดำเนินการทดลองซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ จ

ทั้งนี้ปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้ ไม่สามารถใช้กับข้อกำหนดในต่างประเทศได้ทั้งหมด เนื่องจากมีความแตกต่างของสภาพการทดลองหลายประการ เช่น ลักษณะสภาพภูมิอากาศ ลักษณะและองค์ประกอบของดินและสิ่งทดลอง สภาพแวดล้อมขณะดำเนินการทดลอง วิธีวิเคราะห์ทางสถิติ วิธีการสกัด ตลอดจนดัชนีที่ใช้บ่งถึงความเป็นพิษเป็นต้น

2 กิจกรรมจุลินทรีย์ดินในการย่อยสลายอินทรีย์สาร

ก. อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่อัตราเติมสิ่งทดลอง 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

จากผลการทดลอง (**ตารางที่4.5**) พบว่า ผลการเติมสิ่งทดลอง 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอนในอัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ทั้งในดินเหนียวและดินร่วนไม่ทำให้อัตราการ ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในแต่ละตำรับทดลองซึ่งมีอัตราเติมสิ่งทดลองเท่ากัน มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในดินมีความสำคัญมากกว่าการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ได้จากสิ่งทดลอง เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตำรับทดลองควบคุมซึ่งไม่มีการเติมสิ่งทดลอง ไม่มีความแตกต่างจากตำรับทดลองที่เติมสิ่งทดลอง อีกทั้งในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมี ซึ่งมีออกานิคคาร์บอนต่ำมาก ก็สามารถให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปริมาณที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับตำรับทดลองอื่นๆ ที่อัตราเติมเดียวกัน

2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจากดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอน 4 ระดับ

จาก**ตารางที่4.5** ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยในดินทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามอัตราเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราเติมกากตะกอน 20 และ 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์จะให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยมีความแตกต่างทางสถิติ การที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ แล้วติดตามกิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมกากตะกอน เพื่อพิจารณาถึงการทด

แทนการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในดินสำหรับเพาะปลูกพืชผัก ในตำรับทดลองที่อัตราเติมกากตะกอน 20 และ 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ อาจเนื่องจากความสามารถในการจับกันระหว่างอนุภาคเคลย์ในดินและสารประกอบอินทรีย์วัตถุที่เติมลงในดิน โดยดินมีคุณสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ที่ดี (Brady, 1990)

ดังนั้น เมื่อเติมกากตะกอนลงดิน อินทรีย์วัตถุจากกากตะกอนส่วนหนึ่งจับไปกับอนุภาคเคลย์ และอินทรีย์วัตถุอีกส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลของการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ก๊าซคาร์บอนไซออกไซด์ขึ้น

จากการทดลอง แม้ว่าจะเพิ่มอัตราเติมกากตะกอนถึงอัตราเติมกากตะกอนเป็น 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ แต่ยังไม่เพียงพอในการที่จะทำให้ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่อัตราเติมกากตะกอนและปุ๋ยอินทรีย์ที่ 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ อาจเป็นเพราะอนุภาคเคลย์ยังสามารถจับกับอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มขึ้นได้ เป็นผลให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในส่วนที่ถูกย่อยสลายมีในระดับที่ใกล้เคียงกันของอัตราเติมกากตะกอน 20 และ 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์และอัตราเติมปุ๋ยอินทรีย์ 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยแต่ละอัตราเติมจึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการเติมกากตะกอนลงในดิน เพื่อทดแทนการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ที่อัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ สารมารถเติมกากตะกอนลงในดินถึงอัตราเติม 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ได้ทั้งในดินเหนียวและดินร่วน โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างทางกิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับกิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่เกิดขึ้นภายหลังเติมปุ๋ยอินทรีย์ที่อัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

เมื่อเวลาดำเนินการทดลองผ่านไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งได้จากผลรวมของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทดลองที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ แต่ละอัตราเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันมากขึ้น นั่นหมายถึงว่ากิจกรรมจุลินทรีย์ดินที่เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์สารจากกากตะกอนแต่ละระดับต้องการใช้เวลาเพื่อการย่อยสลาย ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะอินทรีย์วัตถุที่ไม่ถูกย่อยสลายในระยะแรกซึ่งมีปริมาณที่มากหรือน้อยแตกต่างกันตามอัตราเติมกากตะกอน สามารถเกิดการย่อยสลายได้ในช่วงเวลาดำเนินการทดลองต่อมา จึงส่งผลให้ในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนในอัตราที่สูงกว่า มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งได้จากผลรวมของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทดลองที่เก็บทุก 2 สัปดาห์มากขึ้นตลอดเวลาดำเนินการทดลอง 16 สัปดาห์ จึงอาจใช้แนวโน้มเส้นกราฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งได้จากผลรวมของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทดลองที่เก็บตัวอย่างแต่ละครั้ง เป็นดัชนีหนึ่งเพื่อบอกถึงระยะเวลาที่จะเติมกากตะกอนลงดินอีกครั้ง

3) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจากดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน ที่เติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่ากับอัตราการเติมกากตะกอน 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ **(ตารางที่4.5)** พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ให้ผลเช่นเดียวกับทั้งในดินเหนียวและดินร่วน ซึ่งอาจเป็นเพราะอิทธิพลของคุณสมบัติบางประการของดิน เช่น การที่อนุภาคเคลย์ในดินมีความสามารถในการจับกับโลหะหนักสูง โดยโลหะหนักที่เติมลงไปอาจไปจับกับอนุภาคเคลย์จึงเป็นผลให้ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงและแม้ว่าโลหะหนักที่เติมลงไปจะเพิ่มความเข้มข้นถึง 4 เท่า แต่อนุภาคเคลย์ก็ยังสามารถจับกับโลหะหนักที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นนี้ได้ ดังนั้นความเป็นพิษของโลหะหนักในระดับที่ทำการทดลองจึงไม่สามารถไปมีผลกระทบต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินได้ หรืออาจเนื่องจากการที่อินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดินมีความสามารถจับกับโลหะหนักได้ดี (cf. Hanntra et al, 1985; Karapanagiotis, 1991; Mathur, 1985) อาจกล่าวได้ว่าโลหะหนักทั้ง 7 ชนิดคือ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย ในปริมาณเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ไม่มีผลกระทบต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกกไซด์เป็นดัชนีบ่งชี้ ทั้งนี้ปรากฏเช่นเดียวกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน

4) การเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนักในระยะเวลา 16 สัปดาห์

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลจากการย่อยสลาย จะมีปริมาณสูงที่ช่วงเวลาหนึ่ง โดยจากผลการทดลองพบว่า ภายหลังเติมกาก ตะกอนทันทีจนถึงจนถึงภายหลังเติมกากตะกอนประมาณ 4 สัปดาห์ จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในทุกตำรับทดลอง ซึ่งอาจเนื่องจากกากตะกอนเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุให้กับจุลินทรีย์ดิน (Coppola, 1983; Varanka et al., 1976) ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับ Agbim (1977) ซึ่งได้ระบุไว้ว่า ภายหลังการเติมอินทรีย์วัตถุ จะมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นที่ช่วงระยะเวลาหนึ่งและ Terry (1979) พบว่าการเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งปรากฏในช่วง 2 - 3 สัปดาห์แรกของการใส่กากตะกอนลงในดินเป็นสาเหตุให้มีการเพิ่มการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้จุลินทรีย์ดินจะใช้สารประกอบง่ายๆก่อน เช่น น้ำตาล หรือคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน (Pichtel et al., 1989; Rebhun, M., and Manka, J. 1971, Schumberg et al., 1980) รวมทั้งสารประกอบคาร์บอนที่อยู่ในรูปสารละลายและเคลื่อนที่ง่าย (Hartenstein .,1981, Hsieh et al., 1981) และยังพบว่าในระยะที่มีการใช้สารประกอบเหล่านี้ โลหะหนัก

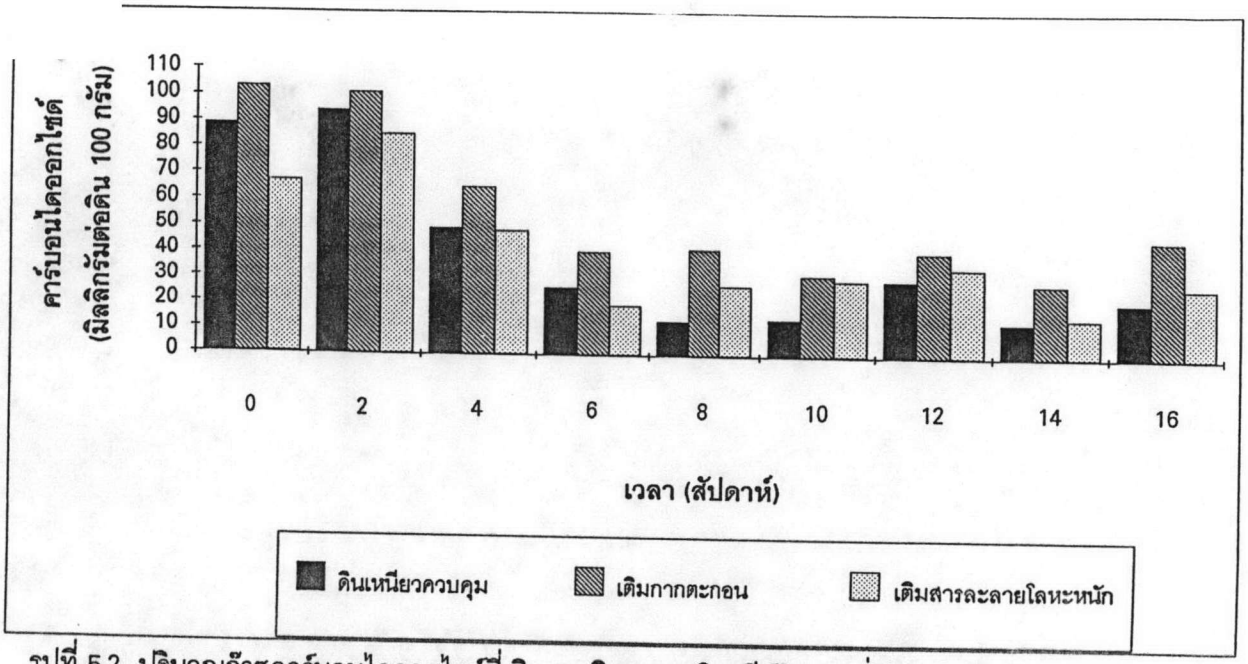
ที่ปนเปื้อนอยู่ในดินจะไม่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายแต่อย่างใด (Ebregt and Bolddeijn, 1977; Tyler, 1975)

เมื่อเวลาทำการทดลองหลังผ่านไป 4 สัปดาห์ พบว่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะน้อยลง ซึ่งอาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ดินต้องการระยะเวลาหนึ่งในการปรับตัว เพื่อใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนกว่า เนื่องจากสารประกอบที่ถูกใช้ง่าย เริ่มเป็นปัจจัยจำกัด (Alexander, 1977; Gilmour, J.T., and Gilmour,C,M. 1980; Hsieh et al., 1981; Terry et al., 1979) และ Foster (1980) ได้ระบุถึงการขาดธาตุอาหาร 1 ชนิด หรือมากกว่า จะทำให้กระบวนการที่ทำให้มีอัตราการหายใจในระยะเริ่มต้นถูกยับยั้ง

นอกจากนี้ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป อาจมีสาเหตุมาจากการที่จุลินทรีย์เริ่มมีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้างใหญ่และซับซ้อน เช่น พวกเซลลูโลส แป้ง ทำให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ไปมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเหล่านี้ (Ebregt and Blodeijn, 1977; Tyler, 1975) ทั้งนี้ด้วยการสนับสนุนจากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างดินที่เติมกากตะกอนและดินที่เติมสารละลายโลหะหนัก พบว่าทั้ง 2 ตำรับทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างสูง ซึ่งหมายความว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระยะเวลาต่างๆ จาก 2 ตำรับทดลองนี้ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างมาก และเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน **(รูปที่ 5.2 และ 5.3)**

ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอน พบว่า อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยระหว่าง 2 ตำรับทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ **(ตารางที่ 4.7)** ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าความแตกต่างกันของชนิดดินไม่มีอิทธิพลเพียงพอ ที่จะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทั้งสองภายหลังเติมกากตะกอน มีความแตกต่างกัน หรือสาเหตุของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่แตกต่างกันในดินสองชนิดนี้ อาจเป็นเพราะอิทธิพลขององค์ประกอบในกากตะกอน เช่น อินทรีย์วัตถุ โลหะหนักเป็นต้น ทั้งนี้ด้วยการสนับสนุนจากผลการทดลอง ที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างตำรับทดลองของดินเหนียวที่เติมกากตะกอน และตำรับทดลองของดินร่วนที่เติมกากตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางเดียวกัน และความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสองตำรับทดลองนี้มีค่อนข้างสูง

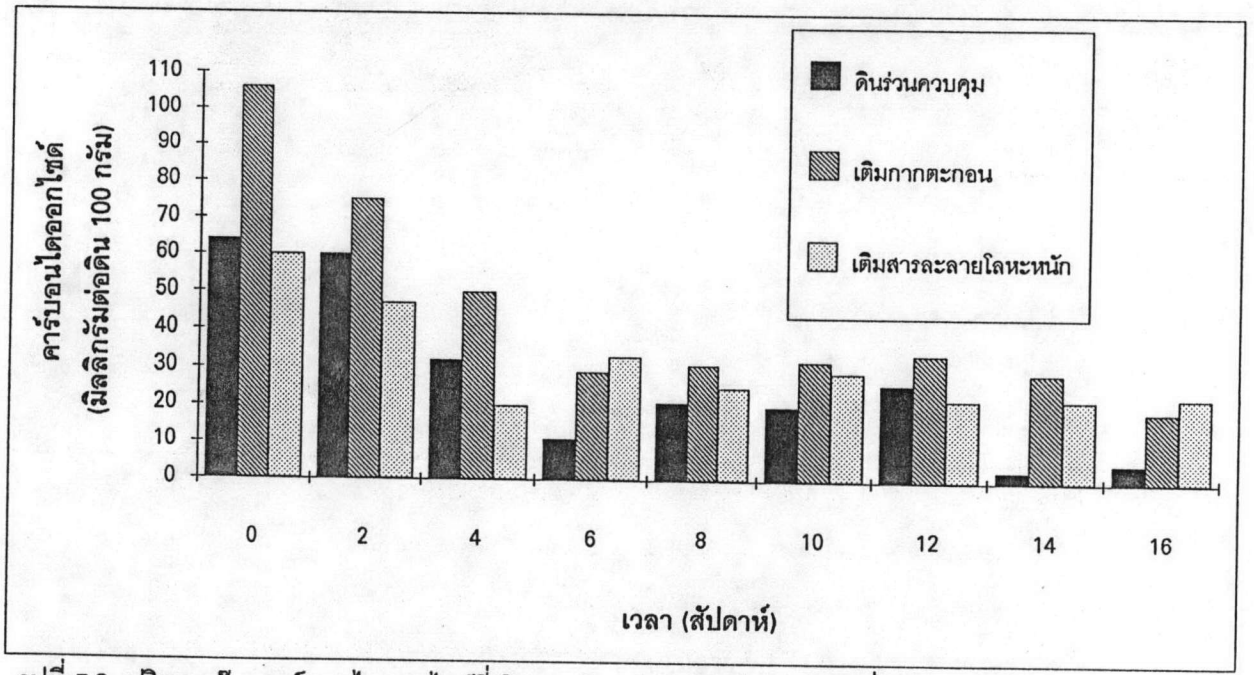
จึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทดลองทั้ง 2 ประเภทคือ ดินเหนียวและดินร่วน ที่เติมกากตะกอน และการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน จะมีลักษณะของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกัน โดยที่จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วง 4 สัปดาห์แรก แล้วจะค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง 16 สัปดาห์



รูปที่ 5.2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน 96 ชั่วโมง ในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับ และสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.3 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน 96 ชั่วโมง ในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินร่วนที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับ และสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ

ข. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

1) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินเหนียวและดินร่วนที่อัตราเติมสิ่งทดลอง 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

ภายหลังเติมสิ่งทดลองสามชนิดซึ่งได้แก่ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอน ในอัตราเติมที่เท่ากันคือ 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ในดินเหนียวและดินร่วน พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีเพียงชนิดเดียวที่มีค่าน้อยที่สุด และให้ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตำรับทดลองควบคุม ตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยอินทรีย์ และตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปุ๋ยอินทรีย์มีค่าไนโตรเจนสูงมากถึง 3.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมลงไปในดินจึงเป็นการเพิ่มค่าไนโตรเจนในดิน ซึ่งเป็นผลให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีลดลงมาก

2) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอน 4 ระดับ

ภายหลังเติมกากตะกอนลงในดินเหนียวและดินร่วน พบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในแต่ละตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับทดลองควบคุม ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในกากตะกอน **(ตารางที่ 4.3)** ดังนั้นเมื่อเติมกากตะกอนลงในดินจึงมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่แตกต่างทางสถิติกับดินควบคุม อีกทั้งไม่มีความแตกต่างระหว่างตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนในอัตรา 20 40 60 และ80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

ค. พีเอช

1) ค่าพีเอชเฉลี่ยของดินเหนียวและดินร่วนที่อัตราเติมสิ่งทดลอง 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

ผลของการเติมสิ่งทดลองซึ่งได้แก่ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอน ด้วยอัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ลงในดินเหนียวและดินร่วน พบว่า ค่าพีเอชในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีต่ำลงมาก อาจเป็นผลจากปุ๋ยเคมีซึ่งมีความเป็นกรดสูง ส่วนในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยอินทรีย์และเติม

กากตะกอนไม่พบว่า มีค่าพีเอชแตกต่างจากตำรับทดลองควบคุม อาจเป็นเพราะอัตราเติมที่ 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ของปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนยังอยู่ในศักยภาพของดินที่จะรับด้วยคุณสมบัติความเป็นบัฟเฟอร์ของดินไว้ได้

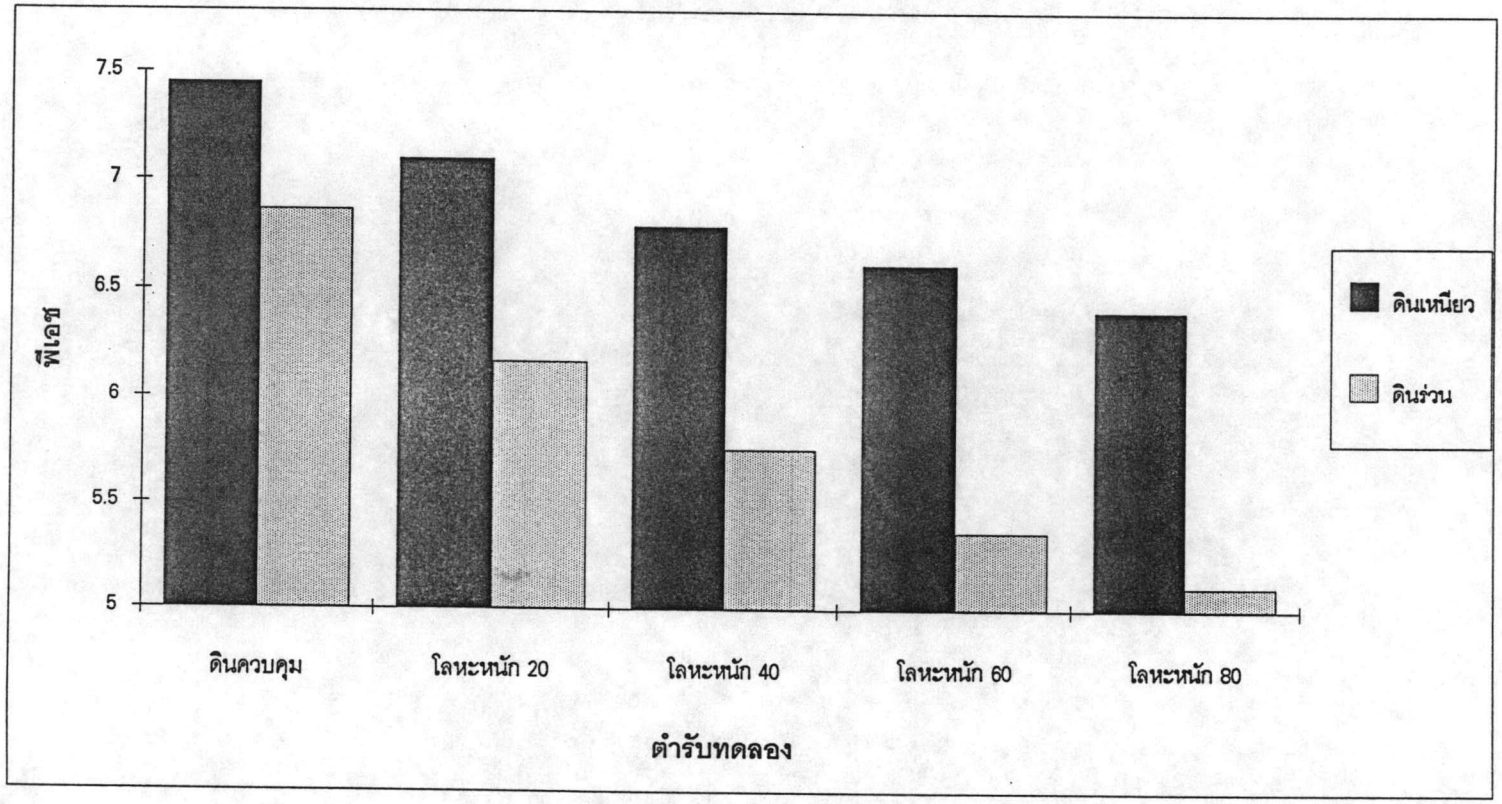
2) ค่าพีเอชเฉลี่ยของดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอน 4 ระดับ

ค่าพีเอชเฉลี่ยในแต่ละระดับทดลองภายหลังเติมกากตะกอน ในดินเหนียวและดินร่วน พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเติมกากตะกอนในดินทั้ง 2 ชนิด แต่การลดลงของค่าพีเอชไม่ชัดเจน เมื่อเทียบกับการลดลงของพีเอชเมื่อเพิ่มสารละลายโลหะหนัก ซึ่งการลดลงของพีเอชในดินภายหลังเติมกากตะกอน อาจเป็นเพราะอิทธิพลของโลหะหนักในกากตะกอนที่หลุดออกมาในรูปสารละลายแล้วเข้าแย่งจับกับอนุภาคเคลย์ หรือสาเหตุจากอินทรีย์วัตถุจากกากตะกอนถูกย่อยสลายแล้วเกิดเป็นกรดอินทรีย์ จึงทำให้พีเอชในดินลดลง (Brady, 1990) **(รูปที่ 5.4)** แต่ทั้งนี้ การที่พีเอชลดลงภายหลังเติมกากตะกอน ดินยังมีสภาพที่เป็นกลาง โดยเฉพาะการเติมกากตะกอนที่อัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ มีค่าพีเอชไม่แตกต่างจากดินควบคุมและดินที่เติมปุ๋ยอินทรีย์ ในระดับที่ใช้สำหรับปลูกพืชผักคือ 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน

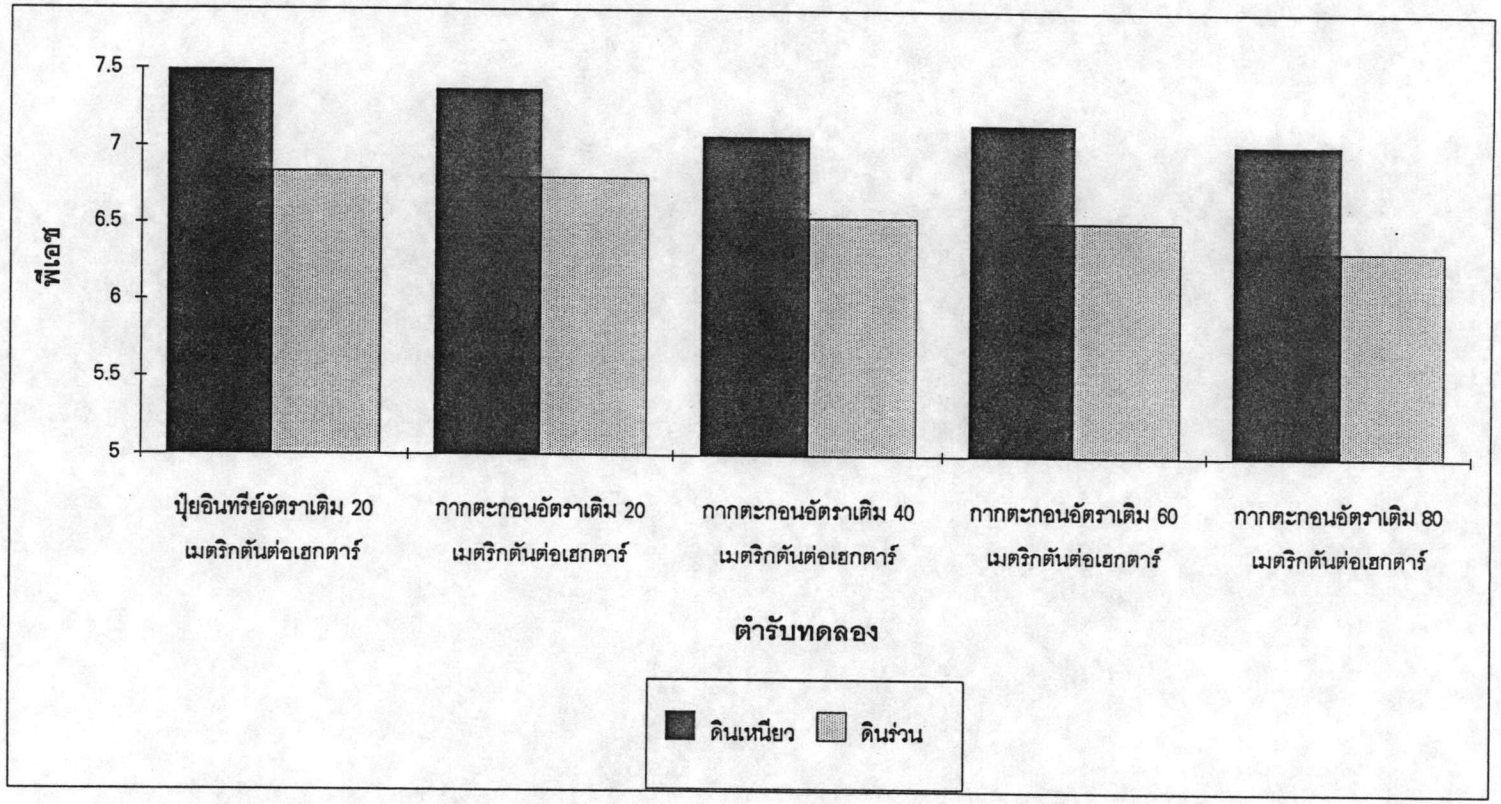
3) ค่าพีเอชเฉลี่ยของดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

ภายหลังเติมสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ระดับลงในดินเหนียวและดินร่วน พบว่าค่าพีเอชลดลงเมื่อเทียบกับดินควบคุม นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโลหะหนักลงในดินเป็นผลให้พีเอชยิ่งลดต่ำลง **(รูปที่ 5.5)** ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากแคทไอออนจากสารละลายโลหะหนักที่เติมลงดินมีความสามารถในการแย่งจับที่ผิวอนุภาคเคลย์ได้ดีกว่าไฮโดรเจนไอออน ทำให้ไฮโดรเจนไอออนที่จับอยู่ที่ผิวอนุภาคเคลย์ซึ่งมีความสามารถในการจับกับผิวอนุภาคเคลย์น้อยกว่า หลุดมาอยู่ในสารละลาย เมื่อวัดค่าพีเอชจากสารละลายดิน (อัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 5) ค่าพีเอชจึงลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโลหะหนักลงในดิน จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดไอออนซึ่งจะเป็นผลให้ไฮโดรเจนไอออนในสารละลายมีมากขึ้น ค่าพีเอชจึงลดลงมากขึ้น (Brady, 1990)

4) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเฉลี่ยของดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนักในระยะเวลา 16 สัปดาห์



รูปที่ 5.4 ค่าพีเอชเฉลี่ยจากดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ในดินเหนียวและดินร่วนที่ผสม สารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

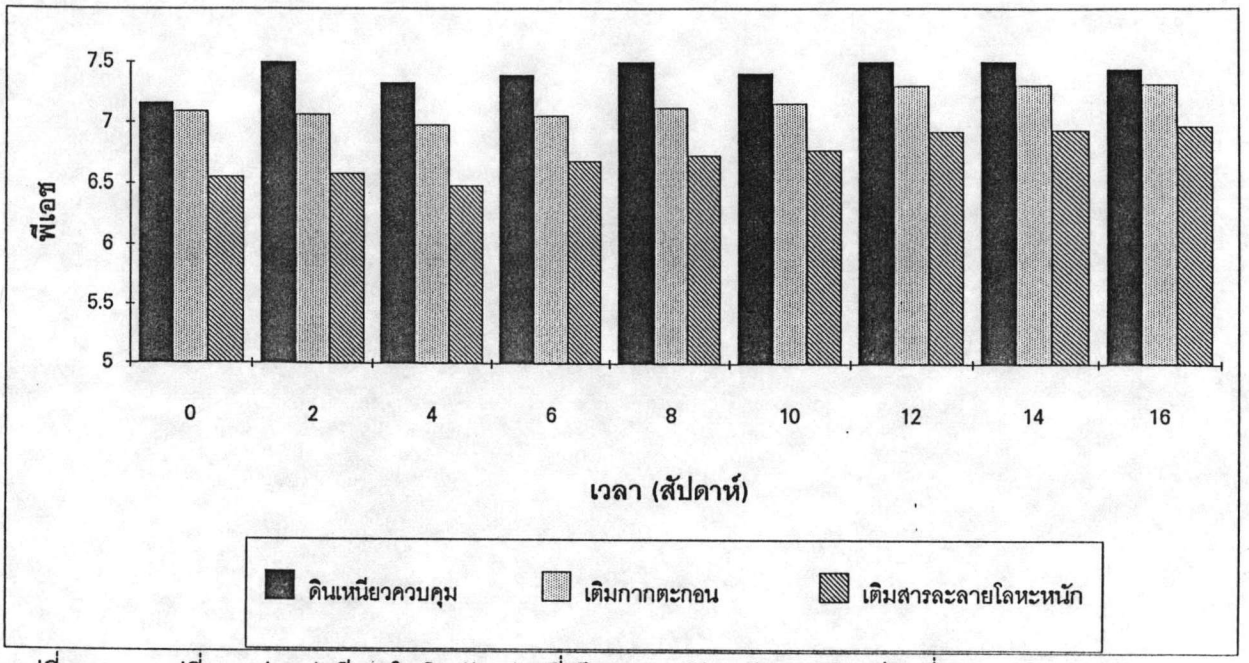


รูปที่ 5.5 ค่าพีเอชเฉลี่ยจากดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ในดินเหนียวและดินร่วนที่ผสม ปุ๋ยเคมี และกากตะกอน 4 ระดับ ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

ค่าพีเอชในดินเหนียวและดินร่วน ภายหลังการเติมสารละลายโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ พบว่า มีการลดลงของพีเอชอย่างเห็นได้ชัดและลดลงต่ำสุดในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการทดลองจากนั้นพีเอชจะสูงขึ้น แล้วคงที่ในช่วงใกล้สิ้นสุดการทดลอง สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงพีเอชซึ่งลดลงทันที ภายหลังเติมสารละลายโลหะหนัก อาจอธิบายได้ว่า เป็นผลจากการที่สารละลายโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ที่เติมลงในดินให้แคทอิออน ซึ่งจะเข้าไปแย่งจับกับอนุภาคเคลย์ แล้วทำให้ไฮโดรเจนอิออนที่ถูกแย่งจับหลุดออกมาอยู่ในรูปสารละลาย (อรรณพ, 2535 อ้างถึงใน Kuntze et al., 1984) และภายหลังเติมสารละลายโลหะหนักที่ระยะเวลาหนึ่งค่าพีเอชจะมีการปรับตัวสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะผลของกิจกรรมจุลินทรีย์ดิน โดยแคทอิออนส่วนหนึ่งจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ (Gadd, 1992) และส่วนหนึ่งอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Alloway, 1991) ปริมาณแคทอิออนจากสารละลายโลหะหนักที่จะเข้าแย่งจับกับอนุภาคเคลย์จึงน้อยลง ไฮโดรเจนอิออนที่ถูกแทนที่ด้วนแคทอิออนจึงหลุดออกมาในสารละลายน้อยลง **(รูปที่ 5.6 และ 5.7)**

ส่วนค่าพีเอช ในดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอน **(รูปที่ 5.6 และ 5.7)** พบว่า พีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพีเอชภายหลังเติมสารละลายโลหะหนัก คือมีการลดลงของพีเอชที่ระยะเวลาประมาณหนึ่งเดือนซึ่งจะให้พีเอชต่ำสุด แล้วมีการปรับตัวสูงขึ้น และคงที่ในช่วงใกล้สิ้นสุดการทดลอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชภายหลังการเติมกากตะกอน อาจเนื่องจากกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในดิน เช่น กิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์สารที่เติมลงในดินโดยจุลินทรีย์ดิน และปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างตำรับทดลองที่เติมสารละลายโลหะหนัก และตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนในระยะเวลาต่างๆ พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของ 2 ตำรับทดลองนี้มีความสัมพันธ์กันและมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชในทิศทางเดียวกัน ซึ่งปรากฏเช่นเดียวกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพีเอชในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน อาจเนื่องจากอิทธิพลของโลหะหนักในกากตะกอนส่วนหนึ่ง แต่การเปลี่ยนแปลงพีเอชในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนจะมีช่วงแคบกว่าในตำรับทดลองที่เติมสารละลายโลหะหนัก อาจเนื่องจากอิทธิพลของอินทรีย์วัตถุในกากตะกอนโดยเป็นแหล่งสำคัญในการจับกับโลหะหนัก (King and Dunlop, 1982)

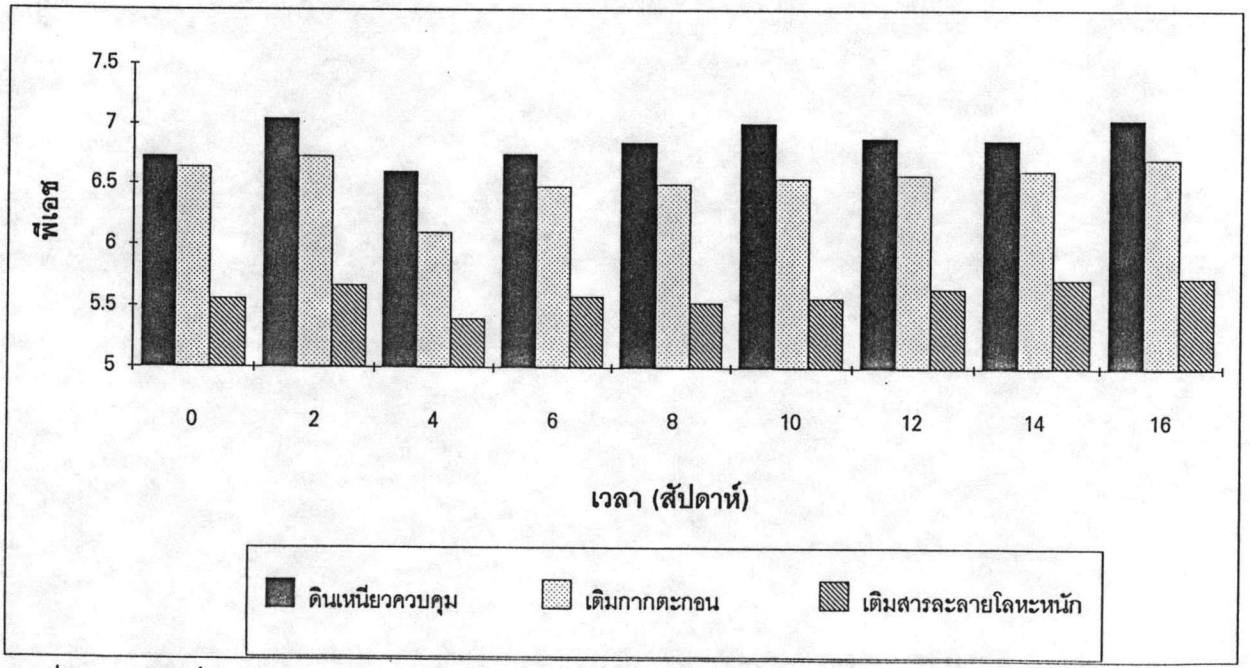
นอกจากนี้ ผลจากการเปรียบเทียบค่าพีเอชเฉลี่ยภายหลังเติมกากตะกอนระหว่างดินเหนียวและดินร่วน พบว่า ค่าพีเอชเฉลี่ยในดินเหนียวสูงกว่าค่าพีเอชเฉลี่ยในดินร่วน ซึ่งอาจเป็นเพราะคุณสมบัติของดินเหนียวก่อนเติมกากตะกอน เช่น ค่าพีเอชของดินเหนียวก่อนเติมกากตะกอน องค์ประกอบต่างๆ ในดินเหนียวที่ช่วยรักษาค่าพีเอชไว้ไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก เป็นต้น และแม้ว่าค่าพีเอชในดินเหนียวจะสูงกว่าในดินร่วน แต่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างตำรับทดลองของดินเหนียวที่เติมกากตะกอนและตำรับของดินร่วนที่เติมกากตะกอน จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไปในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างสองตำรับทดลองนี้อยู่ใน



รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับ และสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินร่วนที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับ และสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ

ระดับปานกลาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอนนี้อาจจะได้รับอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างชนิดดิน และพร้อมกันนี้ก็ได้รับอิทธิพลจากสารประกอบในกากตะกอนที่เติมลงในดินด้วย

ง. กลุ่มจุลินทรีย์ดิน

1) ปริมาณจุลินทรีย์เฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนที่อัตราเติมสิ่งทดลอง 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

จาก**ตารางที่ 4.11** ปริมาณจุลินทรีย์ดินเฉลี่ยทั้ง 3 กลุ่ม ในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยอินทรีย์ และในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน ณ อัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ไม่แตกต่างกัน แต่ทั้ง 2 ตำรับทดลองนี้มีปริมาณจุลินทรีย์ดินแตกต่างจากตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณแอคติโนมัยซีทเฉลี่ย ซึ่งมีค่าต่ำลงภายหลังเติมปุ๋ยเคมี ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะแอคติโนมัยซีทมักมีปริมาณมากในปุ๋ยที่ได้จากวัตถุทางธรรมชาติซึ่งมีอินทรีย์คาร์บอนสูง เช่น ในกองปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก เป็นต้น (สมศักดิ์ วังใน, 2528) อาจเป็นไปได้ที่การเติมปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนเป็นการเพิ่มอินทรีย์คาร์บอน ที่เหมาะสมกับการเจริญของแอคติโนมัยซีท ในทางกลับกันปริมาณแอคติโนมัยซีทลดลงในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมี อาจเป็นเพราะอิทธิพลของพีเอชในดินภายหลังการเติมปุ๋ยเคมีซึ่งมีสภาพค่อนข้างเป็นกรด โดยที่แอคติโนมัยซีท มักจะเจริญได้น้อยในดินที่มีสภาพเป็นกรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มี พีเอช ต่ำกว่า 5 แอคติโนมัยซีทจะไม่สามารถเจริญอยู่ได้ อีกทั้งปุ๋ยเคมีมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนต่ำมาก แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์ดินทั้ง 3 กลุ่มในดิน 2 ชนิด คือดินเหนียวและดินร่วนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแต่ละตำรับทดลอง

2) ปริมาณจุลินทรีย์เฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอน 4 ระดับ

จากการเติมกากตะกอน 4 ระดับ ลงในดินเหนียวและดินร่วน **(ตารางที่4.11)** เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของจุลินทรีย์ดินทั้งสามกลุ่มแตกต่างกันไปคือ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีทมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยในดินร่วนที่อัตราเติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ จุลินทรีย์ดินทั้ง 3 กลุ่ม อันได้แก่ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซัท มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุด

ส่วนในดินเหนียวนั้น ภายหลังเติมกากตะกอนแต่ละระดับ จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ดินทั้งสามกลุ่มแตกต่างกันไป โดยที่อัตราเติมกากตะกอน 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ จะมีผลทำให้ ปริมาณแบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท ในสองตำรับทดลองนี้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ขณะที่ตำรับทดลองของดินเหนียวที่อัตราเติมกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ จะมีปริมาณแบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราเติมกากตะกอนในระดับอื่นๆ ส่วนตำรับทดลองของดินเหนียวที่อัตราเติมกากตะกอน 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ จะให้ปริมาณแบคทีเรีย และแอคติโนมัยซีท เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนอัตรา 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ แต่ก็พบว่า ที่อัตราเติมกากตะกอน 40 เมตริกตันมีปริมาณราสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนระดับอื่นๆ

จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ในดินชนิดเดียวกันแต่ต่างระดับการเติมกากตะกอน จะส่งผลให้ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแตกต่างกันไป และไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน เมื่อเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน ทั้งนี้เนื่องจาก แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท มีความต้องการปริมาณอาหารในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มจำนวนแตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากในดินเหนียวนั้น ราจะเจริญและเพิ่มจำนวนได้มากที่สุด ที่อัตราเติมกากตะกอน 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ในขณะที่แบคทีเรีย และแอคติโนมัยซีท สามารถเจริญและเพิ่มจำนวนไม่แตกต่างกันในตำรับทดลองที่อัตราเติมกากตะกอน 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ ส่วนในดินร่วน แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีทมีปริมาณที่มากสุดในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนอัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

นอกจากนี้ ปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับการเจริญและเพิ่มจำนวนของ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท คือชนิดของดิน โดยจากการเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท ระหว่างดินเหนียวและดินร่วน เมื่อเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน 4 ระดับ พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรีย รา และ แอคติโนมัยซีท มีความแตกต่างกันไป เช่น ในดินเหนียวเมื่อเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน 4 ระดับ พบว่า จะมีผลทำให้ปริมาณราในตำรับทดลองที่อัตราเติมกากตะกอน 40 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ มีปริมาณมากที่สุด ขณะที่ในดินร่วน ผลของการเติมกากตะกอนทั้ง 4 ระดับ ไม่ทำให้ปริมาณราในแต่ละอัตราเติมมีความแตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นชนิดดินที่แตกต่างกันนี้ จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ดินแต่ละกลุ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน 4 ระดับ แตกต่างกัน

ทั้งนี้ ในดินแต่ละชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินทั้งสามกลุ่ม ภายหลังเติมกากตะกอนนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่เกิดขึ้นโดยอ้างถึงการวิเคราะห์ทางสถิติ แต่เมื่อคำนึงถึงกิจกรรมจุลินทรีย์ โดยพิจารณาร่วมกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละอัตราเติม ซึ่งก็พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินแต่ละกลุ่ม ในแต่ละระดับการเติมกากตะกอน

ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างในการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แต่ละระดับการเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินทั้งสามกลุ่มที่ทำการศึกษานี้ เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในแต่ละอัตราเติมกากตะกอน

3) ปริมาณจุลินทรีย์เฉลี่ยในดินเมื่อเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

ผลการเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับลงในดิน พบว่าแต่ละตำรับทดลองมีปริมาณแบคทีเรียและแอคติโนมัยซีทไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับตำรับทดลองควบคุม ส่วนราแม้ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนักในดินเหนียว แต่ก็พบว่า ในดินร่วนที่ระดับการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอนที่อัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ (สารละลายโลหะหนัก 80) มีปริมาณราลดลง **(ตารางที่ 4.11)** ดังนั้นเมื่อมองในภาพรวมของ ปริมาณจุลินทรีย์ดินภายหลังเติมสารละลายโลหะหนักในดินทั้ง 4 ระดับ พบว่าแทบจะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินเฉลี่ยเลย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินร่วมกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์ดินภายหลังเติมโลหะหนักในรูปสารละลาย 4 ระดับ ทั้งในดินเหนียวและดินร่วน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากโลหะหนักที่เติมลงไปในดินมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์เดิมภายในดินให้เห็นอย่างเด่นชัด โดยโลหะหนักที่เติมลงไปจะไปจับกับอนุภาคเคลย์ของดินส่วนหนึ่ง ทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักที่เติมลงในดินลดลง ขณะเดียวกันมีจุลินทรีย์ดินบางกลุ่ม เช่น ราที่สามารถใช้ประโยชน์โลหะหนักที่เติมลงในดินได้ ราจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Hattori, 1989; Ohya et al., 1985) ทั้งนี้ในการทดลองของ Hattori (1991) พบว่าการที่รามีการเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแคดเมียมที่เพิ่มลงไปสามารถเป็นประโยชน์ต่อรา ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุประเภทที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ง่าย แต่ Doelman (1985) ได้ให้เหตุผลในกรณีของการเพิ่มจำนวนของราว่า เนื่องจากคุณสมบัติโดยทั่วไปของพวกยูคาริโอท (เช่น รา) จะทนต่อโลหะหนักได้มากกว่าพวกโปรคาริโอท (เช่น แบคทีเรีย) ดังนั้นปริมาณโลหะหนักที่เติมลงไปไม่มีผลกระทบต่อรา นอกจากนี้ยังมีเหตุผลอื่นๆ อีกคือ จากการที่กลุ่มจุลินทรีย์ในดินจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันภายในระบบนิเวศหนึ่งๆ เมื่อแบคทีเรียถูกยับยั้งไม่ให้มีการเจริญเพิ่มปริมาณ จึงทำให้ราเจริญเพิ่มขึ้นเป็นกลุ่มเด่นแทน ประกอบกับราสามารถเจริญได้ดีในระดับพีเอชที่ค่อนข้างเป็นกรด (Alexander, 1977)

4) การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์เฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนหลังเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนักในระยะเวลา 16 สัปดาห์

ผลการเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนักในดินเหนียว **(รูปที่ 5.8 5.10 และ 5.12)** พบว่า จุลินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งได้แก่ แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีท มีการเพิ่มปริมาณมากกว่าดินควบคุมที่ระยะเวลาหนึ่งแล้วมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนในดินร่วน **(รูปที่ 5.9 5.11 และ 5.13)** พบว่า ภายหลังเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนักจะให้ผลแตกต่างกันไป โดยผลของการเติมสารละลายโลหะหนักในดินร่วน ทำให้ปริมาณราเพิ่มปริมาณสูงขึ้นกว่าตำรับทดลองควบคุม และตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน แต่แบคทีเรียและแอคติโนมัยซีทกลับลดปริมาณลงต่ำกว่าตำรับทดลองควบคุม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมภายในดินหลังการเติมสารละลายโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช **(ดูในหัวข้อ ค ข้อ 4) ประกอบ)** ทำให้สภาพนิเวศภายในดินเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงพีเอชภายหลังเติมสารละลายโลหะหนักในดินเหนียวจะลดลงเพียงเล็กน้อย จึงไม่ก่อให้เกิด การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มราอย่างเด่นชัด

อีกเหตุผลที่สนับสนุน การเปลี่ยนแปลงกลุ่มจุลินทรีย์ดินแตกต่างกันภายหลังเติมสารละลายโลหะหนัก คือการลดความเป็นพิษของโลหะหนักโดยอนุภาคเคลย์ในดิน **(ดังกล่าวไปแล้วในหัวข้อ ก ข้อ 3))** ในดินเหนียวจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับกับแคทอิออนมากกว่าดินร่วน ดังจะเห็นได้จากปริมาณอนุภาคเคลย์ในดินเหนียวที่มากกว่าในดินร่วนหลายเท่า (Brady, 1990) โลหะหนักที่เหลือจากการดูดจับกับอนุภาคเคลย์ในดินเหนียว จึงมีความเป็นพิษอ่อนลงมากกว่าในดินร่วน และไม่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งอาจเป็นแหล่งธาตุอาหารให้กับจุลินทรีย์อีกด้วย แต่ในดินร่วน ความเป็นพิษของโลหะหนักอาจยังมีมากจึงมีผลให้ แบคทีเรียและแอคติโนมัยซีทซึ่งมีความไวต่อความเป็นพิษมากกว่ารามีปริมาณลดต่ำลงกว่าตำรับทดลองควบคุม ขณะที่รามีจำนวนเพิ่มขึ้นเพราะราสามารถทนอยู่บนสภาพที่ถูกเปลี่ยนแปลงใหม่นี้ได้ดีกว่าจุลินทรีย์ดินกลุ่มอื่น ทั้งนี้ความแตกต่างของความเป็นพิษของโลหะหนักที่เติมลงในดินร่วนและดินเหนียวนั้น อาจยังมีไม่มากพอที่จะทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ดินมีการเปลี่ยนแปลงจนส่งผลให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในดินทดลองทั้งสอง

ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินภายหลังเติมกากตะกอนในดินเหนียว มีการเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทุกกลุ่ม ส่วนในดินร่วนพบว่ามีแบคทีเรียและแอคติโนไมซีทเพิ่มขึ้นแต่รามีปริมาณลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพนิเวศในดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอนไม่เหมาะกับการเจริญของรา

ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ดินภายหลังเติมกากตะกอนนี้ เป็นผลเกี่ยวเนื่องกับอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน-

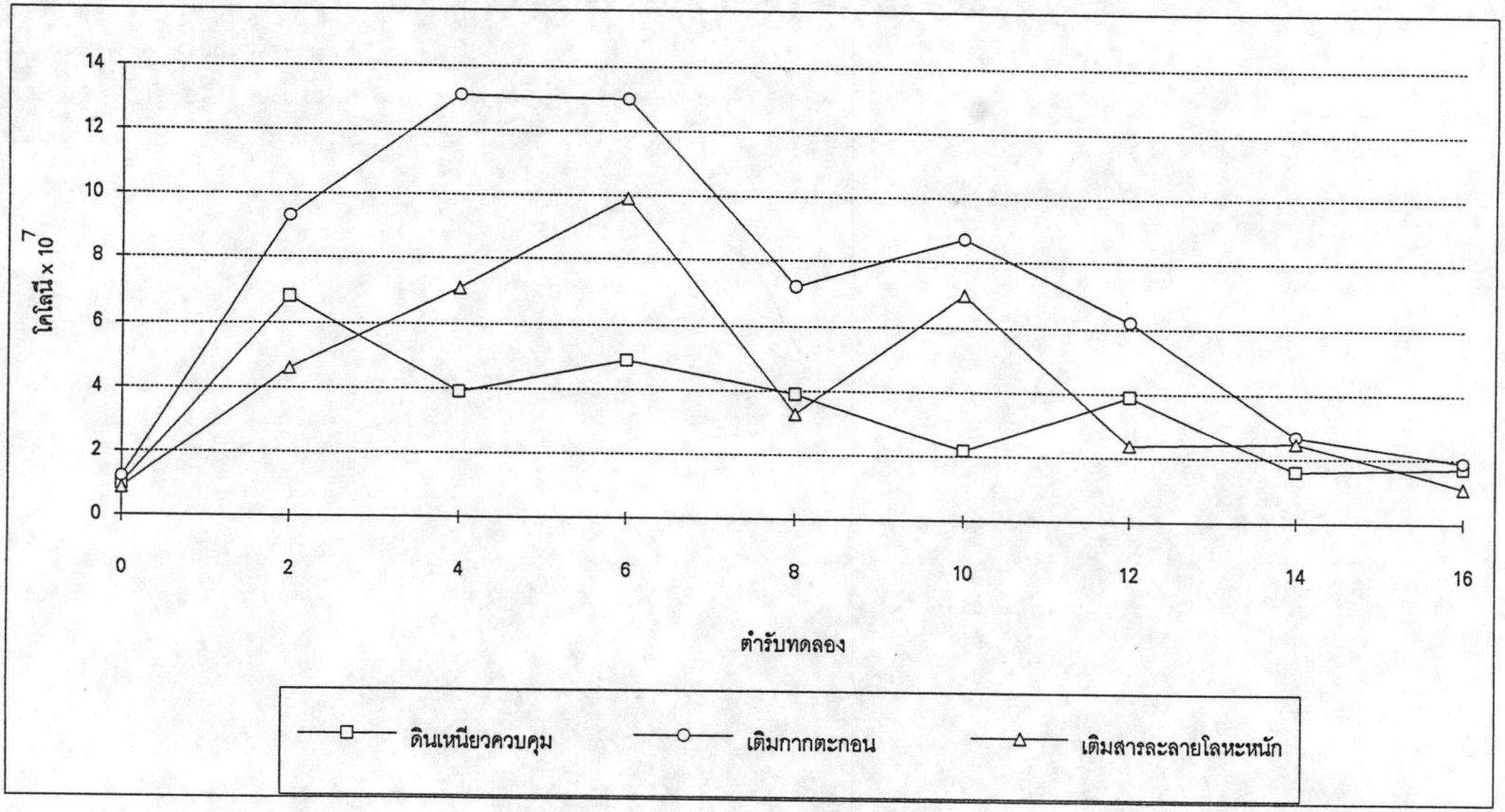
ไดออกไซด์เป็นดัชนีสำคัญในการบอกถึงกิจกรรมจุลินทรีย์ และมีความสัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์ดิน (Alexander, 1977; Cheney et al., 1978; Frangkenberger and Dick, 1983; Tate, 1991) การเพิ่มขึ้นของปริมาณจุลินทรีย์ดินภายหลังเติมกากตะกอนซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งนี้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมกากตะกอนลงในดินทั้ง 2 ประเภท คือดินเหนียวและดินร่วนไม่มีผลกระทบต่อปริมาณจุลินทรีย์ดิน เมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

5) การเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ในดินเหนียวและดินร่วนหลังเติมกากตะกอนตลอดระยะเวลา 16 สัปดาห์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มจุลินทรีย์ในดินเหนียวและดินร่วนภายหลังเติมกากตะกอน (**รูปที่ 5.14**) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มจุลินทรีย์ดินทั้ง 3 กลุ่ม มีไม่มากนัก โดยเฉพาะแอคติโนมัยซีทและรา ซึ่งมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาทดลอง ขณะที่แบคทีเรียมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างชัดเจนกว่าซึ่งการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นคล้ายคลึงกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกากตะกอนสามารถเป็นแหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์ดิน และแบคทีเรียจะเป็นกลุ่มที่มีความว่องไวในการเข้าใช้อาหารมากกว่าราและแอคติโนมัยซีท (Alexander, 1977) ถึงแม้ว่าแบคทีเรียจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแล้วยังมีการปรับตัวเข้าสู่ปริมาณที่ใกล้เคียงปริมาณเริ่มแรกของการทดลอง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแบคทีเรียมีการปรับตัวเข้าสู่ระบบสมดุลย์ใหม่

6) ปริมาณจุลินทรีย์เฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอน

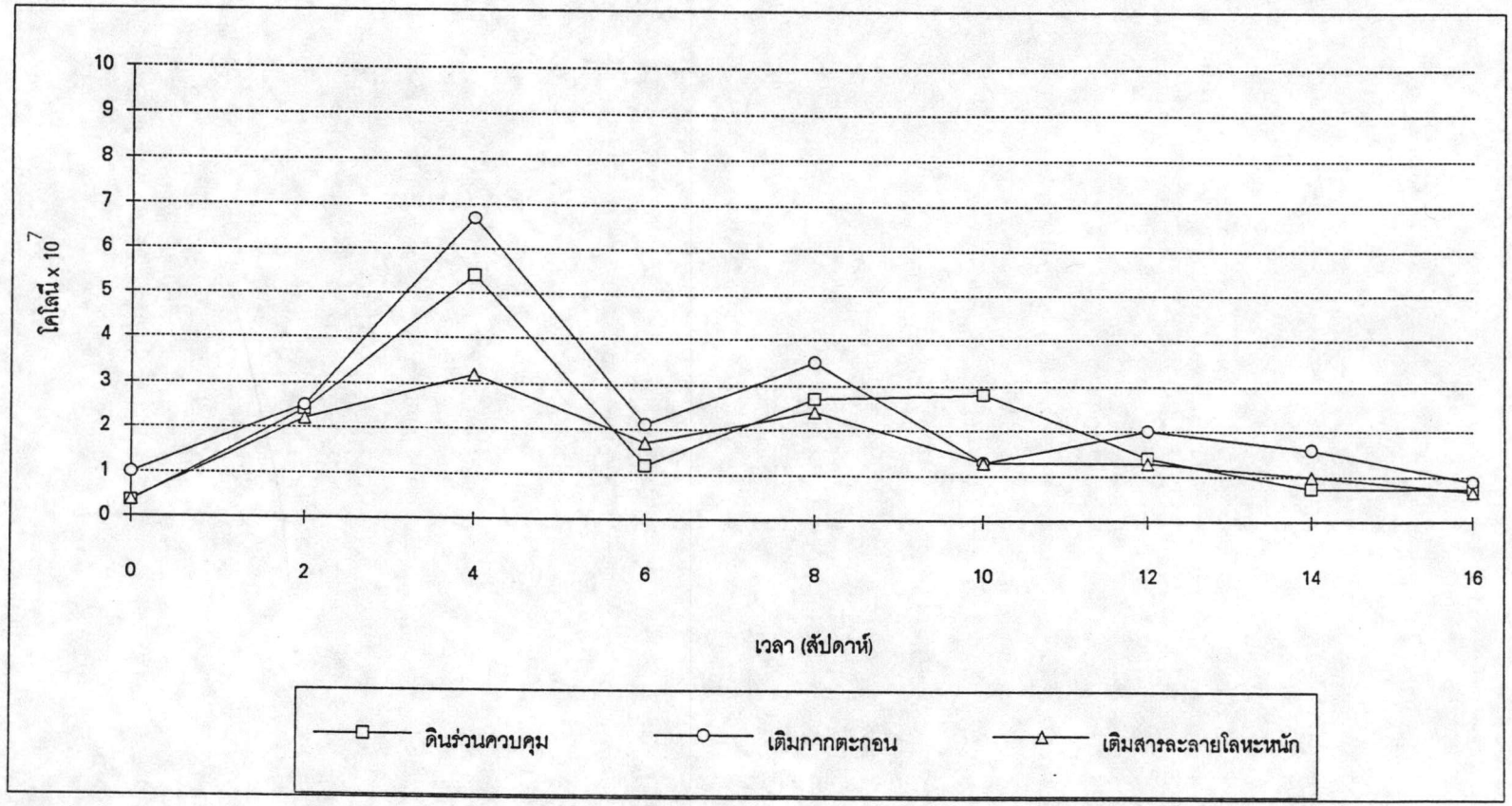
ผลของการเติมกากตะกอนทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ดิน ในดินเหนียวและดินร่วนแตกต่างกัน(**ตารางที่ 4.12**) โดยปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยของดินเหนียวที่เติมกากตะกอน จะสูงกว่าปริมาณแบคทีเรียในดินร่วนอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณรา และแอคติโนมัยซีทในดินเหนียวที่เติมกากตะกอน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับปริมาณรา และปริมาณแอคติโนมัยซีทในดินร่วนที่เติมกากตะกอนที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของความแตกต่างทางลักษณะสมบัติดินระหว่างดินเหนียวและดินร่วนที่เติมกากตะกอน ซึ่งมีผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณในแบคทีเรียได้เด่นชัดกว่า รา และแอคติโนมัยซีท และเมื่อพิจารณาปริมาณจุลินทรีย์ดินทั้งสามกลุ่ม ในดินเหนียวและดินร่วนที่เติมกากตะกอนร่วมกับ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยจากดินเหนียวและดินร่วน ที่เติมกากตะกอน อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณแบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีทในดินเหนียวที่เติมกากตะกอน และ



รูปที่ 5.8 ปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

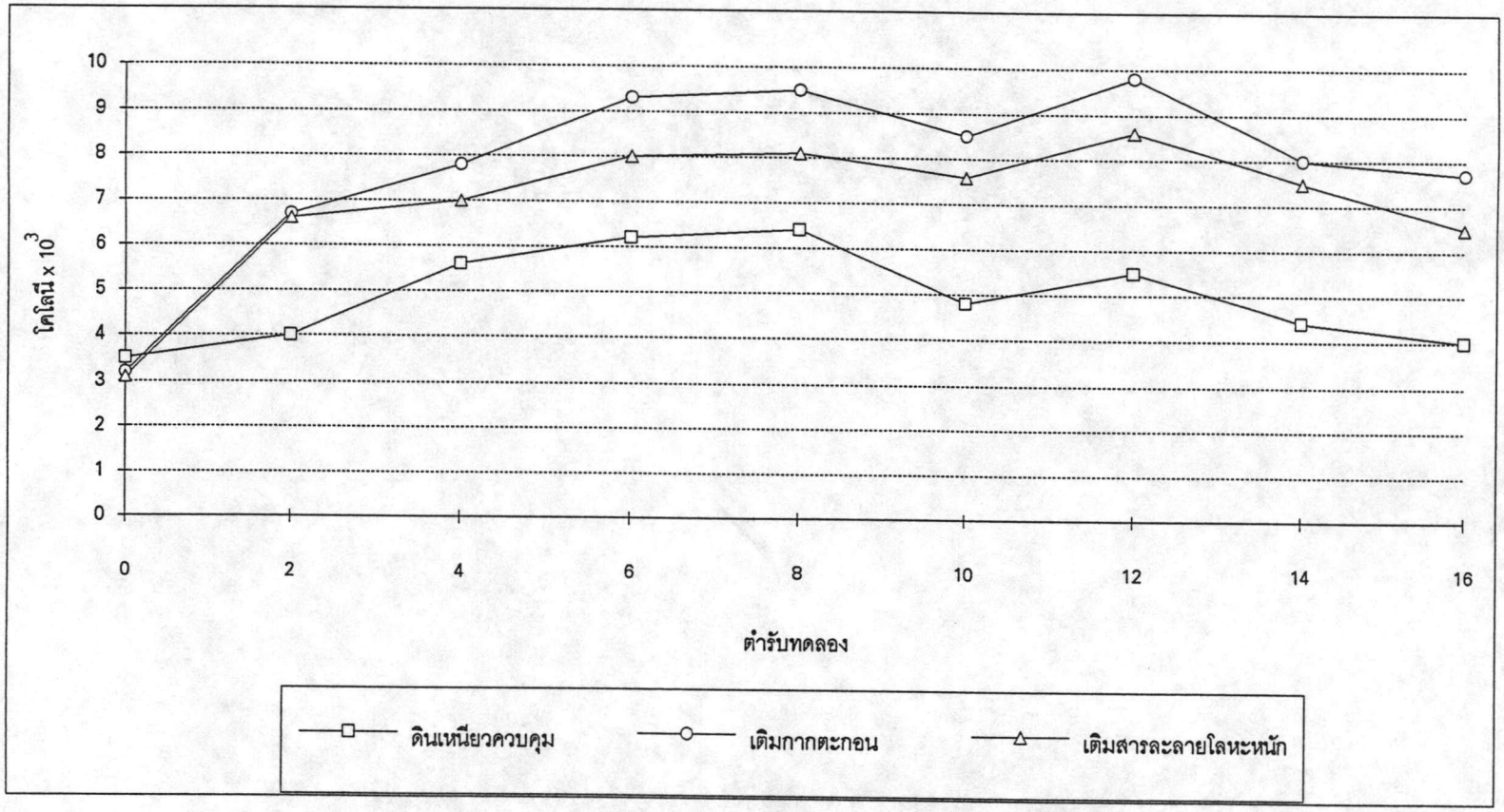
2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.9 ปริมาณแบคทีเรียเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินร่วนที่ผสมกากตะกอน4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

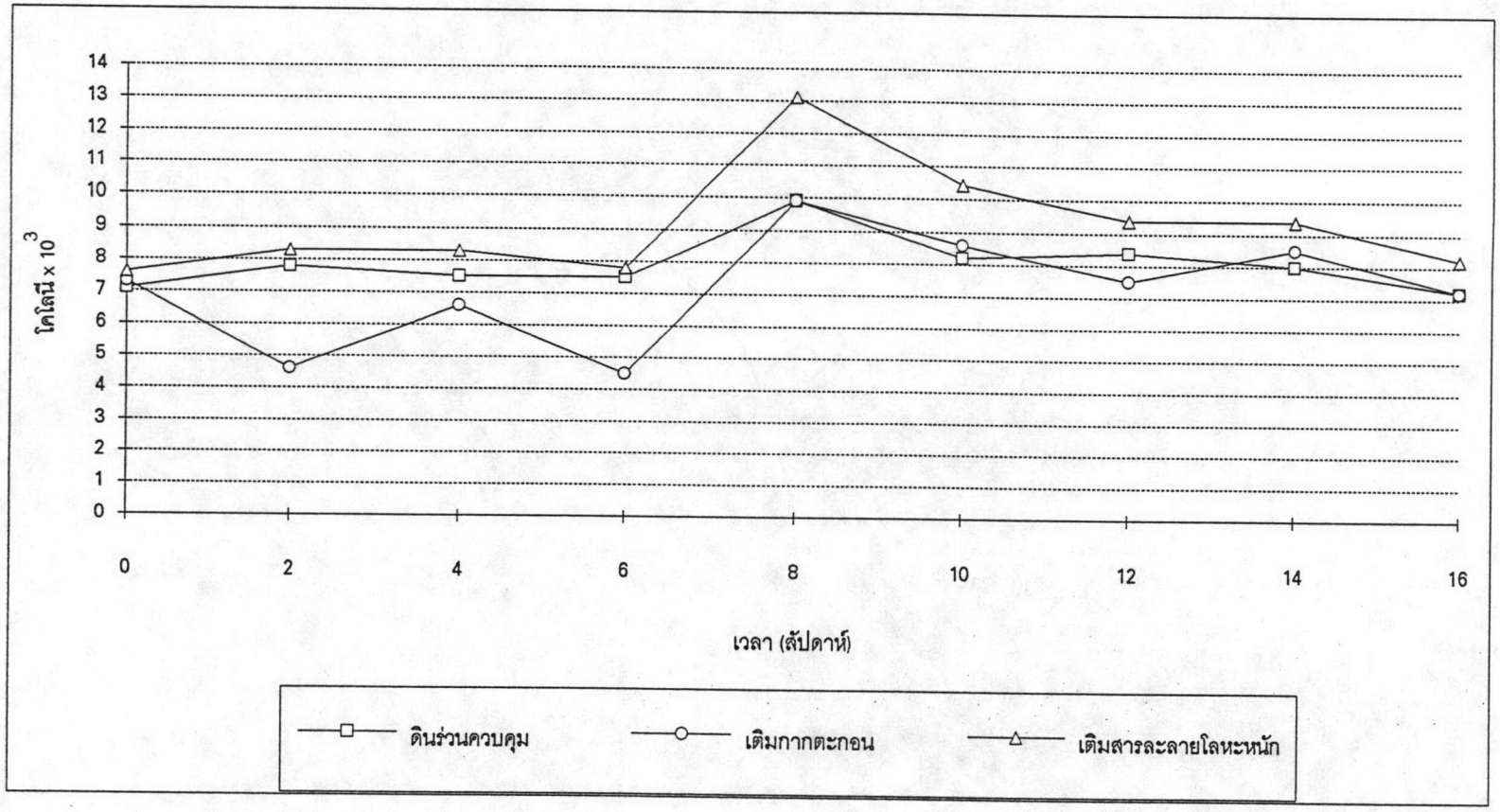
2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.10 ปริมาณราเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

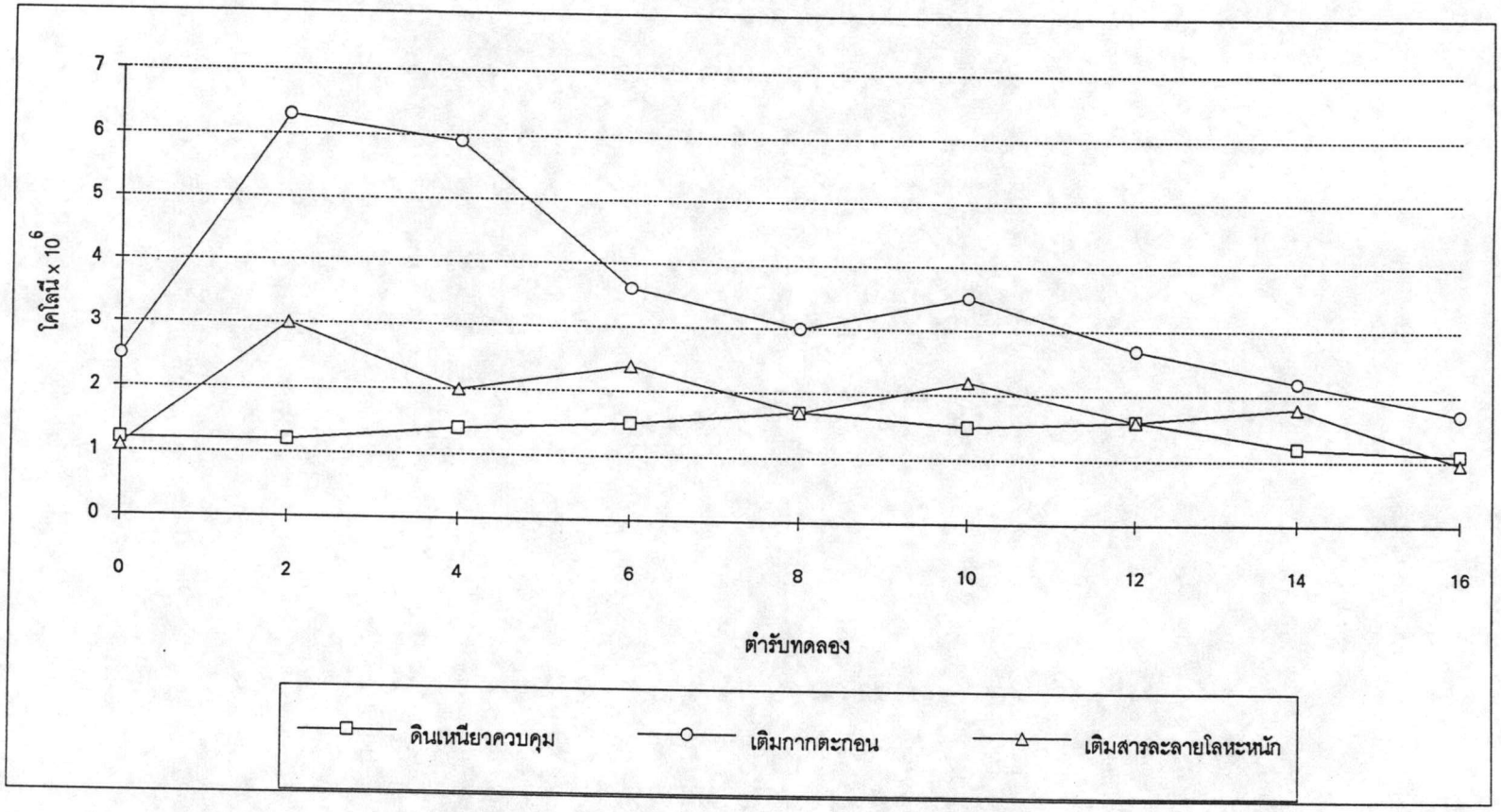
2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.11 ปริมาณราเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินร่วนที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

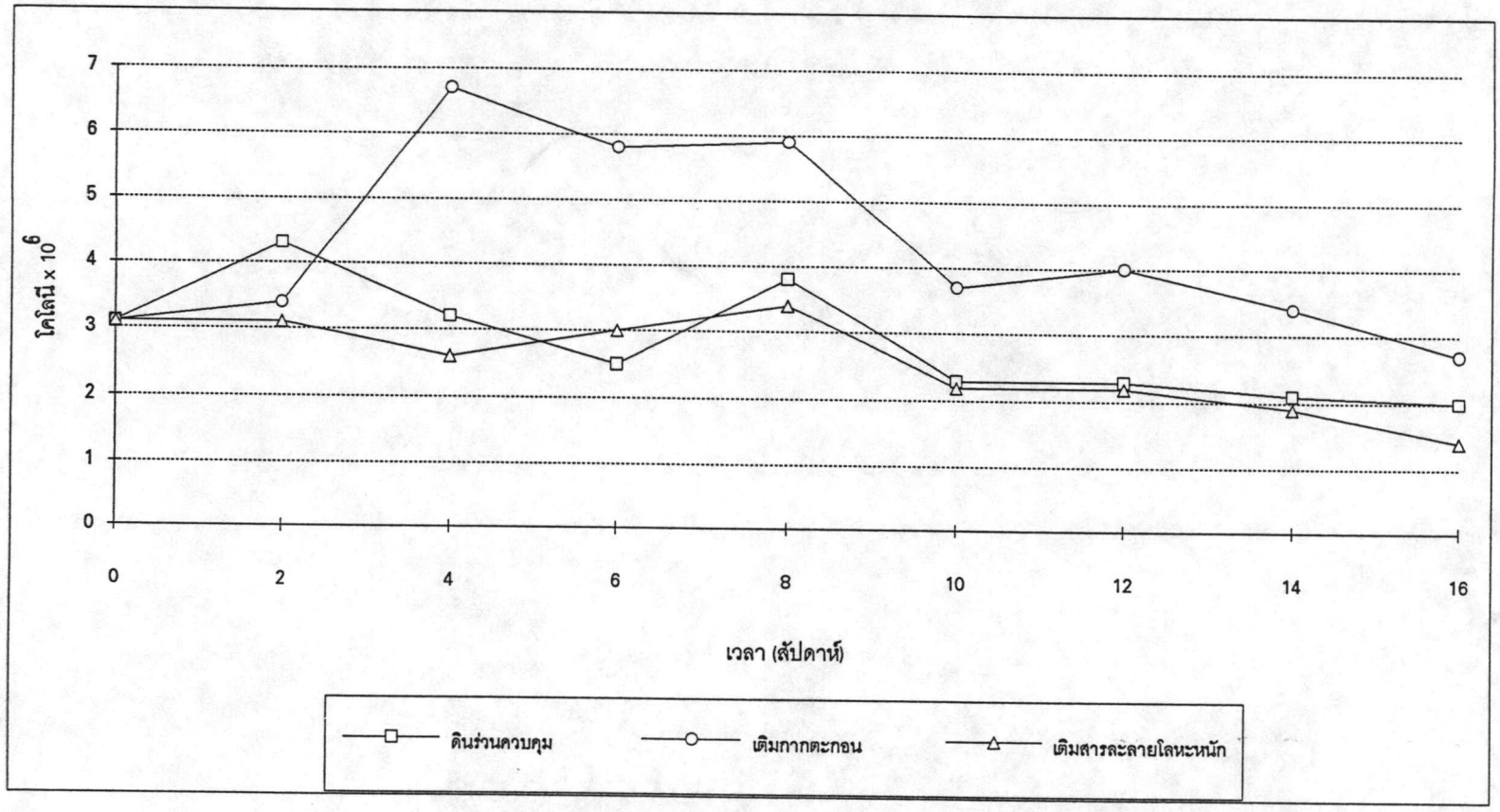
2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.12 ปริมาณแอคติโนมัยซีทเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

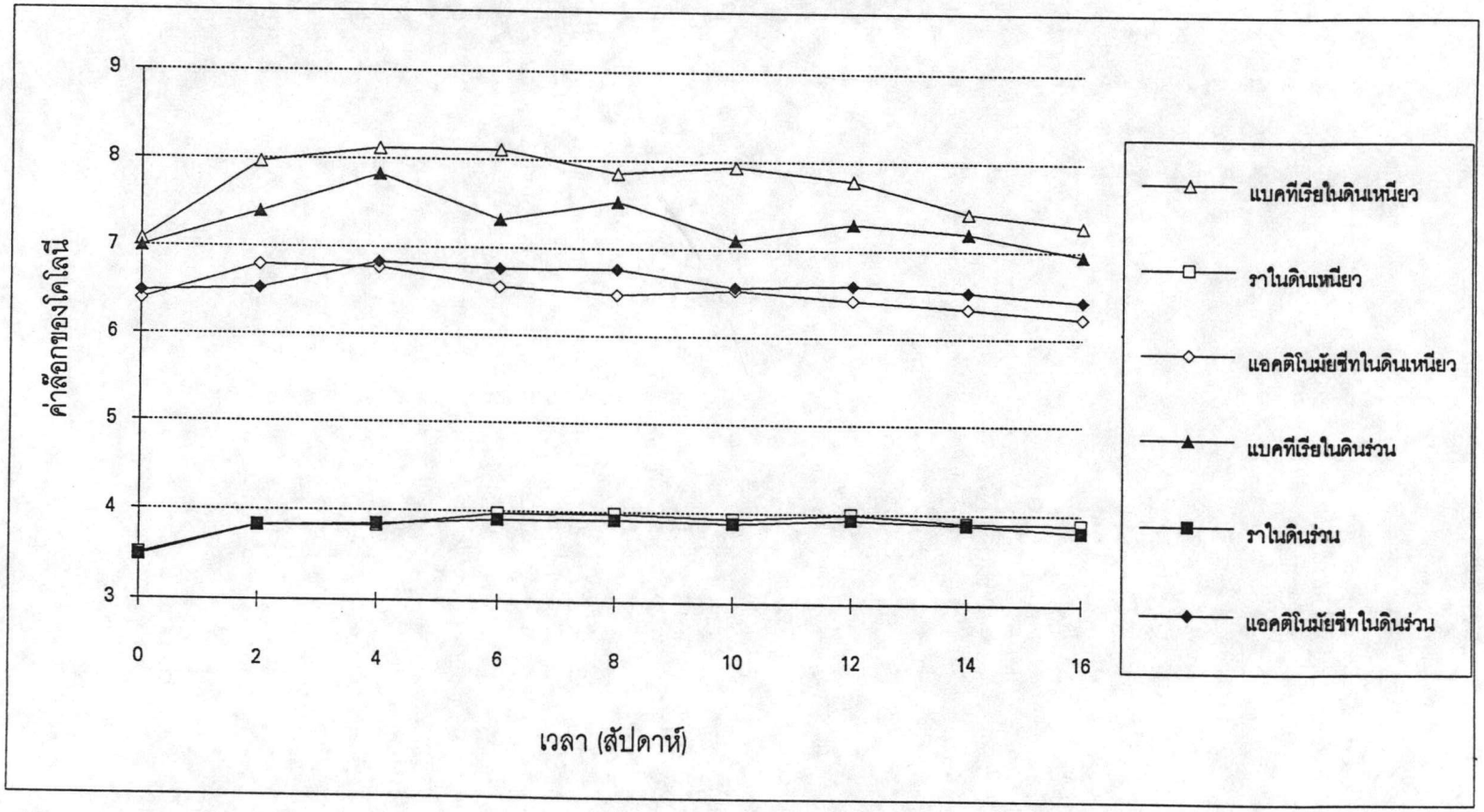
2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.13 ปริมาณแอคติโนมัยซีทเฉลี่ยในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินร่วนที่ผสมกากตะกอน 4 ระดับและสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าในกากตะกอน 4 ระดับซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

หมายเหตุ 1) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

2) เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมสารละลายโลหะหนักเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน 4 ระดับ



รูปที่ 5.14 ปริมาณจุลินทรีย์ในดินตัวอย่างที่เก็บทุก 2 สัปดาห์ จากดินเหนียวและดินร่วนหลังเติมกากตะกอนซึ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 16 สปดาห์

หมายเหตุ เป็นภาพรวมเฉลี่ยของการเติมกากตะกอน 4 ระดับ คือ 20 40 60 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

ปริมาณแบคทีเรีย รา และแอคติโนมียซีทในดินร่วนที่เติมกากตะกอน เป็นปริมาณที่ไม่มีความแตกต่างกันมากพอ ที่จะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยจากดินเหนียว กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยจากดินร่วนนั้น มีความแตกต่างกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในดินเหนียวที่เติมกากตะกอนมีปริมาณจุลินทรีย์ดินไม่แตกต่างกับในดินร่วนที่เติมกากตะกอนเมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทั้งสองชนิด

จ. ปริมาณโลหะหนัก

1) ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนที่อัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกตาร์

ผลการหาปริมาณโลหะหนักจากตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอนที่อัตราเติมเดียวกัน พบว่า มีโลหะหนักที่สกัดได้มากที่สุดแตกต่างกันไป ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ ปริมาณโลหะหนักในสิ่งทดลองที่เติมลงไปในดินมีปริมาณแตกต่างกัน เช่น พบว่าสังกะสีในกากตะกอนมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณสังกะสี ในสิ่งทดลองต่างๆ ที่ใช้เติม ดังนั้นเมื่อเติมสิ่งทดลองแต่ละชนิด (ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และกากตะกอน) ในอัตราเติมเดียวกันลงในดินจึง พบว่าสามารถสกัดสังกะสีได้มากที่สุด จากตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน นอกจากนี้ ยังมีอิทธิพลจากองค์ประกอบ และลักษณะสมบัติต่างๆ ของดินเข้ามาเกี่ยวข้องกับปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้ เช่น ในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนเท่ากันแต่แตกต่างที่ชนิดของดิน ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้จากดินเหนียวและดินร่วนนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นหากมีการใช้กากตะกอน ควรมีการระมัดระวังส่วนประกอบที่เป็นพิษในกากตะกอนเป็นประการสำคัญ และคำนึงถึงพื้นที่ที่จะนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ด้วย **(ตารางที่4.13 และ4.14)**

2) ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยในดินเมื่อเติมกากตะกอน 4 ระดับ

ผลการทดลองเนื่องจากการเติมกากตะกอนลงในดินทั้ง 2 ชนิด พบว่า ชนิดของโลหะหนักที่มีปริมาณที่สกัดได้เพิ่มขึ้น ตามอัตราการใส่กากตะกอนในดิน 2 ชนิดนั้นแตกต่างกัน แต่โลหะหนักที่พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมกากตะกอนในดินทั้ง 2 ชนิดคือ แคดเมียม นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสีมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมชัดเจนที่สุด อาจเป็นเพราะสังกะสีมีความสามารถจับกับกากตะกอนได้ต่ำจึงถูกสกัดออกมาอยู่ในรูปสารละลายมาก ได้มีการทดลองหาความสามารถในการจับกันของโลหะหนักและกากตะกอน พบว่าโลหะหนักแต่ละ

ชนิดมีความสามารถในการจับกับกากตะกอนได้แตกต่างกันไป เช่น ที่ พีเอช 4.00 - 6.00 แคดเมียมจะจับกับกากตะกอนได้ดีกว่า สังกะสี (Verloo and Cottenie, 1972) และพบว่า ทองแดงจับกับอินทรีย์วัตถุดีกว่าแคดเมียมหรือสังกะสี (Stevenson,1977) นอกจากนี้ ผลการทดลองนี้คล้ายคลึงกับ Nicolas และคณะ (1991) ซึ่งได้สกัดด้วย 0.1 M $Na_4P_2O_7$ พบว่า แคดเมียม นิเกิล และสังกะสี มีปริมาณที่สกัดได้เพิ่มตามอัตราการใช้กากตะกอน รวมทั้งแคดเมียมสามารถสกัดได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายโลหะหนัก

3) ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยในดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

จากผลการทดลองของการเติมสารละลายโลหะหนักในดินทั้ง 2 ชนิดคือดินเหนียวและดินร่วน พบว่า ชนิดของโลหะหนักที่มีปริมาณที่สกัดได้เพิ่มขึ้นตามอัตราเติมที่เห็นเด่นชัดระหว่างดินทั้ง 2 ชนิดนั้นแตกต่างกัน และชนิดของโลหะหนักที่มีแนวโน้มของปริมาณที่สกัดได้ตามอัตราการใส่ในดินทั้ง 2 ชนิด คือแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี โดยที่สังกะสีจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเพิ่มตามอัตราการเติมเด่นชัดที่สุด ซึ่งสาเหตุของการที่มีปริมาณโลหะหนักบางชนิดเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนักที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนแตกต่างกันไป คือ ความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบในรูปที่เป็นประโยชน์ของโลหะหนักแต่ละชนิดนั้น มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีค่าพีเอชที่มาเกี่ยวข้องกับปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้ โดยค่าพีเอชจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปริมาณโลหะหนักในรูปที่เป็นประโยชน์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากค่าพีเอชลดลงจะเป็นผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหนทางหนึ่งในการควบคุมปริมาณโลหะหนักในรูปที่เป็นประโยชน์ที่ใช้ระยะเวลาอันสั้นและได้ผลคือ การควบคุมค่าพีเอชในดิน (Davis, 1984 ; Jackson and Alloway, 1990)

สาเหตุของการที่มีปริมาณโลหะหนักบางชนิดเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมสารละลาย โลหะหนักที่เกิดขึ้นในดินเหนียวและดินร่วนแตกต่างกันไป คือ คุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักของดิน ได้มีการทดลองที่พบว่า ในดินมินเนอรัลและดินออกานิคมีความสามารถจับกับโลหะหนักได้แตกต่างกันไป และอินทรีย์วัตถุในดินจะมีความสามารถจับกับ แคดเมียมได้ดีกว่าสังกะสี (Elliott, Liberati and Huang, 1986) ทั้งนี้ ความสามารถในการจับโลหะหนักในดินแตกต่างกันไป เนื่องจากความแตกต่างของชนิดดิน พีเอช กรดฟัลวิค หรือกรดฮิวมิคที่อยู่ในดิน (Gould and Genetelli, 1978)

4) เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในดินเหนียวและดินร่วนเมื่อเติมกากตะกอนและสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

จากการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักทั้ง 7 ชนิดคือ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน 4 ระดับ และในตำรับทดลองที่เติมสารละลายโลหะหนัก ซึ่งเป็นรูปที่สามารถละลายได้ทันที โดยเติมในระดับเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนทั้ง 4 ระดับ พบว่า ปริมาณแคดเมียม ทองแดง เหล็ก และนิเกิล ในตำรับทดลองที่เติมสารละลายโลหะหนักมีแนวโน้มมากกว่าในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนทั้ง 4 ระดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเกิดขึ้นทั้งในดินเหนียวและในดินร่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายแคดเมียม ทองแดง เหล็ก และนิเกิลที่เติมลงดิน ในปริมาณเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนนั้น มีความสามารถอยู่ในรูปสารละลายได้ดีกว่าแคดเมียม ทองแดง เหล็ก และนิเกิลจากกากตะกอน ซึ่งการที่โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายได้ อาจต้องอาศัยระยะเวลาในการย่อยสลายกากตะกอน ส่วนแมงกานีส ตะกั่ว และสังกะสี ให้ผลตรงข้ามกับแคดเมียม ทองแดง เหล็ก และนิเกิล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตะกั่วที่ปริมาณในตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน 4 ระดับ มีแนวโน้มมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับตำรับทดลองที่เติมสารละลายโลหะหนักในระดับที่เทียบเท่าในกากตะกอนทั้ง 4 ระดับ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในดินเหนียวและดินร่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายแมงกานีส ตะกั่ว และสังกะสี ที่เติมลงไป มีความสามารถอยู่ในรูปสารละลายในดินได้ต่ำกว่าแมงกานีส ตะกั่ว และสังกะสีที่อยู่ในรูปสารละลายซึ่งได้จากกากตะกอน **(ตารางที่4.13 และ4.14)**

5) การเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักภายหลังเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับที่ระยะเวลา 16 สัปดาห์

จาก**ตารางที่** 5.2เป็นการสรุปผลพฤติกรรมของโลหะหนักชนิดต่างๆ คือ ชนิดโลหะหนักที่มีปริมาณที่สกัดได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาทดลองมากขึ้น (หมายถึง ระยะเวลาที่ผ่านไปหลังเติมสารละลายโลหะหนัก มีการละลายของโลหะหนักจากดินออกมาอยู่ในรูปสารละลายได้ดีขึ้น) ชนิดโลหะหนักที่สกัดได้เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดลองนานขึ้นนี้ มีพฤติกรรมที่เพิ่มขึ้นตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนักด้วย และแสดงถึงชนิดโลหะหนักที่เฉลี่ยจากระยะเวลาต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนัก

แม้ว่าการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่เติมลงในดินที่เวลาภายหลังเติมสารละลายโลหะหนักทันที และขณะที่เวลาทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มีแคดเมียมเพียงชนิดเดียวที่สกัดได้เพิ่มมากขึ้น แม้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็ตามแต่ก็ปรากฏเช่นเดียวกันทั้งในดินเหนียวและดินร่วน จึงพึงระมัดระวังอันตรายจากแคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมมีความเป็นพิษสูง สามารถสะสมอยู่ในร่างกายเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังมีความสามารถเคลื่อนย้ายจากแหล่งกำเนิดปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้สูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ (Bernhard and Lanwergs, 1984)

6) การเปลี่ยนแปลงปริมาณโลหะหนักภายหลังเติมกากตะกอน4 ระดับที่ระยะเวลา 16 สัปดาห์

จาก**ตารางที่ 5.3** เป็นการสรุปผลพฤติกรรมของโลหะหนักชนิดต่างๆ คือ ชนิดโลหะหนักที่มีปริมาณที่สกัดได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาทดลองมากขึ้น (หมายถึง ระยะเวลาที่ผ่านไปหลังเติมกากตะกอน มีการละลายของโลหะหนักจากดินออกมาอยู่ในรูปสารละลายได้ดีขึ้น) ชนิดโลหะหนักที่สกัดได้เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดลองนานขึ้นนี้ มีพฤติกรรมที่เพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอนด้วย และแสดงถึงชนิดโลหะหนักที่เฉลี่ยจากระยะเวลาต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอน

ภายหลังการเติมกากตะกอน ปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้นั้น แตกต่างกันไป โดยโลหะหนักที่พบว่าน่าสนใจในด้านแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย คือ แคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติดังได้กล่าวไว้ใน **หัวข้อ จ ข้อ 5)** อีกทั้งยังพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเติมกากตะกอน ปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้เมื่อเวลาการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น **(รูปที่ 4.12)** ซึ่งหากมีการใช้กากตะกอนในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเป็นเวลานาน อาจพบปัญหาการละลายของแคดเมียมจากกากตะกอนปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และจากผลการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้กากตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึงการปลดปล่อยแคดเมียมให้อยู่ในรูปสารละลาย ดังจะเห็นได้จาก แคดเมียมที่สกัดได้เมื่อการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มีมากกว่าปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ขณะที่เติมกากตะกอนทันทีซึ่งปรากฏในดินทั้งสองชนิด

นอกจากแคดเมียมแล้ว ยังมีโลหะหนักอีก 2 ชนิดคือ ทองแดงและนิเกิล โดยทองแดงและนิเกิลจะให้ผลคล้ายกับแคดเมียมคือ ปริมาณทองแดงและนิเกิลที่สกัดได้เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มกากตะกอน ซึ่งปรากฏทั้งในดินเหนียวและดินร่วน นอกจากนี้ ปริมาณทองแดงและปริมาณนิเกิลที่สกัดได้เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มีปริมาณมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับปริมาณทองแดงและนิเกิลที่สกัดได้ภายหลังเติมกากตะกอนทันที ดังนั้น ในการใช้ประโยชน์กากตะกอน การเฝ้าระวังปริมาณทองแดงและนิเกิล จึงเป็นสิ่งสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าแคดเมียม

ส่วนโลหะหนักอื่นๆ พบว่ามีปริมาณที่สกัดได้เมื่อเวลาทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์มากกว่าปริมาณโลหะหนักที่สกัดได้หลังเติมกากตะกอนทันที ทั้งนี้เกิดขึ้น เฉพาะในดินเหนียว โลหะหนักเหล่านี้คือ เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี โดยที่ สังกะสี มีปริมาณมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่เกิดขึ้นในดินร่วน ซึ่งอาจเนื่องจาก คุณสมบัติของดินมีบทบาทต่อปริมาณโลหะหนักที่ออกมาอยู่ในรูปสารละลายรวมทั้งชนิดของโลหะหนักที่สกัดออกมาด้วย

ตารางที่ 5.2 โลหะหนักที่สกัดได้จากดินซึ่งเป็นผลจากการเติมสารละลายโลหะหนัก 4 ระดับ

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มากกว่า ปริมาณโลหะหนักภายหลังเติมสารละลายโลหะหนัก		ปริมาณโลหะหนัก เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ เพิ่มขึ้น ตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนัก		ปริมาณโลหะหนักที่ เพิ่มขึ้น ตามอัตราเติมสารละลายโลหะหนัก	
	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินร่วน
แคดเมียม	✓ (ns)	-	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (s)
ทองแดง	-	-	✓ (s)	-	✓ (s)	✓ (ns)
เหล็ก	-	-	✓ (ns)	✓ (s)	✓ (ns)	✓ (ns)
แมงกานีส	-	-	-	✓ (s)	-	✓ (ns)
นิเกิล	-	-	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)
ตะกั่ว	-	-	-	-	✓ (ns)	-
สังกะสี	-	-	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)

หมายเหตุ ns หมายถึง มีตำรับทดลองอย่างน้อย 1 คู่ ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

s หมายถึง ตำรับทดลองทุกคู่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

- หมายถึง ไม่ปรากฏตามข้อความที่หัวคอลัมภ์

✓ หมายถึง ปรากฏตามข้อความที่หัวคอลัมภ์

ตารางที่ 5.3 โลหะหนักที่สกัดได้จากดินซึ่งเป็นผลจากการเติมกากตะกอน 4 ระดับ

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ มากกว่า ปริมาณโลหะหนักภายหลังเติมกากตะกอน		ปริมาณโลหะหนัก เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไป 16 สัปดาห์ เพิ่มขึ้น ตามอัตราเติมกากตะกอน		ปริมาณโลหะหนักเฉลี่ยที่ เพิ่มขึ้น ตามอัตราเติมกากตะกอน	
	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินร่วน
แคดเมียม	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)
ทองแดง	✓ (s)	✓ (ns)	-	✓ (ns)	-	-
เหล็ก	✓ (ns)	-	-	-	-	-
แมงกานีส	✓ (ns)	✓ (s)	✓ (ns)	-	-	✓ (ns)
นิเกิล	✓ (s)	✓ (s)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)	✓ (ns)
ตะกั่ว	-	-	✓ (ns)	-	✓ (ns)	✓ (ns)
สังกะสี	✓ (s)	-	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)	✓ (s)

หมายเหตุ ns หมายถึง มีตำรับทดลองอย่างน้อย 1 คู่ ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

s หมายถึง ตำรับทดลองทุกคู่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 %

- หมายถึง ไม่ปรากฏตามข้อความที่หัวคอลัมภ์

✓ หมายถึง ปรากฏตามข้อความที่หัวคอลัมภ์