



การศึกษารูปแบบของโลหะในปฏิกิริยาหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น  
กรณีศึกษาดังกะสีและโพแทสเซียม



โดย  
นางสาวอมรรัตน์ เอื้อสรวง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารูปแบบของโลหะในปุ๋ยหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น  
กรณีศึกษาสังกะสีและโพแทสเซียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE STUDY OF METAL SPECIATION DURING COMPOST OF PIG MANURE WITH  
THE SEQUENTIAL EXTRACTION TECHNIQUE  
: A CASE STUDY OF ZINC AND POTASSIUM**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**Master of Science Program in Environmental Science**

**Department of Environmental Science**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษารูปแบบ  
ของโลหะในปฏิกัมมูลหมุ่ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น กรณีศึกษาสังกะสีและโพแทสเซียม ”  
เสนอโดย นางสาวอมรรัตน์ เอื้อสกุล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศา  
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารท์สนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง)

...../...../.....

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาถ์)

...../...../.....

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี)

...../...../.....



54311320: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: รูปแบบของสังกะสี/รูปแบบของโพแทสเซียม/การสกัดแบบลำดับขั้น

อมรรัตน์ เอื้อสกุล: การศึกษารูปแบบของโลหะในปุ๋ยหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น  
กรณีศึกษาสังกะสีและโพแทสเซียม. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ.ดร.นันทิรา สรรพณี. 89 หน้า.

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อกำหนดระยะเวลาของกระบวนการหมักโดยใช้ปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมที่ถูกสกัดลำดับขั้นตามวิธีที่ปรับปรุงจาก Tessier et al. (1979) (Wada and Wada, 1999) ควบคู่ไปกับคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยหมักที่ได้จากมูลหมูผสมของเหลือใช้ทางการเกษตร ณ วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ถูกเก็บและวิเคราะห์ ปุ๋ยหมักถูกแบ่งตามอุณหภูมิออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะอุณหภูมิสูง (ระหว่างวันที่ 0-34) และระยะที่เจริญเต็มที่ (ระหว่างวันที่ 35-119)

การศึกษารูปแบบบ่งบอกว่าการกระจายของสังกะสีและโพแทสเซียมแตกต่างกัน โดยพบรูปแบบของสังกะสีเรียงตามลำดับดังนี้ รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปคอลลอยด์ของแข็ง > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ ขณะที่พบรูปแบบของโพแทสเซียม เรียงตามลำดับดังนี้ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปคอลลอยด์ของแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการกรด-เบสอ่อนแก่ (HSAB) ที่ซึ่งกรดแก่ ดังเช่นกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เหมือนโพแทสเซียมชอบอยู่ในรูปที่ละลาย ขณะที่กลุ่มโลหะแตรนซิชัน เช่น สังกะสี ซึ่งเป็นกรดที่อ่อนกว่าและมีแนวโน้มที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ถึงแม้ว่ากระบวนการหมักอาจเพิ่มรูปสารประกอบออกไซด์และรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองไปในทิศทางเดียวกัน ( $p < 0.01$ ) ผลกระทบดูเหมือนจะไม่มีผลต่อปริมาณของรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากนัก เนื่องจากรูปแบบนี้ได้รับอิทธิพลจากหลายรูปแบบที่อาจปลดปล่อยหรือแลกเปลี่ยนได้ ถ้าสภาวะแวดล้อมปุ๋ยหมักถูกเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามสังกะสีอาจได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมากกว่าโพแทสเซียม จากการที่ปริมาณสังกะสีรูปแลกเปลี่ยนได้มีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงที่แคบกว่าระหว่างวันที่ 42-49 เท่านั้น และค่อยๆ ลดลงหลังจากนั้น ขณะที่รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของโพแทสเซียมมีค่าค่อนข้างสูงไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังนั้นไม่เพียงแต่งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลของการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก แต่ยังให้แนวคิดถึงกระบวนการหมักที่กระทบต่อรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมอย่างแตกต่างกันด้วย สังกะสีปริมาณน้อยดูเหมือนจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่าโพแทสเซียมและกลายเป็นดัชนีของการเลือกอายุปุ๋ยหมักนี้

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

54311320: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: ZINC/POTASSIUM/SEQUENTIAL EXTRACTION

AMORNRAT AURSALUNG: THE STUDY OF METAL SPECIATION DURING COMPOST PERIOD OF PIG MANURE WITH THE SEQUENTIAL EXTRACTION TECHNIQUE : A CASE STUDY OF ZINC AND POTASSIUM. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NATDHERA SANMANEE, Ph.D. 89 pp.

The objective of this study was to determine the duration of fermentation period using the amounts and speciation of zinc (Zn) and potassium (K) that were sequentially extracted by the adapted Tessier's method (Wada and Wada, 1999) together with other physical and chemical compost's characteristics. Compost derived from swine manures mixed with agricultural wastes at day 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 and 119 was collected and analyzed. The compost was divided after temperature into 2 stages: thermophilic stage (during days 0-34) and mature stage (during days 35-119).

The speciation study indicated that the distributions of Zn and K were different. The preferable Zn species were found in the order of Zn-Ox > Zn-Org > Zn-Res > Zn-Ex while K species were found in the order of K-Ex > K-Ox > K-Org > K-Res. This was in agreement with hard and soft acid and base (HSAB) concept where hard acid as alkaline group like K is more likely to be soluble while transition group like Zn is softer acid and prone to form complexes. Although the fermenting process might increase the oxide and organically complexes of both metals in the same way ( $p < 0.01$ ), the effect seemed not reflecting the amount of exchangeable species. This was because these species got the influence from other species that might release or exchange if environmental compost conditions were altered. However, Zn seemed to get more influence from the fermenting process than K as the narrower highest amounts of Zn-Ex was only during days 42-49 and gradually decreased after that while K-Ex was rather high towards the end of the processes. As a result, not only this research provided the information of maturity but also gave the idea how the fermenting process affected the Zn and K speciation in different manners. The minute amounts of Zn seemed to respond to the change more than K and being the selectivity index of this compost.

---

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรพณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือ การให้ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชรรมเรศ เชื้อสาวถี และ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนคุณแต่คุณแม่ประภาพร เอื้อสกุล และคุณพ่อสม โทพธิ์ เอื้อสกุล ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ถือเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บูรพคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	3
สมมติฐานของการศึกษา .....	3
ขอบเขตของการศึกษา .....	3
ขั้นตอนการศึกษา .....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
ปุยหมัก .....	5
ความหมายของปุยหมัก .....	5
ประโยชน์ของปุยหมัก .....	8
ธาตุอาหารพืช .....	9
สังกะสี .....	9
บทบาทของสังกะสีที่มีต่อพืช .....	9
อาการของพืชเมื่อขาดสังกะสี .....	10
ความเป็นพิษจากสังกะสี .....	11
โพแทสเซียม .....	11
บทบาทของโพแทสเซียมที่มีต่อพืช .....	11
อาการของพืชเมื่อขาดโพแทสเซียม .....	11
รูปแบบของโลหะ .....	12



บทที่	หน้า
รูปแบบของโลหะในสิ่งแวดล้อม .....	12
ลิแกนด์และกลไกการเกิดสารประกอบโลหะ .....	14
แอนไอออน .....	14
รูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ .....	15
รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ .....	15
การจัดจำแนกโลหะโดยใช้การจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้น	
พลังงาน d .....	18
การแบ่งกลุ่มตามทฤษฎี Hard and Soft Acids and Bases	
(HSAB) .....	18
เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction techniques) .....	21
รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) .....	22
รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) .....	22
รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound	
fraction) .....	22
รูปคงค้างกับของแข็ง (Residual fraction) .....	23
3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	33
สารเคมีและรีเอเจนต์ที่ใช้ในการทดลอง .....	34
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	36
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	37
ขั้นตอนการหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก .....	37
ขั้นตอนของการหมักปุ๋ย .....	37
ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก .....	38
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ .....	39
การวิเคราะห์หารูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมด้วยวิธีการสกัดแบบ	
ลำดับขั้น .....	39
รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) .....	39
รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) .....	39

บทที่	หน้า
รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically complexed fraction) .....	40
รูปคงค้างกับของแข็ง (Residual fraction) .....	40
การวิเคราะห์ทางสถิติ .....	40
4 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง .....	41
การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร .....	41
สัดส่วนและปริมาณของสังกะสีและ โปแทสเซียมที่ปลดปล่อยออกจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น .....	47
อิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อรูปแบบของสังกะสีและโปแทสเซียม .....	49
กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาอย่างชัดเจน .....	50
รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและ โปแทสเซียม .....	50
รูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและ โปแทสเซียม .....	54
กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาน้อยหรือไม่ชัดเจน .....	58
รูปคงค้างของแข็งของสังกะสีและโปแทสเซียม .....	58
รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและ โปแทสเซียม .....	61
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	64
รายการอ้างอิง .....	66
ภาคผนวก .....	71
ภาคผนวก ก .....	72
ภาคผนวก ข .....	77
ประวัติผู้วิจัย .....	89

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง .....	6
2	เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 .....	7
3	เกณฑ์การยอมรับของปริมาณโลหะที่มีได้ .....	10
4	ความชอบของไอออนของโลหะกลุ่มต่างๆ กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ .....	18
5	การจำแนกไอออนของโลหะแบบกรด-เบสตามทฤษฎีของ Pearson .....	19
6	สรุปการจำแนกไอออนของโลหะตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d ออร์บิทัล และการจัดกลุ่มตามทฤษฎี Hard and soft acid and base .....	20
7	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (DOC) ในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย กากตะกอนน้ำเสีย (SSC) และปุ๋ยหมักมูลหมู (SMC) .....	26
8	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับรูปแบบต่างๆ ของ Cu, Zn และ Pb .....	26
9	วิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	33
10	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต .....	36
11	ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก .....	38
12	แสดงคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับ .....	
	เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ...	42
13	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับสังกะสีและ โพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อ ไตรเจน อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น .....	51
14	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับสังกะสีและ โพแทสเซียมออกไซด์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อ ไตรเจน อุณหภูมิ และ ปริมาณความชื้น .....	55
15	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมรูปคงค้าง ของแข็งกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อ ไตรเจน อุณหภูมิ และปริมาณ ความชื้น .....	60
16	ปริมาณของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ .....	73

ตารางที่	หน้า
17 ปริมาณของโพแทสเซียมในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ .....	74
18 ร้อยละของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ .....	75
19 ร้อยละของโพแทสเซียมในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ .....	76
20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	78
21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	79
22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	80
23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปค้ำของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก .....	81
24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	82
25 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	83
26 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	84
27 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปค้ำของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก .....	85
28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของสังกะสีที่เกิดขึ้น .....	86
29 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของโพแทสเซียมที่เกิดขึ้น .....	87
30 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีและรูปแบบโพแทสเซียม .....	88

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่างๆ กับสิ่งมีชีวิต .....	13
2	เสถียรภาพของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชและไอออนในระบบเมื่อประกอบด้วย $Zn + CO_2 + S + H_2O$ ที่ $25^{\circ}C$ และความดัน 1 บรรยากาศมี $Zn = 10^{-5} \text{ mol/L}$ , $CO_2 = 10^{-3} \text{ mol/L}$ และ $S = 10^{-3} \text{ mol/L}$ .....	14
3	ความสัมพันธ์ของพีเอชกับรูปแบบของเหล็ก .....	15
4	ปฏิกิริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้น .....	16
5	โครงสร้างการจับกันของทองแดงกับหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอิมมัส .....	17
6	การพล็อตเส้นตรงระหว่าง $\log$ ของค่าคงที่ของการละลายที่ 1 ( $K_1 = \{MOH^{(z-1)+}\} \{H^+\} / \{M^{z+}\}$ ) กับอัตราส่วนระหว่างประจุกับ (ระยะทาง M-O) (z/d) สำหรับสี่กลุ่มของแคตไอออนที่ 25 องศาเซลเซียส .....	21
7	การแบ่งกลุ่มของไอออนโลหะและไอออนกึ่งโลหะ ( $As^{3+}$ และ $Sb^{3+}$ ) 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A กลุ่ม borderline และกลุ่ม B โดยกลุ่ม B จะใช้ $X_m^2/r$ เป็นตัวบ่งบอก และกลุ่ม A จะใช้ดัชนีของ $Z^2/r$ เป็นตัวแบ่ง โดยที่ $X_m$ คือค่าแรงดึงดูดอิเล็กตรอนของโลหะแต่ละตัว r คือรัศมีของไอออนแต่ละตัว และ Z คือค่าประจุ สำหรับโลหะแต่ละตัวจะนำค่ากลุ่ม B ( $X_m^2/r$ ) มาพล็อตกับกลุ่ม A ( $Z^2/r$ ) .....	22
8	การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ Cu, Zn และ Pb ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยกากตะกอนน้ำเสีย .....	24
9	การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ Cu, Zn และ Pb ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยมูลหมู .....	25
10	รูปแบบต่างๆ ของสังกะสี (Zn) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต A = เติมหินฟอสเฟต 0 %, B = เติมหินฟอสเฟต 2.5 %, C = เติมหินฟอสเฟต 5.0 % และ D = เติมหินฟอสเฟต 7.5 % .....	27
11	รูปแบบต่างๆ ของทองแดง (Cu) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต A = เติมหินฟอสเฟต 0 %, B = เติมหินฟอสเฟต 2.5 %, C = เติมหินฟอสเฟต 5.0 % และ D = เติมหินฟอสเฟต 7.5 % .....	28

รูปที่	หน้า
12	รูปแบบของสังกะสี (Zn) ก่อนการหมักกากตะกอนน้ำเสีย ..... 29
13	รูปแบบของสังกะสี (Zn) หลังการหมัก 100 วัน และหมักร่วมกับปุ๋ยขาวร้อยละ 0.63,1 และ1.63 ตามลำดับ ..... 29
14	รูปแบบของโครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe), ไทเทเนียม (Ti), สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่ง ..... 31
15	รูปแบบของตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), นิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่ง ..... 32
16	แผนผังการทดลองโดยรวม ..... 34
17	เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction Techniques) ..... 35
18	ลักษณะปุ๋ยหมักมูลหมู ..... 44
19	เปรียบเทียบสีของปุ๋ยหมักกับสีของสารอินทรีย์ ..... 44
20	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมักมูลหมู ..... 46
21	ปริมาณโลหะรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 48
22	ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมออกไซด์กับแมงกานีสออกไซด์ ..... 49
23	ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ..... 50
24	ปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 51
25	ความสัมพันธ์ของรูปเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.931, p < 0.01$ ) ..... 52
26	ปริมาณสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 53
27	ปริมาณโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 53
28	ปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 54
29	ความสัมพันธ์ของรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.944, p < 0.01$ ) ..... 56
30	ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปสารประกอบออกไซด์และรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียม ..... 56
31	ปริมาณสังกะสีออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก ..... 57

รูปที่		หน้า
32	ปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	58
33	ปริมาณสังกะสีของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก .....	59
34	ปริมาณโพแทสเซียมของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก .....	59
35	ความสัมพันธ์ของรูปทรงของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.894, p < 0.01$ ) .....	60
36	ปริมาณสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	62
37	ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	62



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยหมักมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และสังกะสี ตลอดจนสารอินทรีย์จากองค์ประกอบของพืชและมูลสัตว์ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก โดยมูลสัตว์เป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้ เนื่องจากมีปริมาณธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุสูง สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน (Qureshi et al., 2008; Li et al., 2010) เช่น ในมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลหมูมีสังกะสีและทองแดงในปริมาณสูง เนื่องจากมีการเสริมในอาหารหมูเพื่อต้านจุลชีพและเพิ่มการเจริญเติบโต (Mullins et al., 1982; Payne et al., 1988; L'Herroux et al., 1997; Zhang et al., 2012) ธาตุอาหารอาจปรากฏตัวในธรรมชาติได้หลายรูปแบบ เช่น รูปที่พืชนำไปใช้ได้ยากหรือรูปที่พืชไม่สามารถใช้ได้โดยตรง ได้แก่ รูปสารประกอบเชิงซ้อนจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางสภาวะทางเคมี เช่นเดียวกับรูปที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแร่ธาตุต้องมีการผุพังตามธรรมชาติให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงก่อน เมื่อสิ่งมีชีวิตถูกย่อยสลายโลหะจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด (Baudo, 1982) ดังนั้นการศึกษาถึงรูปแบบและปริมาณของโลหะ ตลอดจนปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยโลหะของปุ๋ยหมัก ณ เวลาต่างๆ จึงมีความสำคัญ

วิธีการศึกษารูปแบบของโลหะและลำดับความยากต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมนิยมใช้สารละลายที่มีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ทีละขั้น เรียกว่า “การสกัดแบบลำดับขั้น” (Sequential extraction) รูปแบบที่ได้แบ่งเป็น รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically complexed fraction) และรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง (residual fraction) (Tessier et al., 1979; Alloway, 1990) เช่น การศึกษาของ He et al. (2009) ที่ศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบของโลหะทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีจากปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียและปุ๋ยหมักมูลหมู พบว่าชนิดของโลหะมีอิทธิพลต่อรูปแบบโลหะและการนำไปใช้ของพืชแตกต่างกัน โดยในวัสดุหมักทั้งสองชนิดจะพบทองแดงมากในรูปสารอินทรีย์ ขณะที่พบตะกั่วมากในรูปคงค้างของแข็ง แตกต่างจากสังกะสีที่พบว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อรูปแบบที่เกิดขึ้นด้วย โดยปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียจะพบอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปที่จับกับ



คาร์บอนเนตมาก ขณะที่สารอินทรีย์ที่มีมากกว่าในปุ๋ยหมักมูลหมูทำให้พบสังกะสีในรูปสารอินทรีย์สูงสุด นอกจากนี้ ระยะเวลาการหมักและสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปที่เสถียรมากขึ้นหรือลดลงขึ้นกับคุณลักษณะและปริมาณของสารอินทรีย์ เช่น ในปุ๋ยหมักมูลหมูเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลงจากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ โดยสังกะสีจะเปลี่ยนไปเป็นรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์แทน ขณะที่การเติมสารอินทรีย์ เช่น หินฟอสเฟตจะช่วยตรึงทองแดงและสังกะสีให้แลกเปลี่ยนได้ลดลง โดยอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ รูปที่จับกับสารอินทรีย์และรูปคงค้างมากขึ้น (Lu et al., 2014)

สำหรับการศึกษานี้ พิจารณาโลหะที่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เนื่องจากปริมาณที่ปลดปล่อยออกมากำหนดปริมาณที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ ขณะเดียวกันรูปแบบอื่นๆ จะหมายถึงศักยภาพที่ยังคงมีอยู่เพื่อการปลดปล่อยธาตุนั้นอย่างต่อเนื่อง โดยตัวแทนโลหะในกลุ่มจุลธาตุอาหาร ได้แก่ สังกะสี ซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่ในดินน้อยมาก ประมาณ 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sposito, 1989) เมื่อเปรียบเทียบกับ โลหะที่อยู่ในรูปไควาเลนซ์แคตไอออนจะพบว่า สังกะสีถูกชะล้างออกมาได้ง่ายเช่นกัน เนื่องจากมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเต็มออร์บิทัลทุกระดับพลังงาน ทำให้อยู่ในรูปสารประกอบที่คงตัวได้น้อยกว่า (Stumm and Morgan, 1996; Wong and Selvam, 2006; Singh and Kalamdhad, 2013) สำหรับโพแทสเซียมเป็นตัวแทนของธาตุอาหารหลักที่เกษตรกรต้องเติมเป็นประจำเพราะเป็นธาตุที่พืชต้องการปริมาณมาก สามารถช่วยในการเพิ่มผลผลิต (Ganeshamurthy et al., 2011) และทำให้ผลไม้นหวาน (นฤมลและคณะ, 2554) เนื่องจากโพแทสเซียมอยู่ในกลุ่มโลหะแอลคาไลน์ชอบเกิดสารประกอบไอออนิกจึงแตกตัวได้ง่าย และละลายน้ำได้ดี (Chang, 2002) ทำให้โพแทสเซียมมักถูกชะออกไปจากอนุภาคดินด้วยการแทนที่ของไอออนอื่นๆ ได้ง่าย (Stumm and Morgan, 1996) จึงมักขาดแคลนและต้องมีการเติมปุ๋ยเพื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมตลอดเวลา

ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ปุ๋ยหมักมูลหมูที่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น นำมาสกัดลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier et al. (1979) ที่ดัดแปลงโดย Wada and Wada (1999) เพื่อศึกษารูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักตลอดจนศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักที่มีต่อรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาในการกำหนดวันที่เหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุดตลอดจนศึกษาการปลดปล่อยสังกะสีและโพแทสเซียมจากรูปแบบต่างๆ ณ ระยะเวลาการหมักต่างๆ และความสัมพันธ์ของรูปแบบที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์คุณภาพปุ๋ยพื้นฐาน ซึ่งความรู้นี้จะนำไปสู่การนำไปใช้จริงของเกษตรกรในการกำหนดอายุปุ๋ยเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น ณ เวลาในการหมักต่างๆ
2. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยต่อการนำรูปแบบที่เป็นประโยชน์ไปใช้กับพืช ตลอดจนศึกษาภาพในการปลดปล่อยสังกะสีและโพแทสเซียม ณ เวลาการหมักต่างๆ
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของรูปแบบสังกะสีและโพแทสเซียมกับพารามิเตอร์คุณภาพปุ๋ยพื้นฐาน อันจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการนำไปใช้ในการพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมัก ตลอดจนความเป็นประโยชน์ต่อพืชต่อไป

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยที่ต่างกัน มีผลต่อศึกษาภาพในการปลดปล่อยโลหะทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก ณ เวลาต่างๆ แตกต่างกันอย่างออกไป

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ปุ๋ยหมักมูลหมูที่นำมาศึกษาเป็นปุ๋ยหมักที่ผลิตขึ้นเองจากพื้นที่ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งส่วนผสมที่ใช้ในการหมักปุ๋ยนั้นสามารถหาได้ตามท้องถิ่นทั่วไป โดยทำ การหมักปุ๋ยเป็นเวลา 4 เดือน และทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 เพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและเคมี ได้แก่ สี กลิ่น ลักษณะวัสดุหมัก ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ค่าการนำไฟฟ้า และวิเคราะห์หารูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียมและสังกะสีด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้น เพื่อศึกษาปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของสังกะสีและโพแทสเซียมที่เกิดขึ้น ตลอดจนศึกษาภาพในการปลดปล่อยโลหะทั้งสอง ณ เวลาต่างๆ ตลอดจนการทำปุ๋ยหมัก ข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SPSS

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. สืบค้นข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนและทำการทดลองเบื้องต้น และเขียนโครงร่างการวิจัย
3. ขออนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์
4. ทำการทดลองตามแผนการทดลองและวิเคราะห์ตัวอย่าง

5. รวบรวมข้อมูลผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์
6. สอบวิทยานิพนธ์
7. แก้ไขวิทยานิพนธ์ และส่งวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ณ เวลาในการหมักต่างๆ
2. ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยต่อการนำรูปแบบที่เป็นประโยชน์ไปใช้กับพืช ตลอดจนศักยภาพในการปลดปล่อยสังกะสีและโพแทสเซียม ณ เวลาการหมักต่างๆ
3. ทราบถึงความสัมพันธ์ของรูปแบบสังกะสีและโพแทสเซียมกับพารามิเตอร์คุณภาพปุ๋ยพื้นฐาน อันจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการนำไปใช้ในการพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมักตลอดจนความเป็นประโยชน์ต่อพืชต่อไป



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากการหมักวัสดุเหลือทิ้งเป็นสารอินทรีย์บางชนิด โดยนำสารอินทรีย์เหล่านั้นมากรวมกัน และเมื่อเกิดการย่อยสลายจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในสภาพที่ชื้นและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

##### 2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก คือ ปุ๋ยที่ได้จากการหมักสารอินทรีย์ให้สลายตัวผุพังตามธรรมชาติ โดยนำสิ่งเหล่านั้นมากรวมกัน รดน้ำให้ชื้น แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เกิดการสลายตัวโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งนำไปใช้ปรับปรุงดิน ในการเตรียมกองปุ๋ยหมักอาจใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อช่วยเร่งกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และเป็นการเพิ่มคุณค่าด้านธาตุอาหารของปุ๋ยหมักด้วย (นุกดา, 2548) จากการศึกษาของ Zeng et al. (2009) แบ่งกระบวนการหมักปุ๋ยหมักออกได้เป็นช่วงเวลาของระยะของการหมักออกเป็น 4 ระยะด้วยกัน ดังนี้

##### 2.1.1.1 ระยะเริ่มผสม (Mesophilic phase)

ระยะเริ่มผสมเป็นช่วงระยะเวลาของวันแรกๆ ในกระบวนการหมักปุ๋ย คือ ปุ๋ยหมักอยู่ในช่วงอายุ 0 ถึง 2 วัน ในช่วงระยะเวลานี้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักค่อนข้างจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกเพราะยังไม่มีกิจกรรมของพวกสิ่งมีชีวิต ไม่มีการย่อยสลายของสารอินทรีย์

##### 2.1.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาในการหมักปุ๋ยที่มีอุณหภูมิสูง เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตพวกเชื้อรา โปรโตซัว และจุลินทรีย์ โดยเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลิกจะมีบทบาทสำคัญในการปลดปล่อยความร้อนทำให้กองปุ๋ยมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Tiquia et al., 1998) นอกจากนี้ความชื้นในกองปุ๋ยหมักก็จะมีค่าสูงตามไปด้วยเช่นกัน

##### 2.1.1.3 ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (Temperature falling phase)

ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาช่วงเวลานี้ของกระบวนการหมักปุ๋ย จะพบว่าอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักที่ก่อนหน้านี้มีอุณหภูมิสูงนั้น เริ่มจะมีอุณหภูมิต่ำลง และเริ่มจะมีแนวโน้มของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็พบว่ากิจกรรมของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่เคยย่อยสารอินทรีย์ก็เริ่มจะเกิดขึ้นน้อยลง เช่นกัน

#### 2.1.1.4 ระยะที่อุณหภูมิคงที่ (Maturation phase)

ระยะที่อุณหภูมิคงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ในช่วงระยะเวลาสุดท้ายของกระบวนการหมักปุ๋ยหมัก อุณหภูมิเริ่มจะมีความคงที่เพิ่มมากขึ้น สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายมาเรื่อยๆ เมื่อถึงในช่วงระยะเวลานี้ก็เริ่มจะมีความเสถียรมากขึ้น

โดยในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการหมักปุ๋ยหมักก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ละช่วงเวลา การย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักโดยกระบวนการของจุลินทรีย์ จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง โดยเฉพาะปัจจัยในด้านของระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการหมักปุ๋ย อุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นต้น (สาวิตรี, 2553) โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของปุ๋ยหมักก่อนและหลังการหมัก ที่ดูได้อย่างง่ายจากสีที่มีลักษณะที่เข้มข้น (Stevenson, 1982) และกลิ่นของแอมโมเนียจะลดลง เนื่องจากจะถูกใช้ไปโดยแบคทีเรียในกลุ่มไนตริฟิเคชัน (Sasaki et al., 2004) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง

คุณลักษณะ	การเปลี่ยนแปลงของปุ๋ยหมัก	
	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ	สูง	ลดลงเท่ากับอุณหภูมิภายนอก
สี	สีน้ำตาล	สีน้ำตาลดำ
กลิ่น	มีกลิ่นเหม็นฉุนของก๊าซต่างๆ	ไม่มีกลิ่นเหม็นฉุนของก๊าซต่างๆ
ลักษณะวัสดุหมัก	เป็นชิ้นของวัสดุหมัก	อ่อนนุ่มและเปียกชุ่ม
ความอุดมสมบูรณ์	ไม่มีวัชพืชขึ้นบนกองปุ๋ย	อาจมีหญ้าหรือเห็ดขึ้นบนกองปุ๋ย

สำหรับเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยหมักที่พร้อมจำหน่าย จะต้องเป็นไปตามตารางที่ 2 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ต้องมีขนาดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิเมตร ขนาดของปุ๋ยมีความสำคัญในการสร้างสมดุลของพื้นผิวสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และทำให้มีความพรุนเพียงพอสำหรับให้อากาศถ่ายเท ถ้าอนุภาคขนาดใหญ่จะทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อมวลต่ำ ดังนั้นถ้าอนุภาคในปุ๋ยใหญ่จะทำให้การย่อยสลายไม่เหมาะสมคือเกิดการย่อยสลายไม่หมด เพราะจุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าไปด้านในของอนุภาคได้ (Bernal et al., 2009) ความชื้นไม่เกินร้อยละ 35 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) โดยความชื้นในระหว่างกระบวนการหมักก็แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับของเสียที่นำมาใช้ ทั่วไปแล้วจะมีค่าร้อยละ 50-60 (Gajalakshmi and Abbasi, 2008) ซึ่งความชื้นในช่วงดังกล่าวจะเหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Tiquia et al., 1998) เมื่อความชื้นเกินร้อยละ 60

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5 × 12.5 มิลลิเมตร
2	ความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกินร้อยละ 35
3	หิน กรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
4	เศษพลาสติก เศษแก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20:1
8	ค่าการนำไฟฟ้า	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต่อเมตร
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก	ไนโตรเจน (Total N) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โพแทสเซียม (Total K <sub>2</sub> O) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 และฟอสฟอรัส (Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
10	การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์	มากกว่าร้อยละ 80
11	ปริมาณสารพิษและโลหะหนัก	สารหนู (As) ไม่เกินร้อยละ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แคดเมียม (Cd) ไม่เกินร้อยละ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง (Cu) ไม่เกินร้อยละ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว (Pb) ไม่เกินร้อยละ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปรอท (Hg) ไม่เกินร้อยละ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของออกซิเจนและจะทำให้กระบวนการหมักกลายเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Das and Keener, 1997) ระหว่างกระบวนการหมักน้ำจะระเหยไปในปริมาณมาก เพื่อที่ควบคุม อุณหภูมิและในระหว่างที่สูญเสียน้ำอัตราของการย่อยสลายจะช้าลง ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าอยู่ในช่วง 5.5-8.5 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) Bernal et al. (2009) กล่าวว่าช่วงค่าความเป็น กรด-ด่าง 6.7-9.0 เป็นช่วงที่เหมาะสมของกิจกรรมจุลินทรีย์ระหว่างกระบวนการหมัก ส่วน de Bertoldi et al. (1983) และ Miller (1992) เสนอว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ 5.5-8.0 ปริมาณอินทรีย์วัตถุต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ในระหว่างกระบวนการหมัก สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายและทำให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ลดลงด้วย (Bernal et al., 2009) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่บ่งบอกความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (Hsu and Lo, 1999; Huang et al., 2006) Nolan et al. (2011) บอก ว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ไม่เกิน 20:1 ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ในช่วงแรกอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักจะ ลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ได้ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Tam et al., 1996) และเกิดเป็นสารชีวมีกที่มีมากขึ้น (Bernal et al., 2009; Lu et al., 2014) ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมักปุ๋ย จะอยู่ในช่วง 25-35 จุลินทรีย์จะต้องการคาร์บอนต่อไนโตรเจน 30 (Bishop and Godfrey, 1983) ถ้า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่า 35 จะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้ช้า เนื่องจาก มีสารตั้งต้นสำหรับจุลินทรีย์มากเกินไป ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำจะทำให้มีปริมาณ ไนโตรเจนที่มากเกินไปต่อคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ ดังนั้นเมื่อมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จะแก้ไขได้โดยการเติม bulking agent เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (Bernal et al., 2009)

### 2.1.2 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

1. ปรับปรุงสภาพหรือลักษณะของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ดินเหนียว ปุ๋ยหมักก็จะช่วยทำให้ดินนั้นมีสภาพร่วนซุยมากขึ้น ช่วยลดการจับตัวเป็นแผ่นแข็งของ หน้าดิน และช่วยลดการไหลบ่าของน้ำเวลาฝนตก

2. เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เช่น ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้แก่ต้นพืช อย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ

3. ปุ๋ยหมักยังมีคุณค่าในแง่ของการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์อีกหลายๆ อย่าง เช่น ช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในดินแปรสภาพมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ง่ายขึ้น ช่วยดูดซับแร่ธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกน้ำฝนชะล้าง

## 2.2 ธาตุอาหารพืช

ธาตุอาหารพืชแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ธาตุอาหารมหธาตุ หมายถึง ธาตุที่พืชต้องการปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อพืช ในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (พืชแห้ง) มี 9 ธาตุ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน โดยที่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมเรียกรวมกันว่า ธาตุปุ๋ย

2. จุลธาตุอาหาร หมายถึง ธาตุที่พืชต้องการปริมาณน้อยและสะสมในเนื้อเยื่อพืช ในความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (พืชแห้ง) มี 8 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม นิกเกิล และคลอรีน

กลุ่มธาตุทั้ง 2 กลุ่มนี้ จะมีความสำคัญต่อการดำรงชีพของพืชเท่า ๆ กัน จะต่างกันก็แต่ ปริมาณที่พืชต้องการเท่านั้น โดยพืชจะได้รับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม นิกเกิล และคลอรีน จากดิน ยกเว้นไนโตรเจนบางส่วนที่ได้รับจากพืชตระกูลถั่วบ้าง ส่วนคาร์บอนกับออกซิเจนจะได้รับ จากอากาศ และไฮโดรเจนจะได้รับจากน้ำ ionic ธาตุอาหารหากมีมากเกินไปจะเป็นพิษต่อ พืช (สำนักงานเกษตรจังหวัดลำพูน, 2558) ดังนั้นจึงมีกำหนดมาตรฐานโลหะหนักในดิน ค่าสูงสุดที่ ยอมรับให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์ และค่ากำหนดที่ยอมรับได้ในกากตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตร ดังตารางที่ 3

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาธาตุอาหารพืช 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสีและโพแทสเซียม โดยจะกล่าวถึงพอสังเขปดังนี้

### 2.2.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุที่มีความสำคัญสำหรับมนุษย์ สัตว์ และพืชชั้นสูง โดย Sommer and Lipman (1926) พบประโยชน์ของสังกะสีต่อพืช พืชจะดูดซับสังกะสีในรูปของไดวาเลนต์ แคตไอออน ( $Zn^{2+}$ )

#### 2.2.1.1 บทบาทของสังกะสีที่มีต่อพืช มีดังนี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1. มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนพืช
2. มีส่วนในการขยายพันธุ์พืชบางชนิด
3. มีบทบาททางอ้อมในการสร้างคลอโรฟิลล์
4. เป็นตัวปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น carbonic anhydrase alcohol dehydrogenase และ peptidase หลายชนิด



### 2.2.2.2 อาการของพืชเมื่อขาดสังกะสี

พืชที่ขาดสังกะสีจะมีการยืดต้น (stem elongation) ช้าและมีใบเล็กแคบ ไม่ออกผล และผลิตออกซิน (auxin) ได้น้อยลงหรืออาจไม่ผลิตเลยก็ได้ เช่น ในมะเขือเทศ และทานตะวัน และยังมีผู้พบอีกว่าเมื่อพืชขาดสังกะสี กิจกรรมของออกซินจะลดลงถึงร้อยละ 50 หรือมากกว่านั้น ในกรณีที่พืชแสดงอาการขาดสังกะสีอย่างรุนแรงการใส่สังกะสีลงไปจะทำให้ปริมาณออกซินในพืชเพิ่มขึ้นอย่างมาก ภายใน 2-3 วัน ต่อมาใบที่แสดงอาการขาดสังกะสี จะมีน้ำน้อยกว่าปกติ เพราะความดันออสโมติก (osmotic pressure) ของน้ำเลี้ยงในเซลล์ (cell sap) ของส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชอยู่ในระดับ 5-9 บรรยากาศ ในขณะที่พืชปกติมีความดันออสโมติก เพียง 5-6 บรรยากาศเท่านั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 3 เกณฑ์การยอมรับของปริมาณ โลหะที่มีได้

โลหะหนัก	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน (มก./กก.) <sup>1</sup>	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน (มก./กก.) <sup>2</sup>	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ในปีอินทรีย์ (มก./กก.) <sup>3</sup>	ค่ากำหนดที่ยอมรับได้ในการเกษตรนำไปใช้ในการเกษตร (มก./กก.) <sup>4</sup>
1. สารหนู	-	30	50	-
2. แคดเมียม	3	0.15	5	20
3. โครบอลต์	100	20	-	-
4. โครเมียม	100	80	300	1,000
5. ทองแดง	100	45	500	900
6. พรอท	1	0.1	2	10
7. นิกเกิล	50	45	-	400
8. ตะกั่ว	100	55	500	1,000
9. สังกะสี	300	70	-	3,000

ที่มา: สำนักงานเกษตรจังหวัดลำพูน (2558)

หมายเหตุ: <sup>1</sup> มาตรฐานของโลหะหนักในดิน กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป

<sup>2</sup> เอกสารวิชาการ “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน” ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย

<sup>3</sup> มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ.2548 กรมวิชาการเกษตร

<sup>4</sup> วารสารดินและปุ๋ย ปีที่ 20 เล่ม 4 ต.ค.-ธ.ค. 2541

### 2.2.2.3 ความเป็นพิษจากสังกะสี (ยงยุทธ, 2552)

พืชที่ไม่ทนต่อสังกะสีหากได้รับธาตุนี้มากจะเป็นพิษ และอาการแรกทีเด่นชัด คือ รากหยุดการยึดตัว นอกจากนั้นใบอ่อนจะเหลืองซีดซึ่งเป็นอาการขาดเหล็กในภาวะที่มีสังกะสีมากเกินไป ทั้งนี้เพราะทั้งสองธาตุมีขนาดของไฮดรตไอออนใกล้เคียงกัน จึงเป็นปฏิปักษ์ต่อกันในการดูดที่ราก และรากพืชดูดเหล็กมาได้น้อยลง (Boardman and McGuire, 1990)

## 2.2.2 โปแทสเซียม

โปแทสเซียมเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับการดำรงชีพของพืช และอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นอนุโมลของเกลือที่ละลายน้ำได้ ไม่เกิดการแปรสภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ และเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ในพืช เช่นเดียวกับธาตุฟอสฟอรัสและธาตุไนโตรเจน (มุกดา, 2548)

### 2.2.2.1 บทบาทของโปแทสเซียมที่มีต่อพืช มีดังนี้ (ปฐพีซล, 2533)

1. ส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก ทำให้รากดูดน้ำได้ดีขึ้น
2. มีความจำเป็นต่อการสร้างเนื้อของผลไม้ให้มีคุณภาพดีขึ้น
3. ทำให้พืชมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของดินฟ้าอากาศ เช่น มีแสงน้อย อากาศหนาวหรือมีฝนตกชุก
4. ทำให้พืชมีความต้านทานต่อโรคต่างๆ
5. ช่วยป้องกันผลเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับพืชเนื่องจากการที่ได้รับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากเกินไป
6. ช่วยเพิ่มคุณภาพของพืชและผลไม้ โดยทำให้พืชมีสีส้ม ขนาดความหวาน และการคงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้

### 2.2.2.2 อาการของพืชเมื่อขาดโปแทสเซียม

หากพืชขาดธาตุโปแทสเซียมจะแสดงอาการ คือ

1. ขอบใบมีสีเหลืองจากนั้นจะกลายเป็นสีน้ำตาลโดยเริ่มต้นจากปลายใบเข้าสู่กลางใบ ส่วนที่เป็นสีน้ำตาลจะแห้งเหี่ยวไป จะเกิดจากใบล่างก่อน แล้วจึงค่อยๆ ลามขึ้นข้างบน พืชที่เห็นชัดคือข้าวโพด

2. ทำให้ผลผลิตตกต่ำ พืชพวกธัญพืชจะทำให้เมล็ดลีบมีน้ำหนักเบา พืชหัวจะมีแป้งน้อยและน้ำมาก ข้าวโพดจะมีเมล็ดไม่เต็มฝัก ฝักจะเล็กมีรูปร่างผิดปกติ ใบยาสูบมีคุณภาพต่ำ ติดไฟยาก กลิ่นไม่ดี พืชจำพวกฝ้ายใบจะมีสีน้ำตาลปนแดง สมอฝ้ายที่เกิดขึ้นจะไม่อ้าเต็มทีเมื่อแก่

ปุ๋ยหมัก นอกจากจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชแล้ว ยังมีคุณค่าในแง่ของการช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในดินแปรสภาพมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ง่ายขึ้น

## 2.3 รูปแบบของโลหะ

รูปแบบของโลหะมีทั้งรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อาทิเช่น โลหะที่อยู่ในรูปแบบไอออน โลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ เป็นต้น นอกจากนี้โลหะจะมีประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตแล้ว หากได้รับโลหะในปริมาณที่มากเกินไปจนอาจก่อให้เกิดโทษต่อสิ่งมีชีวิตได้เช่นกัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของโลหะนั่นเอง ดังนั้น การพิจารณา รูปแบบของโลหะจึงมีความสำคัญต่อการพิจารณาความเป็นพิษของโลหะ ทำให้การศึกษาเพื่อแยก รูปแบบต่างๆ ของโลหะออกจากกัน จึงมีความจำเป็นเพื่อใช้เป็นข้อมูลที่จะนำไปประเมินรูปแบบของโลหะที่สิ่งมีชีวิตจะนำไปใช้ประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตนั่นเอง

### 2.3.1 รูปแบบของโลหะในสิ่งแวดล้อม

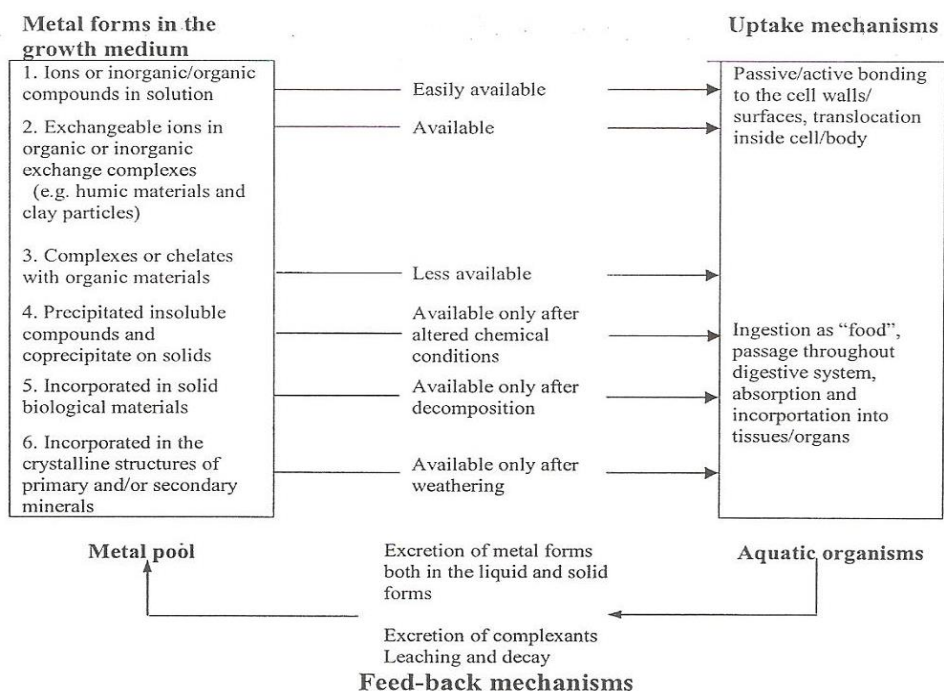
การสะสมของโลหะในสิ่งแวดล้อมมีด้วยกันหลายรูปแบบ ตั้งแต่รูปแบบที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเข้าไปสะสมอยู่ในตะกอนหรือสะสมในสิ่งมีชีวิต ไปจนกระทั่งถึงรูปแบบที่ยึดเกาะด้วยพันธะที่แข็งแรงและถูกปลดปล่อยออกมาได้ยากตามลำดับ ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งโลหะที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จะพบรูปแบบในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. โลหะที่อยู่ในรูปของไอออน รูปสารประกอบอนินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำอยู่ จะเป็นรูปแบบที่เข้าไปสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายที่สุด เช่น ไอออน ( $Zn^{2+}$ ) อีสาระ ไอออน ( $K^+$ ) อีสาระ เป็นต้น

2. โลหะที่อยู่ในรูปไอออนแลกเปลี่ยนได้ ที่อยู่ร่วมกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และอนินทรีย์จะเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ง่าย เช่น ซิงค์ที่อยู่ในรูปสารคอมเพล็กซ์กับลิแกนด์อินทรีย์หรือลิแกนด์อนินทรีย์ และ ไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้หรือในสารละลายดินมักแตกตัวจากเกลือซัลเฟต คลอไรด์ และไบคาร์บอเนต เหล็กคีเลตซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเหล็กไอออนกับสารคีเลตรวมชาติ เช่น กรดฮิวมิก สังกะสีที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของแร่ อะลูมิเนียมซิลิเกต ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส ตลอดจนฮิวมัส เป็นต้น

3. โลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน หรือพวคีเลตกับสารอินทรีย์จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้น้อย เช่น สารอินทรีย์ที่จับเหล็กไว้เป็นเหล็กคีเลต สารอินทรีย์ที่จับสังกะสีไว้เป็นสังกะสีคีเลต เป็นต้น

4. สารประกอบที่ตกตะกอนไม่ละลายและสารประกอบตกตะกอนร่วมของโลหะบนพื้นผิวของของแข็งนั้น จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น



### รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่างๆ กับสิ่งมีชีวิต

ที่มา: Baudo (1982)

5. โลหะที่อยู่ในรูปของของแข็งในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต โลหะในรูปแบบนี้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีโดยมีการนำเป็ยผูกพันเสียก่อนจึงจะอยู่ในรูปที่นำเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้

6. โลหะที่อยู่ในรูปผลึกแร่ทั้งปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิ จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ก็ต่อเมื่อมีการผูกพันของแร่ธาตุด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิวิทยายภายใต้ความร้อนและความดันร่วมกับกระบวนการทางเคมีและชีวภาพ เช่น สังกะสี รูปที่พบคือแร่แมกนีไทต์ ไบโอไทต์ และฮอร์นเบลนด์ แร่ทุติยภูมิบางชนิดที่เป็นสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ และซิลิเกต และโพแทสเซียม รูปที่พบคือ แร่เฟลด์สปาร์ ไมกา แร่ดินเหนียว เช่น illite

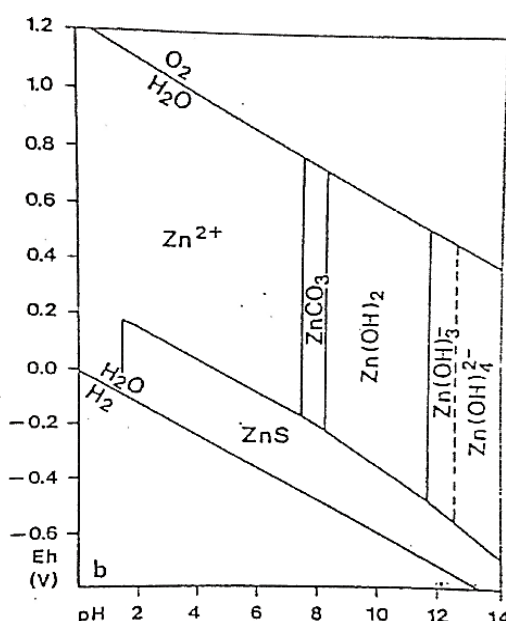
โดยกระบวนการนำโลหะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตนั้นจะมีการดูดซึมผ่านเข้าทางผิวหนังหรือดูดซึมเข้าสู่เซลล์หรือร่างกาย หากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่จะเข้าสู่กระบวนการย่อยอาหาร ผ่านทางระบบทางเดินอาหารและถูกดูดซับเข้าไปยังเนื้อเยื่อและอวัยวะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตและเมื่อสิ่งมีชีวิตขับถ่ายของเสียซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลว หรือเกิดการล้มตายลง โลหะในรูปแบบต่างๆ ก็จะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมย้อนกลับเข้าสู่วัฏจักรดังกล่าวอีกครั้ง

### 2.3.2 ลิแกนด์และกลไกการเกิดสารประกอบโลหะ

ในการหมักปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แร่ธาตุ และสารอินทรีย์ที่มีความคงตัว ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบโลหะต่างๆ ดังนี้

#### 2.3.2.1 แอนไอออน

แอนไอออนที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติที่สามารถเกิดสารประกอบกับโลหะนั้น ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต เป็นต้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักปุ๋ยรูปของแอนไอออนที่สามารถเกิดสารประกอบโลหะอาจจะเป็นแอนไอออนชนิดไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตที่จะเกิดเป็นสารละลายหรือตกตะกอนได้ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของตัวมันเอง อย่างไรก็ตามพบว่าการตกตะกอนของโลหะจะขึ้นกับ พีเอช พีอี และปริมาณความเข้มข้นของแอนไอออนต่างๆ โลหะส่วนใหญ่มักพบอยู่ในรูปไอออนอิสระที่ช่วงพีเอชต่ำ และเมื่อมีการเพิ่มพีเอชในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ โลหะจะอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความคงตัวมากกว่า ขณะที่สภาวะไร้ออกซิเจนสารประกอบโลหะซัลไฟด์จะคงตัวที่สุดในช่วงพีเอชกว้าง ดังรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของสังกะสีกับแอนไอออนทั้ง 3 ชนิด คือ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ และคาร์บอเนต

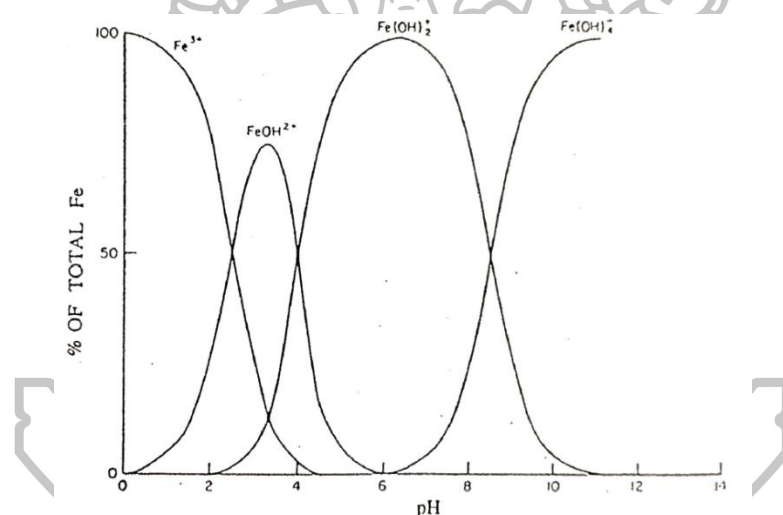


**รูปที่ 2** เสถียรภาพของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชและอีเอชในระบบเมื่อประกอบด้วย  $Zn + CO_2 + S + H_2O$  ที่  $25^{\circ}C$  และความดัน 1 บรรยากาศ มี  $Zn = 10^{-5}$  mol/L,  $CO_2 = 10^{-3}$  mol/L และ  $S = 10^{-3}$  mol/L

ที่มา: Hem (1972)

### 2.3.2.2 รูปสารประกอบไฮดรอกไซด์

ในธรรมชาติโลหะที่อยู่ในปุ๋ยหมักจะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ โดยเฉพาะเหล็กและแมงกานีส ซึ่งพบว่าไฮดรอกไซด์ของโลหะทั้งสองมีคุณสมบัติเป็นตัวควบคุมพีเอช (pH) สามารถดูดซับแคทไอออนและแอนไอออนได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงไฮดรอกไซด์ของเหล็ก ซึ่งในธรรมชาติเหล็กจะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปโพลิเมอร์หรือโมโนเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และประจุบนพื้นผิวของมันจะทำให้สารประกอบเหล่านี้ถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของคอลลอยด์ดินเหนียวได้ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเหล็กในช่วงค่าพีเอชที่แตกต่างกันก็จะเกิดสารประกอบของเหล็กในรูปแบบที่ต่างกัน (นัทธิรา, 2541) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยจะพบว่าในช่วง pH > 6 เหล็กจะอยู่ในรูปแบบของ  $\text{Fe(OH)}_4^-$  ซึ่งจะแสดงประจุลบออกมาทำให้สามารถดูดซับโลหะได้ดังรูปที่ 4 (ก), (ข), (ค), (ง) และ (จ)

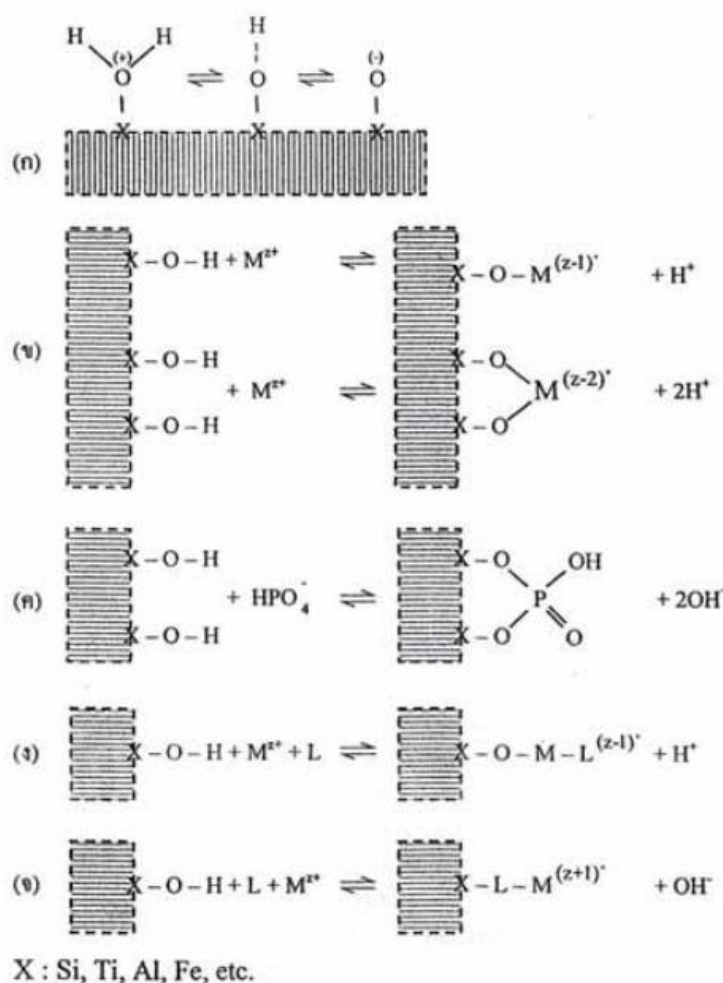


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของพีเอชกับรูปแบบของเหล็ก

ที่มา: Bohn et al. (1985)

### 2.3.2.3 รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์

จากผลผลิตที่ได้อาจจากการหมักปุ๋ยจะได้สารอินทรีย์ที่มีความคงตัวในการเก็บกัก คือ สารประกอบฮิวมัสซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีความเสถียรมากที่สุด เป็นตัวช่วยยึดเกาะโลหะ เนื่องมาจากการมีประจุที่แตกต่างกันซึ่งพบว่ากรดฮิวมิกและฟัลวิกมีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะ เพราะสามารถเกิดพันธะกับโลหะได้ โดยที่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับโลหะ (Stevenson, 1994) ดังรูปที่ 5

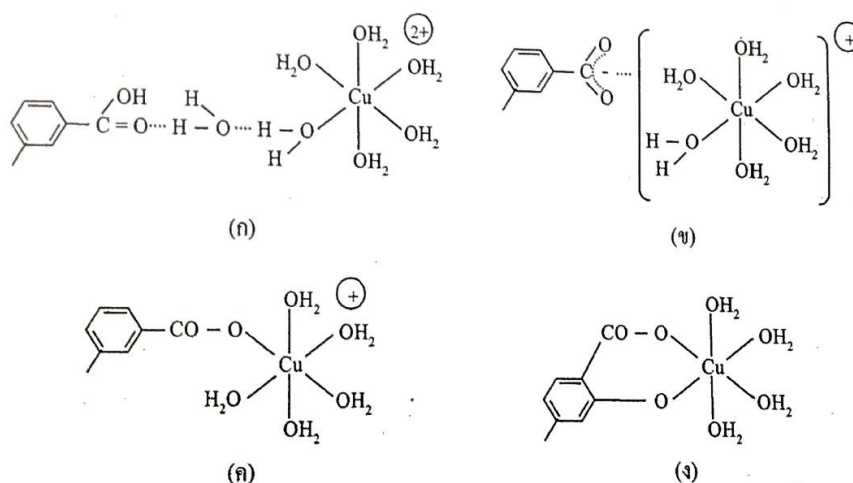


รูปที่ 4 ปฏิกิริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้น

- (ก) ปฏิกิริยากรด-เบส บริเวณผิวของออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล
- (ข) ไอออนของโลหะแทนที่  $\text{H}^+$  ของหมู่ไฮดรอกซิล
- (ค) หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยลิแกนด์อื่นๆ
- (ง) ไอออนของโลหะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับลิแกนด์อื่น และเกิดการแทนที่  $\text{H}^+$  ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของออกไซด์ด้วย
- (จ) Multidentate ligand ที่ละลายน้ำ ทำปฏิกิริยาทั้ง X และไอออนของโลหะด้วยพันธะโคออร์ดิเนต

ที่มา: นัทธีรา (2541) และ Bradl (2004)





### รูปที่ 5 โครงสร้างการจับกันของทองแดงกับหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอิมิด

- (ก) จับกันด้วย water bridge
- (ข) จับกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับหมู่ COO
- (ค) จับกันด้วยพันธะโคออร์ดิเนต โดยมีผู้ให้อิเล็กตรอนตัวเดียว
- (ง) จับกันด้วยพันธะโคออร์ดิเนต แต่โมเลกุลที่เข้าไปจับนั้นมีตำแหน่งให้อิเล็กตรอนที่มากกว่า 1 หมู่

ที่มา: Stevenson (1994) และ Tan (2014)

จะเห็นได้ว่าโลหะสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆ และทำให้เกิดการสะสมในรูปแบบต่างๆ โดยลำดับความชอบของไอออนโลหะที่เกิดสารประกอบสอดคล้องกับความสามารถของ ลิแกนด์ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะดังนี้  $MnO_2 > กรดฮิวมิก > เหล็กออกไซด์ > แร่ดินเหนียว$  (Guy and Chakrabarti, 1975) โดย Bradl (2004) กล่าวว่าพื้นผิวดังกล่าวจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะ (Stevenson, 1994; Gungor and Bekbolet, 2010)

ความจำเพาะเจาะจงกับไอออนหรือโมเลกุลที่เกิดพันธะกับโลหะในไอออนเชิงซ้อนที่เรียกว่าลิแกนด์ (ligand) ที่มีมากน้อยต่างกัน ทำให้ความสามารถในการจับลิแกนด์ต่างๆ นั้นต่างกันไปด้วย อันส่งผลไปถึงเสถียรภาพของสารประกอบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติที่ต่างกันออกไป เหล่านี้จึงต้องอาศัยคุณสมบัติบางประการในการจัดกลุ่มโลหะให้ละเอียดลงไป ได้แก่ การจัดจำแนกตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d ออร์บิทัล และการจัดกลุ่มกรด-เบสอ่อนแก่ หรือที่เรียกว่า hard and soft acid-base (HSAB) และดัชนี ของ Niboer and Richardson (Stumm and Morgan, 1996)



เพื่อที่จะสามารถทำนายแนวโน้มของการเกิดสารประกอบของโลหะและคุณสมบัติที่เฉพาะเจาะจงลงไปได้มากขึ้นอันนำไปสู่การบ่งบอกถึงเสถียรภาพของโลหะนั้นๆ อีกด้วย

### 1. การจัดจำแนกโลหะโดยใช้การจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d

สำหรับการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d นี้สามารถแบ่งโลหะออกเป็น 3 กลุ่มดังตารางที่ 4 ได้แก่

- โลหะกลุ่ม A ไม่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d
- โลหะกลุ่ม B มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d จำนวน 10-12 ตัว

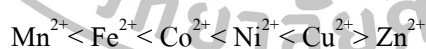
ตารางที่ 4 ความชอบของไอออนของโลหะกลุ่มต่างๆ กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ

ไอออนของโลหะกลุ่ม A (A-Type Metal Cations)	ไอออนของโลหะแทรนซิชัน (Transition-Metal Cations)	ไอออนของโลหะกลุ่ม B (B-Type Metal Cation)
Ligands : F>O>N>Cl>Br>I>S OH->RO->RCO <sub>2</sub> <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> >>NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> >>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >>ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	มีแนวโน้มอยู่ระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B	Ligands: S>I>Br>Cl>N>O>F

ที่มา: Stumm and Morgan (1996)

- โลหะแทรนซิชันมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้นนี้ 1-9 ตัว

Irving-Williams (1953) ได้ค้นพบ กฎของลำดับเสถียรภาพของสารประกอบเชิงซ้อน (complex stability) โดยเสถียรภาพของสารประกอบโลหะแทรนซิชันจะเพิ่มขึ้นโดยเรียงลำดับดังนี้

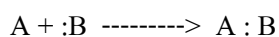


ซึ่งจะเห็นได้ว่าการจัดแบ่งโลหะ โดยดูจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนบางครั้งไม่สามารถสรุปได้ถึงแนวโน้มของสารประกอบที่เกิดขึ้น ต้องอาศัยความรู้ในการเกิดปฏิกิริยาเข้ามาช่วยแบ่งโลหะในการเกิดสารประกอบ และในกรณีนี้สามารถนำมาใช้พิจารณาเสถียรภาพของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดียิ่งขึ้น

### 2. การแบ่งกลุ่มตามทฤษฎี Hard and Soft Acids and Bases (HSAB)

โลหะกลุ่มแทรนซิชันหรือโลหะกลุ่ม borderline และโลหะกลุ่ม B บางชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยากับลิแกนด์ชนิดเดียวกันแต่มีแรงดึงดูดที่แตกต่างกัน อาจทำให้เสถียรภาพของสารประกอบรวมถึงคุณสมบัติของสารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกันด้วย จึงต้องมีการพิจารณา

ชนิดของลิแกนด์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยากับโลหะแต่ละตัวเป็นกรณีไป โดยอาศัยคุณสมบัติของโลหะในการที่เป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Lewis acid) จากผู้ให้อิเล็กตรอน (Lewis base) ของ Pearson หรือ HSAB concept ดังสมการ



ซึ่งทฤษฎีที่อาศัยหลักการให้และรับคู่อิเล็กตรอนนี้บางครั้งเรียก “ทฤษฎีผู้ให้-ผู้รับ หรือ donor-acceptor theory” ตามทฤษฎีของ HSAB สามารถจัดกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ 5 ได้แก่

- โลหะกลุ่มกรดแก่ (hard acid) ได้แก่ ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มแอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ท
- โลหะกลุ่มก้ำกึ่งระหว่างกรดแก่และกรดอ่อน (borderline) ได้แก่ ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะทรานซิชันที่มีเลขออกซิเดชันเป็น 2+
- โลหะกลุ่มกรดอ่อน (soft acid) ได้แก่ ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d จำนวน 10-12 ตัว ยกเว้น  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  และ  $Bi^{3+}$

ตารางที่ 5 การจำแนกไอออนของโลหะแบบกรด-เบสตามทฤษฎีของ Pearson

According to Pearson's (1963) Hard and Soft Acids		
Hard Acids	Borderline	Soft Acids
All A-type metal cations plus $Cr^{3+}$ , $Mn^{3+}$ , $Fe^{3+}$ , $Co^{3+}$ , $UO^{2+}$ , $VO^{2+}$	All bivalent transition-metal Cations plus $Zn^{2+}$ , $Pb^{2+}$ , $Bi^{3+}$ , $SO_2$ , $NO^+$ , $B(CH_3)_3$	All B-type metal cations Minus $Zn^{2+}$ , $Pb^{2+}$ , $Bi^{3+}$
Preference for ligand atom: N >> P O >> S F >> Cl		P >> N S >> O I >> F

ที่มา: นัทธีรา (2554) อ้างจาก Pearson (1963)

จากตารางที่ 5 ได้แยกหมู่โลหะออกเป็น “hard” และ “soft” ตามความสามารถในการให้อิเล็กตรอนโดยโลหะกลุ่ม A นั้นจะจัดเป็นพวกกรดแก่ (hard acid) ส่วนโลหะกลุ่ม B นั้นจะจัดเป็นพวกกรดอ่อน (soft acid) ซึ่งพบว่าในกลุ่มโลหะทรานซิชันระบบการจัดการแยกแบบ “hard” และ “soft” จะแยกจากกันอย่างไม่ชัดเจน แต่จะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงไปที่ละน้อย ซึ่งสามารถสรุป

การจำแนกไอออนของโลหะตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d ออร์บิทัล และการจัดกลุ่มตามทฤษฎี Hard and soft acid and base ดังตารางที่ 6

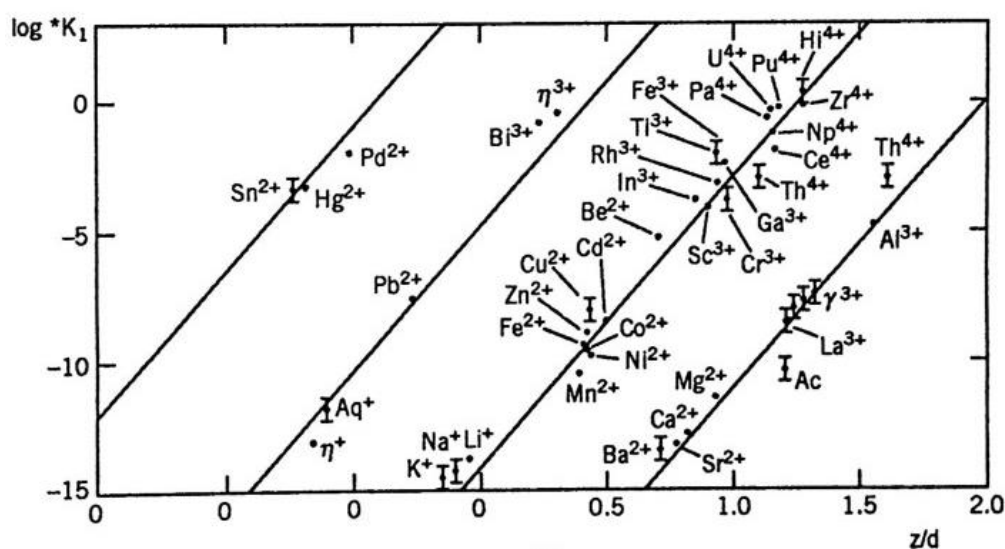
ตารางที่ 6 สรุปการจำแนกไอออนของโลหะตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d ออร์บิทัล และการจัดกลุ่มตามทฤษฎี Hard and soft acid and base

ไอออนของโลหะกลุ่ม A (A-Type Metal Cations)	ไอออนของโลหะทรานซิชัน (Transition-Metal Cations)	ไอออนของโลหะกลุ่ม B (B-Type Metal Cation)
$H^+$ , $Li^+$ , $Na^+$ , $K^+$ , $Be^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ , $Sr^{2+}$ , $Al^{3+}$ , $Sc^{3+}$ , $La^{3+}$ , $Si^{4+}$ , $Ti^{4+}$ , $Zr^{4+}$ , $Th^{4+}$ , $Cr^{3+}$ , $Mn^{3+}$ , $Fe^{3+}$ , $Co^{3+}$ , $UO^{2+}$ , $VO^{2+}$	$V^{2+}$ , $Cr^{2+}$ , $Mn^{2+}$ , $Fe^{2+}$ , $Co^{2+}$ , $Ni^{2+}$ , $Cu^{2+}$ , $Ti^{3+}$ , $V^{3+}$ , $Zn^{2+}$ , $Pb^{2+}$ , $Bi^{3+}$ , $SO_2$ , $NO^+$ , $B(CH_3)_3$	$Cu^+$ , $Ag^+$ , $Au^+$ , $Tl^+$ , $Ga^+$ , $Cd^{2+}$ , $Hg^{2+}$ , $Sn^{2+}$ , $Tl^{3+}$ , $Au^{3+}$ , $In^{3+}$

ที่มา: นัทธีรา (2554)

จากทฤษฎีการจัดจำแนกทั้งสองทำให้ทราบปฏิกิริยาของโลหะที่เกิดในรูปแบบต่างๆ เช่น โลหะที่อยู่ในกลุ่ม A ชอบที่จะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์ที่มีออกซิเจน และฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบมากกว่าที่จะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งรูปแบบของโลหะที่เกิดขึ้นมักจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ โดยเฉพาะโลหะกลุ่มแอลคาไลน์จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก มีคุณสมบัติการละลายน้ำได้ดี (Chang, 2002) ส่วนโลหะในกลุ่ม B ชอบที่จะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบมากกว่าที่จะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์ที่มีออกซิเจน และฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบ และรูปแบบที่เกิดขึ้นในกลุ่มนี้มีพิษรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุด การเลือกจับของไอออนโลหะจะเป็นไปตามหลักการของ Lewis hard-soft acid-base (HSAB) hard Lewis acid ชอบเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ hard Lewis base ส่วนกรดอ่อนก็ชอบจับกับเบสอ่อน (Pulls and Bohm, 1988) คำว่า Hard หมายถึงมีแรงดึงดูดอิเล็กตรอนสูง โพลาริซต่ำ และมีรัศมีของไอออนต่ำ ส่วน soft เป็นในทางตรงกันข้าม แร่ดินเหนียวจะเป็นเบสอ่อนส่วนเหล็กออกไซด์จะเป็นเบสแก่ (Alloway, 1990) ดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าโลหะที่มีเลขประจุสูงกว่าจะมีความเป็นกรดมากกว่าโลหะที่มีเลขประจุน้อย และโลหะที่มีรัศมีใหญ่กว่าจะมีความเป็นกรदन้อยกว่าโลหะที่มีรัศมีน้อย และโลหะที่มีเลขประจุที่ต่ำกว่าจะมีคุณสมบัติของการเกิดพันธะไอออนิกได้ดีกว่าโลหะที่มีเลขประจุที่สูงกว่า ส่วนโลหะที่มีค่าแรงดึงดูดอิเล็กตรอนสูงกว่า

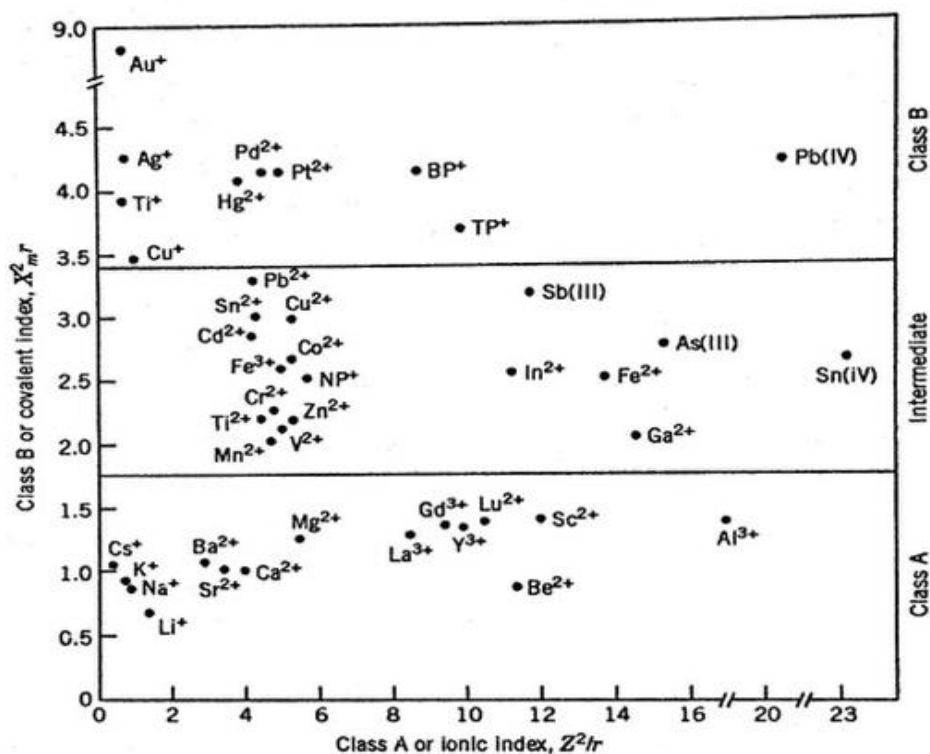
จะมีคุณสมบัติของการเกิดพันธะโคเวเลนต์ได้ดีกว่าโลหะที่มีแรงดึงดูดอิเล็กตรอนที่ต่ำกว่า จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าโลหะที่อยู่ในกลุ่ม A จะมีคุณสมบัติของการเกิดพันธะไอออนิกได้ดีกว่าโลหะที่อยู่ในกลุ่ม B แต่จะมีคุณสมบัติของการเกิดพันธะโคเวเลนต์น้อยกว่าโลหะที่อยู่ในกลุ่ม A



รูปที่ 6 การพล็อตเส้นตรงระหว่าง  $\log$  ของค่าคงที่ของการละลายที่ 1 ( $K_1 = \frac{\{MOH^{(Z-1)+}\}}{\{H^+\}\{M^{Z+}\}}$ ) กับอัตราส่วนระหว่างประจุกับ (ระยะทาง M-O) ( $z/d$ ) สำหรับสี่กลุ่มของแคตไอออนที่ 25 องค์ประกอบเคมี (หมายเหตุ ค่า 0 ของแกน x ในแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน)  
ที่มา: Baes and Mesmer (1976)

## 2.4 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction techniques)

การสกัดแบบลำดับขั้น เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็ง และตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลว เนื่องจากเทคนิคการสกัดดังกล่าวมีวิธีการที่ไม่ยุ่งยากนักในการปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเทคนิคดังกล่าวถูกพัฒนามาจากแนวความคิดของ Tessier et al. (1979) โดยแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปแบบที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปแบบที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction) และรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง (residual fraction) โดยวิธีการของสารสกัดแบบลำดับขั้น จะเลือกใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยพิจารณารูปแบบต่างๆ ของโลหะได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7 การแบ่งกลุ่มของไอออนโลหะและไอออนกึ่งโลหะ ( $As^{3+}$  และ  $Sb^{3+}$ ) 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A กลุ่ม borderline และกลุ่ม B โดยกลุ่ม B จะใช้  $X_m^2/r$  เป็นตัวบ่งบอก และกลุ่ม A จะใช้ดัชนีของ  $Z^2/r$  เป็นตัวแบ่ง โดยที่  $X_m$  คือค่าแรงดึงดูดอิเล็กตรอนของโลหะแต่ละตัว  $r$  คือรัศมีของไอออนแต่ละตัว และ  $Z$  คือค่าประจุ สำหรับโลหะแต่ละตัวจะนำค่ากลุ่ม B ( $X_m^2/r$ ) มาพล็อตกับกลุ่ม A ( $Z^2/r$ )  
ที่มา: Stumm and Morgan (1996) ดัดแปลงมาจาก Nieboer and Richardson (1980)

#### 2.4.1 รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบแลกเปลี่ยนได้จะอยู่ในรูปไอออน สามารถหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เป็นรูปแบบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้สกัดในรูปแบบนี้จะมีควมรุนแรงน้อยที่สุด มีค่าพีเอชเท่ากับ 7

#### 2.4.2 รูปแบบที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

โลหะในรูปแบบนี้ จะอยู่ในรูปแบบของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบกับสารประกอบออกไซด์ได้ โดยถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากกว่ารูปแบบแลกเปลี่ยนได้

#### 2.4.3 รูปแบบที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบที่เกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์นั้น จะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อยๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เกิดฝนกรดที่มีค่า  $pH \geq 4$

#### 2.4.4 รูปค้ำกับของแข็ง (Residual fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปค้ำกับของแข็ง พบว่าโลหะรูปแบบดังกล่าว จะมีโอกาสหลุดออกมาได้ยาก ยกเว้นเสียว่าเจอกับการชะล้างที่รุนแรง ตัวอย่างเช่น ฝนกรดที่มีค่า  $pH < 4$  ซึ่งจัดเป็นฝนกรดที่มีระดับความรุนแรง เป็นต้น

การใช้เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นสามารถนำมาใช้ในการพิจารณารูปแบบของโลหะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการศึกษาตัวอย่างนั้นๆ ที่สามารถบ่งบอกการนำไปใช้กับพืชและความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อมได้ โดยวัตถุประสงค์ที่ต่างกันอาจจะส่งผลให้รูปแบบของโลหะแตกต่างกัน หรือโลหะที่ต่างชนิดกันอาจจะให้รูปแบบที่ออกมาแตกต่างกัน พร้อมทั้งอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการเกิดรูปแบบนั้นๆ ดังการศึกษาดังต่อไปนี้

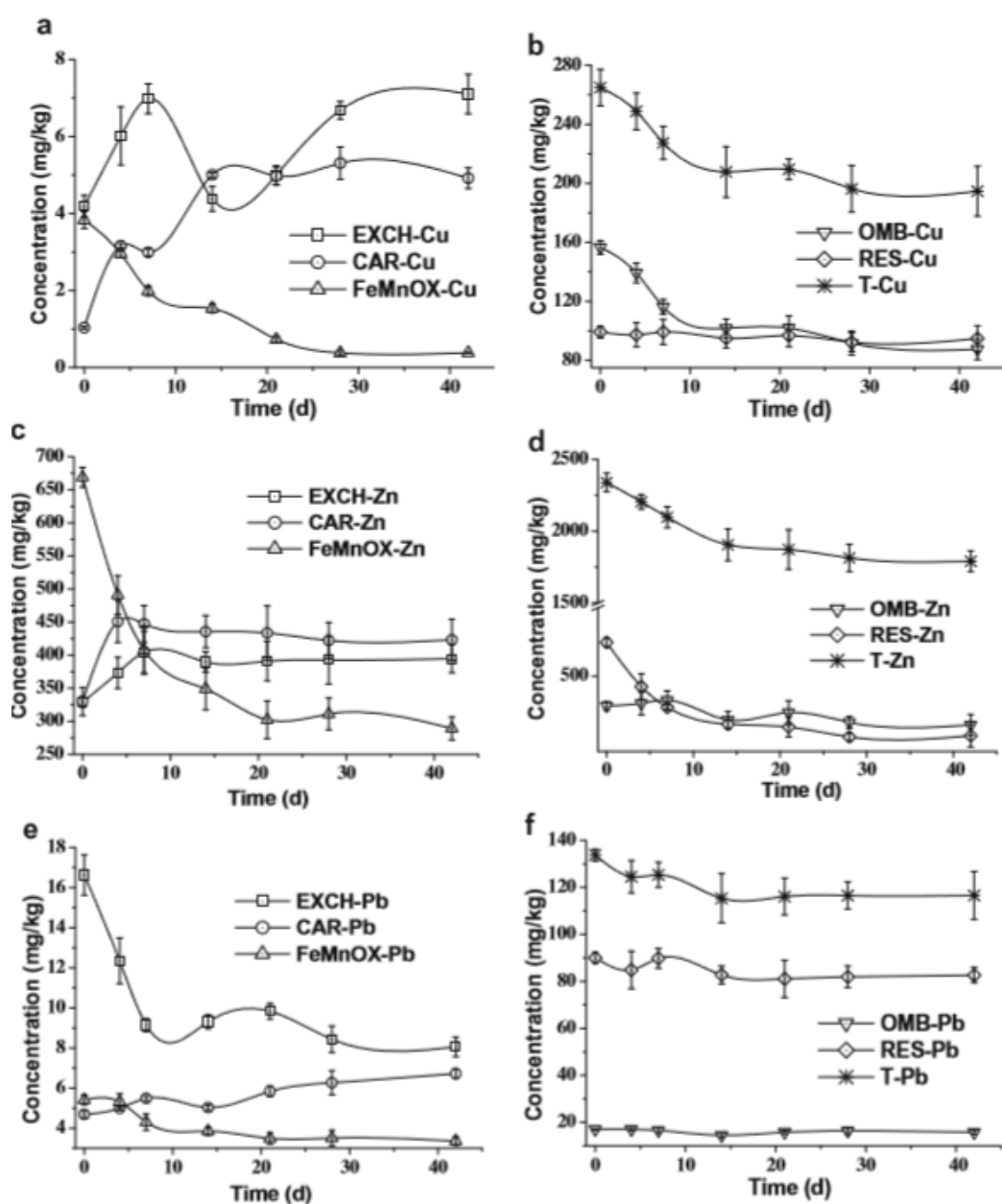
He et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการหมักปุ๋ยและรูปแบบของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และตะกั่ว (Pb) ในปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียและปุ๋ยหมักมูลหมู โดยกากตะกอนน้ำเสียที่นำมาหมักได้จากโรงงานบำบัดน้ำเสียที่ชื่อ Sibao และมูลหมูที่นำมาหมักได้จากฟาร์ม Red Mountain ซึ่งทั้งสองแหล่งอยู่ที่เมือง Hangzhou ประเทศจีน ที่ทำการหมักเป็นเวลา 42 วัน พร้อมกับศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (DOC) รูปแบบของโลหะที่ทำการศึกษามีด้วยกัน 5 รูปแบบ สกัดตามวิธีของ Tessier et al. (1979) ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXCH) รูปคาร์บอนเนต (CAR) รูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (FeMnOX) รูปสารอินทรีย์ (OMB) และรูปค้ำกับของแข็ง (RES) การกระจายตัวของโลหะในปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียและปุ๋ยหมักมูลหมู แสดงไว้ดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

จากการศึกษาของ He et al. (2009) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ปริมาณโลหะทั้งหมดในปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสียและปุ๋ยหมักมูลหมูสามารถเรียงลำดับดังนี้  $Zn > Cu > Pb$  โดยปริมาณของสังกะสีและตะกั่วในกากตะกอนน้ำเสียสูงกว่ามูลหมู ยกเว้นทองแดง

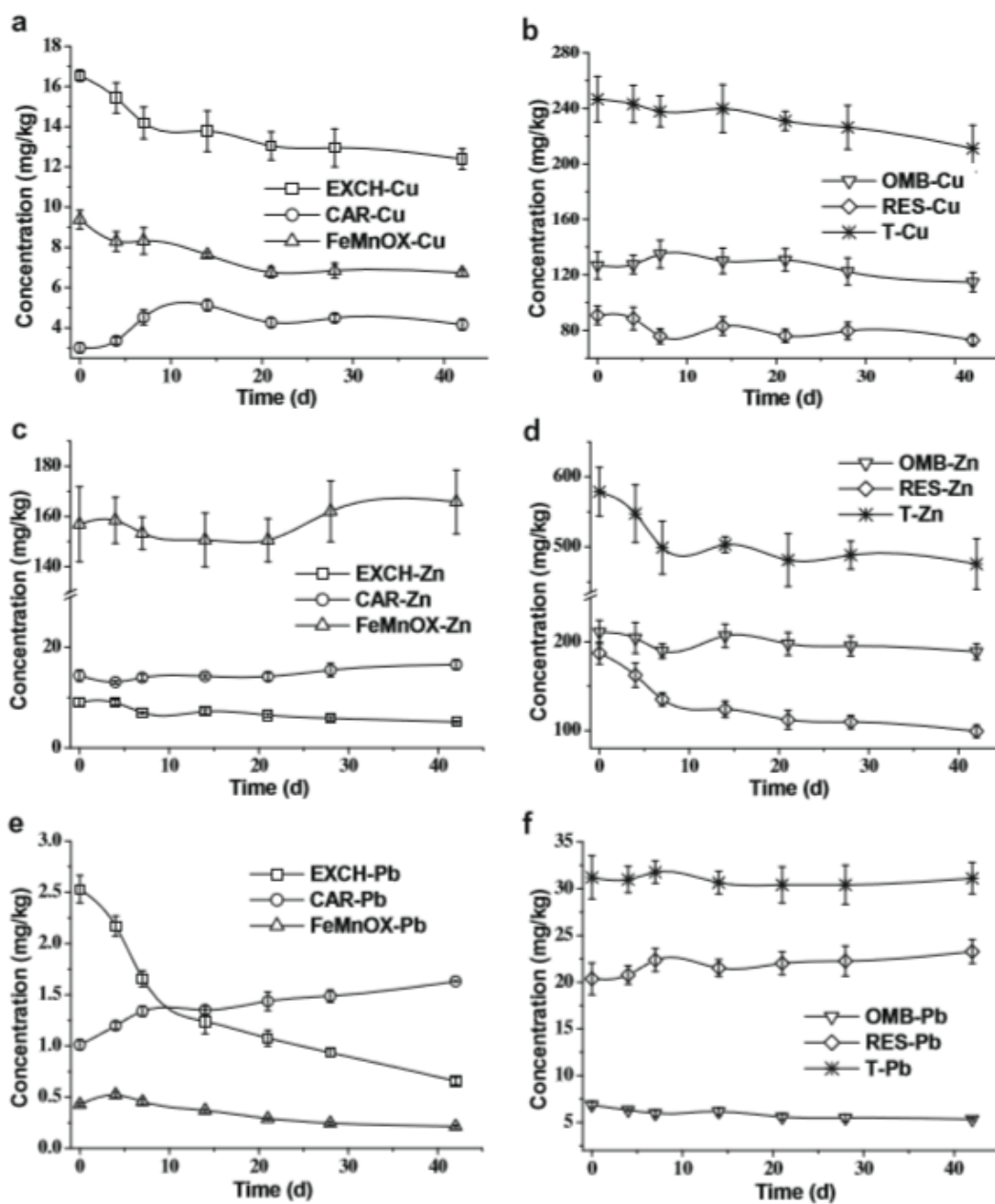
- วัสดุหมักที่ต่างกันไม่มีผลต่อรูปแบบของทองแดงและตะกั่ว โดยทองแดงจะพบมากในรูปที่จับกับสารอินทรีย์ ส่วนตะกั่วจะพบมากในรูปที่อยู่กับค้ำกับของแข็ง

- รูปแบบของสังกะสีที่เกิดขึ้นในปุ๋ยหมักทั้งสองชนิดแตกต่างกัน โดยปุ๋ยหมักกากตะกอนจะพบอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้กับรูปที่จับกับคาร์บอนเนตมาก ส่วนปุ๋ยหมักมูลหมูพบอยู่ในรูปสารอินทรีย์มาก และตอนท้ายของกระบวนการหมักจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์แทน



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ Cu, Zn และ Pb ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย  
กากตะกอนน้ำเสีย

ที่มา: He et al. (2009)



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ Cu, Zn และ Pb ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยมูลหมู  
ที่มา: He et al. (2009)

- จะเห็นว่าสังกะสีและทองแดงที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปที่จับกับคาร์บอนเนตมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากตะกอนน้ำเสีย แต่มีค่าลดลงในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยมูลหมู ส่วนรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ของสังกะสีและทองแดงในกากตะกอนน้ำเสียและทองแดงที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ในปุ๋ยหมักมูลหมูมีค่าลดลง แต่สังกะสีที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ในปุ๋ยหมักมูลหมูก่อๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อยเมื่อหมักไป



- ในทางตรงข้ามผลของกระบวนการหมักที่มีต่อรูปแบบของตะกั่วจะมีลักษณะที่คล้ายกันในปุ๋ยหมักทั้งสองชนิด กระบวนการหมักตะกั่วในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้จะมีค่าลดลง

เมื่อนำค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (DOC) ของกระบวนการหมักปุ๋ยจากตะกอนน้ำเสียและปุ๋ยหมักมูลหมูตลอดระยะเวลาการหมัก ได้ตั้งตารางที่ 7 และหาความสัมพันธ์กับรูปแบบของโลหะที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (DOC) ในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากตะกอนน้ำเสีย (SSC) และปุ๋ยหมักมูลหมู (SMC)

Time (d)	pH		OM (g/kg)		DOC (g/kg)	
	SSC	SMC	SSC	SMC	SSC	SMC
0	7.1 ± 0.1*	8.2 ± 0.2	651.9 ± 22.3	444.1 ± 34.7	10.87 ± 1.02	8.09 ± 0.58
4	7.0 ± 0.1	8.0 ± 0.1	622.1 ± 0.4	426.3 ± 8.2	9.67 ± 0.51	8.41 ± 0.43
7	7.9 ± 0.2	7.6 ± 0.1	600.7 ± 26.9	407.7 ± 13.1	7.03 ± 0.42	7.74 ± 0.09
14	7.3 ± 0.1	7.8 ± 0.2	585.0 ± 14.1	374.9 ± 27.2	7.21 ± 0.49	7.01 ± 0.24
21	7.0 ± 0.1	7.8 ± 0.4	565.6 ± 38.9	342.3 ± 17.9	6.51 ± 0.60	6.54 ± 0.27
28	6.9 ± 0.6	8.0 ± 0.1	572.2 ± 19.6	337.8 ± 6.4	6.18 ± 0.15	6.13 ± 0.36
42	6.8 ± 0.3	7.9 ± 0.2	546.7 ± 9.4	318.9 ± 23.3	5.53 ± 0.24	5.22 ± 0.17

\* The values are means ± standard deviations (n = 3).

ที่มา: He et al. (2009)

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับรูปแบบต่างๆ ของ Cu, Zn และ Pb

		SSC				SMC			
		pH	OM	DOC	T-M	pH	OM	DOC	T-M
Cu	BF-	-0.136	-0.782*	-0.849*	-0.713	0.649	0.842*	0.800*	0.590
	EXCH-	0.040	-0.517	-0.606	-0.426	0.505	0.965**	0.898**	0.858*
	CAR-	-0.353	-0.836*	-0.769*	-0.943**	-0.732	-0.590	-0.492	-0.339
	FeMnOX-	0.322	0.925**	0.929**	0.980**	0.338	0.970**	0.869*	0.818*
	OMB-	0.221	0.926**	0.919**	0.998**	-0.473	0.530	0.674	0.740
Zn	RES-	0.589	0.763*	0.703	0.796*	0.694	0.794*	0.758*	0.800*
	BF-	-0.194	-0.904**	-0.895**	-0.977**	0.267	0.908**	0.960**	0.837*
	EXCH-	0.211	-0.650	-0.671	-0.751	0.444	0.939**	0.936**	0.938**
	CAR-	0.194	-0.373	-0.323	-0.493	0.098	-0.837*	-0.891**	-0.532
	FeMnOX-	0.189	0.865*	0.841*	0.959**	0.453	-0.308	-0.451	-0.070
Pb	OMB-	0.621	0.854*	0.778*	0.830*	0.598	0.617	0.604	0.983**
	RES-	0.183	0.869*	0.848*	0.963**	0.529	0.657	0.683*	0.780*
	BF-	-0.081	0.798*	0.826*	0.796*	0.447	0.975**	0.932**	0.422
	EXCH-	-0.013	0.816*	0.822*	0.864*	0.434	0.978**	0.932**	0.447
	CAR-	-0.420	-0.923**	-0.965**	-0.907**	-0.469	-0.947**	-0.905**	-0.304
	FeMnOX-	0.233	0.898**	0.907**	0.889**	0.027	0.928**	0.969**	0.515
	OMB-	0.013	0.517	0.407	0.737	0.450	0.933**	0.861*	0.342
	RES-	0.652	0.722	0.598	0.653	-0.566	-0.833*	-0.839*	0.003

\*\*\*\*Statistically significant at the probability level 0.05, 0.01 and 0.001 level respectively (2-tailed).

ที่มา: He et al. (2009)

จากผลการศึกษาของ He et al. (2009) สามารถสรุปได้ว่า

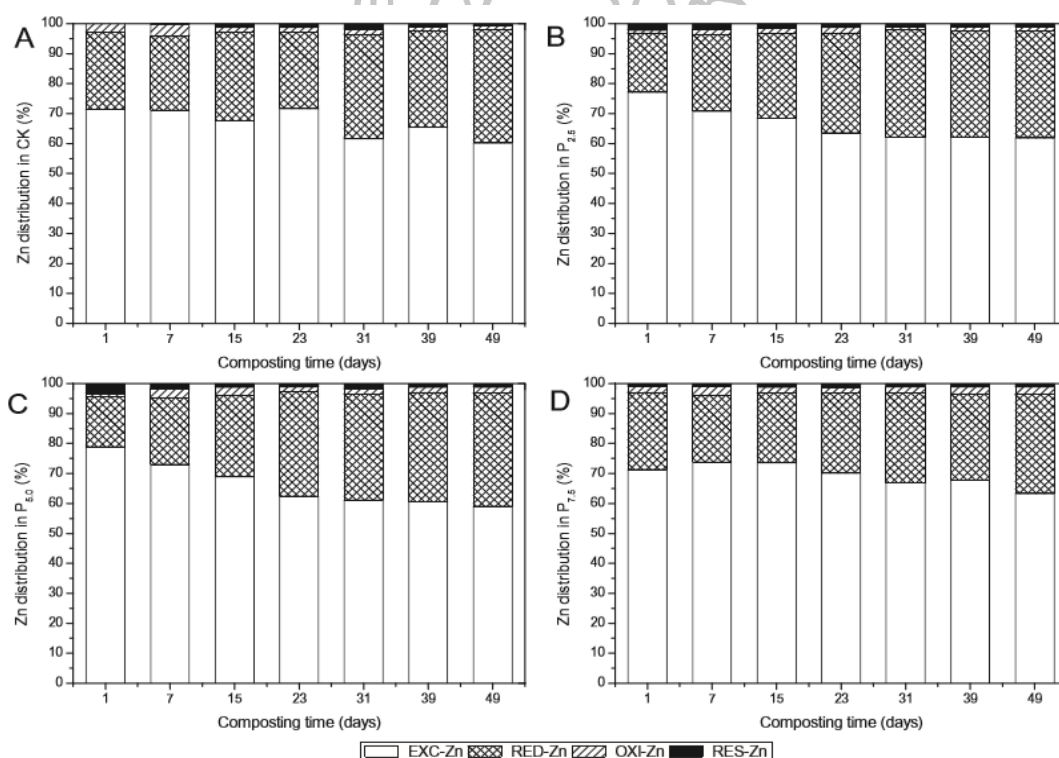
- กระบวนการหมักปุ๋ยของกากตะกอนน้ำเสียและมูลหมูจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำค่อยๆ ลดลง

- จะเห็นว่าสังกะสีมีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่าแฟกเตอร์การนำไปใช้กับพืช และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุ คาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ และความเข้มข้นทั้งหมดของ

สังกะสีในกระบวนการหมักทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเพิ่มความสามารถในการนำไปใช้ของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ )

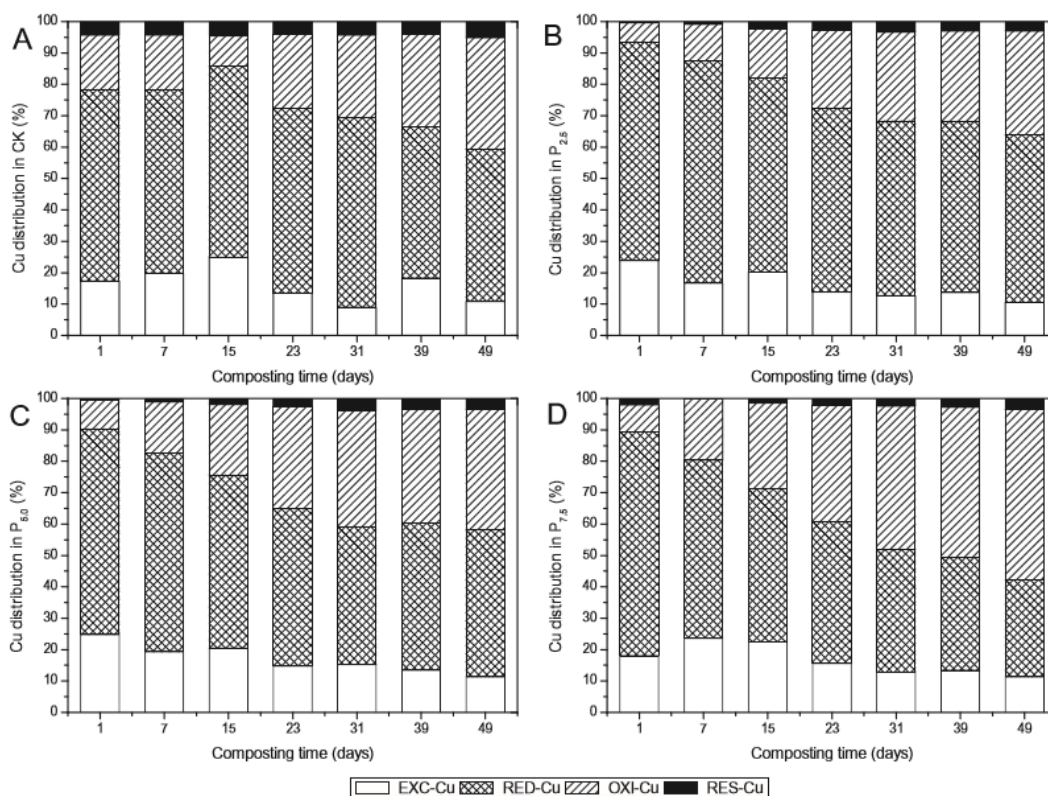
- จะเห็นว่าการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุระหว่างกระบวนการหมักอาจมีอิทธิพลต่อรูปที่สกัดได้ง่ายของสังกะสีในปุ๋ยหมักมูลหมู แต่อาจกระทบต่อรูปแบบที่เฉื่อยของสังกะสีในปุ๋ยหมักกากตะกอนน้ำเสีย

จากการศึกษา Lu et al. (2014) ที่ใช้วิธีสกัดแบบลำดับขั้นในการศึกษารูปแบบของสังกะสีและทองแดงในระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต ที่หมักเป็นระยะเวลา 49 วัน โดยศึกษาทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) รูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (RED) รูปสารอินทรีย์ (OXI) และรูปคงค้างของแข็ง (RES) ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 10 รูปแบบต่างๆ ของสังกะสี (Zn) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต A = เติมหินฟอสเฟต 0 %, B = เติมหินฟอสเฟต 2.5 %, C = เติมหินฟอสเฟต 5.0 % และ D = เติมหินฟอสเฟต 7.5 %

ที่มา: Lu et al. (2014)



รูปที่ 11 รูปแบบต่างๆ ของทองแดง (Cu) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต A = เติมหินฟอสเฟต 0%, B = เติมหินฟอสเฟต 2.5%, C = เติมหินฟอสเฟต 5.0% และ D = เติมหินฟอสเฟต 7.5%

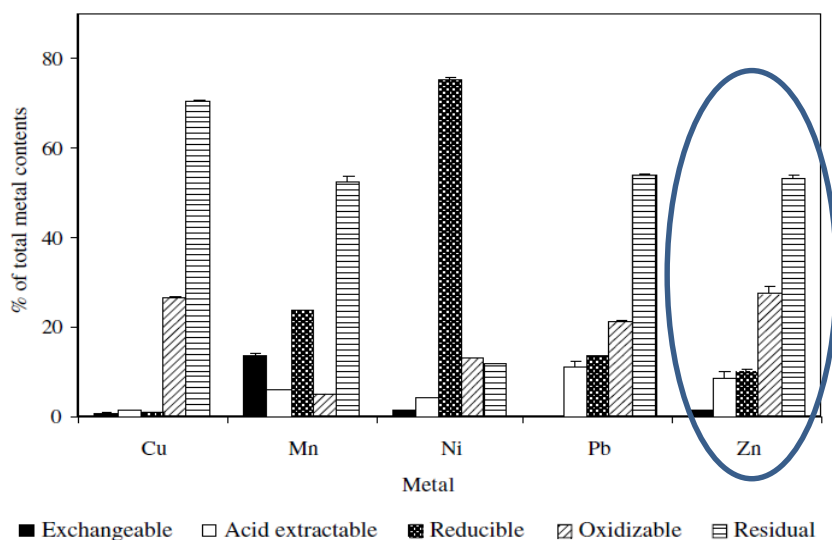
ที่มา: Lu et al. (2014)

จากการศึกษาของ Lu et al. (2014) สามารถสรุปได้ว่า

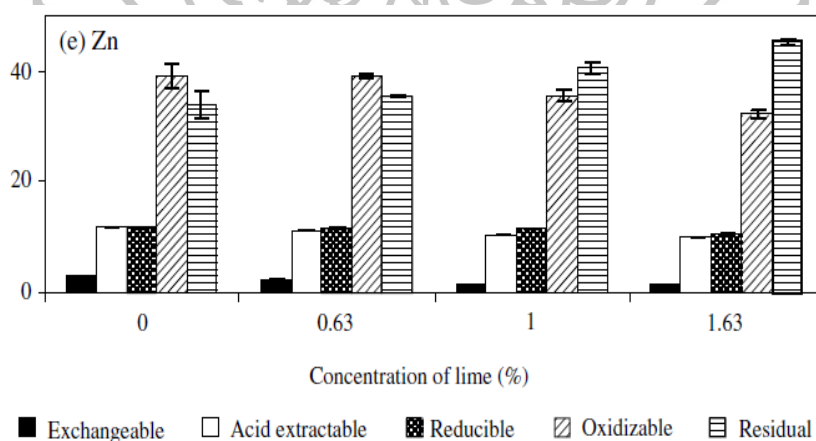
- ในระหว่างการหมักสังกะสีจะเปลี่ยนจากรูปที่แลกเปลี่ยนได้ไปเป็นรูปของออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมหินฟอสเฟตและทองแดงจะเปลี่ยนจากรูปออกไซด์ไปเป็นรูปที่จับกับสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมหินฟอสเฟตเช่นกัน ซึ่งปุ๋ยหมักที่มีปริมาณสารอินทรีย์มากจะถูกย่อยสลายได้ง่าย จึงทำให้เกิดรูปโลหะที่เป็นพิษมาก ดังนั้นการเติมหินฟอสเฟตจะช่วยในการตรึงโลหะไม่ให้ปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Wong and Selvam (2006) ที่ศึกษารูปแบบของโลหะหนักในระหว่างการหมักของกากตะกอนน้ำเสียกับปุ๋ยขี้วัวด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นของ Tessier et al. (1979) 5 รูปแบบ คือ 1) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) 2) รูปที่สกัดด้วยกรด (acid

extractable fraction) 3) รูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (reducible fraction)  
 4) รูปที่จับกับสารอินทรีย์ (oxidizable fraction) 5) รูปคงค้างของแข็ง (residual fraction)  
 หมักเป็นระยะเวลา 100 วัน และมีการเติมปูนขาวร้อยละ 0.63, 1 และ 1.63 ตามลำดับ เช่น สังกะสี  
 ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 รูปแบบของสังกะสี (Zn) ก่อนการหมักกากตะกอนน้ำเสีย  
 ที่มา: Wong and Selvam (2006)



รูปที่ 13 รูปแบบของสังกะสี (Zn) หลังการหมัก 100 วัน และหมักร่วมกับปูนขาวร้อยละ 0.63, 1  
 และ 1.63 ตามลำดับ  
 ที่มา: Wong and Selvam (2006)

สามารถสรุปได้ว่า

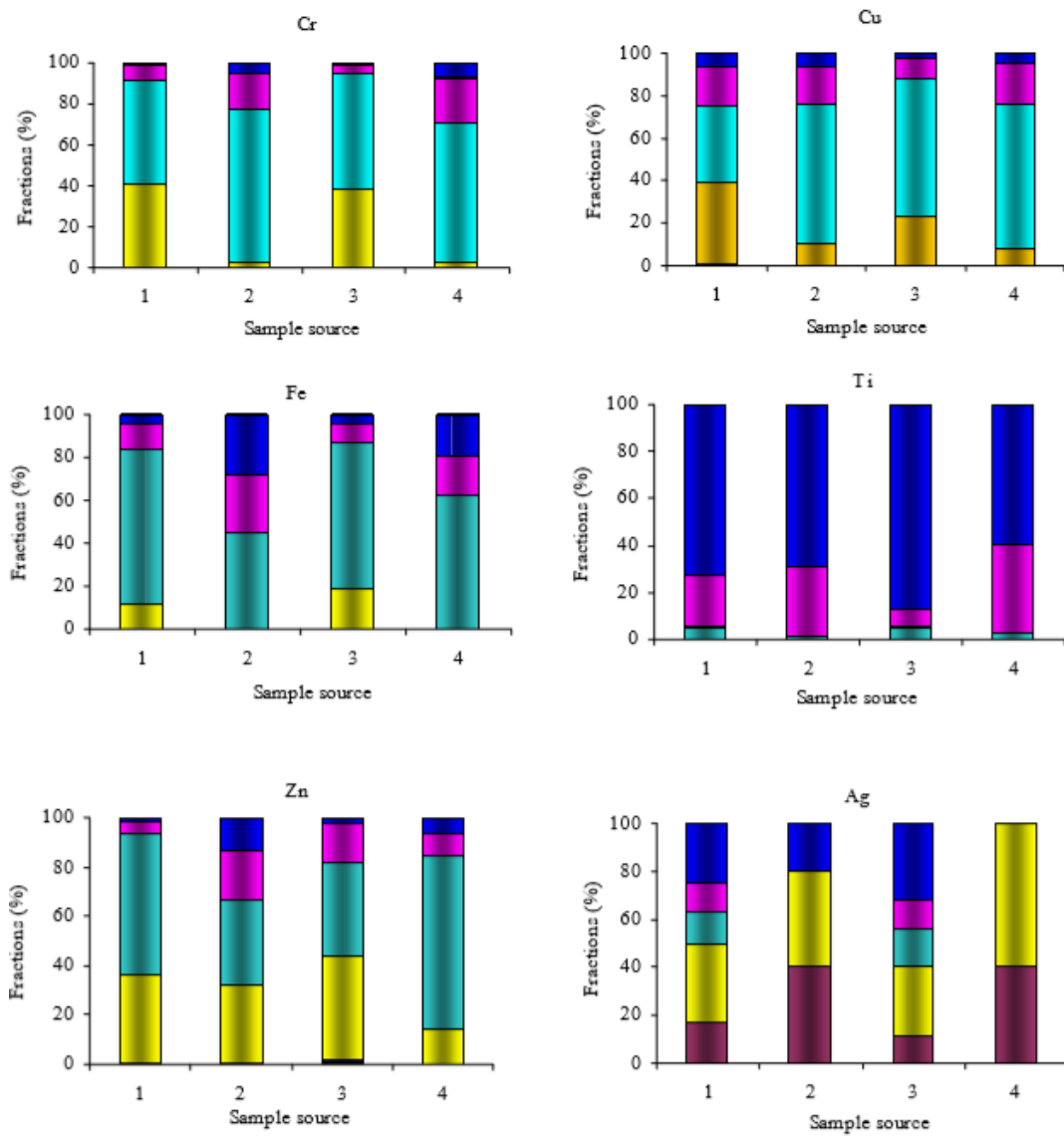
- ก่อนการหมักปริมาณสังกะสีในรูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) > รูปสารอินทรีย์ (oxidizable fraction) > รูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (reducible fraction) > รูปที่สกัดด้วยกรด (acid extractable fraction) > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) (ดังรูปที่ 12)

- หลังการหมัก 100 วัน (ดังรูปที่ 13) ที่ไม่ใส่ปูนขาวพบว่าปริมาณสังกะสีในรูปสารอินทรีย์ (oxidizable fraction) > รูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) > รูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (reducible fraction) > รูปที่สกัดด้วยกรด (acid extractable fraction) > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) เมื่อใช้ปูนขาวร้อยละ 0.63, 1 และ 1.63 ตามลำดับ พบว่ารูปแบบของสังกะสีเหมือนตอนก่อนหมัก

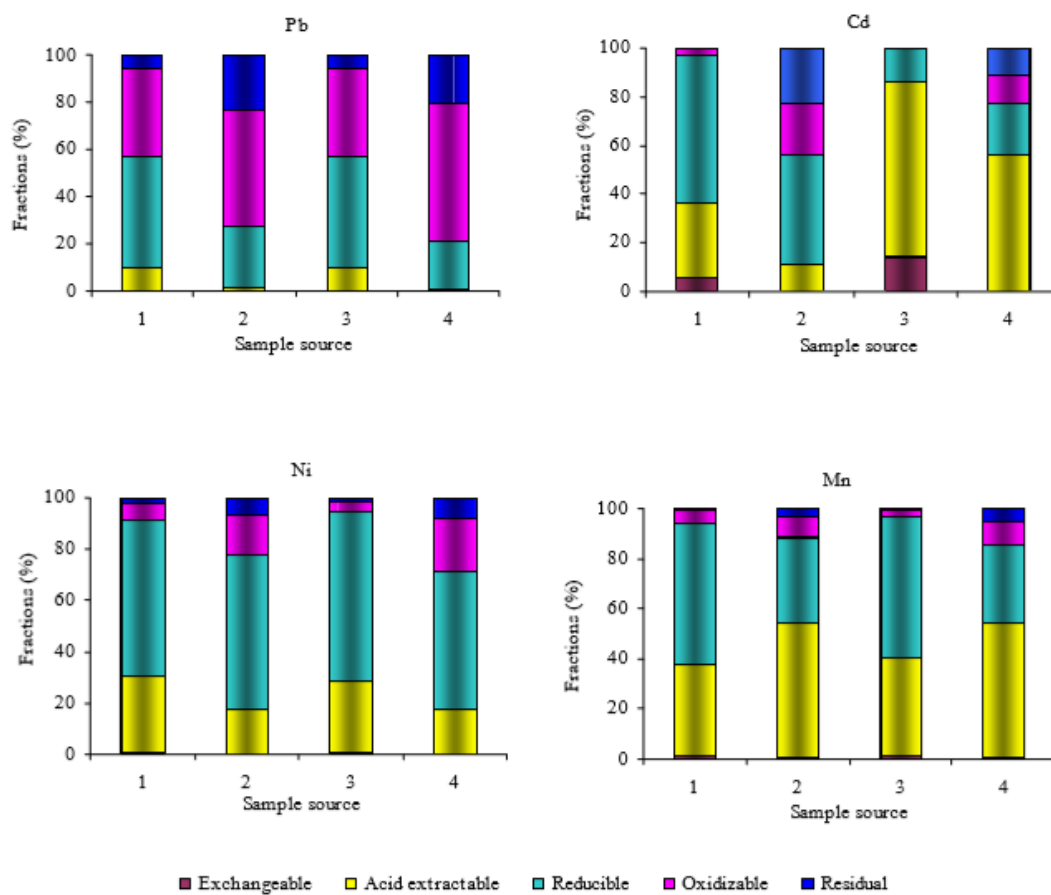
เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของโลหะหลายตัวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแบบเดียวกันแต่มาจากหลายแหล่ง เช่น การศึกษาของ Venkateswaran et al. (2007) ที่ศึกษารูปแบบของโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่งในประเทศอินเดีย ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นที่พัฒนามาจาก Tessier et al. (1979) 5 รูปแบบ คือ 1) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) 2) รูปที่สกัดด้วยกรด (acid extractable fraction) 3) รูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (reducible fraction) 4) รูปที่จับกับสารอินทรีย์ (oxidizable fraction) 5) รูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15

จากผลการศึกษาของ Venkateswaran et al. (2007) สามารถสรุปได้ว่า

- Cr, Cu, Fe, Zn และ Ni จะพบอยู่ในรูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์มาก
- Mn จะพบอยู่ในรูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์และรูปที่สกัดด้วยกรดมาก
- Pb จะพบอยู่ในรูปเหล็กและแมงกานีสออกไซด์และรูปสารอินทรีย์มาก
- Cd และ Ag ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปที่สกัดด้วยกรดมาก
- Ti จะพบอยู่ในรูปคงค้างของแข็งมาก



รูปที่ 14 รูปแบบของโครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe), ไทเทเนียม (Ti), สังกะสี (Zn) และเงิน (Ag) จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่ง  
ที่มา: Venkateswaran et al. (2007)



รูปที่ 15 รูปแบบของตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), นิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม 4 แหล่ง  
ที่มา: Venkateswaran et al. (2007)



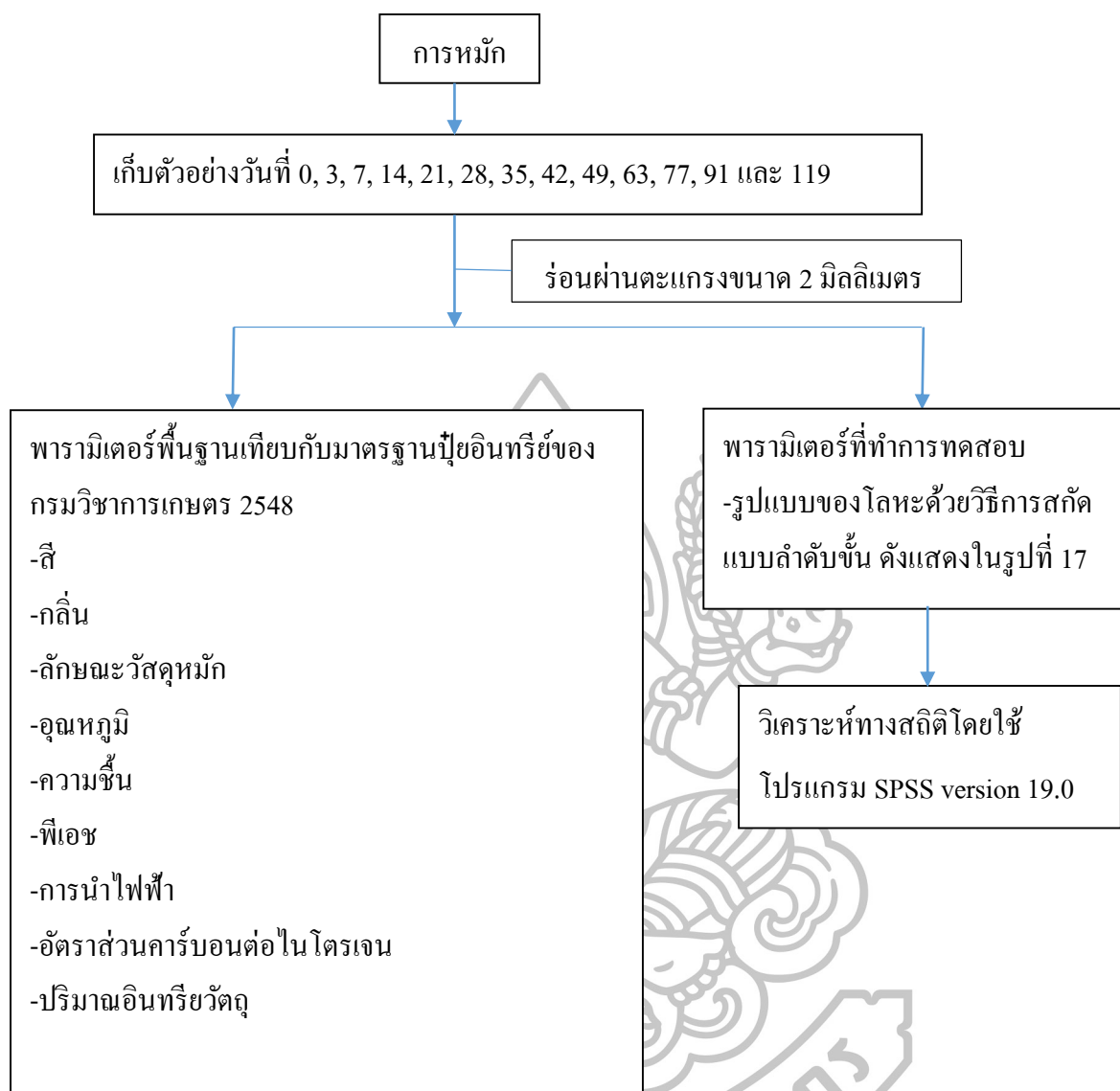
### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งกระบวนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ กระบวนการหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานกับการเปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยอินทรีซ์ของกรมวิชาการเกษตรและการหาปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียม และการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS version 19.0 โดยแสดงแผนผังการทดลองโดยรวมดังรูปที่ 16 และตารางที่ 9 แสดงพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา วิธีการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้

ตารางที่ 9 วิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง	วิธีการทดลอง	เครื่องมือที่ใช้
พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพ		
สี	วัดค่าสี	Munsell Soil Color chart
กลิ่น	การสังเกต	
ลักษณะของวัสดุหมัก	การสังเกต	
อุณหภูมิ	วัดอุณหภูมิ	เครื่องวัดอุณหภูมิ
ความชื้น	อบที่อุณหภูมิ 103-105 °C	Electric oven
พารามิเตอร์พื้นฐานทางเคมี		
ความเป็นกรด-ด่าง	Potentiometry	pH meter
การนำไฟฟ้า	วัดสภาพการนำไฟฟ้า	Conductivity meter
ปริมาณอินทรีซ์วัตถุ	คำนวณจากค่า TOC	Total organic Carbon Analyzer
อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน	อัตราส่วนระหว่าง TC ต่อ TN	TOC Analyzer and Gerhardt Bonn
พารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ		
รูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียม	Sequential Extraction Techniques	ICPS

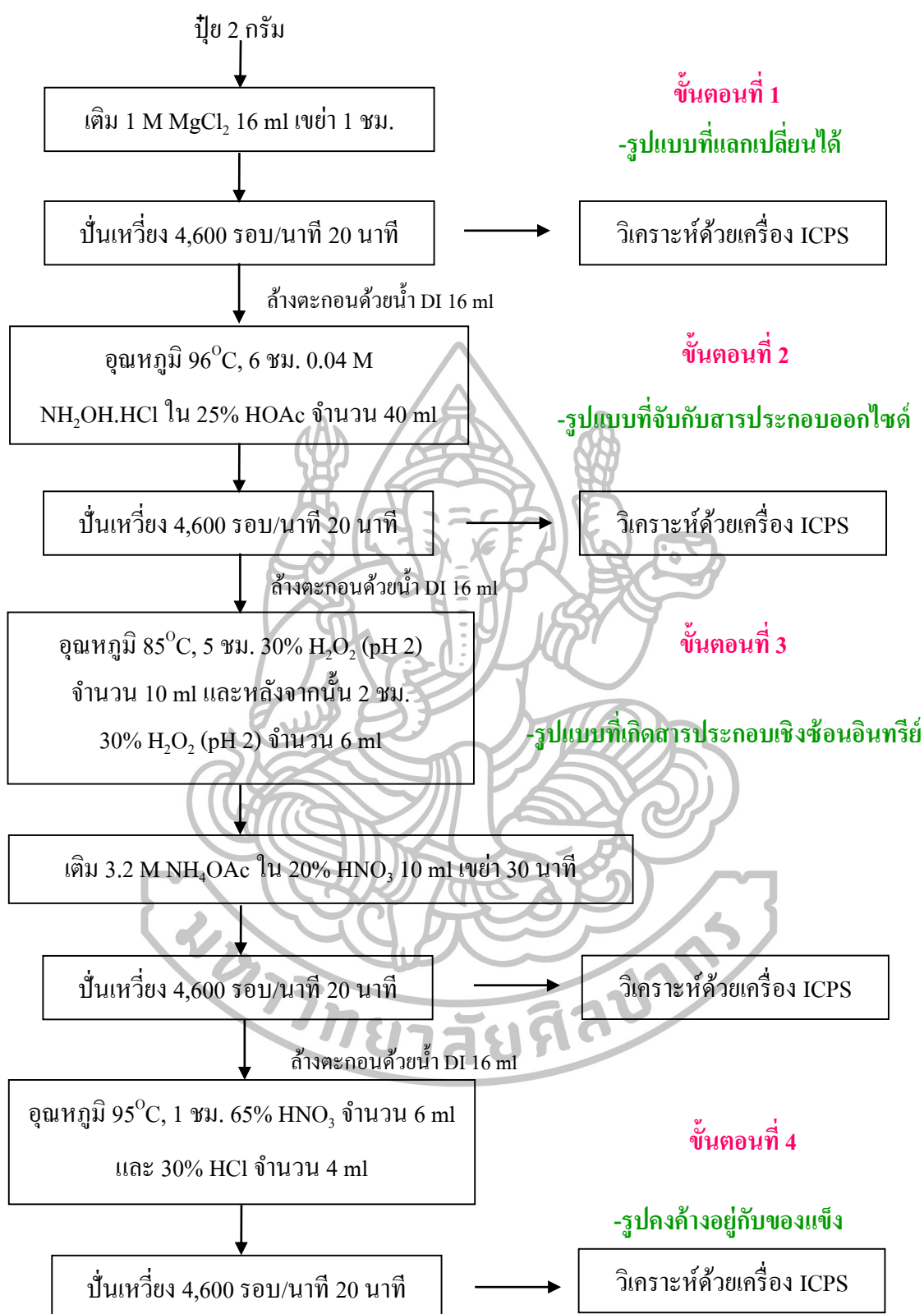




รูปที่ 16 แผนผังการทดลองโดยรวม

### 3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีและรีเอเจนต์ที่ผู้วิจัยได้ใช้ในการทดลองครั้งนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ Chemical Abstracts Service number (CAS no.) ของสารเคมี และบริษัทผู้ผลิตสารเคมีของแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 10



รูปที่ 17 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extraction Techniques)

ตารางที่ 10 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS number	บริษัท
Magnesium chloride	296-500G	Ajax
Hydroxylamine hydrochloride	A263-500G	Ajax
Acetic acid	1.00063.2500	Merck
Hydrogen peroxide	1.00519.2500	Merck
Ammonium acetate	27-500G	Ajax
Nitric acid	1.00456.2500	Merck
Hydrochloric acid	1.00317.2500	Merck

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S ยี่ห้อ Sartorius

#### 3.2.2 เครื่องเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)

สามารถปรับความเร็วในการเหวี่ยงสูงสุด 10,000 RPM และตั้งเวลาได้ รุ่น Rotina 38, Rotina 38R ยี่ห้อ Hettich zentrifugen

#### 3.2.3 เครื่องเขย่าแนวราบ (Horizontal shaker)

สามารถเขย่าได้ที่ความเร็วรอบ 20-400 RPM พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิและตั้งเวลาในการเขย่าได้ รุ่น G76 ยี่ห้อ Gyrotory water bath shaker

#### 3.2.4 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

รุ่น WB 14 ยี่ห้อ Memmert

#### 3.2.5 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter)

ปรับเทียบโดยใช้ buffer pH 4 และ buffer pH 7 รุ่น pH meter 240 ยี่ห้อ CORNING

#### 3.2.6 ห้องทำความเย็น (Cold room)

ใช้เก็บรักษาสารเคมีที่เตรียมไว้ใช้ในการทดลองและเก็บรักษาตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของสารเคมีให้คงเดิม

#### 3.2.7 เครื่อง ICPS (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)

รุ่น Optima 4200 DV ยี่ห้อ PerkinElmer

### 3.2.8 ตะแกรงร่อน (Sieve)

ใช้ Standard Test Sieve B.S.410: 1986/I.S.O. 3310 ขนาดรู 2 มิลลิเมตร ของยี่ห้อ ELE International

## 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 ขั้นตอนการหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักที่มีวัตถุดิบหลัก คือ มูลหมู ในการผลิตปุ๋ยหมักในครั้งนี้วัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมเป็นวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ซึ่งแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 11

ซึ่งในการทำปุ๋ยหมักจะใช้ส่วนผสมดังปริมาณที่กล่าวไว้ในข้างต้น นอกจากนี้ยังมีการเติมจุลินทรีย์แคะดินเพิ่มเข้าไปในปุ๋ยหมักจำนวนร้อยละ 5.08 ของวัตถุดิบทั้งหมด

#### 3.3.1.1 ขั้นตอนของการหมักปุ๋ย

ในขั้นตอนของการทำปุ๋ยหมักผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักสูตรมูลหมูที่ได้จากสูตรการหมักปุ๋ยของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรพณี โดยใช้พื้นที่ในการทำปุ๋ยหมักที่ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นพื้นที่ของศูนย์การเรียนรู้ชุมชนตำบลบางช้าง เป็นพื้นที่ที่ไกลจากแหล่งชุมชนเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนในการทำปุ๋ยหมักมีดังนี้

1. นำเอามูลที่เราต้องการที่เตรียมไว้มาใส่ในเครื่องบดผสม
2. เติมน้ำเพื่อให้มูลแยกออกจากกันและผสมให้เข้ากัน โดยให้มีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60
3. ใส่จุลินทรีย์แคะดิน
4. ใส่ส่วนผสมน้ำหมักชุดที่ 1 ประมาณ 10 ลิตร และส่วนผสมของแห้งชุดที่ 2 ตามปริมาณที่กล่าวไว้ในตารางที่ 9
5. ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน
6. นำปุ๋ยหมักที่ได้ไปบรรจุใส่กระสอบปุ๋ย ประมาณ 10 กระสอบ ปริมาณกระสอบละ 15 กิโลกรัม แล้วใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบไม่ต้องแน่นมาก

ตารางที่ 11 ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม		ปริมาณ (ร้อยละ)	แหล่งที่มา	อายุ ส่วนผสม
1. ส่วนผสม น้ำหมัก	ปลาน้ำจืด	8.03	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัด นครปฐม	1 เดือน
	กากน้ำตาล	2.68		
	สับปะรด	0.27		
	สารเร่ง พด.2	0.01		
	รำละเอียด	1.34		
2. ส่วนผสม ของแห้ง	กระดูกวัวป่น	1.34	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัด นครปฐม	1 เดือน
	รำละเอียด	0.80		
	มูลค้างคาว	0.54		
	ธาตุอาหารรอง (Mg, Ca และ S)	0.54		
	โคโคไมท์	0.27		
มูลหมู		79.13	อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี	2 เดือน
ซีเมนต์นาเกลือ		5.08	นาเกลือ จังหวัดสมุทรสาคร	2 เดือน

นำปุ๋ยหมักที่ได้มาหมักต่อที่เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

### 3.3.1.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก

เมื่อจะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก โดยก่อนเก็บจะต้องทำการพลิกกลับ กระจกสอบปุ๋ยไปมา 2 – 3 ครั้ง เพื่อให้ปุ๋ยในกระจกสอบผสมกัน จากนั้นทำการเปิดปากกระจกสอบแล้ว วัดอุณหภูมิ บันทึกอุณหภูมิที่วัดได้และบันทึกลักษณะอื่นๆ ของปุ๋ยหมัก เช่น สี กลิ่น ลักษณะ วัสดุหมัก เป็นต้น การศึกษาครั้งนี้จะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ ซึ่งการเก็บตัวอย่างปุ๋ยจะใช้ปิ๊กเกอร์ตักบริเวณตรง กลางกระจกสอบปุ๋ยเพื่อเป็นตัวแทนของกองปุ๋ย โดยเก็บให้ครบทุกกระจกสอบ ทั้งหมดจำนวน 10 กระจกสอบ เก็บตัวอย่างให้ได้ประมาณ 2 กิโลกรัม เขียนฉลากติดข้างถุงพลาสติกที่ใส่ตัวอย่างปุ๋ย อายุ ปุ๋ยหมัก และวันที่เก็บตัวอย่าง เมื่อถึงวันที่ปุ๋ยหมักมีอายุการหมักครบจำนวนวันที่ต้องเก็บก็ทำการ เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเข้ากระจกสอบเดิม ทั้งหมด จำนวน 10 กระจกสอบเหมือนกัน ทำการเก็บตัวอย่างแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนครบอายุการหมักที่ 119 วัน

### 3.3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์

นำตัวอย่างปุ๋ยหมักมาผึ่งให้แห้งโดยวิธี Air dry ในตู้ laminar flow ในห้อง clean room และคัดแยกสิ่งที่ต้องห้ามตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 โดยคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ ออก และคัดแยกขนาดของปุ๋ยโดยผ่านการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและรูปแบบของเหล็กและแมกนีเซียมด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction) ซึ่งมี 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปแบบที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically complexed fraction) และรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง (residual fraction) โดยที่รูปแบบแรกจะใช้ตัวทำละลายที่มีความแรงในการสกัดน้อยสุดและจะค่อยๆ เพิ่มความแรงของตัวทำละลายที่มีความแรงขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับ

### 3.3.2 การวิเคราะห์หารูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเทคนิคของ Wada and Wada (1999) ที่ถูกพัฒนามาจากแนวความคิดของ Tessier et al. (1979) โดยแบ่งรูปแบบของโลหะที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ออกเป็น 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปแบบที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically complexed fraction) และรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง (residual fraction) หลักการของการสกัดแบบลำดับขั้นที่ใช้นี้ จะเลือกใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงน้อย แล้วค่อยๆ เพิ่มระดับความรุนแรงของตัวสกัดให้เพิ่มระดับมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเรียงตามลำดับความยากง่ายของการปลดปล่อยโลหะตามความแรงของสารสกัดที่เข้มข้นขึ้นดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งวิธีการสกัดในแต่ละขั้นก็จะใช้การสกัดที่แตกต่างกันออกไป

#### 3.3.2.1 รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบแลกเปลี่ยนได้จะอยู่ในรูปไอออน สามารถหลุดออกมาจากการถูกจับได้ง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนในดิน ความเป็นกรด - ด่างของดิน เป็นต้น สารสกัดที่ใช้สกัดในรูปแบบนี้จะมีมีความรุนแรงน้อยที่สุด ซึ่งสารสกัดที่เลือกใช้ในรูปแบบนี้คือ 1 โมลาร์แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) และทำการสกัดโดยเขย่าที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ซึ่งการสกัดในรูปแบบนี้จะเลียนแบบการชะล้างของน้ำตามธรรมชาติ

#### 3.3.2.2 รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบนี้จะอยู่ในรูปแบบของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบกับสารประกอบออกไซด์ได้ ซึ่งสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ยากกว่ารูปแบบ

แลกเปลี่ยนได้ และใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงมากกว่ารูปแบบแลกเปลี่ยนได้ ซึ่งสารสกัดที่เลือกใช้ในรูปแบบนี้คือ ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ในกรดอะซิติก ( $\text{HOAc}$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 25 และทำการสกัดที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

### 3.3.2.3 รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically complexed fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบที่เกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์นั้น จะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อยๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เกิดฝนกรดที่มีค่า  $\text{pH} \geq 4$  โดยสารสกัดที่ใช้ในรูปแบบนี้จะมีค่าความรุนแรงมากกว่าสองรูปข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งสารสกัดที่เลือกใช้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาณ 16 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชเป็น 2 แล้ว ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเติมแอมโมเนียมอะซิเตท ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) ความเข้มข้น 3.2 โมลาร์ ในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 20

### 3.3.2.4 รูปคงค้างกับของแข็ง (Residual fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง พบว่าโลหะในรูปแบบจะมีโอกาสหลุดออกมาได้ยาก ยกเว้นเสียว่าเจอกับการชะล้างที่รุนแรง ตัวอย่างเช่น ฝนกรดที่มีค่า  $\text{pH} < 4$  ซึ่งจัดเป็นฝนกรดที่มีระดับความรุนแรง เป็นต้น โดยสารสกัดที่ใช้ในรูปแบบนี้จะมีค่าความรุนแรงมากกว่าทั้งสามรูปแบบข้างต้น ซึ่งสารสกัดที่เลือกใช้คือ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 65 และกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 3.3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรม SPSS version 19.0 ทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับรูปแบบต่างๆ ของสังกะสีและโพแทสเซียม โดยใช้ความสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation)
2. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับรูปแบบต่างๆ ของสังกะสีและโพแทสเซียมในรูปแบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธี Multiple linear regression เลือกรูปแบบโดยวิธี stepwise
3. ทดสอบความแตกต่างในเชิงปริมาณ โดยการจับกลุ่มด้วยวิธี Duncan test ของปริมาณสังกะสีและโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

ในการศึกษาเพื่อหาปริมาณและรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียม โดยใช้ปุ๋ยหมักมูลหมู ที่ผสมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นระยะเวลา 119 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในช่วงอายุของการหมัก ดังนี้ วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน นำปุ๋ยหมักที่ได้มา ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร สกัดลำดับขั้นเพื่อหารูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง หากความสัมพันธ์ของรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเปรียบเทียบปริมาณของรูปแบบที่เกิดขึ้น ณ ระยะเวลาต่างๆ โดยใช้วิธีทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของการหมัก และการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางเคมี ดังตารางที่ 12 พบว่าในช่วงแรกปุ๋ยหมักมีกลิ่นฉุน มองเห็นวัสดุหมักที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นชัดเจน แต่เมื่อปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ที่จะมองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้น ปุ๋ยมีสีน้ำตาลเทา ดังรูปที่ 18

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมัก ได้แก่ สี กลิ่น ลักษณะวัสดุหมัก ความชื้น และอุณหภูมิ มีรายละเอียดดังนี้ ดังตารางที่ 12

##### 4.1.1.1 สี

สีของปุ๋ยหมักตั้งแต่วันเริ่มผสมจนถึงวันที่ 28 จะมีสีน้ำตาล หลังจากวันที่ 35 จนถึงวันสุดท้ายของการหมักจะมีสีน้ำตาลออกเทา สีที่เข้มขึ้นบ่งบอกถึงกระบวนการสร้างสารฮิวมิก ซึ่งเป็นสารมีสีน้ำตาลจนถึงสีดำ ดังรูปที่ 19 โดยสียิ่งเข้มยิ่งบ่งบอกถึงกระบวนการสร้างสารฮิวมิกที่มากขึ้น (Stevenson, 1982)



ตารางที่ 12 แสดงคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)														
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119	
1. คุณสมบัติทางกายภาพ																
สี	ไม่ได้กำหนด	สีน้ำตาล							สีน้ำตาลออกเทา							
กลิ่น	ไม่ได้กำหนด	วัสดุส่วนผสมตั้งต้น	กลิ่นแอมโมเนียรุนแรง	กลิ่นแอมโมเนียลดลง				ไม่มีกลิ่นแอมโมเนีย								
ลักษณะวัสดุหมัก	ไม่ได้กำหนด	มองเห็นวัตถุบิตตั้งต้นชัดเจน			เกาะกันเป็นก้อนแห้ง เริ่มมองไม่เห็นวัตถุบิตตั้งต้น							เกาะกันเป็นก้อนแข็งแห้ง				
อุณหภูมิ	ไม่ได้กำหนด	44.3	49.7	40.0	30.0	30.7	40.0	30.0	29.7	28.7	28.2	29.0	27.0	28.0	28.3	
ความชื้น	≤ 35 % w/w	100	85	62	55	47	34	32	32	28	24	19	20	17	15	
2. คุณสมบัติทางเคมี																
pH	5.5-8.5	7.0	7.6	7.3	7.2	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.2	7.1	
C/N ratio	≤ 20:1	19.5	25.0	11.3	11.3	11.6	11.0	11.7	11.4	11.7	14.0	9.8	9.3	9.8	9.9	
อินทรีย์วัตถุ	≥ 30 % w/w	61	47	41	43	43	41	45	42	43	53	38	37	36	38	
การนำไฟฟ้า	≤ 6 ds/m	11.4	12.8	13.4	8.9	10.9	10.6	13.5	13.4	13.4	13.1	14.1	12.1	13.5	13.5	

ตารางที่ 12 (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
หินและ กรวด	>5 mm. ≤5 %w/w	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	3.5	2.5	3.0	3.5	5.0	3.0	4.5
Total Nitrogen <sup>1</sup>	≥1.0 w/w	2.4	1.3	2.5	2.5	2.4	2.5	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.4	2.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>1</sup>	≥0.5 w/w	15.7	16.0	26.0	21.3	21.4	18.3	20.5	21.9	19.1	24.6	14.2	17.9	14.9	18.6
K <sub>2</sub> O <sup>1</sup>	≥0.5 w/w	2.5	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.9	2.8	2.7	2.8	2.8	2.7	2.9	2.7
As	≤50mg/Kg	0.55	0.66	0.59	0.61	0.58	0.56	0.64	0.73	0.67	0.60	0.68	0.64	0.65	0.62
Cd	≤5 mg/Kg	0.77	0.73	0.78	0.81	0.94	1.00	0.90	0.86	0.83	0.91	0.97	0.93	0.97	1.00
Cr	≤300 mg/Kg	24.70	20.84	23.35	33.81	30.76	38.65	30.64	44.15	26.55	32.21	35.16	30.27	31.53	43.33
Cu	≤500 mg/Kg	44.79	28.24	48.13	80.14	93.40	150.44	106.91	95.61	89.73	112.38	123.76	104.72	114.85	111.24
Pb	≤500 mg/Kg	14.92	12.31	15.62	17.42	18.75	22.35	18.66	20.27	16.92	19.35	18.33	20.22	19.54	21.01

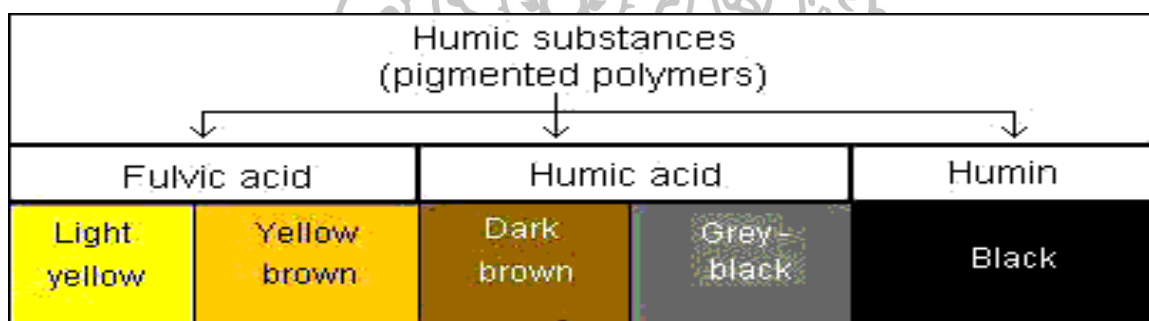
หมายเหตุ 1 แสดงองค์ประกอบของธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมัก  
ปรอท (Hg) ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในครั้ง  
นี้  
ขนาด 0.2 มิลลิลิตร ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิลิตร  
พลาสติก แก้วและวัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ ไม่พบ



ก

ข

รูปที่ 18 ลักษณะปุ๋ยหมักมูลหมู ก. วันเริ่มผสม (0 วัน) ข. วันสุดท้ายของการหมัก (119 วัน)



—————	increase in intensity of colour	—————>
—————	increase in degree of polymerization	—————>
2 000	increase in molecular weight	—————> 300 000 ?
45%	increase in carbon content	—————> 62%
48%	decrease in oxygen content	—————> 30%
1 400	decrease in exchange acidity	—————> 500
—————	decrease in degree of solubility	—————>

Chemical properties of humic substances. (Stevenson 1982)

รูปที่ 19 เปรียบเทียบสีของปุ๋ยหมักกับสีของสารฮิวมิก

#### 4.1.1.2 กลิ่น

ช่วงแรกของการหมักจะมีกลิ่นของแอมโมเนียรุนแรง เนื่องจากมูลสัตว์มีการปะปนของปัสสาวะ แต่เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นจุลินทรีย์ย่อยสลายวัตถุดิบตั้งต้นตลอดจนนำแอมโมเนียไปใช้ในกระบวนการของสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย กลุ่ม *Bacillus smithii* มีประสิทธิภาพในการดูดซึมแอมโมเนียร้อยละ 80 (Sasaki et al., 2004) ทำให้กลิ่นของแอมโมเนียลดลง โดยพบว่าหลังจากวันที่ 49 เป็นต้นไปกลิ่นของแอมโมเนียจะลดลง

#### 4.1.1.3 ปริมาณความชื้น

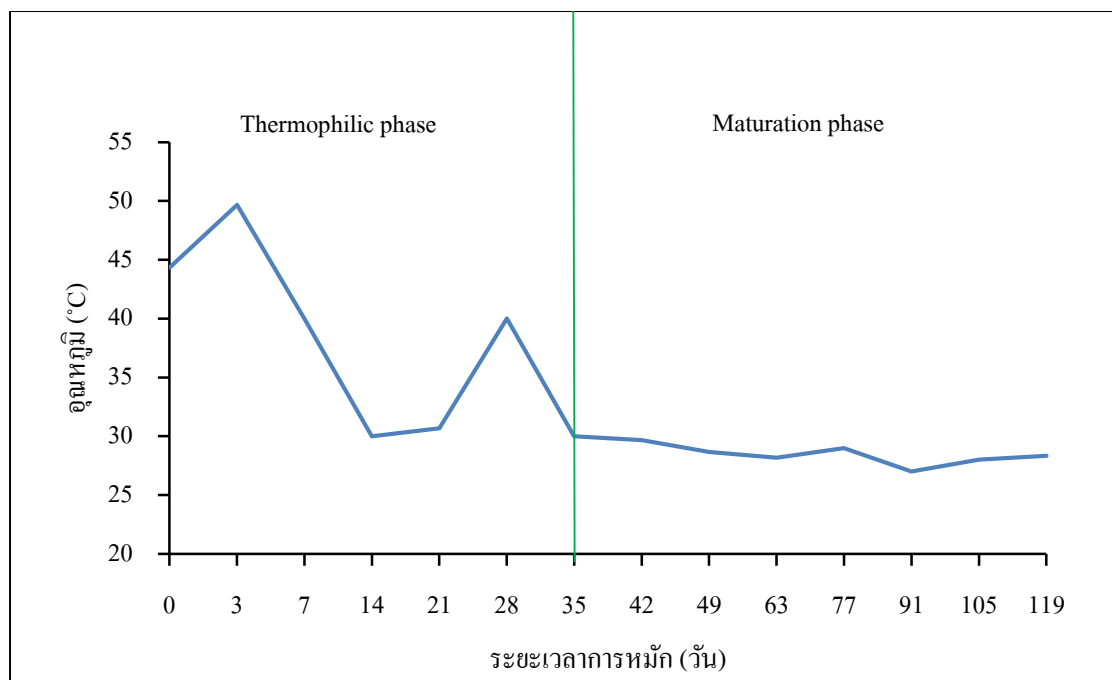
ปริมาณความชื้นในช่วงแรกสูงเกินร้อยละ 50-60 ซึ่งเหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Tiquia et al., 1998) และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาของการหมักนานขึ้นพบว่าระยะเวลาของการหมักตั้งแต่วันที่ 28 เป็นต้นไปจนถึงระยะเวลาการหมักวันสุดท้ายมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 35 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

#### 4.1.1.4 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักมูลหมูจะพบว่า อุณหภูมิในช่วงแรกของการหมักค่อนข้างสูง ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการปลดปล่อยความร้อนจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลิกที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและสารประกอบไนโตรเจน (Tiquia et al., 1998) ซึ่งเมื่ออาหารของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ค่อยๆ หดไปอุณหภูมิของปุ๋ยหมักจะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ จนอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก จึงสามารถแบ่งกระบวนการหมักเป็น 2 ระยะ ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนี้ 1) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) อยู่ในช่วง 0-34 วันของการหมัก 2) ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturation phase) คือตั้งแต่วันที่ 35 ถึงระยะสุดท้ายของการหมัก โดยอุณหภูมิในปุ๋ยหมักจะมีค่าค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก มีค่าอยู่ในช่วง 27.0-30.0 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 20

#### 4.1.2 ลักษณะทางเคมี

พารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆ ทางเคมีของปุ๋ยหมัก ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และการนำไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร ตามตารางที่ 12 ดังนี้



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมักมูลหมู

#### 4.1.2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการทดลองจะพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยหมักมูลหมูตลอดระยะเวลาของการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 6.97-7.55 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ (Bernal et al., 2009) นอกจากนี้ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตรที่ต้องให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าอยู่ในช่วง 5.5-8.5 (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

#### 4.1.2.2 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Tam et al., 1996) โดยในช่วงแรกวันที่ 0 และ 3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูง เป็น 19.5:1 และ 25.0:1 ตามลำดับ แต่ตั้งแต่วันที่ 7 เป็นต้นไปอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดลงอยู่ในช่วง 9.3-14.0 โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ควรมีค่าต่ำกว่า 20:1 (Nolan et al., 2011)

### 4.1.2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

ในช่วงแรกของปุ๋ยหมักมีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะเกิดกระบวนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ จากนั้นปริมาณอินทรีย์วัตถุจะค่อยลดลงอย่างช้าๆ เป็นผลมาจากการย่อยสลายกลายเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความเสถียรมากขึ้น โดยมีอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 36-61 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่กำหนดให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไป

### 4.1.2.4 การนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักมีค่าอยู่ในช่วง 8.9-14.1 ที่เกินเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่กำหนดให้ค่าการนำไฟฟ้าต้องไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต่อเมตร อาจมาจากส่วนผสมของชี้แคะนาเกลือที่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ยหมักที่ใส่ลงไปใน การเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร ซึ่งการนำปุ๋ยหมักนี้ไปใช้อาจแก้ไขโดยใช้ปริมาณปุ๋ยที่ลดลงเพื่อป้องกันการเกิดดินเค็ม หรืออาจนำชี้แคะนาเกลือออกจากส่วนผสม เพื่อลดปริมาณ โซเดียมลง เป็นต้น

จากการประเมินคุณลักษณะของปุ๋ยหมักและการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร (2548) พบว่าวันที่เหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุด คือ ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิปุ๋ยเท่ากับอุณหภูมิภายนอกและคุณภาพปุ๋ยส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

## 4.2 สัดส่วนและปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยออกจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ในการศึกษาสัดส่วนและปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยออกมาจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นในปุ๋ยหมักมูลหมูที่รูปแบบต่างๆ พบว่าปริมาณโพแทสเซียมรวมมีมากกว่าสังกะสี 7.5-8.3 เท่า โดยสังกะสีมีค่าอยู่ในช่วง 0.68-1.18 กรัมต่อกิโลกรัม และโพแทสเซียมมีค่าอยู่ในช่วง 5.66-8.83 กรัมต่อกิโลกรัม โดยสังกะสีซึ่งเป็นจุลธาตุอาหารมีปริมาณไม่เกินค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ในกากตะกอนที่จะนำไปใช้เป็นปุ๋ยในการเกษตรที่กำหนดไว้ต้องมีค่าไม่เกิน 3 กรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานเกษตรจังหวัดลำพูน, 2558) ขณะที่โพแทสเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการปริมาณมากมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.5-3.0 ของน้ำหนักปุ๋ย ซึ่งจัดเป็นปุ๋ยที่มีปริมาณโพแทสเซียมอุดมสมบูรณ์มากกว่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่ต้องมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ขึ้นไป ถึง 5-6 เท่า

จากการศึกษาพบว่า การกระจายของสังกะสีและโพแทสเซียมรูปแบบต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 21 เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังนี้

#### สังกะสี

รูปสารประกอบออกไซด์ (ร้อยละ 45.4-65.1)

รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (ร้อยละ 32.3-46.1)

รูปคั่งค้างของแข็ง (ร้อยละ 2.3-9.1)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 0.1-0.2)

#### โพแทสเซียม

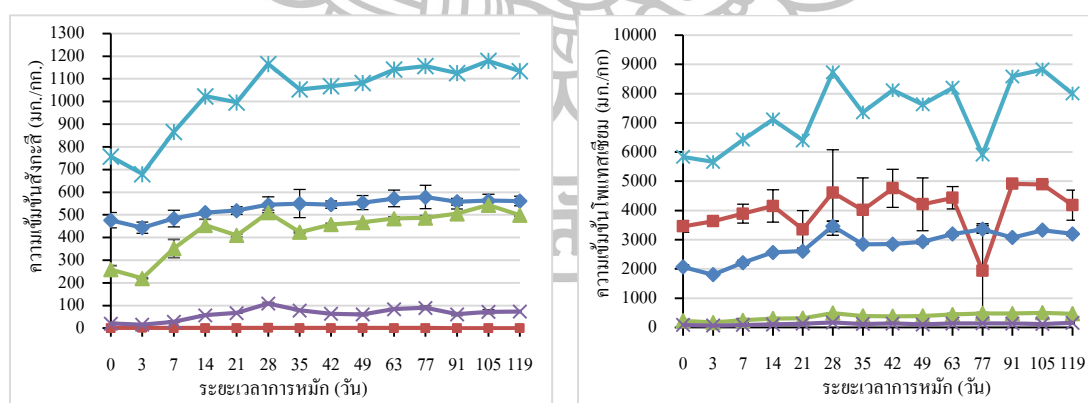
รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ 43.6-61.4)

รูปสารประกอบออกไซด์ (ร้อยละ 31.9-59.3)

รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (ร้อยละ 2.9-8.5)

รูปคั่งค้างของแข็ง (ร้อยละ 1.1-2.4)

จากคุณสมบัติของโพแทสเซียมซึ่งเป็นโลหะกลุ่มกรดแก่ (hard acid) (Stumm and Morgan, 1996) อยู่ในกลุ่มโลหะแอลคาไลน์ที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก มีคุณสมบัติการละลายน้ำได้ดี (Chang, 2002) ทำให้พบโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุดถึงปริมาณครึ่งหนึ่งของโพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละ 43.6-61.4) ขณะที่สังกะสีจัดอยู่ในกลุ่ม borderline ที่ชอบเกิดพันธะโคเวเลนต์และพันธะไอออนิก ตามการจัดกลุ่มกรด-เบสอ่อนแก่ หรือที่เรียกว่า hard and soft acid-base (HSAB) และดัชนีของ Niboer and Richardson (Stumm and Morgan, 1996) ทำให้สังกะสีมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และอนินทรีย์ได้มากกว่าทำให้พบปริมาณสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 0.1-0.2 เท่านั้น โดยลำดับความชอบของสังกะสีและโพแทสเซียมที่ชอบเกิดสารประกอบสอดคล้องกับความสามารถของลิแกนด์ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะดังนี้ (Guy and Chakrabarti, 1975)  $MnO_2 > กรดอิวมิก > เหล็กออกไซด์ > แร่ดินเหนียว$



ก.

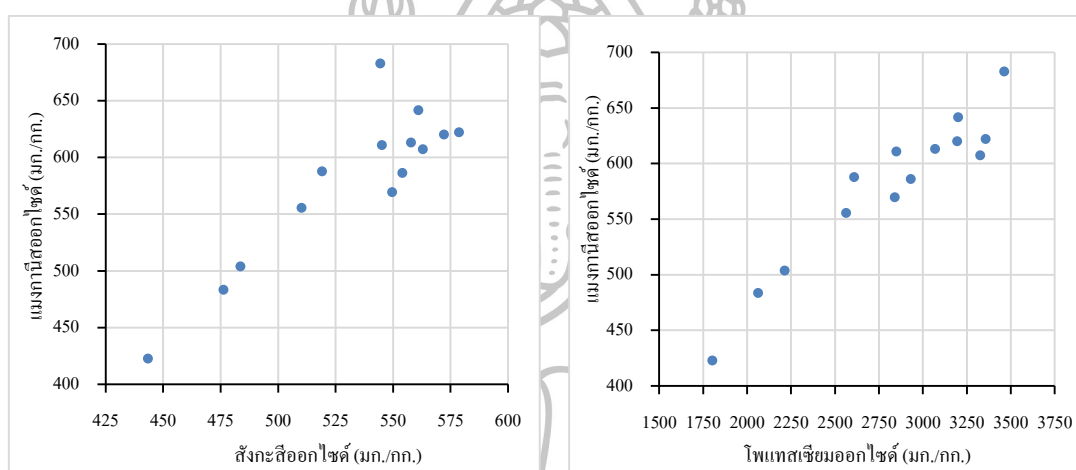
ข.

- รูปที่แลกเปลี่ยนได้      ◆ รูปสารประกอบออกไซด์      ▲ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์  
✖ รูปคั่งค้างของแข็ง      ✱ ปริมาณโลหะทั้งหมด

รูปที่ 21 ปริมาณโลหะรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก ก. สังกะสี ข. โพแทสเซียม



โดยพบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสังกะสีออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์สอดคล้องกับปริมาณแมงกานีสออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $r = 0.890$  และ  $r = 0.952$ ,  $p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังรูปที่ 22 และความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์และโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ผกผันกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $r = -0.874$  และ  $r = -0.747$ ,  $p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังรูปที่ 23 ซึ่งหมายถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์จากกระบวนการหมักปุ๋ยที่ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเกิดเป็นสารฮิวมิกที่มีมากขึ้น (Bernal et al., 2009; Lu et al., 2014) จึงทำให้รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองผกผันกับอัตราส่วนดังกล่าว



ก.

ข.

**รูปที่ 22** ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมออกไซด์กับแมงกานีสออกไซด์

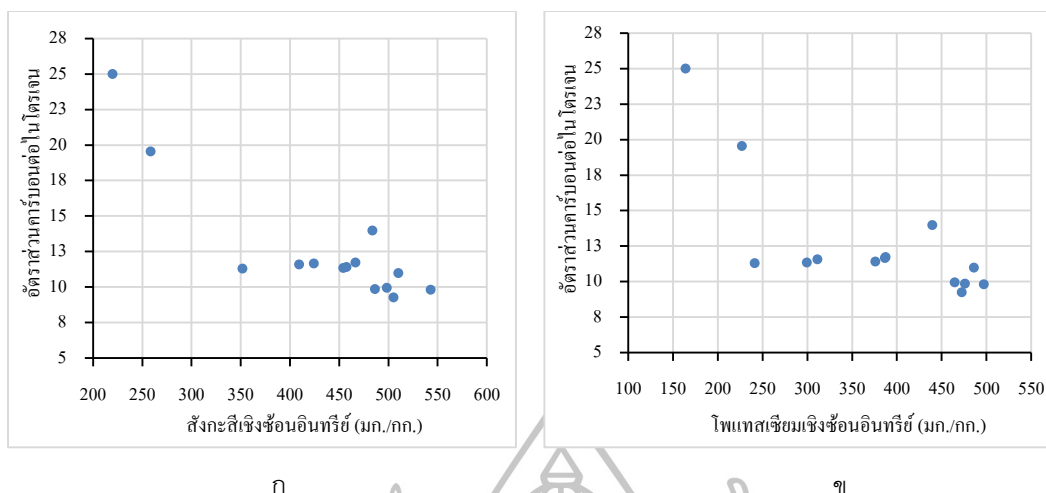
ก. ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ( $r = 0.890$ ,  $p < 0.01$ )

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ( $r = 0.952$ ,  $p < 0.01$ )

#### 4.3 อิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียม

อิทธิพลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบสังกะสีและโพแทสเซียมแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาอย่างชัดเจน โดยเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นรูปแบบโลหะที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นด้วย เช่น รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปสารประกอบออกไซด์ และกลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาน้อยหรือไม่ชัดเจน เช่น รูปคางของแข็ง และรูปที่แลกเปลี่ยนได้ มีรายละเอียดดังนี้





**รูปที่ 23** ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

- ก. ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน  
( $r = -0.874, p < 0.01$ )
- ข. ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน  
( $r = -0.747, p < 0.01$ )

#### 4.3.1 กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาอย่างชัดเจน

##### 4.3.1.1 รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียม

รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปแบบที่สะท้อนถึงกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้อย่างชัดเจน โดยรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.747$  และ  $r = 0.826, p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังรูปที่ 24 และตารางที่ 13 โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์กับระยะเวลา ดังนี้

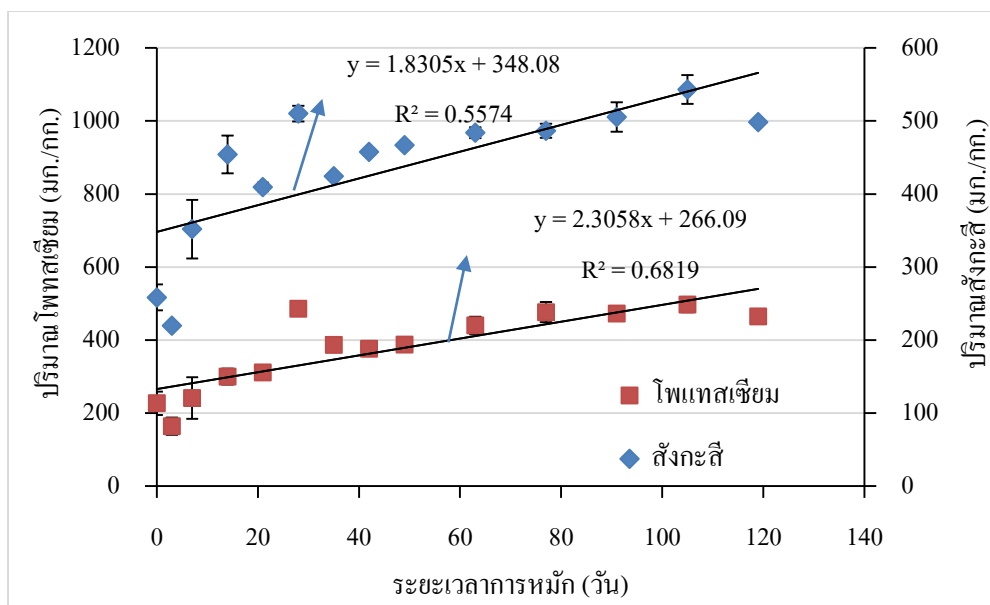
$$\text{Zn-Org} = 1.8305 \text{ time} + 348.08 \quad R^2 = 0.5574 \quad (1)$$

$$\text{K-Org} = 2.3058 \text{ time} + 266.09 \quad R^2 = 0.6815 \quad (2)$$

โดย Zn-Org คือ สังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

K-Org คือ โพแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

time คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



รูปที่ 24 ปริมาณของสังกะสีและ โฟแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์กับระยะเวลาการหมัก ( $r = 0.747$ ,  $p < 0.01$ )

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างโฟแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์กับระยะเวลาการหมัก ( $r = 0.826$ ,  $p < 0.01$ )

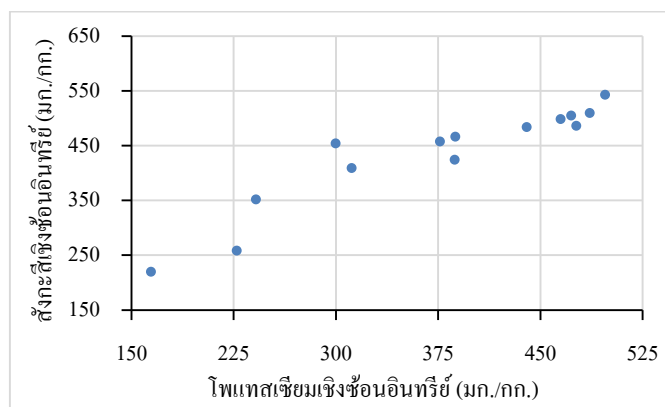
ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับสังกะสีและ โฟแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น

พารามิเตอร์	เวลา	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	อุณหภูมิ	ความชื้น
เวลา	1	-0.574*	-0.701**	-0.890**
สังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์	0.747**	-0.874**	-0.839**	-0.908**
โฟแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์	0.826**	-0.747**	-0.725**	-0.930**

หมายเหตุ \* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\*\* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 0.931, p < 0.01$ ) ดังรูปที่ 25 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันด้วย



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและ โพแทสเซียม ( $r = 0.931, p < 0.01$ )

นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิและความชื้นซึ่งได้รับอิทธิพลต่อกระบวนการหมักเช่นกัน โดยอุณหภูมิและความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อกระบวนการหมักนานขึ้น ( $r = -0.701$  และ  $r = -0.890, p < 0.01$  ตามลำดับ) สอดคล้องกับรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและ โพแทสเซียมที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกัน (อุณหภูมิ  $r = -0.839$  และ  $-0.725$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ ; ความชื้น  $r = -0.908$  และ  $-0.930$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ )

เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักไปทดสอบ multiple regression โดยใช้ stepwise selection เพื่อหาตัวแปรที่สามารถอธิบายรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสอง จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Zn-Org} = 678.522 - 4.578 \text{ Mois.} - 9.555 \text{ C/N} \quad R^2 = 0.908, n = 13 \quad (3)$$

$$\text{K-Org} = 600.634 - 8.379 \text{ Mois.} \quad R^2 = 0.864, n = 13 \quad (4)$$

โดย Zn-Org คือ สังกะสีสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

K-Org คือ โพแทสเซียมสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

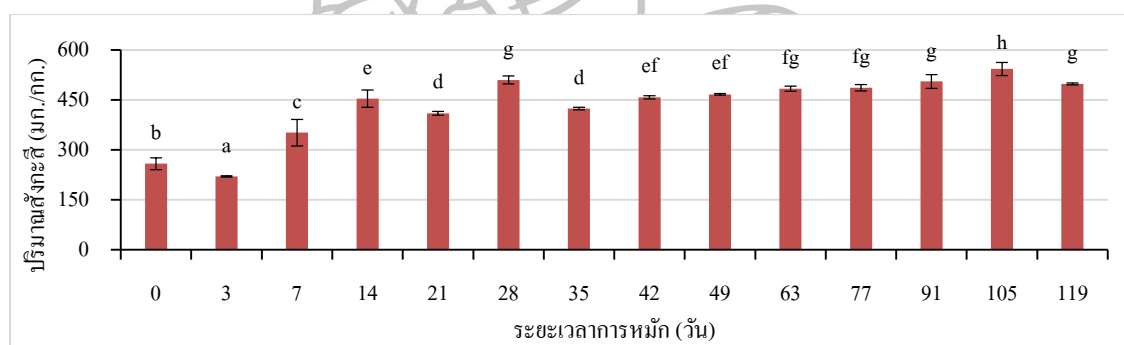
C/N คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

Mois. คือ ปริมาณความชื้น

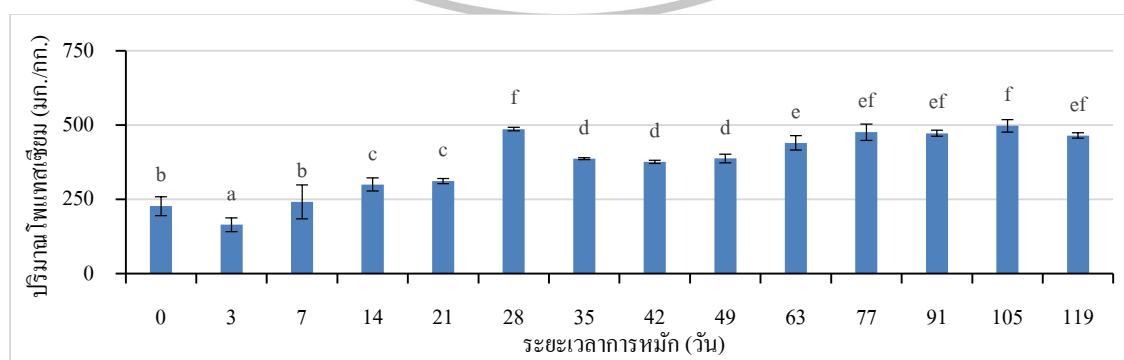
พบว่าความชื้นและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณ สังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์ได้ร้อยละ 90.8 ขณะที่มีความชื้นที่สามารถนำมาใช้ประเมินปริมาณ โปแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ได้ร้อยละ 86.4

โดยปริมาณสังกะสีและโปแทสเซียมที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักก็มีความ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแบ่งเป็น 8 และ 6 กลุ่ม ตามลำดับ ดังรูปที่ 26 และ 27 เรียงลำดับกลุ่มที่มี ปริมาณจากมากไปหาน้อยดังนี้

สังกะสี	โปแทสเซียม
กลุ่ม h วันที่ 105	กลุ่ม f ตั้งแต่วันที่ 28 และ 77 – 119
กลุ่ม g ตั้งแต่วันที่ 28, 63 – 91 และวันที่ 119	กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 63, 77 – 91 และวันที่ 119
กลุ่ม f ตั้งแต่วันที่ 42 – 77	กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 35 – 49
กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 14 และ 42 – 49	กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 14 – 21
กลุ่ม d วันที่ 21 และ 35	กลุ่ม b วันที่ 0 และ 7
กลุ่ม c วันที่ 7	กลุ่ม a วันที่ 3
กลุ่ม b วันที่ 0	
กลุ่ม a วันที่ 3	



รูปที่ 26 ปริมาณสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก



รูปที่ 27 ปริมาณโปแทสเซียมเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.3.1.2 รูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียม

รูปสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสองชนิดได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักอย่างชัดเจนเช่นกัน โดยรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.786$  และ  $r = 0.757$ ,  $p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังรูปที่ 28 และตารางที่ 14 โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของรูปสารประกอบออกไซด์กับระยะเวลา ดังนี้

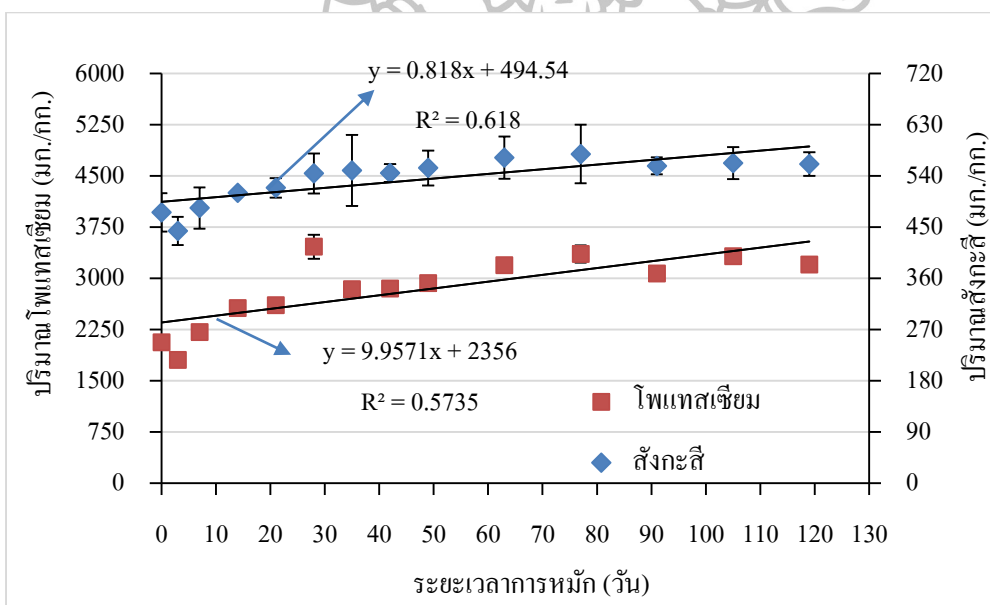
$$\text{Zn-Ox} = 0.818 \text{ time} + 494.54 \quad R^2 = 0.618 \quad (5)$$

$$\text{K-Ox} = 9.9571 \text{ time} + 2356 \quad R^2 = 0.5735 \quad (6)$$

โดย Zn-Ox คือ สังกะสีออกไซด์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

K-Ox คือ โพแทสเซียมออกไซด์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

time คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



รูปที่ 28 ปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีออกไซด์กับระยะเวลาการหมัก ( $r = 0.786$ ,  $p < 0.01$ )

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมออกไซด์กับระยะเวลาการหมัก ( $r = 0.757$ ,  $p < 0.01$ )

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับสังกะสีและโพแทสเซียมออกไซด์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อ ไตรเจน อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น

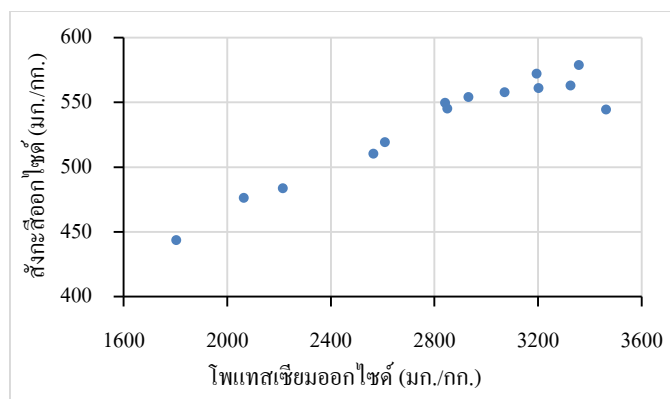
พารามิเตอร์	เวลา	อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน	อุณหภูมิ	ปริมาณความชื้น
เวลา	1	-0.574*	-0.701**	-0.890**
สังกะสีออกไซด์	0.786**	-0.774**	-0.863**	-0.940**
โพแทสเซียมออกไซด์	0.757**	-0.756**	-0.716**	-0.911**

หมายเหตุ \* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

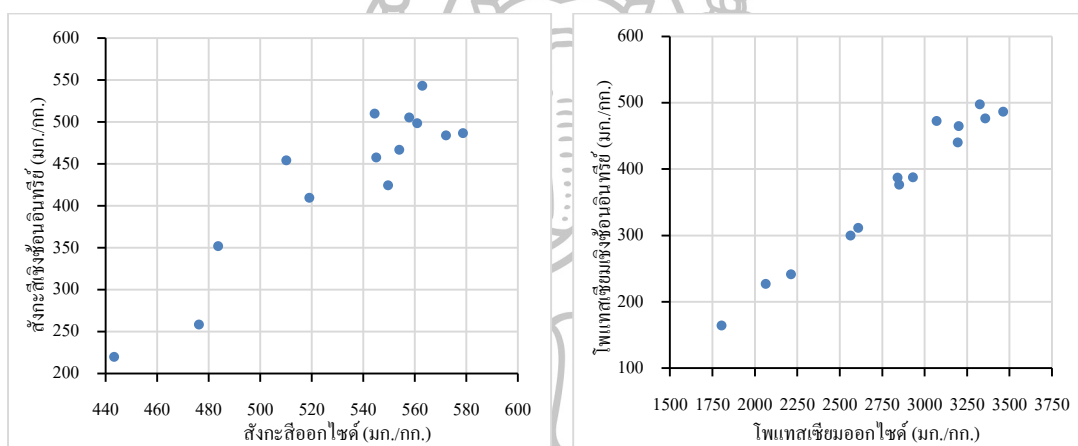
\*\* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 0.944, p < 0.01$ ) ดังรูปที่ 29 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบออกไซด์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันด้วย

ทั้งนี้รูปสารประกอบออกไซด์ที่มากขึ้นอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปของรูปสารอินทรีย์ (He et al., 2009) จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์มาเป็นรูปสารประกอบออกไซด์ที่ง่ายต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่า สังเกตได้จากปริมาณสังกะสีออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ต่างแปรผันตามรูปสารอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.915$  และ  $r = 0.986, p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังรูปที่ 30 ทำให้รูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียมต่างเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเช่นกัน ( $r = -0.774$  และ  $r = -0.756, p < 0.01$  ตามลำดับ) ดังตารางที่ 14 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับอุณหภูมิและความชื้นที่ลดลงจากกระบวนการหมักเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ( $r = -0.701$  และ  $r = -0.890, p < 0.01$  ตามลำดับ) โดยสัมพันธ์กับรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นด้วย (อุณหภูมิ  $r = -0.863$  และ  $-0.716$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ ; ความชื้น  $r = -0.940$  และ  $-0.911$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ )



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ของรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.944$ ,  $p < 0.01$ )



ก.

ข.

รูปที่ 30 ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปสารประกอบออกไซด์และรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียม

ก. สังกะสี ( $r = 0.915$ ,  $p < 0.01$ )

ข. โพแทสเซียม ( $r = 0.986$ ,  $p < 0.01$ )

เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักไปทดสอบ multiple regression โดยใช้ stepwise selection เพื่อหาตัวแปรที่สามารถอธิบายรูปสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสอง จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Zn-Ox} = 618.226 - 3.157 \text{ Mois.} \quad R^2 = 0.884, n = 13 \quad (7)$$

$$\text{K-Ox} = 3867.614 - 38.654 \text{ Mois.} \quad R^2 = 0.830, n = 13 \quad (8)$$

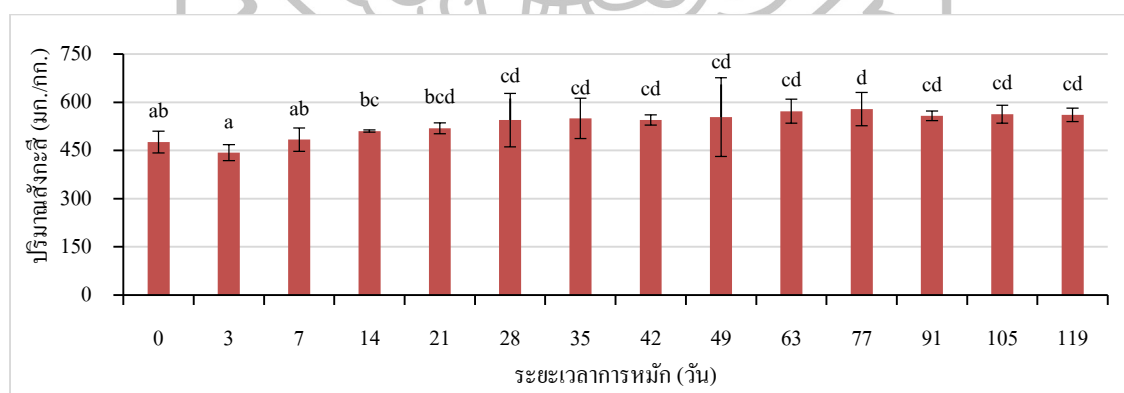
โดย Zn-Ox คือ สังกะสีออกไซด์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

K-Ox คือ โพแทสเซียมออกไซด์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

Mois. คือ ปริมาณความชื้น

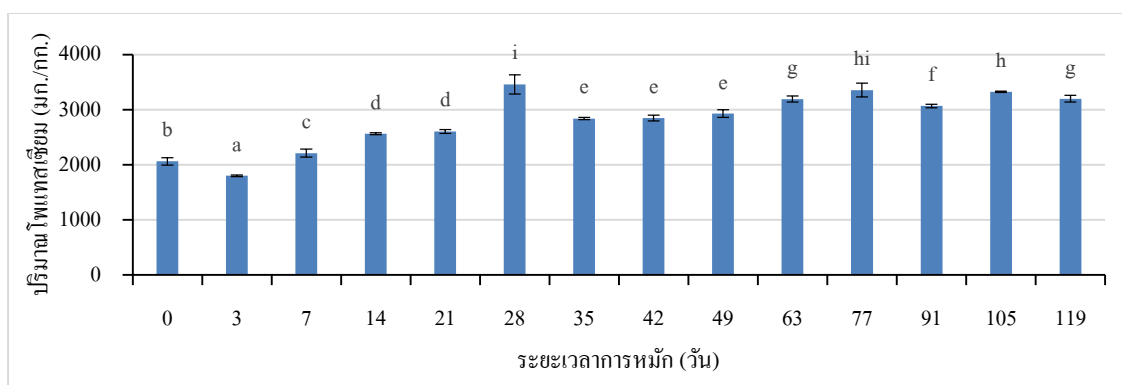
พบว่ามีความชื้นที่สามารถนำมาใช้ประเมินปริมาณสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสองได้สังกะสีร้อยละ 88.4 และโพแทสเซียมได้ร้อยละ 83.0 ตามลำดับ โดยปริมาณสังกะสีและโพแทสเซียมที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแบ่งเป็น 4 และ 9 กลุ่ม ตามลำดับ ดังรูปที่ 31 และ 32 เรียงลำดับกลุ่มที่มีปริมาณจากมากไปหาน้อยดังนี้

สังกะสี	โพแทสเซียม
กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 21 – 119	กลุ่ม I วันที่ 28 และ 77
กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 14 – 63 และ 91–119	กลุ่ม h วันที่ 77 และ 105
กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 0 และ 7 – 21	กลุ่ม g วันที่ 63 และ 119
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0 – 7	กลุ่ม f วันที่ 91
	กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 35 – 49
	กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 14 – 21
	กลุ่ม c วันที่ 7
	กลุ่ม b วันที่ 0
	กลุ่ม a วันที่ 3



รูปที่ 31 ปริมาณสังกะสีออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก





รูปที่ 32 ปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.3.2 กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาน้อยหรือไม่ชัดเจน

กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาน้อยหรือไม่ชัดเจน ได้แก่ กลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ได้แก่ รูปทรงค้ำของแข็งและรูปที่แตกเปลี่ยนได้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.3.2.1 รูปทรงค้ำของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียม

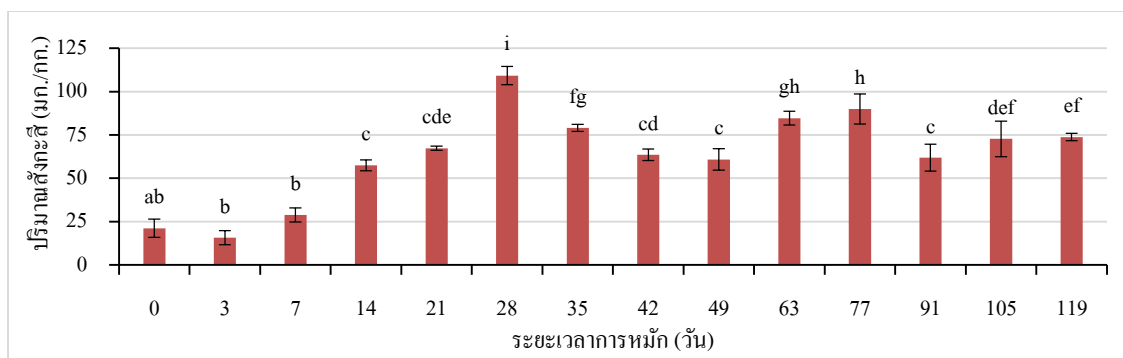
รูปทรงค้ำของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียมมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ตลอดกระบวนการหมัก ดังรูปที่ 33 และ 34 โดยเรียงลำดับปริมาณรูปทรงค้ำของแข็งของโลหะทั้งสองออกได้เป็น 9 กลุ่ม ที่มีปริมาณจากมากไปหาน้อยดังนี้

##### สังกะสี

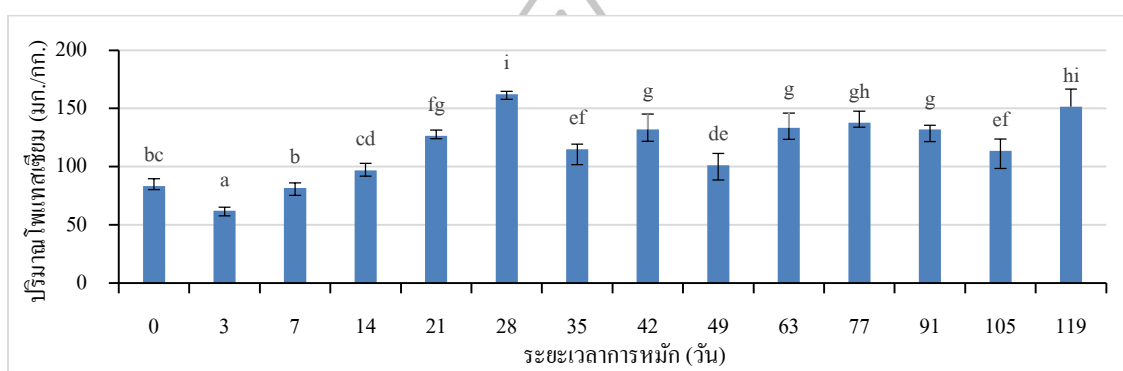
- กลุ่ม I วันที่ 28
- กลุ่ม h ตั้งแต่วันที่ 63 – 77
- กลุ่ม g วันที่ 35 และ 63
- กลุ่ม f ตั้งแต่วันที่ 35 และ 105 – 119
- กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 21 และ 105 – 119
- กลุ่ม d วันที่ 21 และ 42
- กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 14 – 21, 42 – 49 และวันที่ 91
- กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 0 – 7
- กลุ่ม a วันที่ 0

##### โพแทสเซียม

- กลุ่ม I วันที่ 28 และ 119
- กลุ่ม h วันที่ 77 และ 119
- กลุ่ม g ตั้งแต่วันที่ 21, 42 และ 63 – 91
- กลุ่ม f วันที่ 21, 35 และ 105
- กลุ่ม e วันที่ 35, 49 และ 105
- กลุ่ม d วันที่ 14 และ 49
- กลุ่ม c วันที่ 0 และ 7
- กลุ่ม b วันที่ 0 และ 7
- กลุ่ม a วันที่ 3



รูปที่ 33 ปริมาณสังกะสีคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก



รูปที่ 34 ปริมาณโพแทสเซียมคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

ปริมาณรูปคั่งค้างของแข็งน้อยที่สุดในการหมักปุ๋ยช่วงแรก (วันที่ 0 – 7) ขณะที่ปริมาณที่มากที่สุดของโลหะทั้งสองพบในวันที่ 28 แม้ว่าหลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงอีก โดยมีค่าต่ำอีกครั้งในวันที่ 49 ซึ่งเป็นช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ จากนั้นรูปคั่งค้างของแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีค่าลดลงอีกครั้งในวันที่ 91 สำหรับสังกะสี และวันที่ 105 สำหรับโพแทสเซียม การเปลี่ยนแปลงแบบขึ้นๆ ลงๆ เช่นนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายวัตถุคั่งค้างออกไปเป็นรูปแบบต่างๆ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบคั่งค้างของแข็งของโลหะทั้งสองด้วย ซึ่งแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงจะไม่สัมพันธ์กับระยะเวลาแต่การเปลี่ยนแปลงยังสัมพันธ์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อุณหภูมิ และความชื้น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบคั่งค้างของแข็งของโลหะทั้งสอง โดยรูปคั่งค้างของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์และสารประกอบออกไซด์ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ( $r = -0.680$  และ  $-0.676$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ ) นอกจากนี้ทั้งอุณหภูมิและความชื้นที่ลดลงเมื่อระยะเวลาในการหมักผ่านไป ก็สัมพันธ์กับปริมาณรูปคั่งค้างของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นด้วย (อุณหภูมิ  $r = -0.613$  และ  $-0.582$  ตามลำดับ,  $p < 0.05$ ; ความชื้น

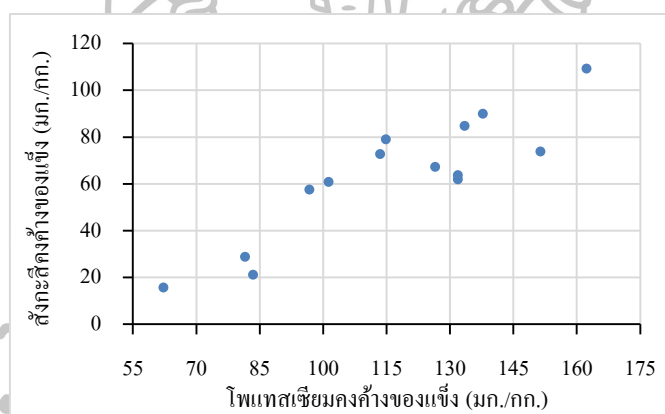
$r = -0.776$  และ  $-0.756$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ ) ดังตารางที่ 15 ทำให้รูปทรงค้ำของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียมมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 0.894$ ,  $p < 0.01$ ) ดังรูปที่ 35

**ตารางที่ 15** สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างสังกะสีและโพแทสเซียมรูปทรงค้ำของแข็งกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อโตรเจน อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น

พารามิเตอร์	เวลา	อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน	อุณหภูมิ	ปริมาณ ความชื้น
เวลา	1	-0.574*	-0.701**	-0.890**
สังกะสีค้ำของแข็ง	0.515	-0.680**	-0.613*	-0.776**
โพแทสเซียมค้ำของแข็ง	0.524	-0.676**	-0.582*	-0.759**

หมายเหตุ \* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

\*\* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01



**รูปที่ 35** ความสัมพันธ์ของรูปทรงค้ำของแข็งของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.894$ ,  $p < 0.01$ )

เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักไปทดสอบ multiple regression โดยใช้ stepwise selection เพื่อหาตัวแปรที่สามารถอธิบายรูปทรงค้ำของแข็งของโลหะทั้งสองจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Zn-Res} = 109.148 - 1.694 \text{ Mois.} \quad R^2 = 0.602, n = 13 \quad (9)$$

$$\text{K-Res} = 164.858 - 1.792 \text{ Mois.} \quad R^2 = 0.577, n = 13 \quad (10)$$

โดย Zn-Res คือ สังกะสีค้ำของแข็ง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

Zn-Res คือ โพแทสเซียมค้ำของแข็ง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

Mois. คือ ปริมาณความชื้น

พบว่ามีความชื้นที่สามารถนำมาใช้ประเมินปริมาณคั่งค้างของแข็งของโลหะทั้งสองได้ โดยอธิบายสังกะสีคั่งค้างของแข็งได้ร้อยละ 60.2 และโพแทสเซียมคั่งค้างของแข็งได้ร้อยละ 55.7

#### 4.3.2.2 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและโพแทสเซียม

รูปที่แลกเปลี่ยนเป็นรูปแบบที่ได้รับความอิทธิพลมาจากหลายรูปแบบที่อาจปลดปล่อยไอออนโลหะให้ออกมาและถูกตรึง ตัวอย่างเช่น รูปที่เกิดสารประกอบออกไซด์คือ สมการที่ (11) (Bradl, 2004) และรูปที่เกิดสารเชิงซ้อนอินทรีย์คือสมการที่ (12) และ (13) (Tan, 2014)



โดย  $\equiv\text{S}$  คือ พื้นผิวออกไซด์

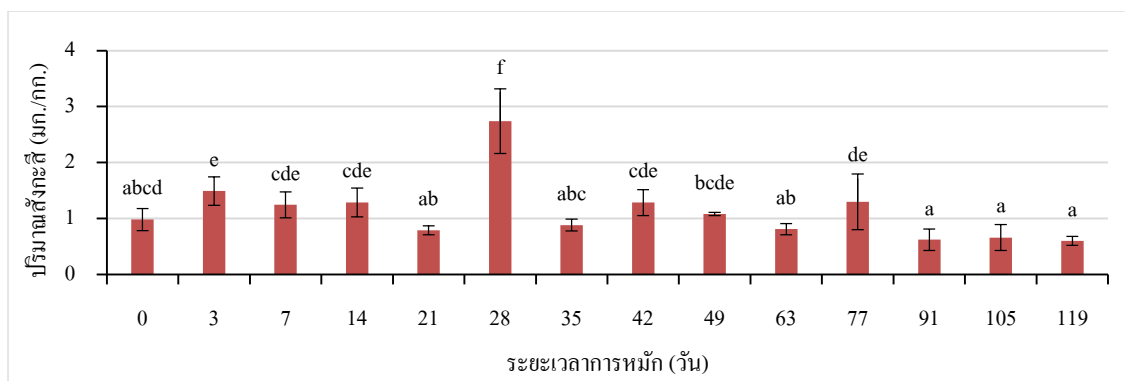
$\text{Me}^{n+}$  คือ ไอออนสังกะสีหรือไอออนโพแทสเซียม

R คือ โครงสร้างอัลคิล

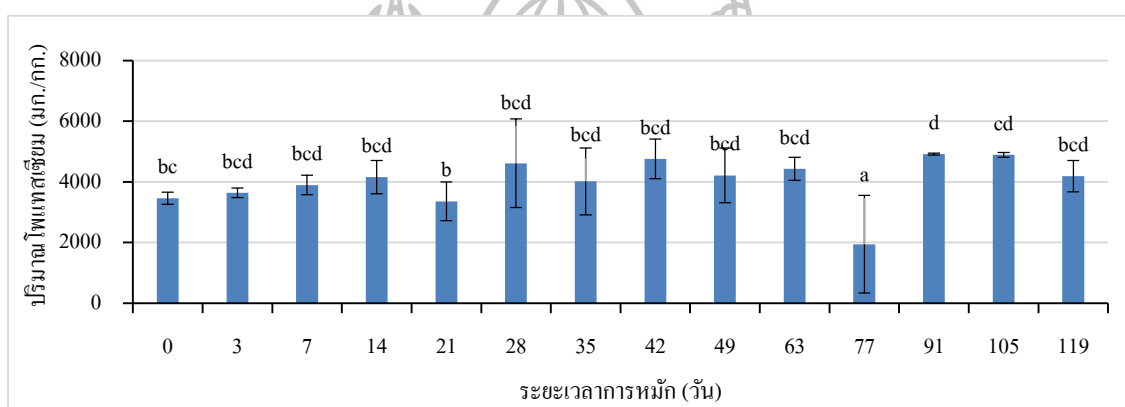
n คือ เลขออกซิเดชันของสังกะสีและโพแทสเซียม

ซึ่งจะพบว่าทั้งรูปออกไซด์และรูปสารเชิงซ้อนที่กล่าวมาเป็นรูปที่ได้รับความอิทธิพลจากระยะเวลาอย่างชัดเจน แต่รูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นกลุ่มที่ได้รับความอิทธิพลจากระยะเวลาน้อยหรือไม่ชัดเจน จึงทำให้รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและโพแทสเซียมมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ตลอดกระบวนการหมัก ดังรูปที่ 36 และ 37 โดยเรียงลำดับรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและโพแทสเซียมออกเป็น 6 และ 4 กลุ่ม ที่มีปริมาณจากมากไปหาน้อยเรียงตามลำดับดังนี้

สังกะสี	โพแทสเซียม
กลุ่ม f วันที่ 28	กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 3 – 14, 28 – 63 และ
กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 3 – 14, 42 – 49 และวันที่ 77	91 – 119
กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 0, 7 – 14 และ 42 – 49	กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 0 – 14, 28 – 63 และ
กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 0, 7 – 14 และ 35 – 49	105 – 119
กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 0, 21, 35 และ 49 – 63	กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 0 – 63 และวันที่ 119
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0, 21, 35, 63 และ 91 – 119	กลุ่ม a วันที่ 77



รูปที่ 36 ปริมาณสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก



รูปที่ 37 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ารูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักโดยตรง โดยเฉพาะรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปสารประกอบออกไซด์ ขณะที่รูปค้ำของแข็งแม้ไม่สัมพันธ์กับระยะเวลาโดยตรงก็ยังสามารถอธิบายได้จากปัจจัยที่แปรผันตามระยะเวลา ได้แก่ ความชื้นเช่นกัน โดยทั้งสามรูปแบบนี้มีผลให้รูปที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งของสังกะสีและโพแทสเซียมมีความแปรปรวนตลอดระยะเวลาการหมัก อันเนื่องมาจากความยากง่ายของทั้งสามรูปแบบที่ปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมมีความยากง่ายแตกต่างกัน

อย่างไรก็ดีจากการทดลองนี้พอสรุปได้ว่าแม้ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไปคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักจะบ่งบอกว่าปุ๋ยเจริญเต็มที่พร้อมใช้งานได้ แต่เมื่อพิจารณา ร่วมกับการสกัดแบบลำดับขั้นเพื่อให้ได้รูปแบบที่เป็นประโยชน์ของสังกะสีและโพแทสเซียมที่พร้อมใช้มากที่สุด พบว่ารูปที่แลกเปลี่ยนได้ในช่วงวันที่ 42 – 49 เป็นวันที่โลหะทั้งสองอยู่ในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ปริมาณมากที่สุด หากทิ้งไว้นานกว่านี้ปริมาณสังกะสีจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่า

รูปแบบอื่นๆ ได้แก่ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ รูปสารประกอบออกไซด์ และรูปค่างของแข็ง จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไปก็ตาม แต่ทั้งสามรูปแบบต้องอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อเปลี่ยนรูปแบบทั้งสามไปอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เสียก่อน ดังนั้นรูปแบบที่เพิ่มขึ้นจึงอาจหมายถึงรูปแบบที่มีความเสถียรมากขึ้นและความสามารถในการเก็บกักโลหะที่สำคัญ ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการเพื่อเปลี่ยนรูปให้พร้อมใช้งาน นั่นหมายถึงการป้องกันการสูญเสียโลหะทั้งสองก่อนการนำไปใช้จริง ดังนั้นการศึกษาถึงระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมไม่เพียงแต่จะกำหนดช่วงเวลาที่ย่อยพร้อมใช้งานและมีปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์สูงสุด ยังเป็นฐานข้อมูลที่ดีในการพิจารณาการเก็บรักษาและการกำหนดรูปแบบโลหะที่มีความเสถียรแตกต่างกันได้ด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ ทำการศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักมูลหมูจากรูปแบบและปริมาณของธาตุอาหาร 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสีที่จัดอยู่ในกลุ่มจุลธาตุอาหาร และ โพแทสเซียมที่จัดอยู่ในกลุ่มธาตุอาหารหลัก โดยศึกษาควบคู่ไปกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักที่หมักเป็นระยะเวลา 4 เดือน ในช่วงอายุของการหมัก 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการนำรูปแบบไปใช้กับพืช ตลอดจนศึกษาภาพในการปลดปล่อย ณ เวลาการหมักต่างๆ โดยสกัดตามลำดับความยากง่ายของการปลดปล่อยตามวิธีของ Tessier et al. (1979) ที่ดัดแปลงโดย Wada and Wada (1999)

การศึกษาด้านกายภาพและเคมีแบ่งอายุปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ออกเป็น 2 ระยะ คือ 1) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) อยู่ในช่วง 0-34 วันของการหมัก ลักษณะปุ๋ยมีสีน้ำตาล มีความชื้นสูง มีกลิ่นของแอมโมเนีย และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงที่สุดในช่วงนี้เป็น 25.0 และ 2) ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturation phase) คือตั้งแต่วันที่ 35 ถึงระยะสุดท้ายของการหมัก โดยอุณหภูมิในปุ๋ยหมักจะมีค่าค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ความชื้นจะลดลงต่ำกว่าร้อยละ 35 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงอยู่ในช่วง 9.3-14.0 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548)

การศึกษาด้านส่วนและปริมาณของสังกะสีและโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยออกมาจากการสกัด พบว่าการกระจายของสังกะสีและโพแทสเซียมมีความแตกต่างกัน สังกะสีจะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์และรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์มากที่สุด (ร้อยละ 45.4-65.1 และ ร้อยละ 32.3-46.1 ตามลำดับ) เนื่องจากสังกะสีเป็นโลหะแทรนซิชันซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มกรดที่อ่อนกว่า (กลุ่ม borderline) จะชอบเกิดสารประกอบตามทฤษฎีของ HSAB ทำให้มีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ได้ดีกว่าโพแทสเซียมที่เป็นโลหะแอลคาไลน์และตามทฤษฎีของ HSAB จัดอยู่ในกลุ่มกรดแก่ (hard acid) ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ละลายน้ำอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนง่ายได้ดี จึงทำให้รูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่เด่นถึงร้อยละ 43.6-61.4

กระบวนการหมักส่งผลต่อรูปแบบของสังกะสีและโพแทสเซียมแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์กับรูปสารประกอบออกไซด์ซึ่งเป็นกลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาการหมักอย่างชัดเจน พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นมีผลต่อรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและโพแทสเซียมไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 0.931$  และ

0.944,  $p < 0.01$  ตามลำดับ) และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.01$ ) สอดคล้องกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลง ( $p < 0.01$ ) โดยสารประกอบออกไซด์ที่มากขึ้นตามระยะเวลาการหมักอาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาเป็นรูปสารประกอบออกไซด์ที่ง่ายต่อการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากกว่าสังเกตได้จากความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปสารประกอบออกไซด์กับรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและโพแทสเซียม ( $r = 0.915$  และ  $0.986$ ,  $p < 0.01$  ตามลำดับ) โดยช่วงอายุที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่โลหะทั้งสองในรูปสารประกอบออกไซด์และสารเชิงซ้อนอินทรีย์จะพบมากในวันที่ 77-119

กลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากระยะเวลาการหมักน้อยหรือไม่ชัดเจน ได้แก่ รูปทรงค้ำของแข็งและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการหมัก โดยรูปทรงค้ำของแข็งแม้ไม่สัมพันธ์กับระยะเวลาแต่ยังสัมพันธ์กับดัชนีของกระบวนการหมักอื่น ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ( $p < 0.01$ ) อุณหภูมิ ( $p < 0.05$ ) และความชื้น ( $p < 0.01$ ) เช่นเดียวกับสารเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปสารประกอบออกไซด์ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักที่ยังคงมีอิทธิพลต่อรูปแบบค้ำ-ของแข็งของโลหะทั้งสอง โดยทั้งสังกะสีและโพแทสเซียมได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 0.894$ ,  $p < 0.01$ ) แตกต่างจากรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่มีความแปรปรวนมาจากหลายปัจจัย เช่น อาจได้มาจากการสลายตัวของรูปแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก อย่างไรก็ตามการที่รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสองมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42-49 โดยสังกะสีจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญหากระยะเวลาการหมักนานกว่านี้

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการเพิ่มปริมาณรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปสารประกอบออกไซด์อย่างชัดเจน โดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นและเป็นรูปแบบที่เด่นในสังกะสี ซึ่งถ้าหากต้องการให้สังกะสีอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นรูปที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ของพืชจะต้องมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทั้งสองนี้เสียก่อน ขณะที่แม้กระบวนการหมักจะมีอิทธิพลต่อรูปแบบทั้งสองของโพแทสเซียมเช่นกัน แต่มีผลกระทบต่อปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้น้อยจากระดับของปริมาณโพแทสเซียมที่ขอบอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีมากถึงประมาณร้อยละ 50 ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ทำให้จุลธาตุอาหาร เช่น สังกะสีจึงเป็นตัวพิจารณา กำหนดการนำไปใช้ ดังนั้น การศึกษาถึงปริมาณและรูปแบบของโลหะจึงมีความสำคัญเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการพิจารณาอายุปุ๋ยหมักตลอดจนการเก็บรักษาที่จะมีอิทธิพลต่อคุณภาพและรูปแบบของธาตุอาหารโลหะซึ่งมีความแตกต่างกัน การศึกษานี้จึงเป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษารูปเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารที่มีมากมายในปุ๋ยหมักซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาเช่นเดียวกันนี้กับปุ๋ยชนิดอื่นหรือโลหะอื่นๆ ในอนาคตต่อไป



## รายการอ้างอิง

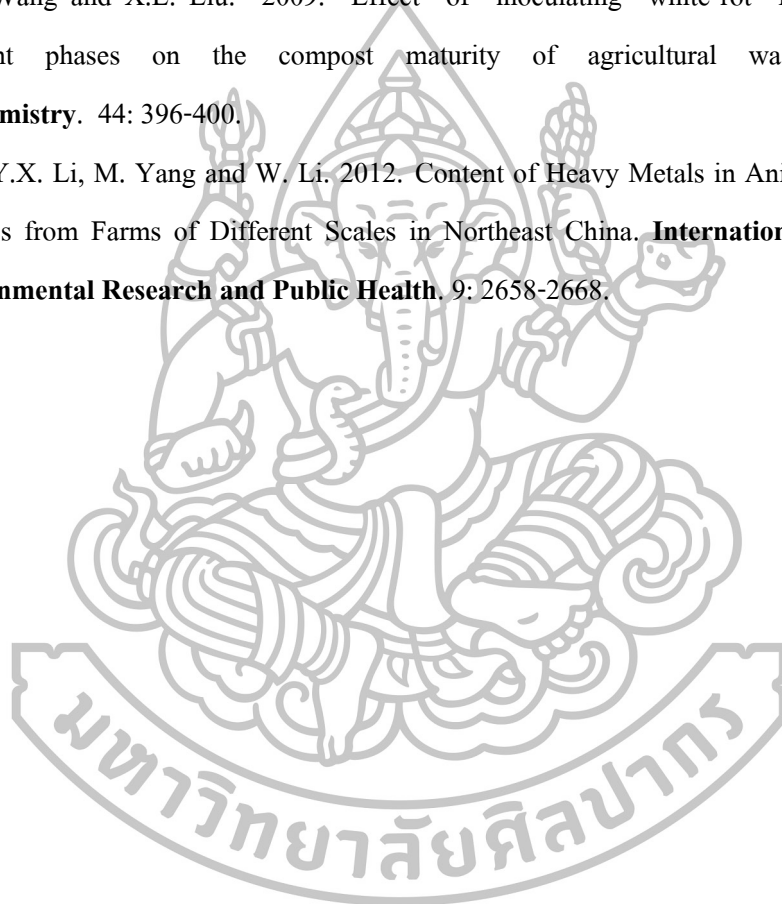
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. ปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. เอกสารวิชาการ ลำดับที่ 17/2548 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นฤมล วชิรปัทมา, ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก และสุนทรี สุวรรณสิขณณ์. 2554. ผลของโพแทสเซียมต่อ ปริมาณผลผลิต การสะสมธาตุอาหารในเนื้อเยื่อ ปริมาณน้ำตาล และการยอมรับของผู้บริโภค ต่อมะละกอบที่ปลูกในวัสดุปลูก. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 19(2): 1-11.
- นัทธีรา สรรพณี. 2541. **เคมีสิ่งแวดล้อม**. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- \_\_\_\_\_. 2554. **โลหะในแหล่งน้ำ**. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- ปฐพีชล วายุคคี. 2533. **ดินและปุ๋ย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท, นนทบุรี.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2548. **ปุ๋ยอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์บ้านและสวน, กรุงเทพฯ.
- ขงยุทธ โอสดสภา. 2552. **ธาตุอาหารพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สาวิตรี กาพภักดี. 2553. การศึกษารูปแบบของเหล็กและทองแดงในปุ๋ยหมักด้วยเทคนิคการสกัด แบบลำดับขั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สำนักงานเกษตรจังหวัดลำพูน. 2558. เอกสารสนับสนุนระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน และค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมรับให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนน้ำเสีย. แหล่งที่มา: [http://www.lamphun.doae.go.th/level\\_soil.DOC](http://www.lamphun.doae.go.th/level_soil.DOC), 29 พฤศจิกายน 2558.
- Alloway, B.J. 1990. **Heavy Metals in Soils**. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Baes, C.F. and R.E. Mesmer. 1976. **The hydrolysis of Cations**. Wiley-Interscience, New York.
- Baudo, R. 1982. The role of the speciation in the transfer of heavy metals along the aquatic food wab. In ecological effect on heavy metal speciation in aquatic ecosystems. Edited by O. Revera.Ispra-Cour-ses.Ispra/Italy. Unpublished manuscript.
- Bernal, M.P., J.A. Albuquerque and R. Moral. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**. 100: 5444-5453.
- Bishop, P.L. and C. Godfrey. 1983. Nitrogen transformation during sewage composting. **Biocycle**. 24: 34-39.

- Boardman, R. and D.O. McGuire. 1990. The role of zinc in forestry I. Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition. **Forest Ecology and Management**. 37: 167-205.
- Bohn, H. L., B. L. Mcneal and G. A. O'Connor. 1985. **Soil Chemistry**. John Wiley & Sons, Inc, New York. U.S.A.
- Bradl, H.B. 2004. Adsorption of Heavy metal ions on soils and soils constituents. **Colloid and Interface Science**. 27: 1-18.
- Chang, R. 2002. **Chemistry**. McGraw-Hill, New York.
- Das, K. and H.M. Keener. 1997. Moisture effect on compaction and permeability in composts. **J. Environ. Eng.** 123: 275-281.
- de Bertoldi, M., G. Vallini and A. Pera. 1983. The biology of composting: A review. **Waste Management and Research**. 1: 157-176.
- Gajalakshmi, S. and S.A. Abbasi. 2008. Solid waste management by composting: state of the art. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.** 38: 311-400.
- Ganeshamurthy, A.N., G.C. Satisha and P. Prakash, 2011. Potassium nutrition on yield and quality of fruit crops with special emphasis on banana and grapes Karnataka **J. Agric. Sci.** 24(1): 29-38.
- Gungor, E.B.O. and M. Bekbolet. 2010. Zinc release by humic and fulvic acid as influenced by pH, complexation and DOC sorption. **Geoderma**. 159: 131-138.
- Guy, R.D. and C.L. Chakrabarti. 1975. Analytical techniques for speciation in trace metals, pp. 277-294. In: T.C. Hutchinson, ed. **Proceeding International Conference on Heavy Metals in the Environment 1st**, Toronto.
- Hem J.D. 1972. Chemistry and Occurrence of Cadmium and Zinc in Surface Water and Groundwater. **Water Resources Research**. 8: 661-679.
- He, M., W. Li, X. Liang, D. Wu and G. Tian. 2009. Effect of composting process on phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead in sewage sludge and swine manure. **Waste Management**. 29: 590-597.
- Hsu, J. and S. Lo. 1999. Recycling of separated pig manure: characterization of maturity and chemical fractionation of elements during compost. **Wat. Sci. Technol.** 40: 121-127.

- Huang, G.F., Q.T. Wu, J.W.C. Wong and B.B. Nagar. 2006. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. **Bioresource Technology**. 97: 1834-1842.
- Irving, H. and R. J. P. Williams. 1953. The stability of transition-metal complexes. **J. Chem. Soc.** 637: 3192-3210.
- Li, L., Z. Xu, J. Wu and G. Tian. 2010. Bioaccumulation of heavy metals in the earthworm *Eisenia fetida* in relation to bioavailable metal concentrations in pig manure. **Bioresource Technology**. 101: 3430-3436.
- Lu, D., L. Wang, B. Yan, Y. Ou, J. Guan, Y. Bian and Y. Zhang. 2014. Speciation of Cu and Zn during composting of pig manure amended with rock phosphate. **Waste Management**. 34: 1529-1536.
- L'Herroux, L., S. Le Roux, P. Appriou and J. Martinez. 1997. Behavior of metals following intensive pig slurry applications to a natural field treatment process in Brittany (France). **Environmental Pollution**. 97(1-2): 119-130.
- Miller, F.C. 1992. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors, pp. 515-544. In: Metting, F.B. Jr, ed. **Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Mullins, G.L., D.C. Martens, W.P. Miller, E.T. Kornegay and D.L. Hallock. 1982. Copper availability form and mobility in soil from three annual copper-enriched hog manure applications. **Journal of Environmental Quality**. 11(2): 316-320.
- Nieboer, E. and D.H.S. Richardson. 1980. The Replacement of the nondescriptive term heavy metals by a biologically and chemically significant classification of metals ions. **Environ. Pollut. Ser B**. 1: 3-26.
- Nolan, T., S.M. Troy, M.G. Healy, W. Kwapinski, J.J. Leahy and P.G. Lawlor. 2011. Characterization of compost produced from separated pig manure and a variety of bulking agents at low initial C/N ratios. **Bioresource Technology**. 102: 7131-7138.
- Payne, G.G., D.C. Martens, E.T. Kornegay and M.D. Lindemann. 1988. Availability and form of copper in three soils following eight annual applications of copper-enriched swine. **Journal of Environmental Quality**. 17: 740-746.
- Pearson, R.G. 1963. Physical and Inorganic Chemistry. **J. Am. Chem. Soc.** 85: 3533.

- Pulls, R.W. and H.L. Bohn. 1988. Sorption of cadmium, nickel and zinc by kaolinite and montmorillonite suspensions. **Soil. Sci. Soc. Am. J.** 52: 1289-1292.
- Qureshi, A., K.V. Lo, P.H. Lian and D.S. Mavinic. 2008. Real-time treatment of dairy manure: Implications of oxidation reduction potential regimes to nutrient management strategies. **Bioresour. Technol.** 99: 1169–1176.
- Sasaki, H.I., G. Maruyama, H. Suzuki, J. Nonaka, M. Sato, T. Sasaki, M. Ohta and Y. Nakai. 2004. Distribution of ammonia assimilating bacteria in the composting process. **Compost Science and Utilization.** 12(2): 108-113.
- Singh, J. and A.S. Kalamdhad. 2013. Chemical Speciation of Heavy Metals in Compost and Compost Amended Soil -A Review. **International Journal of Environmental Engineering Research.** 2 (2): 27-37.
- Sommer, A.L. and C.B. Lipman. 1926. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants. **Plant Physiol.** 1: 231–249.
- Sposito, G. 1989. **The Chemistry of Soils.** Oxford University Press, Inc., New York.
- Stevenson, F.J. 1994. **Humus chemistry of soils.** Oxford University Press, New York, USA.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 1996. **Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters.** New York: John Wiley & Sons; 1996.
- Tam, N.F.Y., S.M. Tiquia and L.L.P. Vrijmoed. 1996. Nutrient transformation of pig manure under pig-on-litter system, pp. 96-105. In M.D. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi, ed. **The Science of Composting.** Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Tan, K.H. 2014. **Humic Matter in Soil and the Environment, Principles and Controversies.** 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Tessier, A., P.G.C. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. **Anal.Chem.** 51: 844-850.
- Tiquia, S.M., N.F.Y. Tam and I.J. Hodgkiss. 1998. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. **Agriculture, Ecosystems and Environment.** 67: 79-89.
- Venkateswaran, P., S. Vellaichamy and K. Palanivelu. 2007. Speciation of heavy metals in electroplating industry sludge and wastewater residue using inductively coupled plasma. **J. Environ. Sci. Tech.** 4(4): 497-504.

- Wada, D., S-I. Wada. 1999. Kinetics of speciation of copper, lead, and zinc loaded to soils that differ in cation exchanger composition at low moisture content. *Commun. Soil.Sci. Plant Anal.* 30(17&18): 2363-2375.
- Wong, J.W.C. and A. Selvam. 2006. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere.* 63: 980-986.
- Zeng, G.M., H.L., Huang, D.L., Huang, X.Z., Yuan, R.Q., Jiang, M., Yu, H.Y., Yu, J.C., Zhang, R.Y., Wang and X.L. Liu. 2009. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochemistry.* 44: 396-400.
- Zhang F.S., Y.X. Li, M. Yang and W. Li. 2012. Content of Heavy Metals in Animal Feeds and Manures from Farms of Different Scales in Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 9: 2658-2668.







ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์การสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยหมักมูลหมู

ตารางที่ 16 ปริมาณของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (mean ± SD)	รูปสารประกอบออกไซด์ (mean ± SD)	รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (mean ± SD)	รูปคั่งค้างของแข็ง (mean ± SD)
0	0.98 ± 0.20	476.25 ± 33.73	258.49 ± 17.72	21.15 ± 5.26
3	1.49 ± 0.25	443.40 ± 24.67	219.92 ± 1.85	15.69 ± 4.00
7	1.24 ± 0.23	483.68 ± 36.39	351.87 ± 39.94	28.83 ± 4.05
14	1.29 ± 0.26	510.20 ± 3.56	454.22 ± 25.93	57.46 ± 3.07
21	0.79 ± 0.08	519.17 ± 17.08	409.55 ± 5.84	67.28 ± 1.20
28	2.00 ± 0.10	544.45 ± 35.16	510.04 ± 10.74	109.23 ± 5.32
35	0.88 ± 0.11	549.67 ± 62.54	424.29 ± 3.71	78.97 ± 2.05
42	1.28 ± 0.23	545.10 ± 15.73	457.69 ± 4.43	63.62 ± 3.33
49	1.08 ± 0.03	554.00 ± 30.63	466.79 ± 2.57	60.78 ± 6.19
63	0.81 ± 0.10	572.18 ± 37.03	483.87 ± 7.40	84.68 ± 4.01
77	1.30 ± 0.50	578.73 ± 51.37	486.52 ± 9.55	89.99 ± 8.72
91	0.62 ± 0.19	557.83 ± 14.78	505.40 ± 20.33	61.86 ± 7.78
105	0.66 ± 0.23	562.94 ± 28.17	543.15 ± 19.62	72.69 ± 10.21
119	0.60 ± 0.08	561.00 ± 20.80	498.50 ± 2.95	73.75 ± 2.08



ตารางที่ 17 ปริมาณของโพแทสเซียมในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (mean ± SD)	รูปสารประกอบออกไซด์ (mean ± SD)	รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (mean ± SD)	รูปคั่งค้างของแข็ง (mean ± SD)
0	3457.75 ± 201.84	2064.63 ± 68.13	227.16 ± 31.78	83.45 ± 6.15
3	3634.22 ± 156.69	1803.84 ± 14.11	164.44 ± 23.48	62.24 ± 3.04
7	3891.39 ± 321.66	2214.42 ± 73.14	241.41 ± 56.94	81.55 ± 4.48
14	4155.01 ± 548.70	2564.99 ± 17.44	299.93 ± 21.99	96.75 ± 6.10
21	3354.19 ± 637.00	2609.10 ± 35.12	311.61 ± 8.34	126.48 ± 4.87
28	4612.69 ± 1460.65	3463.56 ± 174.57	486.31 ± 5.88	162.28 ± 2.37
35	4014.22 ± 1102.45	2841.85 ± 21.52	387.12 ± 3.30	114.87 ± 4.39
42	4759.61 ± 653.73	2849.87 ± 50.73	376.26 ± 5.70	131.91 ± 13.23
49	4211.39 ± 906.80	2931.23 ± 69.62	387.68 ± 14.84	101.27 ± 9.99
63	4429.90 ± 383.79	3195.50 ± 56.21	440.01 ± 24.07	133.48 ± 12.65
77	1940.29 ± 1611.52	3357.58 ± 124.38	476.34 ± 27.53	137.82 ± 9.96
91	4915.81 ± 28.60	3071.26 ± 31.95	472.62 ± 10.33	131.85 ± 3.81
105	4890.30 ± 79.12	3326.35 ± 13.12	497.51 ± 20.84	113.50 ± 10.26
119	4185.61 ± 513.10	3201.99 ± 61.13	464.83 ± 9.39	151.39 ± 15.10

ตารางที่ 18 ร้อยละของสังกะสีในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วย  
เทคนิคการสกัดแบบลำดับ

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แตกเปลี่ยน ได้	รูปสารประกอบ ออกไซด์	รูปสารเชิงซ้อน อินทรีย์	รูปคงค้าง ของแข็ง
0	0.13	62.93	34.16	2.77
3	0.22	65.13	32.34	2.32
7	0.14	55.87	40.65	3.33
14	0.13	49.89	44.37	5.61
21	0.08	52.08	41.09	6.75
28	0.16	48.98	42.28	8.92
35	0.08	52.05	40.36	7.51
42	0.12	51.05	42.87	5.96
49	0.09	53.60	40.94	5.36
63	0.07	50.09	42.42	7.42
77	0.11	49.98	42.14	7.77
91	0.06	49.57	44.89	5.48
105	0.06	47.71	46.05	6.18
119	0.05	49.47	43.98	6.50

ตารางที่ 19 ร้อยละของโพแทสเซียมในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับ

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แตกเปลี่ยน ได้	รูปสารประกอบ ออกไซด์	รูปสารเชิงซ้อน อินทรีย์	รูปคงค้าง ของแข็ง
0	59.25	35.41	3.90	1.43
3	64.14	31.86	2.90	1.10
7	60.46	34.53	3.74	1.27
14	58.22	36.20	4.22	1.36
21	52.08	41.04	4.90	1.98
28	50.42	41.72	5.90	1.97
35	53.92	39.17	5.33	1.58
42	58.44	35.27	4.65	1.64
49	54.77	38.78	5.11	1.35
63	53.97	39.04	5.37	1.63
77	29.84	59.26	8.48	2.43
91	57.22	35.75	5.50	1.53
105	55.40	37.68	5.64	1.29
119	52.16	40.12	5.83	1.89



ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปที่แตกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
119	3	0.5967					
91	3	0.6167					
105	3	0.6600					
21	3	0.7867	0.7867				
63	3	0.8100	0.8100				
35	3	0.8800	0.8800	0.8800			
0	3	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800		
49	3		1.0833	1.0833	1.0833	1.0833	
7	3			1.2400	1.2400	1.2400	
42	3			1.2833	1.2833	1.2833	
14	3			1.2867	1.2867	1.2867	
77	3				1.2967	1.2967	
3	3					1.4900	
28	3						2.0033
Sig.		0.068	0.144	0.050	0.125	0.050	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
3	3	443.3967			
0	3	476.2500	476.2500		
7	3	483.6800	483.6800		
14	3		510.2000	510.2000	
21	3		519.1633	519.1633	519.1633
28	3			544.4533	544.4533
42	3			545.1000	545.1000
35	3			549.6700	549.6700
49	3			553.9967	553.9967
91	3			557.8333	557.8333
119	3			561.0000	561.0000
105	3			562.9333	562.9333
63	3			572.1800	572.1800
77	3				578.7300
Sig.		.167	.155	.058	.068

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
3	3	219.9167								
0	3		258.4900							
7	3			351.8767						
21	3				409.5500					
35	3				424.2867					
14	3					454.2200				
42	3					457.6900	457.6900			
49	3					466.7900	466.7900			
63	3						483.8667	483.8667		
77	3						486.5167	486.5167		
119	3							498.5033		
91	3							505.3967		
28	3							510.0367		
105	3									543.1500
Sig.		1.000	1.000	1.000	.278	.382	.056	.088		1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปค้ำของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	15.6867								
0	3	21.1533	21.1533							
7	3		28.8367							
14	3			57.4633						
49	3			60.7833						
91	3			61.8633						
42	3			63.6200	63.6200					
21	3			67.2800	67.2800	67.2800				
105	3			72.6867	72.6867	72.6867	72.6867			
119	3				73.7500	73.7500	73.7500			
35	3					78.9767	78.9767			
63	3						84.6767	84.6767		
77	3							89.9967		
28	3									109.2233
Sig.		.229	.095	.056	.062	.179	.191	.210	.241	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
77	3	1940.2933			
21	3		3354.1867		
0	3		3457.7467	3457.7467	
3	3		3634.2233	3634.2233	3634.2233
7	3		3891.3900	3891.3900	3891.3900
35	3		4014.2233	4014.2233	4014.2233
14	3		4155.0067	4155.0067	4155.0067
119	3		4185.6100	4185.6100	4185.6100
49	3		4211.3900	4211.3900	4211.3900
28	3		4279.3500	4279.3500	4279.3500
63	3		4429.9033	4429.9033	4429.9033
42	3		4759.6067	4759.6067	4759.6067
105	3			4890.2933	4890.2933
91	3				4915.8100
Sig.		1.000	.055	.050	.079

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	1803.8433								
0	3		2064.6300							
7	3			2214.4233						
14	3				2564.9900					
21	3				2609.1000					
35	3					2841.8533				
42	3					2849.8700				
49	3					2931.2333				
91	3						3071.2567			
63	3							3195.4967		
119	3							3201.9900		
105	3								3326.3500	
77	3								3357.5833	3357.5833
28	3									3463.5533
Sig.		1.000	1.000	1.000	.463	.165	1.000	.913	.602	.084

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
3	3	164.4367					
0	3		227.1600				
7	3		241.4100				
14	3			299.9233			
21	3			311.6100			
42	3				376.2600		
35	3				387.1167		
49	3				387.6833		
63	3					440.0067	
119	3					464.8300	464.8300
91	3					472.6167	472.6167
77	3					476.3367	476.3367
28	3						486.3067
105	3						497.5067
Sig.		1.000	.461	.545	.577	.091	.135

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของโพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan<sup>a</sup>

time	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	62.2367								
7	3		81.5500							
0	3		83.4500	83.4500						
14	3			96.7533	96.7533					
49	3				101.2667	101.2667				
105	3					113.5067	113.5067			
35	3					114.8633	114.8633			
21	3						126.4833	126.4833		
91	3							131.8533		
42	3							131.9133		
63	3							133.4800		
77	3							137.8167	137.8167	
119	3								151.3867	151.3867
28	3									162.2833
Sig.		1.000	.789	.068	.525	.076	.090	.159	.063	.132

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของสังกะสีที่เกิดขึ้น

Correlations

		ระยะเวลา การหมัก	Ex	Ox	Org	Res	CN	pH	HA	OM	Mois	MnO	Temp
ระยะเวลา การหมัก	Pearson Correlation	1	-.565*	.786**	.747**	.515	-.574*	-.438	-.496	-.567*	-.890**	.649*	-.701**
	Sig. (2-tailed)		.035	.001	.002	.060	.032	.117	.072	.034	.000	.012	.005
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ex	Pearson Correlation	-.565*	1	-.330	-.220	.058	.256	.487	.012	.038	.361	-.084	.564*
	Sig. (2-tailed)	.035		.249	.450	.844	.377	.078	.968	.898	.205	.774	.036
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ox	Pearson Correlation	.786**	-.330	1	.915**	.849**	-.774**	-.384	-.584*	-.441	-.940**	.890**	-.863**
	Sig. (2-tailed)	.001	.249		.000	.000	.001	.176	.028	.114	.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Org	Pearson Correlation	.747**	-.220	.915**	1	.843**	-.874**	-.290	-.660*	-.625*	-.908**	.923**	-.839**
	Sig. (2-tailed)	.002	.450	.000		.000	.000	.315	.010	.017	.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Res	Pearson Correlation	.515	.058	.849**	.843**	1	-.680**	-.148	-.635*	-.411	-.776**	.926**	-.613*
	Sig. (2-tailed)	.060	.844	.000	.000		.007	.613	.015	.145	.001	.000	.020
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ตารางที่ 29 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของโพแทสเซียมที่เกิดขึ้น

Correlations

		ระยะเวลา การหมัก	Ex	Ox	Org	Res	CN	pH	HA	OM	Mois	MnO	Temp
ระยะเวลา การหมัก	Pearson	1	.235	.757**	.826**	.604*	-.574*	-.438	-.496	-.567*	-.890**	.649*	-.701**
	Correlation												
	Sig. (2-tailed)		.419	.002	.000	.022	.032	.117	.072	.034	.000	.012	.005
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ex	Pearson	.235	1	.229	.279	.172	-.216	-.026	-.219	-.150	-.252	.278	-.216
	Correlation												
	Sig. (2-tailed)	.419		.432	.335	.556	.457	.931	.453	.609	.385	.336	.459
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Ox	Pearson	.757**	.229	1	.986**	.877**	-.756**	-.323	-.607*	-.518	-.911**	.952**	-.716**
	Correlation												
	Sig. (2-tailed)	.002	.432		.000	.000	.002	.259	.021	.058	.000	.000	.004
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Org	Pearson	.826**	.279	.986**	1	.853**	-.747**	-.398	-.576*	-.534*	-.930**	.922**	-.725**
	Correlation												
	Sig. (2-tailed)	.000	.335	.000		.000	.002	.158	.031	.049	.000	.000	.003
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Res	Pearson	.524	.172	.877**	.853**	1	-.676**	-.297	-.529	-.408	-.759**	.954**	-.582*
	Correlation												
	Sig. (2-tailed)	.022	.556	.000	.000		.008	.303	.052	.147	.002	.000	.029
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ 30 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีและรูปแบบโพแทสเซียม

**Correlations**

		KEx	KOx	KOrg	KRes
ZnEx	Pearson Correlation	-.036	.040	-.054	.126
	Sig. (2-tailed)	.902	.893	.854	.667
	N	14	14	14	14
ZnOx	Pearson Correlation	.176	.944**	.944**	.804**
	Sig. (2-tailed)	.547	.000	.000	.001
	N	14	14	14	14
ZnOrg	Pearson Correlation	.372	.942**	.931**	.793**
	Sig. (2-tailed)	.191	.000	.000	.001
	N	14	14	14	14
ZnRes	Pearson Correlation	.119	.926**	.870**	.894**
	Sig. (2-tailed)	.686	.000	.000	.000
	N	14	14	14	14

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวอมรรัตน์ เอื้อสกุล

Miss Amornrat Aursalung

ที่อยู่ 20 หมู่ 1 ตำบลโคกสูง อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี 15140

ที่ทำงาน 999 สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล พุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธ  
มณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

โทรศัพท์ 036483069

E-mail address znoi\_ionz@hotmail.com

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยรามคำแหง  
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

พ.ศ. 2554 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

### ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2552-ปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ ฝ่ายเคมีทางอาหาร สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล

### ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

อมรรัตน์ เอื้อสกุล นัทธีรา สรรมณี. 2559. ผลวัดของรูปแบบสังกะสีระหว่างการผลิตของปุ๋ยหมัก  
มูลหมูผสมกับของเหลือจากผลผลิตการเกษตร. ในเอกสารประกอบการประชุม  
วิชาการและเสนอผลงานวิจัยและสร้างสรรค์ระดับชาติและนานาชาติ “ศิลปากรวิจัย  
และสร้างสรรค์” ครั้งที่ 9. วันที่ 11-21 กุมภาพันธ์ 2559 ณ มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า  
146-153.