



การศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ Community
Bureau of Reference (BCR)



โดย
นางสาวเจตจรินทร์ ทำสะอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ
Community Bureau of Reference (BCR)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE STUDY OF IRON AND ZINC SPECIATION DURING FERMENTING PERIOD OF
CHICKEN MANURE USING COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE (BCR)
TECHNIQUE



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)
Science Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference (BCR)
โดย	เจตจรินทร์ ทำสะอาด
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรมนี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

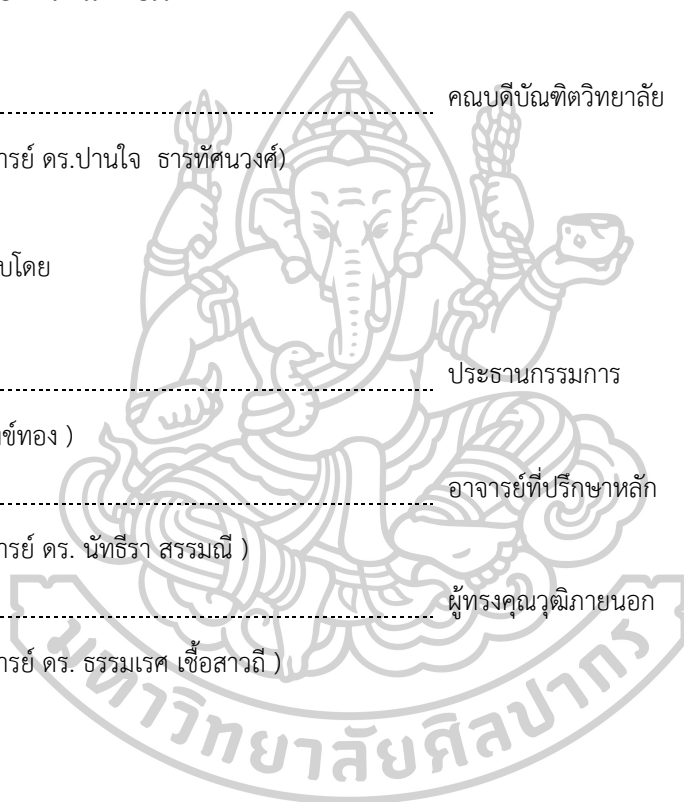
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทคนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรมนี)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมเรศ เชื้อสาวถี)



57311301 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : รูปแบบเหล็ก, รูปแบบสังกะสี, สกัดลำดับชั้น, ปุ๋ยมูลไก่

นางสาว เจตจรินทร์ ทำสะอาด: การศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference (BCR) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษารูปแบบของเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ โดยใช้เทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference (BCR) ซึ่งแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) โดยเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ปุ๋ยหมักถูกแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิออกเป็น 3 ระยะ คือระยะเริ่มผสม (0 วัน) ระยะอุณหภูมิสูง (1-41 วัน) และระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (42-119 วัน) ที่ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ทั่วไป

ผลการศึกษาพบว่า การกระจายตัวของเหล็กและสังกะสีมีความแตกต่างกัน การกระจายตัวของเหล็ก 4 รูปแบบเรียงลำดับได้ดังนี้ รูปคงค้างของแข็ง >>> รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ขณะที่สังกะสีเรียงตามลำดับได้ดังนี้ รูปคงค้างของแข็ง > รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์, รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปสารประกอบออกไซด์ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก(III) มีเสถียรภาพสูงกว่า เหล็กจึงพบได้มากในรูปคงค้างของแข็งขณะที่รูปแบบอื่นๆ จะพบได้น้อย รูปแบบสังกะสี(II) ที่พบในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ยังคงพบในรูปคงค้างของแข็งกับรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ อย่างไรก็ตามรูปแบบส่วนใหญ่ของสังกะสีและเหล็กจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.01$) บ่งบอกถึงกระบวนการที่เพิ่มขึ้นของโลหะ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมของการใช้ปุ๋ยหมักเป็นวันที่ 49 เป็นต้นไป ที่ซึ่งรูปแบบเหล่านี้ถูกพบในปริมาณที่มากทั้งในรูปที่พร้อมจะนำไปใช้ได้ทันทีและรูปที่มีศักยภาพที่จะนำไปใช้ได้ภายหลัง กล่าวโดยสรุป การศึกษารูปแบบของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมักไม่เพียงแต่จะให้แนวคิดถึงกระบวนการหมักที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะเหล่านี้ แต่ยังช่วยเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ปุ๋ยหมักที่ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกพบว่ามีประโยชน์ร่วมกับคุณสมบัติของปุ๋ยหมักอื่นๆ

57311301 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : IRON, ZINC, SEQUENTIAL EXTRACTION, CHICKEN MANURES

MISS Jetjarin TUMSA-AT: THE STUDY OF IRON AND ZINC SPECIATION DURING FERMENTING PERIOD OF CHICKEN MANURE USING COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE (BCR) TECHNIQUE Thesis advisor : Associate Professor Natdhera Sanmanee, Ph.D.

The objective of the research was to study iron (Fe) and zinc (Zn) speciation during fermenting period of chicken manure using community bureau of reference (BCR) technique. The sequential extraction divided the metal speciation into 4 fractions: Exchangeable (Ex), Oxide bound (Ox), Organically bound (Org) and Residual (Res) fractions. Samples were collected for 4 months at days 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 and 119. The compost was divided after the temperatures into 3 phases: initial phase (day 0), thermophilic phase (during days 1-41) and maturation phase (during days 42-119) in which it was the time for commonly use.

The results show that the distributions of iron and zinc were different. The distributions of iron among 4 fractions were found in the order of Fe-Res >>> Fe-Ex > Fe-Ox > Fe-Res while zinc species were found in the order of Zn-Res > Zn-Org, Zn-Ex > Zn-Ox. As the higher stability of Fe(III) complexes, iron was found the most in residual fraction while other fractions were found minute. Zinc(II) species found commonly in the environment the major part was still in the residual fractions with some organically bound and exchangeable fractions. However, all of major fractions of zinc and iron were increased corresponding with the fermenting period ($p < 0.01$) indicating the condensation of metals. Therefore, the appropriate time to apply the compost to the field was since day 49 in which these fractions were found in high concentrations both in readily available and potentially available fractions. In conclusions, study zinc and iron species through the composting period not only gave the idea how the composting process affected the change among these species but also helped to select the appropriate time to apply the compost to the field in which these parameters were found helpful along with other compost's properties.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรมนี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงการให้ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานการวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกท่าน ซึ่งคอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงขอมอบเพื่อตอบแทนคุณแต่คุณพ่อ บุญเรืองทำสะอาด และคุณแม่ประจัน ทำสะอาด ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ถือเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บูรพคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย

เจตจรินทร์ ทำสะอาด



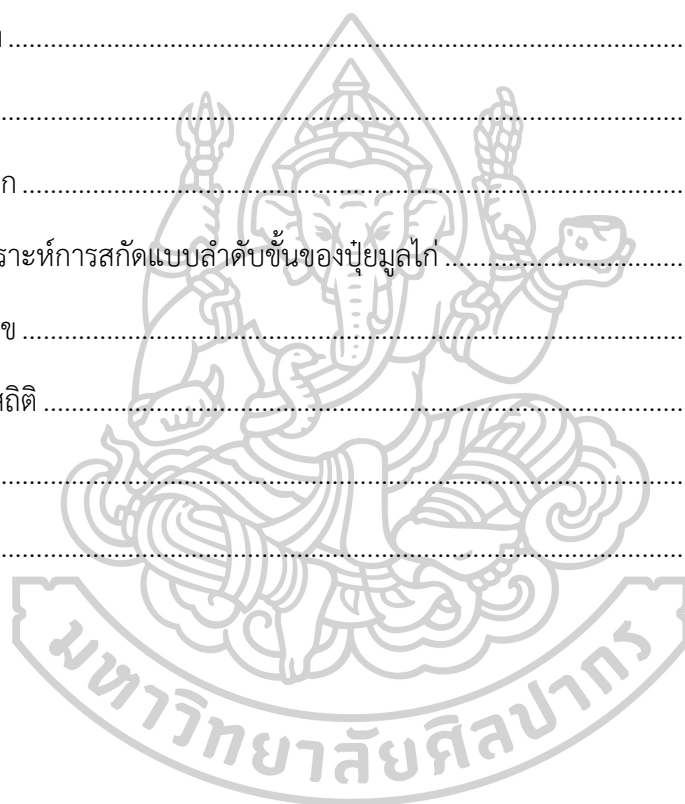
สารบัญ

	หน้า
.....	ง
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปุ๋ยหมัก.....	5
2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก.....	5

2.1.2	ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก.....	6
2.1.2.1	ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพดิน.....	6
2.1.2.2	ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน.....	6
2.1.2.3	ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางจุลชีววิทยาของดิน.....	6
2.1.3	ข้อดีของปุ๋ยหมัก.....	6
2.1.4	ข้อจำกัดของปุ๋ยหมัก.....	7
2.2	มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์.....	7
2.3	ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช.....	9
2.3.1	เหล็ก.....	9
2.3.1.1	บทบาทของเหล็กที่มีความสำคัญต่อพืช.....	9
2.3.1.2	อาการผิดปกติของพืชที่ขาดธาตุเหล็ก.....	10
2.3.2	สังกะสี.....	10
2.3.2.1	บทบาทของสังกะสีที่มีความสำคัญต่อพืช.....	11
2.3.2.2	อาการผิดปกติของพืชที่ขาดธาตุสังกะสี.....	11
2.4	รูปแบบของโลหะในสิ่งแวดล้อม.....	12
2.5	เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction techniques).....	20
2.6.1	รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction).....	21
2.6.2	รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction).....	21
2.6.3	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction).....	21
2.6.4	รูปคงค้างของแข็ง (residual fraction).....	21
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3	.....	34
วิธีดำเนินการวิจัย	.....	34
3.1	สารเคมีและรีเอเจนต์.....	34

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.3.1 การหมักปุ๋ย เก็บตัวอย่างปุ๋ย และเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก	37
3.3.2 วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน.....	39
3.3.3 เทคนิคการสกัดด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR)	40
1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction).....	40
2. รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction).....	40
3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction).....	40
4. รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction).....	40
3.3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	42
3.4 การแปรผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Statistical Package for Social Science (SPSS)	
Version 23.....	42
บทที่ 4	43
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการศึกษา.....	43
4.1 การแบ่งระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมี	
ของปุ๋ยหมัก	43
1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)	43
2. ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase).....	46
3. ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturation phase).....	46
4.2 ปริมาณธาตุอาหารหลัก.....	47
4.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	47
4.4 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่ปลดปล่อยออกจากปุ๋ยหมักด้วย	
วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น	49
4.5 การเปรียบเทียบรูปแบบของเหล็กและสังกะสีที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมัก	52
4.5.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction).....	53

4.5.2	รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)	55
4.5.3	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction).....	58
4.5.4	รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)	62
บทที่ 5	.....	65
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	.....	65
.....	.....	67
รายการอ้างอิง	.....	67
ภาคผนวก	.....	72
ภาคผนวก ก	.....	73
ผลการวิเคราะห์การสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยมูลไก่	.....	73
ภาคผนวก ข	.....	78
ข้อมูลทางสถิติ	.....	78
.....	.....	90
ประวัติผู้เขียน	.....	90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548	8
ตารางที่ 2 ความเข้มข้นโดยประมาณของจุลธาตุอาหารในใบเมื่อพืชแก่เต็มที่	10
ตารางที่ 3 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนน้ำเสีย.....	12
ตารางที่ 4 ค่าคงที่การละลายสารประกอบของโลหะ	14
ตารางที่ 5 ค่าคงที่สมดุลของการละลาย (Constants for solubility equilibria; K).....	19
ตารางที่ 6 ลำดับการของการเคลื่อนที่ของโลหะใน jarosite ทั้ง 3 ตัวอย่าง	30
ตารางที่ 7 รายการสารเคมีที่ใช้และบริษัทผู้ผลิต	34
ตารางที่ 8 ส่วนผสมและปริมาณที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก	37
ตารางที่ 9 คุณภาพปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548	44
ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก	49
ตารางที่ 11 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	50
ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้.....	55
ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีออกไซด์	58
ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์	61
ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีคั่งค้างของแข็ง	64
ตารางที่ 16 ปริมาณของเหล็กรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยมูลไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน.....	74

ตารางที่ 17 ปริมาณของสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยมูลไก่ ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน.....	75
ตารางที่ 18 ร้อยละเฉลี่ยของเหล็กรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยมูล ไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน.....	76
ตารางที่ 19 ร้อยละเฉลี่ยของสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยมูล ไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน.....	77
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย มูลไก่.....	79
ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการ หมักปุ๋ยมูลไก่.....	80
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก ปุ๋ยมูลไก่.....	81
ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก..	82
ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย มูลไก่.....	83
ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการ หมักปุ๋ยมูลไก่.....	84
ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการ หมักปุ๋ยมูลไก่.....	85
ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีที่ประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย มูลไก่.....	86
ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเหล็กกับปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหมักปุ๋ย มูลไก่.....	87
ตารางที่ 29 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีกับปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหมักปุ๋ย มูลไก่.....	88
ตารางที่ 30 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีและรูปแบบของเหล็กในกระบวนการ หมักปุ๋ยมูลไก่.....	89

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่างๆ กับสิ่งมีชีวิต	13
ภาพที่ 2 ความสามารถในการละลายของออกไซด์และ ไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโลหะรูปไอออน อิสระในสภาวะสมดุลกับของแข็งออกไซด์และ ไฮดรอกไซด์.....	14
ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	16
ภาพที่ 4 เสถียรภาพของโลหะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน	17
ภาพที่ 5 ค่าคงที่เสถียรภาพของสารประกอบโลหะทรานซิชัน และค่าคงที่ผลคูณการละลายของ สารประกอบในอัตราส่วนของโลหะเท่ากับ 1 ต่อ 1	18
ภาพที่ 6 ค่าร้อยละของโลหะในรูปแบบต่างๆ จาก 7 สถานีด้วยเทคนิคการสกัดแบบ BCR.....	22
ภาพที่ 7 การปนเปื้อนของโลหะในตัวอย่างทั้ง 7 สถานี.....	23
ภาพที่ 8 รูปแบบต่างๆ ของทองแดงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต... ..	24
ภาพที่ 9 รูปแบบต่างๆ ของสังกะสีที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต	25
ภาพที่ 10 สัดส่วนของโลหะในกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (SS) กากตะกอน แห้ง (SP) และปุ๋ยหมักจากกากตะกอน (SP) ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ BCR.....	26
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุ สังกะสี และทองแดงตลอดระยะเวลาการหมัก	27
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงตลอดระยะเวลาการหมัก	27
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสังกะสีตลอดระยะเวลาการหมัก	28
ภาพที่ 14 การแพร่กระจายของโลหะในตัวอย่าง jarosite วิธีสกัด BCR (ตัวอย่าง 1 ลีก 20 ซม ตัวอย่างที่ 2 ลีก 1 เมตรและตัวอย่างที่ 3 ลีก 2 เมตร).....	29
ภาพที่ 15 การกระจายของโลหะในดิน 3 ชนิด โดยใช้การสกัดแบบ BCR	31
ภาพที่ 16 การกระจายของโลหะในตัวอย่างกากตะกอนที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 21 เดือน	32
ภาพที่ 17 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	36
ภาพที่ 18 ลำดับขั้นตอนการสกัดแบบ BCR.....	41
ภาพที่ 19 ลักษณะปุ๋ยหมักมูลไก่	47

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับ ระยะเวลาการหมัก ($r = -0.643$ และ $r = -0.595$, $p < 0.01$ ตามลำดับ)	48
ภาพที่ 21 ปริมาณเหล็กในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	51
ภาพที่ 22 ปริมาณสังกะสีรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	52
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดย ใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี	54
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก .	55
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี	57
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการ หมัก ($r = 0.648$, $p < 0.01$)	58
ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา การหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี	60
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลา การหมัก ($r = 0.645$, $p < 0.01$)	61
ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปคั่งค้างของแข็งที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี	63
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปคั่งค้างของแข็งของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก (r $= 0.950$, $p < 0.01$)	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยนิยมประกอบอาชีพเกษตรกรรม ทำการเพาะปลูกพืชที่ให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากร จนเกิดการใช้พื้นที่ในการปลูกพืชซ้ำๆ เป็นระยะเวลานาน ทำให้ดินแห้งและขาดธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้ในการเจริญเติบโต การใช้ปุ๋ยจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มผลผลิตที่ง่าย ทำให้เกษตรกรนิยมใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อความสะดวก ลดระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว เพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณผลผลิตทางการเกษตร ปุ๋ยเคมีในปัจจุบันมีการปรับราคาที่สูงขึ้นทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นไปด้วย เกษตรกรจึงหันมาใช้ปุ๋ยที่ได้จากธรรมชาติเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน (Gigliotti, Valentini, Erriquens, & Pullicino, 2005) ทำให้ดินมีธาตุอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช และลดต้นทุนการผลิต ปุ๋ยหมักจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของเกษตรกรที่นำมาใช้มากขึ้น ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์หลายชนิดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Bernal, Albuquerque, & Moral, 2009) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเศษพืชหรือวัสดุเหลือใช้ชนิดต่างๆ จนได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่น มีสีน้ำตาลปนดำ (รสสุคนธ์ พุ่มพินวงค์, 2549) ซึ่งได้มาจากซากพืชซากของสิ่งมีชีวิต อาจอยู่ในรูปหรือสภาพต่างๆ กันเช่น อยู่ในรูปของมูลสัตว์ต่างๆ และอยู่ในรูปของอินทรีย์วัตถุ ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยพืชสด (ชัยมงคล สุวานิช, 2526) ปุ๋ยแต่ละชนิดเกษตรกรสามารถผลิตเองได้โดยนำมาจากวัสดุที่มีอยู่ในแต่ละท้องถิ่นของตน จุลินทรีย์ในดินจะใช้อินทรีย์วัตถุเป็นสารอาหารแล้วปลดปล่อยธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างเพียงพอ ได้แก่ ธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุ

พืชโดยทั่วไปต้องการทั้งธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหาร ซึ่งจำเป็นต่อความสมบูรณ์ต่อการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ จุลธาตุถึงแม้พืชจะต้องการในปริมาณเล็กน้อย แต่ก็มีสำคัญต่อความสมบูรณ์ และการเจริญเติบโตของพืช ตัวอย่างจุลธาตุที่จำเป็นสำหรับพืชก็คือ เหล็ก และสังกะสีซึ่งมีความจำเป็นต่อพืชและสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เป็นสารที่ช่วยในการทำงานของเอนไซม์ในการทำปฏิกิริยา เหล็กช่วยในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ มีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์แสงและหายใจ ส่วนสังกะสีมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการทางชีวเคมีต่างๆ ของพืช ได้แก่ ช่วยในการสังเคราะห์ออกซิน (ฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่ง) คลอโรฟิลล์ แป้ง (ยงยุทธ โอสภสภ, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชัยสิทธิ์ ทองจุ, 2541) กระบวนการสังเคราะห์สารที่เกี่ยวข้องอยู่กับการขยายตัวของเซลล์พืช และกระบวนการเมตาโบลิซึมของไนโตรเจนในพืช (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528)

เหล็กและสังกะสีจะพบในองค์ประกอบของพืชและปุ๋ยหมักที่ได้มาจากมูลสัตว์ โดยรูปแบบที่พบในสิ่งแวดล้อมมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ รวมไปถึงปริมาณที่พบและความยากง่ายในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมของแต่ละรูปแบบ รูปแบบของเหล็กและสังกะสีที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายที่สุดคือรูปแบบไอออนอิสระ รูปสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ เช่น Fe^{2+} Zn^{2+} รองลงมาคือรูปแบบของไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ของสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น รูปของเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ รูปของสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ รูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรือคีเลตกับสารอินทรีย์ เช่น สารอินทรีย์ที่จับกับสังกะสีไว้เป็นสังกะสีคีเลตเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้น้อย ตะกอนที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนและที่ตกตะกอนร่วมบนผิวของแข็ง จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเสียก่อนจึงจะสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ และรูปผลึกแร่ปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ เป็นรูปที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยาก เช่น แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) และแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) จะต้องผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ เพื่อให้เกิดการผุพังเสียก่อน จึงจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528; นัทธีรา สรรพณี, 2555)

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบต่างๆ ของเหล็กและสังกะสีที่มีอยู่ในปุ๋ยหมัก ในกระบวนการหมักปุ๋ยจะเกิดสารอินทรีย์และธาตุอาหารหลากหลายชนิดที่มีประโยชน์ต่อพืช สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำรุงดินและเพิ่มธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช (Zhang, Li, Xiong, Yang, & Li, 2012) แม้ว่าในดินจะมีปริมาณของจุลธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชอยู่แล้วแต่เมื่อเราใช้พื้นที่ติดต่อกันเป็นเวลานานๆ ก็จะทำให้ปริมาณของธาตุอาหารลดลงหรือหมดไป พืชแต่ละชนิดนั้นมีช่วงการเจริญเติบโตแตกต่างกันออกไป ในแต่ละระยะนั้นพืชก็มีความจำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารรวมไปถึงปริมาณที่ใช้ต่างกันด้วย ดังนั้นการศึกษานี้จะทำให้ทราบถึงรูปแบบและปริมาณของธาตุเหล็กและสังกะสีที่มีอยู่ในปุ๋ยหมัก โดยการศึกษาแบบของเหล็กและสังกะสีในครั้งนี้ใช้เทคนิคที่มีความเข้มข้นของสารสกัดรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ สามารถแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ คือ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคั่งค้างของแข็ง ทำให้สามารถนำปุ๋ยที่ได้ไปใช้ใน ช่วงของการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุด ลดการใช้สารเคมี และลดอันตรายให้กับผู้บริโภคได้อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษารูปแบบต่างๆ ของเหล็กและสังกะสีในระหว่างการหมักปุ๋ยเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักที่มีเหล็กและสังกะสีไปใช้ประโยชน์ ตลอดจนศึกษาถึงอิทธิพลหรือปัจจัยต่างๆ ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่างๆ ตลอดกระบวนการหมัก เพื่อให้เกิดการพัฒนาคุณภาพของปุ๋ยหมักที่จะเอื้อประโยชน์ต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น เหล็กและสังกะสีนี้ได้ในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษารูปแบบของเหล็กและสังกะสีที่อยู่ในปุ๋ยหมัก
2. เพื่อศึกษาความเป็นประโยชน์ของเหล็กและสังกะสี ที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ณ เวลาการหมักต่างๆ ตลอดจนศักยภาพการปลดปล่อยเหล็กและสังกะสี ที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จากรูปแบบต่างๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมัก
3. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของการหมักปุ๋ยหมัก สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ช่วงระยะเวลาของการหมักปุ๋ยที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ปริมาณและรูปแบบของเหล็กและสังกะสีในปุ๋ยหมักมีความแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ตัวอย่างปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษาครั้งนี้เป็นปุ๋ยหมักที่ผลิตจากพื้นที่ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ส่วนผสมที่ใช้ในการหมักปุ๋ยเป็นวัสดุที่หาได้โดยทั่วไปในท้องถิ่นเป็นหลัก ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักมาทำการวิเคราะห์ ในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ใช้เทคนิคการสกัดตัวอย่างด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR) แบ่งโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ คือ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) นำผลการศึกษาทั้งหมดมาแปรผลทางสถิติด้วยโปรแกรมประยุกต์ SPSS และสรุปผลการทดลอง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. เก็บรวบรวมข้อมูลเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเป็นระยะเวลา 4 เดือน
3. เตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก วิธีการ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
4. เตรียมการทดลอง
5. วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา
6. เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ
7. วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาวิจัย

8. เขียนรายงานการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบปริมาณและรูปแบบของเหล็กและสังกะสีที่อยู่ในปุ๋ยหมักได้
2. สามารถทำนายนำเหล็กและสังกะสีไปใช้ประโยชน์ของพืชได้
3. สามารถทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี

ที่สุด



บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปุ๋ยหมัก

2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก (compost) คือ ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำซากของสิ่งมีชีวิตเช่น ซากพืช ซากสัตว์ รวมไปถึงเศษวัสดุเหลือใช้มาองรวมกัน รดน้ำให้ชื้นแล้วปล่อยให้สลายตัว ย่อยสลาย แปรสภาพ และสลายตัวผู้ฝังตามระยะเวลาในการหมัก โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์มาช่วยย่อยสลายองค์ประกอบต่างๆ จนกระทั่งได้อินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน (Ahmed, Idris, & Omar, 2007; Bernal et al., 2009) ไม่มีกลิ่น มีสีน้ำตาลปนดำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำรุงดิน เพื่อให้ดินมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2546; ยงยุทธ โอสถสภ, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชวลิต ฮงประยูร, 2551)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งของกระบวนการหมัก โดยการศึกษาปุ๋ยหมักตามการแบ่งอุณหภูมิสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของปุ๋ยในเบื้องต้น ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ รวมไปถึงในแต่ละระยะก็จะมีบทบาทสำคัญต่อการสลายสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันออกไป โดยการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำมาแบ่งระยะของปุ๋ยหมักออกได้เป็น 3 ระยะ (Zeng et al., 2009; ยงยุทธ โอสถสภ et al., 2551) ดังนี้

1. **ระยะเริ่มผสม (Initial phase)** เป็นวันแรก (0วัน) ของการหมักปุ๋ย อุณหภูมิในกองจะใกล้เคียงกับภายนอกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ใช้ อุณหภูมิสูงยังไม่มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในกองปุ๋ยหมัก

2. **ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)** ในระยะนี้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักอยู่ระหว่าง 50-75 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูงจะย่อยสลายสารชนิดต่างๆ ที่สลายได้ยาก เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และปลดปล่อยความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้น (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983; Suler & Finstein, 1977) ระยะนี้มีการสังเคราะห์สารคล้ายฮิวมัส

3. **ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturation phase)** เป็นระยะที่ปุ๋ยมีกระบวนการหมักเสร็จสมบูรณ์ อุณหภูมิของปุ๋ยหมักใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก จากกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงทำงานลดลงแล้วสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วกลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรมากขึ้นเป็นระยะที่เหมาะสมแก่การนำปุ๋ยหมักไปใช้

2.1.2 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถช่วยบำรุงดินและปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะกับการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ดินร่วนซุยไม่จับตัวเป็นก้อน สามารถระบายอากาศและน้ำได้ดี เมื่อใช้ติดต่อกันเป็นระยะเวลาหลายๆ อย่างต่อเนื่อง (ธงชัย มาลา, 2546) ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก มีดังนี้

2.1.2.1 ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพดิน

ส่งเสริมการเกิดเม็ดดิน ในปุ๋ยหมักที่ใส่ลงในดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง ช่วยปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้น (Zhang et al., 2012) ฮิวมัสในปุ๋ยหมักเป็นสารอินทรีย์ที่มีประจุลบเป็นตัวช่วยยึดธาตุดูดอาหารพืชที่มีประจุบวกทำให้อนุภาคดินเกาะตัวกัน สารอินทรีย์ในปุ๋ยมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่พอเหมาะ ช่วยให้ดินสามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น และดินที่มีอนุภาคหยาบๆ จะสามารถเกาะตัวกันได้ดีขึ้น ส่วนดินเหนียวจะร่วนขึ้น โปร่งขึ้น มีการระบายน้ำและอากาศได้ดีขึ้น ความหนาแน่นรวมของดินลดลง ไม่แข็งจัดเมื่อแห้ง (ธงชัย มาลา, 2546; ยงยุทธ โอสดสภ et al., 2541)

2.1.2.2 ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งชี้ถึงระดับความสมบูรณ์ของดิน เป็นแหล่งของธาตุดูดอาหารพืช นอกจากนี้ยังเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน หรือเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมี ช่วยรักษาสมดุลของไอออนที่เป็นกรดเป็นด่าง ทำให้ความกรดเป็นด่างของดินเปลี่ยนแปลงยากขึ้นไม่มีผลกระทบต่อพืชที่ปลูก และช่วยลดการเกิดศิลาแลงเนื่องจากอินทรีย์สารจะไปจับกับเหล็กและอลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จึงลดการเกิดผื่นึกและแข็งตัวของศิลาแลงลงได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2546; ยงยุทธ โอสดสภ et al., 2551)

2.1.2.3 ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางจุลชีววิทยาของดิน

เนื่องจากปุ๋ยหมักมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ในดิน จึงทำให้จุลินทรีย์บางชนิดเติบโตได้ดีขึ้น จุลินทรีย์บางชนิดก็สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้อีกด้วย เช่นแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ เป็นต้น และ ปุ๋ยอินทรีย์ก็ยังสามารถลดปัญหาโรคพืชบางชนิดได้ บางชนิดก็ลดความรุนแรงลง (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2551)

2.1.3 ข้อดีของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงบำรุงดินหลายๆด้าน ทั้งทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตของพืช ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุดูดอาหารพืช ซึ่งเป็นผลิตผลจากสิ่งมีชีวิตจึงมีธาตุดูดอาหารต่างๆ ที่พืชหรือสัตว์ใช้ในการเจริญเติบโตค่อนข้างครบถ้วน เมื่อปุ๋ยหมักถูกย่อยสลาย ธาตุดูดอาหารต่างๆ เหล่านี้จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ เป็นประโยชน์ต่อ

พืช ทำให้ลดการสูญเสียธาตุอาหารอันเกิดจากการชะล้าง นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังมีผลตกค้างอยู่ได้นาน พืชสามารถดูดใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.4 ข้อจำกัดของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักนอกจากจะมีข้อดีแล้วยังมีข้อจำกัดและข้อควรระวังในการใช้ (ยงยุทธ โอสภสภ et al., 2541; อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2551) ดังนี้

2.1.4.1 ปุ๋ยหมักจะมีปริมาณธาตุอาหารต่ำ และถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ การใส่ปุ๋ยหมักจึงเห็นผลช้ากว่าปุ๋ยเคมีและควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชให้ตรงเวลาที่พืชต้องการได้ยาก การใช้ต้องใช้ในปริมาณมากจึงจะให้ธาตุอาหารเพียงพอแก่พืช จะมีปัญหาเรื่องค่าขนส่ง เพราะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น และต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บรักษา

2.1.4.2 ปุ๋ยหมักนี้เป็นปุ๋ยที่ได้จากซากพืชซากสัตว์ ทำให้ปุ๋ยมีสัดส่วนระหว่างธาตุอาหารชนิดต่างๆผันแปรในช่วงที่แคบมาก เช่น ในดินที่ขาดฟอสฟอรัส แต่มีไนโตรเจนอยู่เพียงพอ หากใส่ปุ๋ยมูลไถลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสให้แก่พืช ก็จะมีไนโตรเจนติดไปกับมูลไถลงในดินด้วย ทำให้ดินมีไนโตรเจนมากเกินไปได้

2.1.4.3 ปุ๋ยหมักอาจมีธาตุโลหะหนักและสารพิษอื่นๆติดมา เช่น ปุ๋ยหมักที่ทำจากขยะอาจมีธาตุโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท ติดมาเป็นจำนวนมากได้ หากขยะที่นำมาหมักเป็นปุ๋ยที่มีธาตุโลหะดังกล่าวปะปนอยู่

2.1.4.3 ปุ๋ยหมักจากต่างที่มาและต่างระยะเวลาของการหมัก ทำให้คุณภาพของปุ๋ยหมักไม่เท่ากัน

2.2 มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

ปัจจุบันเกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยอินทรีย์กันอย่างแพร่หลาย เกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยอินทรีย์ไปใช้ในการปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตให้กับพืช กรมวิชาการเกษตรจึงกำหนดมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อควบคุมคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์จากผู้ผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5 x 12.5 มิลลิเมตร
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ย่อยได้	ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
3	ปริมาณหิน และกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะ อื่นๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด ต่าง (pH)	5.5-8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20 : 1
8	ค่าการนำไฟฟ้า (EC :Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก	- ไนโตรเจน (total N) ไม่น้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก - ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก - โพแทสเซียม (total K ₂ O) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
10	การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์
11	สารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

2.3 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช

ธาตุอาหารพืช คือธาตุที่มีความสำคัญสำหรับพืช ซึ่งพืชใช้ในการดำรงชีพและเจริญเติบโตถ้าขาดแคลนในระดับหนึ่งพืชจะแสดงอาการผิดปกติ แต่ถ้าขาดอย่างรุนแรงพืชจะตายได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อพืชในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน และกลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อยและสะสมในเนื้อเยื่อพืชในความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิบดีนัม และคลอรีน โดยธาตุอาหารเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชต่างๆ กันแต่จะแตกต่างกันเพียงปริมาณที่พืชต้องการนำไปใช้เท่านั้น (ยงยุทธ โอสภส et al., 2541; ยงยุทธ โอสภส et al., 2551) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาธาตุอาหารพืช 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กและสังกะสี โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 เหล็ก

ธาตุเหล็กเป็นธาตุที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 4.7 ของผิวโลก (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2540) และเหล็กเป็นโลหะที่มีประจุบวกสามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะไร้ออกซิเจน และพืชสามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่ดินเป็นกรด (ยงยุทธ โอสภส et al., 2541) ธาตุเหล็กที่พบส่วนใหญ่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นรูปของเหล็กอินทรีย์สามารถละลายน้ำได้ดี ละลายอยู่ในสารละลายดิน ซึ่งพืชและมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที และเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นรูปของเหล็กอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ยาก โดยเหล็กมีบทบาทที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528; มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) ดังนี้

2.3.1.1 บทบาทของเหล็กที่มีความสำคัญต่อพืช

1. จำเป็นในระบบการทำงานและเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด เช่น catalase ซึ่งเอนไซม์นี้จะทำงานร่วมกับเอนไซม์ superoxide dismutase ที่อยู่ในรูป Fe-SOD ช่วยในการป้องกันอันตรายจากอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ และจะสลายตัวเป็นน้ำและออกซิเจนในขั้นตอนต่อมา

2. เป็นธาตุที่จำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีนที่อยู่ในส่วนของคลอโรพลาสต์ มีผลต่อโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ นอกจากนี้ธาตุเหล็กยังมีบทบาทที่สำคัญในการสังเคราะห์ RNA และการรวมกลุ่มของไรโบโซม

3. เกี่ยวข้องอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์แสง และกระบวนการหายใจของพืช โดยเหล็กเป็นองค์ประกอบของ ferredoxin ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการรีดิวซ์ซัลเฟตและไนเตรต และมีบทบาทที่สำคัญในการตรึงไนโตรเจนจากอากาศของจุลินทรีย์ พวกแบคทีเรียและสาหร่าย

4. ช่วยในการดูดธาตุอาหารอื่นๆ ของพืช

5. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำออกซิเจนไปสู่กระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์

2.3.1.2 อาการผิดปกติของพืชที่ขาดธาตุเหล็ก

อาการผิดปกติของพืชเมื่อได้รับเป็นปริมาณที่ไม่พอเพียงจะแสดงออกที่ใบ โดยเกิดที่ใบอ่อน มีสีขาว เหลืองซีดหรือเหลืองนวลชัดเจน เนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบจะเปลี่ยนจากสีเขียว เป็นสีเหลือง เมื่ออาการรุนแรงมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองซีดหรือเป็นสีขาวซีดทั้งใบ หลังจากนั้นที่ปลายใบจะแห้งและไหม้ได้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเหล็กมีประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่จะมีปริมาณเหล็กและร่วมไปถึงปริมาณธาตุอาหารอื่นๆ สะสมในแต่ละส่วนของพืช ในปริมาณที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นโดยประมาณของจุลธาตุอาหารในใบเมื่อพืชแก่เต็มที่

จุลธาตุอาหาร	ความเข้มข้นในใบเมื่อพืชแก่เต็มที่ (ส่วนในล้านส่วน)		
	พอเพียง	ขาดแคลน	มากเกินไปหรือเป็นพิษ
เหล็ก (Fe)	50-250	< 50	ไม่มีรายงาน
แมงกานีส (Mn)	20-500	< 20	>500
ทองแดง (Cu)	5-20	< 5	>20
สังกะสี (Zn)	25-150	< 20	>400
โบรอน (B)	20-100	< 15	>200
โมลิบดีนัม (Mo)	0.5-9	< 0.1	ไม่มีรายงาน
คลอรีน (Cl)	ไม่มีรายงาน	ไม่มีรายงาน	ไม่มีรายงาน

ที่มา: ยงยุทธ โอสดสภ et al. (2541)

2.3.2 สังกะสี

สังกะสีจัดอยู่ในกลุ่มจุลธาตุอาหารที่พืชต้องการนำไปใช้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง แต่พืชไม่สามารถขาดได้ นอกจากนี้สังกะสียังจัดเป็นโลหะที่มีปริมาณน้อยในโลกอีกด้วย มีประมาณ 80 ส่วนในล้านส่วน (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2540) โดยสังกะสีที่อยู่ในรูปของไอออน (Zn^{2+}) ที่ละลายอยู่ในสารละลายดิน พืชจะสามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยสังกะสีมีบทบาทที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544; ยงยุทธ โอสดสภ et al., 2541) ดังนี้

2.3.2.1 บทบาทของสังกะสีที่มีความสำคัญต่อพืช

1. มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบเอนไซม์หลายชนิด โดยจะเป็นตัวกระตุ้นหรือตัวเชื่อมให้เอนไซม์ทำงานได้อย่างเต็มที่ เช่น carbonic anhydrase ที่มีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยช่วยในการรักษาสมดุลระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ และไบคาร์บอเนต เพื่อให้มีคาร์บอนไดออกไซด์เพียงพอสำหรับการสังเคราะห์แสง

2. เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์สารที่เกี่ยวข้องอยู่กับการขยายตัวของเซลล์พืช

3. จำเป็นสำหรับกระบวนการเมตาโบลิซึมของไนโตรเจนในพืช โดยสังกะสีจะมีบทบาทในการช่วยให้ไรโบโซมมีโครงสร้างที่ดี และมีบทบาทในการแบ่งเซลล์

4. มีบทบาททางอ้อมต่อกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์ โดยควบคุมการเปิดปิดปากใบ สังกะสีจะช่วยให้เซลล์คุมมีโครงสร้างที่ดี และมีกลไกที่จะดูดใช้โพแทสเซียมเข้าไปสะสมที่เซลล์คุมได้ตามปกติ

2.3.2.2 อาการผิดปกติของพืชที่ขาดธาตุสังกะสี

อาการผิดปกติของพืชเมื่อได้รับเป็นปริมาณที่ไม่พอเพียงคือ ใบอ่อนจะเกิดคลอโรซิสที่มีลักษณะเนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบอาจเป็นสีเขียวซีดหรือสีเหลืองหรือสีขาว ซึ่งคล้ายกับการขาดธาตุเหล็ก แต่กรณีของการขาดสังกะสีจะมีผลทำให้ใบพืชมีขนาดเล็กผิดปกติ ลำต้นแคระแกร็น นอกจากนั้นปล้องของลำต้นและกิ่งก้านบริเวณที่อ่อนหรือมีอายุน้อยกว่าจะมีขนาดสั้นกว่าปกติ และเปลือกของลำต้นของไม้ยืนต้นอาจมีลักษณะขรุขระและเปราะ (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528)

การขาดสังกะสีในพืชจะพบได้น้อย ซึ่งต่างจากการเป็นพิษจะพบได้มากกว่า (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) โดยถ้าพืชได้รับปริมาณสังกะสีมากเกินไปก็อาจเป็นอันตรายต่อพืชได้ จึงต้องมีระดับเกณฑ์ของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยหมักดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนน้ำเสีย

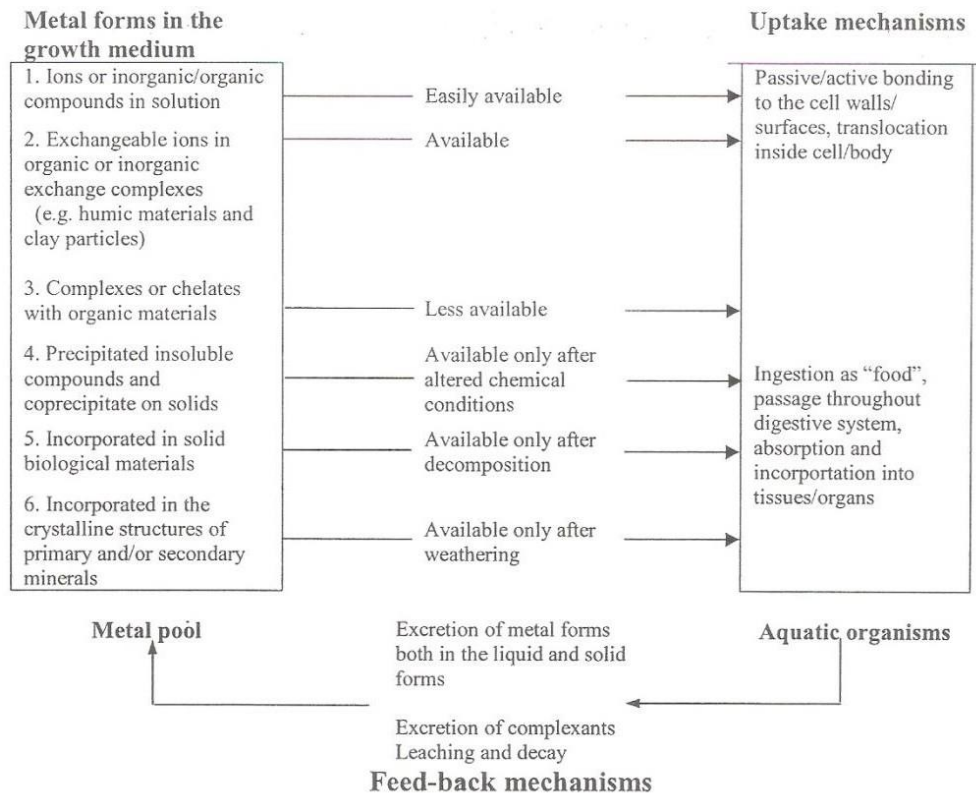
โลหะหนัก	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน ^{1/}	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน ^{2/}	ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์ (มก./กก.) ^{3/}	ค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ในกากตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตร(มก./กก.) ^{4/}
1. สารหนู (As)	-	30	50	-
2. แคดเมียม (Cd)	3	0.15	5	20
3. โคบอลต์ (Co)	100	20	-	-
4. โครเมียม (Cr)	100	80	300	1,000
5. ทองแดง (Cu)	100	45	500	900
6.ปรอท (Hg)	1	0.1	2	10
7. นิกเกิล (Ni)	50	45	-	400
8. ตะกั่ว (Pb)	100	55	500	1,000
9. สังกะสี (Zn)	300	70	-	3,000

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2559)

หมายเหตุ: ^{1/} มาตรฐานของโลหะหนักในดิน กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป
^{2/} เอกสารวิชาการ “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน” ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย
^{3/} มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 กรมวิชาการเกษตร
^{4/} วารสารดินและปุ๋ย ปีที่ 20 เล่ม 4 ต.ค.-ธ.ค. 2541

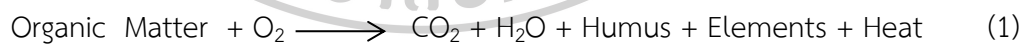
2.4 รูปแบบของโลหะในสิ่งแวดล้อม

โลหะที่สะสมอยู่ในธรรมชาติมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ รวมไปถึงปริมาณที่พบและความยากง่ายในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ความสัมพันธ์ของโลหะแต่ละรูปแบบกับสิ่งมีชีวิตที่ 1 โดยสามารถแบ่งรูปแบบของโลหะแต่ละรูปแบบตามความยากง่ายของการเข้าสู่สิ่งมีชีวิต (Baudo, 1982; นัทธีรา สรรมณี, 2555) ได้ดังนี้



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่างๆ กับสิ่งมีชีวิต
ที่มา: Baudo (1982)

1. รูปไอออนอิสระ หรือรูปสารประกอบอนินทรีย์และอินทรีย์ที่เป็นรูปละลายน้ำสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายที่สุด เช่น ในกระบวนการหมักปุ๋ยจุลินทรีย์จะเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุบางส่วนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ อีเอ็มส์ ธาตุอาหารและความร้อน (Bernal et al., 2009; Tuomela, Vikman, Hatakka, & Itavaara, 2000) ดังสมการที่ 1

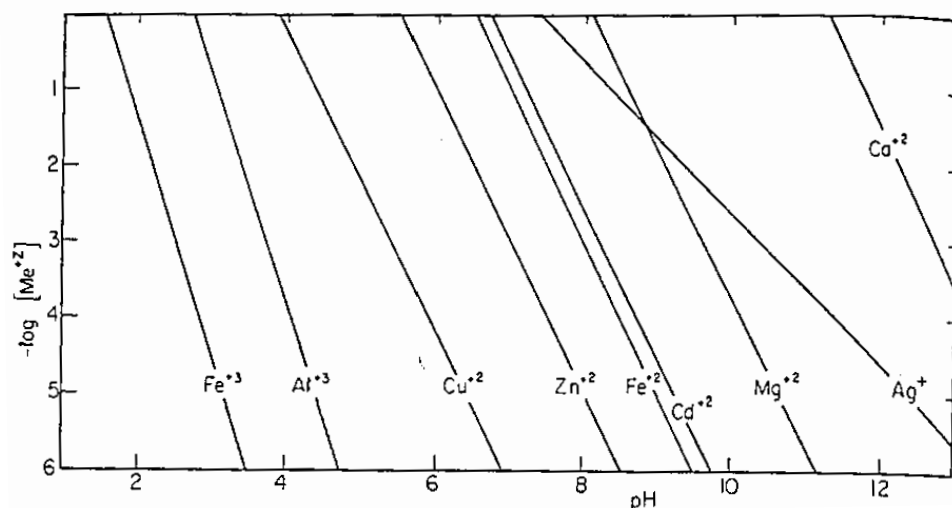


ซึ่งธาตุอาหารที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปไอออน เช่น Fe^{2+} และ Zn^{2+} เป็นต้น ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักปุ๋ยรูปแอมไอออนสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะอาจเป็นแอมไอออนชนิดไฮดรอกไซด์ที่จะเกิดเป็นสารละลายหรือตกตะกอนได้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของโลหะแต่ละชนิด (อมรรัตน์ เอื้อสลุง, 2558) ดังตารางที่ 4 และภาพที่ 2

ตารางที่ 4 ค่าคงที่การละลายสารประกอบของโลหะ

ค่าคงที่การละลาย (Solubility Product Constants)	Ksp (ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ)
Aluminium hydroxide (Al(OH) ₃)	3×10^{-34}
Beryllium hydroxide (Be(OH) ₂)	6.92×10^{-22}
Calcium hydroxide (Ca(OH) ₂)	5.02×10^{-6}
Copper(II) hydroxide (Cu(OH) ₂)	4.8×10^{-20}
Iron(III) hydroxide (Fe(OH) ₃)	2.79×10^{-39}
Magnesium hydroxide (Mg(OH) ₂)	5.61×10^{-12}
Manganese(II) hydroxide (Mn(OH) ₂)	2×10^{-13}
Zinc hydroxide (Zn(OH) ₂)	3×10^{-17}

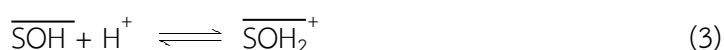
ที่มา: ดัดแปลงจาก N C (2017)



ภาพที่ 2 ความสามารถในการละลายของออกไซด์และ ไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโลหะรูปไอออนอิสระในสภาวะสมดุลกับของแข็งออกไซด์และ ไฮดรอกไซด์

ที่มา: Stumm and Morgan (1981)

2. รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ของสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์หรืออินทรีย์ สามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายรองลงมาจากรูปแบบที่ 1 โดยโลหะที่อยู่ในรูปแบบนี้สามารถเกิดสารประกอบกับสารประกอบออกไซด์ได้ ในธรรมชาติพบว่าโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์จะแบ่งออกได้เป็นรูปของโลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียว และรูปแบบที่ถูกดูดซับบนสารประกอบออกไซด์ (สาวิตรีภาพักดี, 2553) โดยการเกิดประจุบนผิวของออกไซด์พบได้ทั้งในรูปของกรดอ่อนและเบสอ่อนสามารถแสดงได้ดังสมการ (Bourg & Filby, 1974)

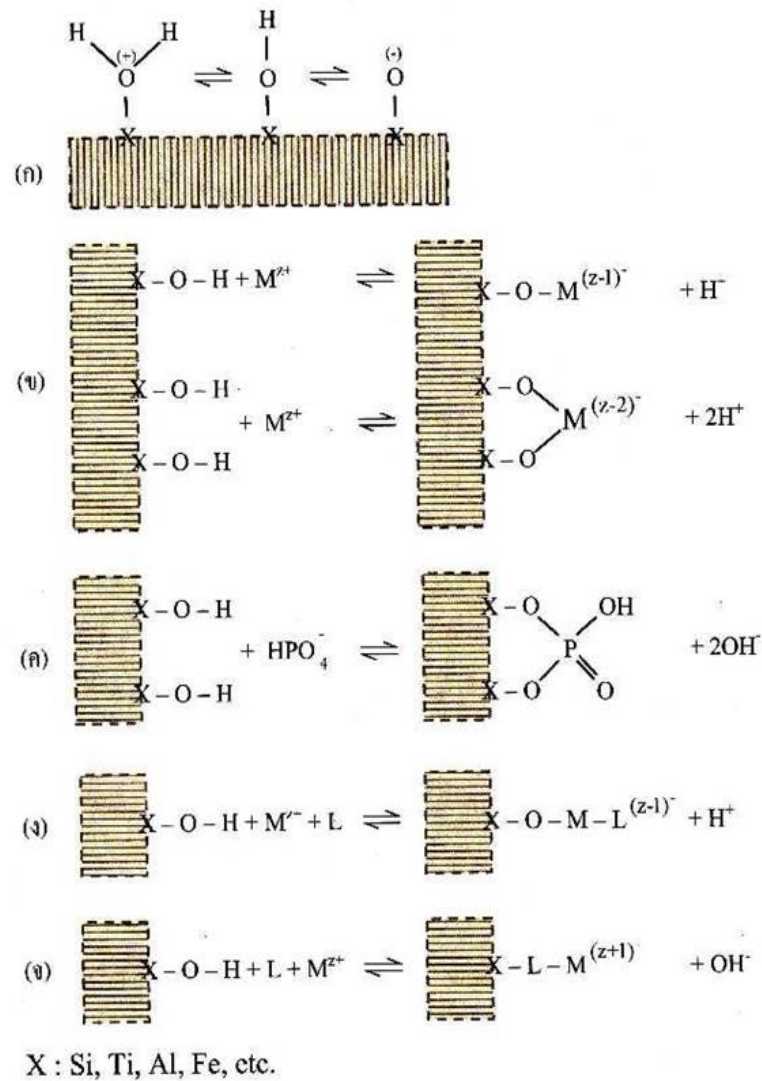


และเมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ (Me^{n+}) ได้ดังสมการ



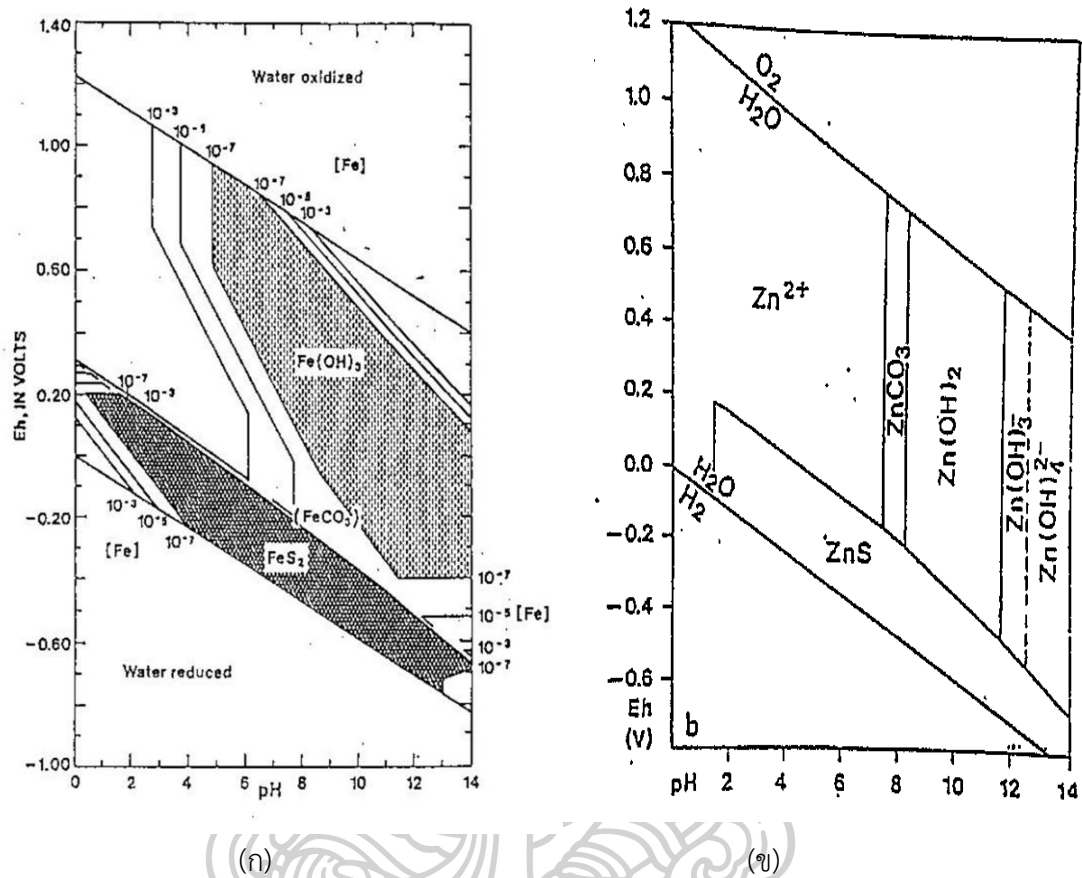
ซึ่งถ้ามีการดูดซับมากขึ้นปฏิกิริยาจะไปทางขวา และค่าความเป็นกรดต่างจะเพิ่มขึ้นด้วย จากคุณสมบัติข้างต้นทำให้ไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับหรือเกิดตกตะกอนร่วมกับแคทไอออนและแอนไอออนได้ดังภาพที่ 3 และ 4





ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ

- ก. ปฏิกิริยากรด - เบส บริเวณผิวของออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล
- ข. ไอออนของโลหะแทนที่ H^+ ของหมู่ไฮดรอกซิล
- ค. หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยลิแกนด์อื่นๆ
- ง. ไอออนของโลหะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์อื่น และเกิดการแทนที่ H^+ ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของออกไซด์ด้วย
- จ. Multidentate ligand ที่ละลายน้ำ ทำปฏิกิริยาทั้ง X และไอออนของโลหะด้วยพันธะโคออดิเนต

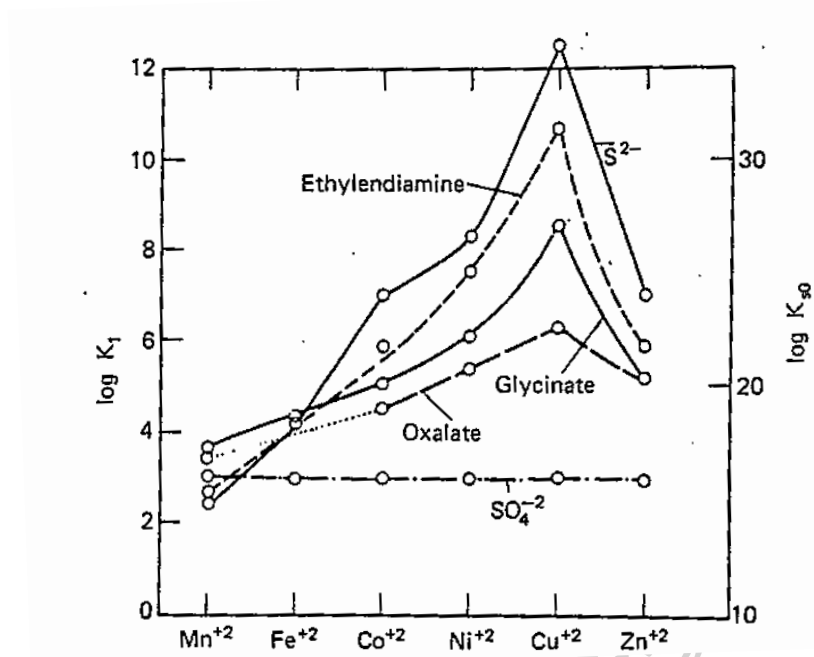


ภาพที่ 4 เสถียรภาพของโลหะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชและศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน

(ก) เหล็ก (ข) สังกะสี

ที่มา: Hem (1972)

3. รูปสารประกอบเชิงซ้อน หรือคีเลตกับสารอินทรีย์ เช่น สารอินทรีย์ที่จับเหล็กไว้เป็น เหล็กคีเลต และสังกะสีคีเลต (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528) ซึ่งรูปแบบนี้โลหะจะถูกสารอินทรีย์ดูดซับไว้และค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยพบว่าโลหะแต่ละชนิด จะมีความชอบในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ได้มากน้อยแตกต่างกันออกไป ซึ่งโลหะที่มีที่ มีความชอบในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ได้น้อยเสถียรภาพของสารประกอบจะมีค่า ต่ำและสามารถถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่า (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 ค่าคงที่เสถียรภาพของสารประกอบโลหะทรานซิชัน และค่าคงที่ผลคูณการละลายของสารประกอบในอัตราส่วนของโลหะเท่ากับ 1 ต่อ 1
ที่มา: Stumm and Morgan (1981)

4. รูปที่ตกตะกอนในรูปสารประกอบเชิงซ้อน และที่ตกตะกอนร่วมบนผิวของแข็ง จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีเท่านั้น เช่น ไอออนของ Zn^{2+} ที่ละลายอยู่ในดิน จะทำปฏิกิริยากับไอออนลบของธาตุอื่นๆ แล้วตกตะกอนเป็นสารประกอบชนิดต่างๆ (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528) ทำให้เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยากขึ้น

5. รูปที่อยู่ในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมในกระดูก ต้องถูกย่อยสลายเสียก่อนจึงจะสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้

6. รูปที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแร่ปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ เช่น แร่ฮีมาไทต์ (haematite) แร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite) และแร่สมิธซอไนต์ (smithsonite) จะอยู่ในรูปของแร่ธาตุที่ต้องมีการผุพังตามธรรมชาติเสียก่อนจึงจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ มีความคงทนมาก และเป็นรูปแบบของสารประกอบที่มีเสถียรภาพมากจึงเป็นรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยากที่สุด โดยพบว่าโลหะแต่ละชนิดมีเสถียรภาพของสารประกอบแตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่สมดุลของการละลาย (Constants for solubility equilibria; K)

ปฏิกิริยา	log K ที่ 25 องศาเซลเซียส
I. Oxides and Hydroxide	
$(am)Fe(OH)_3(s) = Fe^{3+} + 3OH^-$	-38.7
$(am)Fe(OH)_3(s) = FeOH^{2+} + 2OH^-$	-27.5
$(am)Fe(OH)_3(s) = Fe(OH)_2^+ + OH^-$	-16.6
$(am)Fe(OH)_3(s) + OH^- = Fe(OH)_4^-$	-4.5
$2(am)Fe(OH)_3(s) = Fe_2(OH)_2^{4+} + 4OH^-$	-51.9
$(am)FeOOH(s) + 3H^+ = Fe^{3+} + 2H_2O$	3.55
$\alpha\text{-}FeOOH(s) + 3H^+ = Fe^{3+} + 2H_2O$	1.6
$Fe^{3+} + 2H_2O = FeOH^{2+} + H^+$	-2.19
$Fe^{3+} + 2H_2O = Fe(OH)_2^+ + 2H^+$	-5.67
$Fe^{3+} + 3H_2O = Fe(OH)_3(aq) + 3H^+$	<-12
$Fe^{3+} + 4H_2O = Fe(OH)_4^- + 4H^+$	-21.6
$Fe^{3+} + 2H_2O = Fe_2(OH)_2^{4+} + 2H^+$	-2.95
$\alpha\text{-}FeOOH(s) + 3H^+ = Fe^{3+} + 2H_2O$	0.5
$(am)FeOOH(s) + 3H^+ = Fe^{3+} + 2H_2O$	2.5
$Fe^{2+} + H_2O = FeOH^+ + H^+$	-9.5
$Fe(OH)_2(\text{active}) + 2H^+ = Fe^{2+} + 2H_2O$	12.85
$Zn^{2+} + H_2O = ZnOH^+ + H^+$	-8.96
$Zn^{2+} + 2H_2O = Zn(OH)_2 + 2H^+$	-16.9
$Zn^{2+} + 3H_2O = Zn(OH)_3^- + 3H^+$	-28.4
$Zn^{2+} + 4H_2O = Zn(OH)_4^{2-} + 4H^+$	-41.2
$ZnO + 2H^+ = Zn^{2+} + H_2O$	11.14
$Zn(OH)_2(\text{amorph}) + 2H^+ = Zn^{2+} + 2H_2O$	12.45
II. Carbonates and Hydroxide Carbonates	
$ZnCO_3(s) + 2H^+ = Zn^{2+} + H_2O + CO_2(g)$	7.95
$Zn(OH)_{1.2}(CO_3)_{0.4}(s) + 2H^+ = Zn^{2+} + 1.6H_2O + 0.4CO_2(g)$	9.8

ตารางที่ 5 ค่าคงที่สมดุลของการละลาย (Constants for solubility equilibria; K) (ต่อ)

ปฏิกิริยา	log K ที่ 25 องศาเซลเซียส
$\text{FeCO}_3(\text{siderite}) = \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-10.4
III. Sulfides	
$\text{FeS}(\text{s}) = \text{Fe}^{2+} + \text{S}^{2-}$	18.1
$\text{ZnS}(\text{s})(\alpha) = \text{Zn}^{2+} + \text{S}^{2-}$	24.7
IV. Phosphates	
$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})(\text{Strengite}) = \text{Fe}^{3+} + \text{PO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-26
$\text{FeNH}_4\text{PO}_4(\text{s}) = \text{Fe}^{2+} + \text{NH}_4^+ + \text{PO}_4^{3-}$	~-13
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2(\text{s}) = 3\text{Fe}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-}$	~-32
$\text{FeHPO}_4^{2-} = \text{Fe}^{3+} + \text{HPO}_4^{2-}$	-8.3
$\text{FeH}_2\text{PO}_4^{2+} = \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^-$	-1.8
$\text{Fe}(\text{HP}_2\text{O}_7)_2^{3-} = \text{Fe}^{3+} + 2\text{HP}_2\text{O}_7^{3-}$	-22.0

ที่มา: ดัดแปลงจาก Stumm and Morgan (1981)

โดยสิ่งมีชีวิตสามารถนำโลหะเข้าสู่ร่างกายได้หลายทางด้วยกันเช่น ทางผิวหนัง ทางเดินอาหาร เป็นต้น เมื่อสิ่งมีชีวิตมีการขับถ่ายหรือตายลงของเหล่านี้อาจผ่านกระบวนการเน่าสลายผุพัง โลหะเหล่านี้ก็จะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นวัฏจักรอีกครั้งดังภาพที่ 1

2.5 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction techniques)

เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นเป็นเทคนิคที่ใช้สารละลายที่มีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ นิยมใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างที่เป็นของแข็ง และของเหลว เป็นเทคนิคการสกัดที่ไม่ยุ่งยากและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเทคนิคนี้จะแบ่งขั้นตอนออกเป็น 4 รูปแบบคือ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (residual fraction)

2.6.1 รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction)

รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปแบบของโลหะที่อยู่ในรูปแบบของไอออน และสามารถถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายที่สุด พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที และสารสกัดที่ใช้จะมีความรุนแรงน้อยที่สุด

2.6.2 รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction)

รูปสารประกอบออกไซด์เป็นรูปแบบของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้รองลงมาจากรูปแบบแรก

2.6.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction)

รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปแบบที่สามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้น โลหะในรูปแบบนี้จะถูกสารอินทรีย์ดูดซับไว้ และค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมาในสภาวะที่เหมาะสม ต้องใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงมากขึ้น

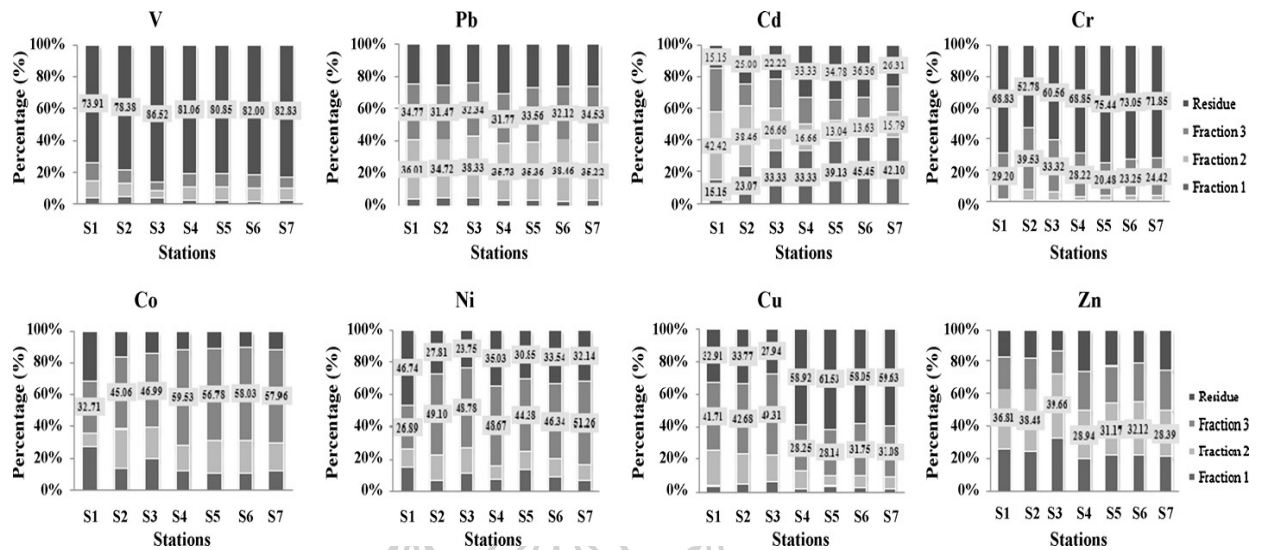
2.6.4 รูปคงค้างของแข็ง (residual fraction)

รูปคงค้างของแข็งจะเป็นรูปที่มาจากองค์ประกอบเศษหินและแร่ที่อยู่ในดิน (ชัยฤกษ์, 2528) เป็นรูปแบบที่สามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก และต้องใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงมากกว่า 3 รูปแบบแรก $\text{pH} < 4$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

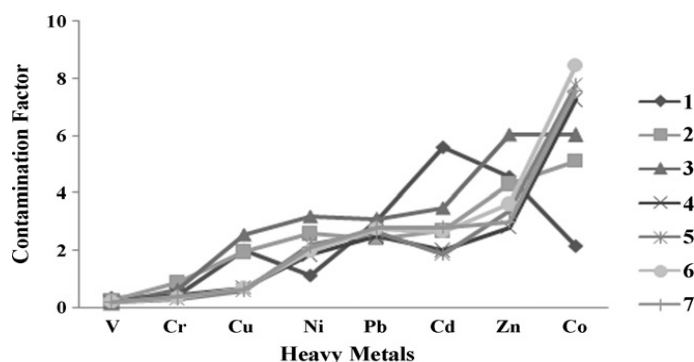
เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นนี้ได้มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการพิจารณารูปแบบต่างๆ ของโลหะที่เกิดขึ้นจากการศึกษาตัวอย่างจากแต่ละแหล่ง และนำมาใช้ในการประเมินความเป็นพิษของโลหะในสิ่งแวดล้อม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

K Nemati, Bakar, Sobhanzadeh, and Abas (2011) ได้ทำการศึกษารูปแบบของโลหะในตัวอย่างตะกอนดิน ที่มีความลึกที่แตกต่างกันด้วยเทคนิคการสกัดแบบ BCR แบ่งรูปแบบของการสกัดออกเป็น 4 รูปแบบ คือรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (easily reducible fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (oxidizable fraction) และรูปคงค้าง (residual fraction) โดยทำการเก็บตัวอย่างตะกอนดินจาก 7 สถานี ผลการศึกษาดังภาพที่



ภาพที่ 6 ค่าร้อยละของโลหะในรูปแบบต่างๆ จาก 7 สถานีด้วยเทคนิคการสกัดแบบ BCR ที่มา : K Nemati et al. (2011)

โดยโลหะ วานาเดียม (V) และ โครเมียม (Cr) ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปคงค้างเป็นรูปแบบที่ ชอบที่จะรวมตัวอยู่ในผลึกพวกซิลิเกต คิดเป็นร้อยละ 73.9-86.52 และ 52.78-75.44 ตามลำดับ สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก โคบอลต์ (Co) และ นิกเกิล (Ni) จะพบว่ามีกระจาย อยู่ในทั้ง 4 รูปแบบ แต่รูปแบบที่สามารถพบได้มากที่สุดคือรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ พบว่ามีค่ามากกว่าร้อยละ 56 ในสถานีที่ 4-7 สังกะสี (Zn) พบได้มากในรูปสารประกอบออกไซด์ สังกะสีจะกระจายตัวอยู่ในรูปแบบที่พืชสามารถไปใช้ได้ง่ายในอนาคตเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ ตะกั่ว (Pb) จะพบในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ได้น้อยเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ แต่ในส่วนของ แคดเมียม (Cd) ในตะกอนดินนั้นจะได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นโลหะที่พบได้มากและมีความเป็นพิษ ดังจะเห็นได้ว่าสถานี 3-7 สามารถพบ แคดเมียมได้มากกว่าร้อยละ 33 ของความเข้มข้นทั้งหมดอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถจะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย อาจเป็นอันตรายได้เมื่อพืชนำไปใช้และเคลื่อนที่เข้าไปสะสมในสิ่งแวดล้อม โลหะทองแดง (Cu) จะพบได้รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของแต่ละโลหะ โดยโลหะแต่ละชนิดจะมีการสะสมในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกันจึงทำให้สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากง่ายต่างกัน ดังภาพที่ 7

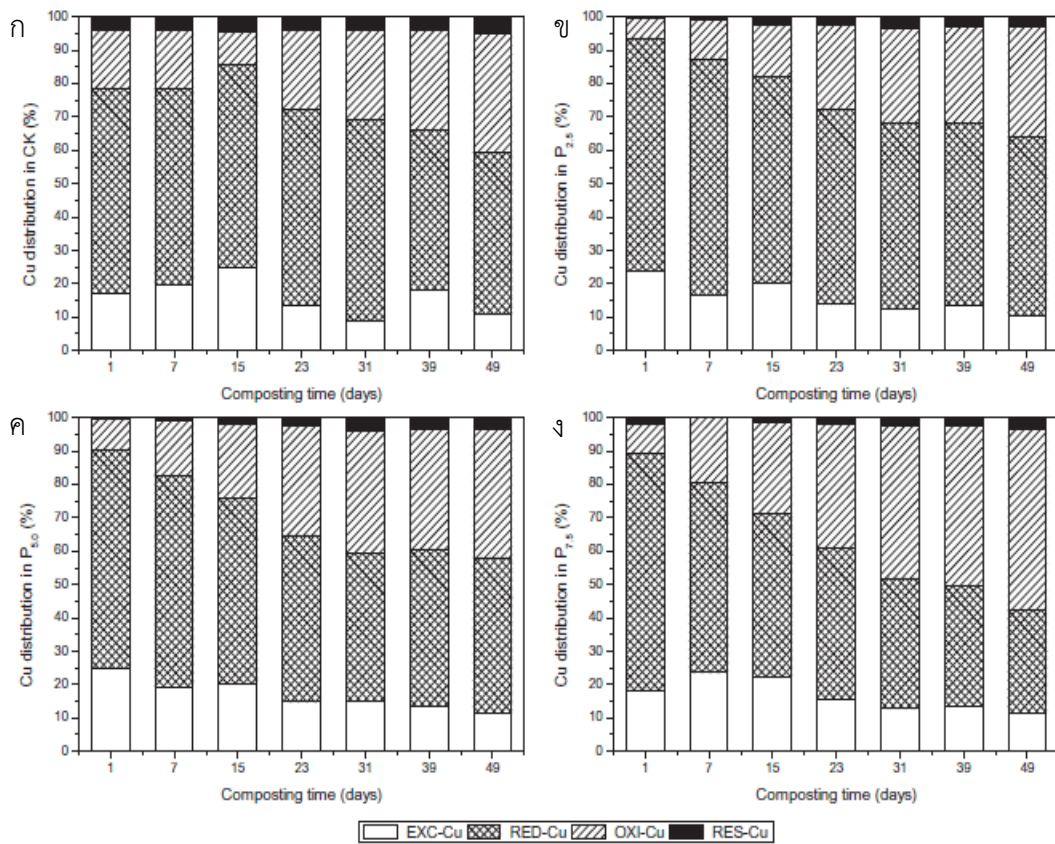


ภาพที่ 7 การปนเปื้อนของโลหะในตัวอย่างทั้ง 7 สถานี

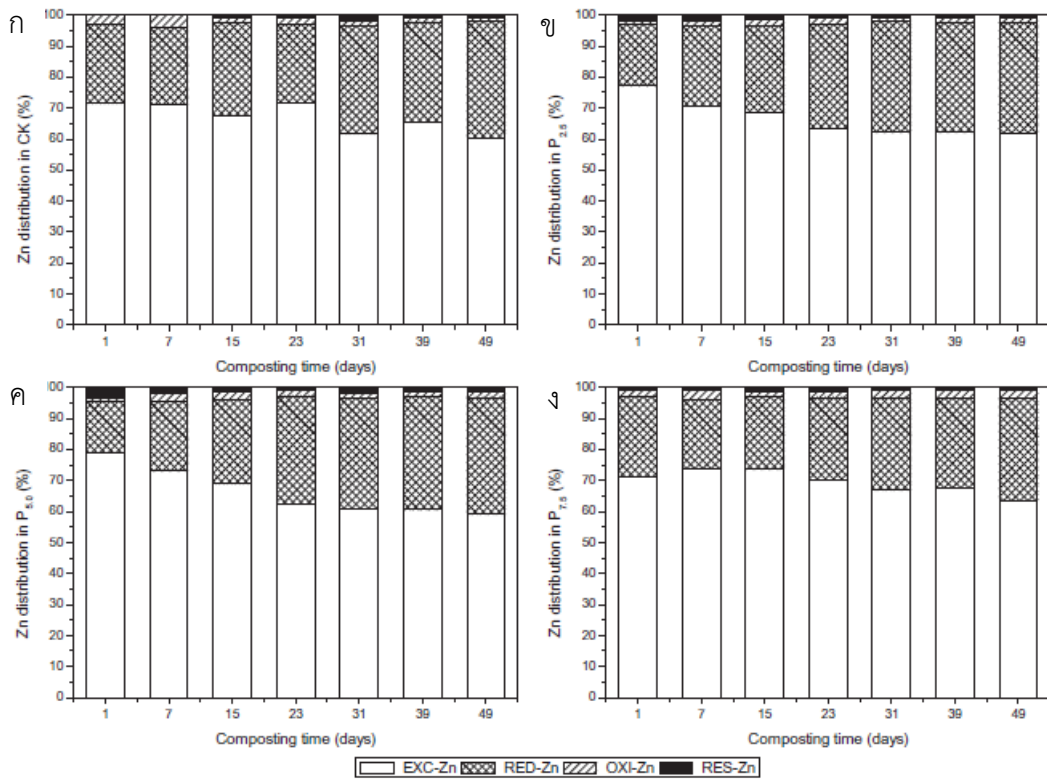
ที่มา : K Nemati et al. (2011)

ความเข้มข้นส่วนใหญ่จะลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น พบโลหะที่มีค่าการปนเปื้อนสูงสุดคือ โคบอลต์, สังกะสี และตะกั่ว ส่วนใหญ่พบในรูปแบบที่สามารถถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ในขณะที่จะพบวานาเดียมและโครเมียมได้น้อย ส่วนค่าการประเมินความเสี่ยงสำหรับ วานาเดียม, โครเมียม, ทองแดง, และ ตะกั่วมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10

Lu et al. (2014) ได้ทำการศึกษารูปแบบของสังกะสีและทองแดงในปุ๋ยหมักมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 49 วัน แล้วนำมาศึกษารูปแบบทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของโลหะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ ปริมาณของสังกะสีและทองแดงทั้ง 4 รูปแบบแสดงได้ดังภาพที่ 8 และ 9 โดยการปรับปรุงเพิ่มปริมาณอนินทรีย์ฟอสฟอรัสด้วยการเติมหินฟอสเฟตระหว่างกระบวนการหมัก พบว่าเมื่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นสังกะสีและทองแดงจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้น ในระหว่างกระบวนการหมักรูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงจะลดลง และรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่สังกะสีจะพบได้มากในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์มากถึงร้อยละ 95 แล้วจะค่อยๆ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้นระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ดังนั้นการเติมหินฟอสเฟตลงในปุ๋ยหมักจะทำให้โลหะทั้งสองอยู่ในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้น้อยลงซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ได้ทันทีซึ่งถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็อาจเป็นพิษต่อพืชได้ หินฟอสเฟตนี้จึงมีคุณสมบัติในการช่วยตรึงโลหะทั้งสองไม่ให้ถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย



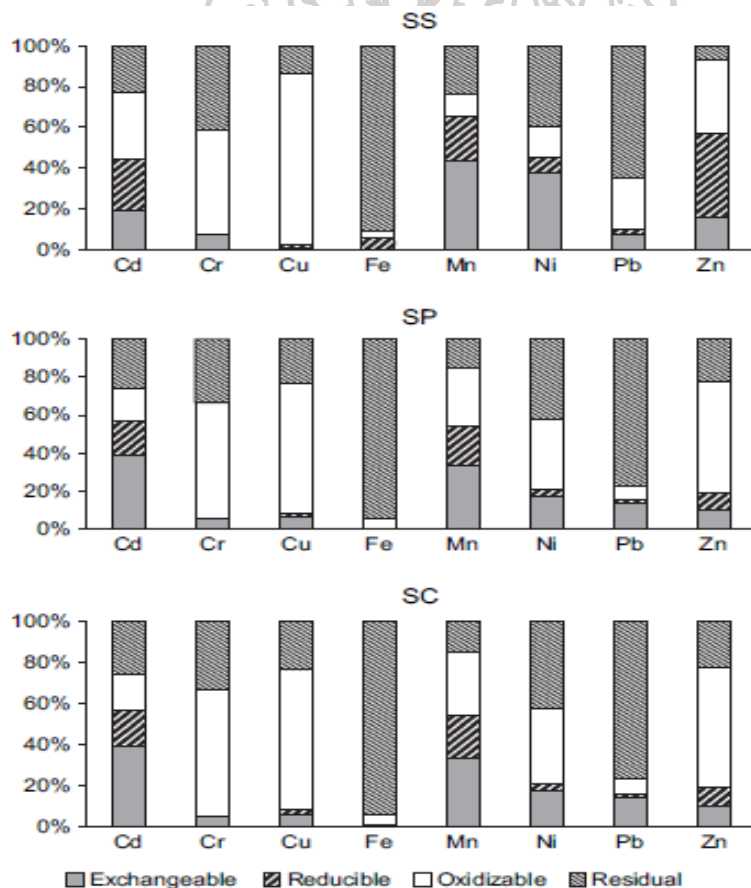
ภาพที่ 8 รูปแบบต่างๆ ของทองแดงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต (ก = 0%, ข = 2.5%, ค = 5.0% และ ง = 7.5%)
ที่มา: Lu et al. (2014)



ภาพที่ 9 รูปแบบต่างๆ ของสังกะสีที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต
(ก = 0%, ข = 2.5%, ค = 5.0% และ ง = 7.5%)

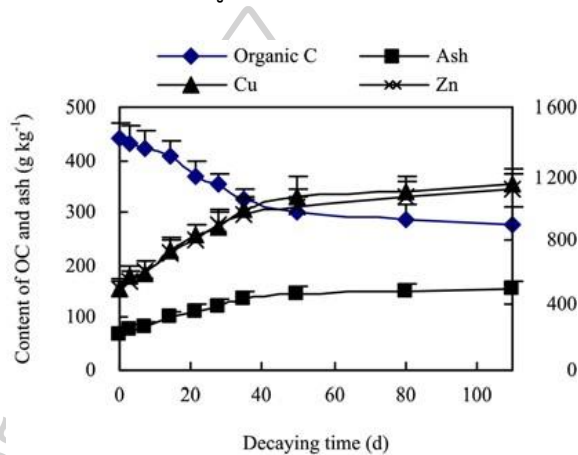
ที่มา: Lu et al. (2014)

Walter, Martinez, and Cala (2006) ได้ศึกษารูปแบบของโลหะในกากตะกอน จากตัวอย่างกากตะกอน 3 ชนิด คือ กากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน กากตะกอนแห้ง และปุ๋ยหมักจากกากตะกอน โดยแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบได้แก่ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง พร้อมกับการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่าปุ๋ยหมักจากการตะกอนปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และไนโตรเจนน้อยที่สุด เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักปุ๋ย ขณะที่ปริมาณสารอินทรีย์มากที่สุด จากการที่จุลินทรีย์จะเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นสารประกอบที่มีความคงทนในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าเหล็กและสังกะสีเป็นโลหะที่พบได้มากในกากตะกอน โดยสังกะสีพบในรูปแบบที่พืชจะนำไปใช้ได้ปริมาณมากโดยเฉพาะในปุ๋ยหมักจึงต้องระมัดระวังในการใช้ปุ๋ยเพื่อไม่ให้มีปริมาณสังกะสีมากเกินไป เหล็กที่พบส่วนใหญ่ร้อยละ 90 อยู่ในรูปคงค้างของแข็ง เป็นรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้ยากจึงไม่เป็นพิษต่อพืช การกระจายตัวในรูปแบบต่างๆ ของโลหะดังภาพที่ 10

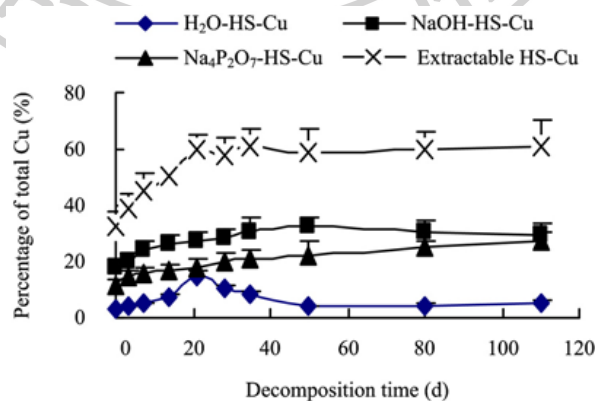


ภาพที่ 10 สัดส่วนของโลหะในกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (SS) กากตะกอนแห้ง (SP) และปุ๋ยหมักจากกากตะกอน (SP) ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ BCR
ที่มา: Walter et al. (2006)

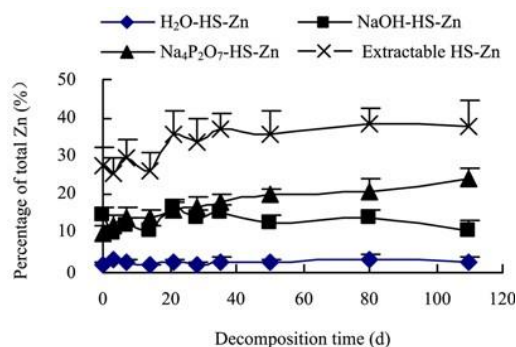
Shuai, Xu-dong, Li-lan, Shi-rong, and Jun-feng (2008) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับสารฮิวมิก ของทองแดง (HS-Cu) และสังกะสี (HS-Zn) ระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 110 วัน พบว่าจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์อินทรีย์วัตถุที่ลดลงตามระยะเวลาหมักส่งผลให้ปริมาณของทองแดงและสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอีกด้วยดังภาพที่ 11 และ เมื่อสกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้นสังกะสีจะจับกับสารฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรได้น้อยกว่าทองแดงทำให้สังกะสีสามารถถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าทองแดง โดยปริมาณรูปแบบต่างๆ ทองแดงและสังกะสีดังภาพที่ 12 และ 13



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุ สังกะสี และทองแดงตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา: Shuai et al. (2008)

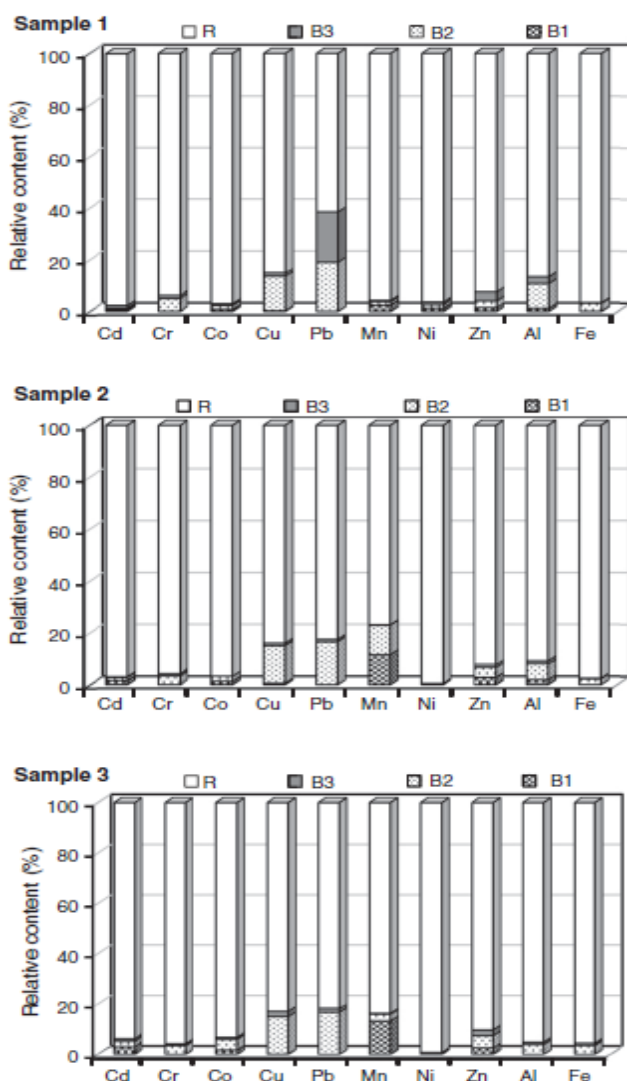


ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา: Shuai et al. (2008)



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสังกะสีตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา: Shuai et al. (2008)

Mustafa, Fajkoviv, Roncevic, and Curkovic (2015) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ขั้นตอนการสกัดแบบ BCR และดัชนีความเสี่ยงต่างๆ เพื่อประเมินความเสี่ยงทางด้านสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศของโลหะหนักที่มาจากเขตพื้นที่ของเสีย Jarosite ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร 1 เมตร และ 2 เมตร และตรวจวัดพารามิเตอร์พื้นฐาน เช่น ความเป็นกรดต่าง ความชุ่ม ความชื้น สารอินทรีย์คาร์บอน เป็นต้น ดังภาพที่ 14 จะแสดงให้เห็นถึงผลของการกระจายตัวของปริมาณโลหะ แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล สังกะสี อลูมิเนียม และ เหล็ก ของทั้ง 3 ตัวอย่าง โดย สังกะสีจะพบมากที่สุดในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ และรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์เป็นรูปแบบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผ่านการย่อยสลายตามธรรมชาติ อาจเนื่องจากสังกะสีเป็นธาตุที่ชอบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้น้อยจึงสามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย รองลงมาคือ ตะกั่ว เหล็ก แมงกานีส ทองแดง อลูมิเนียม และแคดเมียม ส่วนนิกเกิล จะพบได้น้อยที่สุดในทั้ง 3 รูปแบบ ดังนั้นโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำๆ จะมีการเคลื่อนย้ายที่ช้าหรือมีการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อย



ภาพที่ 14 การแพร่กระจายของโลหะในตัวอย่ง jarosite วิธีสกัด BCR (ตัวอย่าง 1 ลีค 20 ซม ตัวอย่างที่ 2 ลีค 1 เมตรและตัวอย่างที่ 3 ลีค 2 เมตร)

ที่มา : Mustafa et al. (2015)

ช่วงของผลการวิเคราะห์โลหะหนักที่ตรวจวัดได้ แคดเมียม 174-1823 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โครเมียม 25.50-49.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โคบอลต์ 7.25-25.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง 2176-8345 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว 38,191-62.581 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แมงกานีส 1152-6239 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นิกเกิล 6.13-88.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสี 21,580-149,104 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อลูมิเนียม 3096-5917 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและ เหล็ก 314,200-327,206 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า แคดเมียมเป็นโลหะที่มีอันตรายที่สุดในระบบนิเวศที่ตรวจพบและสามารถเรียงลำดับความเสี่ยงต่ออันตรายได้ดังนี้

แคดเมียม >สังกะสี> ทองแดง> นิกเกิล สำหรับกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บได้จากระดับความลึกที่แตกต่างกัน สามารถเรียงลำดับของการเคลื่อนที่ของโลหะใน jarosite ทั้ง 3 ตัวอย่างได้ดังตารางที่ 6 ตารางที่ 6 ลำดับการของการเคลื่อนที่ของโลหะใน jarosite ทั้ง 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1

BCR1 สังกะสี>แมงกานีส>อลูมิเนียม>ทองแดง>แคดเมียม>แบเรียม>นิกเกิล>โคบอลต์

BCR2 ตะกั่ว>เหล็ก>สังกะสี>ทองแดง>อลูมิเนียม>แมงกานีส>สตรอนเซียม>โครเมียม>แคดเมียม>เงิน>นิกเกิล>โคบอลต์

BCR3 ตะกั่ว>สังกะสี>เหล็ก>อลูมิเนียม>ทองแดง>แบเรียม>สตรอนเซียม>แมงกานีส>แคดเมียม>เงิน>โครเมียม>นิกเกิล>โคบอลต์

ตัวอย่างที่ 2

BCR1 สังกะสี>แมงกานีส>อลูมิเนียม>ทองแดง>แคดเมียม>แบเรียม>โคบอลต์

BCR2 ตะกั่ว>สังกะสี>เหล็ก>อลูมิเนียม>ทองแดง>แบเรียม>สตรอนเซียม>แคดเมียม>เงิน>โครเมียม>นิกเกิล>โคบอลต์

BCR3 สังกะสี>เหล็ก>ตะกั่ว>แบเรียม>อลูมิเนียม>ทองแดง>สตรอนเซียม>แมงกานีส>แคดเมียม>โครเมียม>นิกเกิล

ตัวอย่างที่ 3

BCR1 สังกะสี>แมงกานีส>แบเรียม>แคดเมียม>ทองแดง>อลูมิเนียม>โครเมียม

BCR2 เหล็ก>ตะกั่ว>สังกะสี>ทองแดง>อลูมิเนียม>แบเรียม>สตรอนเซียม>แมงกานีส>เงิน>แคดเมียม>โครเมียม>โคบอลต์

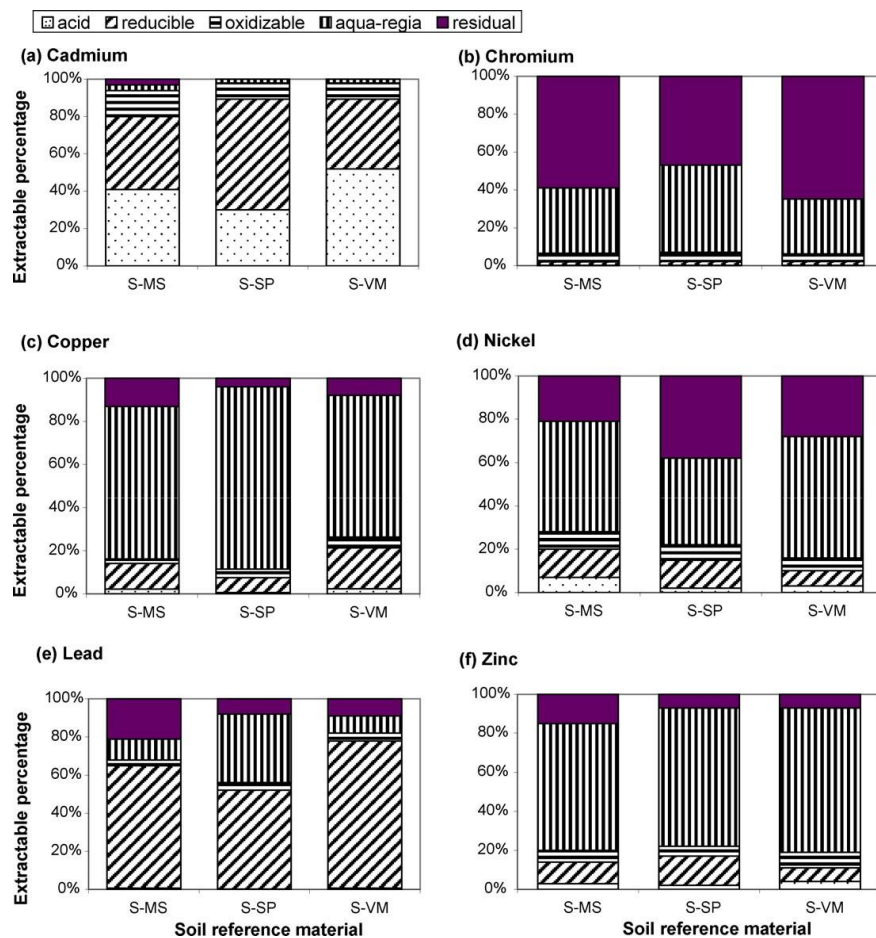
BCR3 เหล็ก>ตะกั่ว>สังกะสี>แบเรียม>ทองแดง>อลูมิเนียม>สตรอนเซียม>แมงกานีส>แคดเมียม>โครเมียม>นิกเกิล>โคบอลต์

ที่มา : Mustafa et al. (2015)

จากตารางจะพบธาตุสังกะสีและเหล็กในปริมาณมากซึ่งเป็นธาตุที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ และจะพบธาตุแคดเมียมพบส่วนใหญ่ในรูปแบบคั่งค้างเป็นรูปแบบที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากจึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้น้อย

Zemberyova, Bartekova, and Hagarova (2006) ได้ทำการศึกษาแบบของโลหะในดินที่แตกต่างกัน โดยแบ่งการสกัดออกเป็นออกเป็น 3 ขั้นตอน คือรูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ โดยความเข้มข้นของโลหะ แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี ได้ผลดังภาพที่ 15 แสดงค่าร้อยละของความเข้มข้นของโลหะแต่ละตัวในรูปแบบต่างๆ โดยแคดเมียมจะพบได้มากในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปแบบที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายถึงร้อยละ

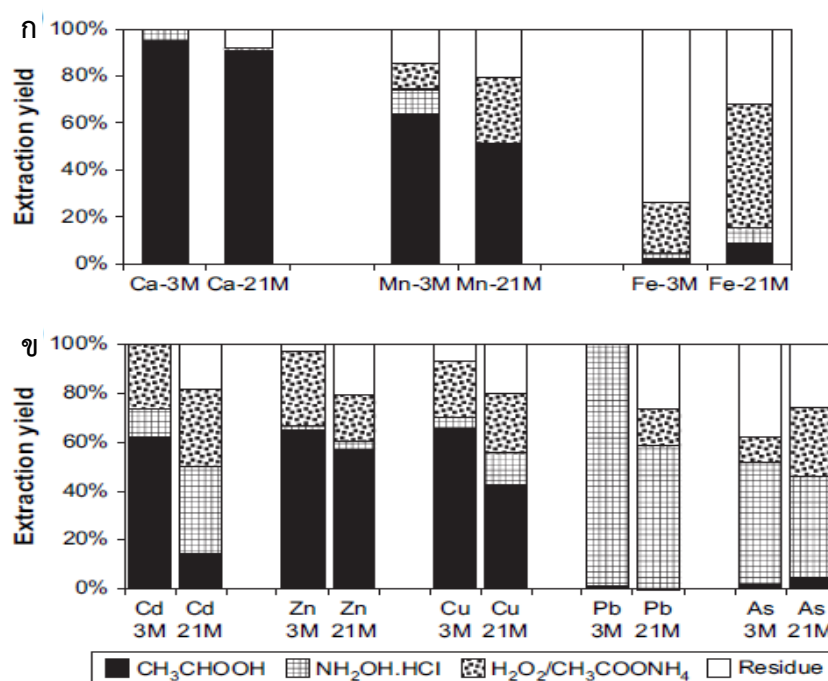
31-53 และรูปสารประกอบออกไซด์ร้อยละ 31-61 ส่วนในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์จะพบได้น้อยเพียงร้อยละ 9-14 และแทบจะไม่พบในรูปแบบคงค้างซึ่งเป็นรูปแบบที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก ในทางตรงกันข้ามโครเมียมสามารถพบได้ในรูปแบบคงค้างถึงร้อยละ 47-65 ทองแดงและนิกเกิลพบได้มากในส่วนของสารสกัดกรดกัดทองร้อยละ 66-85 สามารถจับกับสารฮิวมิกและฮัลไฟต์ในสิ่งแวดล้อมได้ดี ตะกั่วพบได้เล็กน้อยในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และพบมากในรูปสารประกอบออกไซด์ร้อยละ 52-77 สังกะสีพบมากในส่วนของสารสกัดกรดกัดทองร้อยละ 65-74 และร้อยละ 7-15 ในรูปรูปสารประกอบออกไซด์และรูปแบบคงค้าง



ภาพที่ 15 การกระจายของโลหะในดิน 3 ชนิด โดยใช้การสกัดแบบ BCR

ที่มา : Zemberyova et al. (2006)

Pueyo et al. (2008) ได้ทำการศึกษารูปแบบของโลหะในดินด้วยวิธีการสกัดแบบ BCR โดยดินที่ทำการศึกษาคือเป็นดินที่มีการปนเปื้อนการเหมืองแร่ที่ระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือน และ 21 เดือนหลังจากเกิดเหตุปนเปื้อนของประเทศสเปนโดยพบการกระจายตัวของโลหะแคลเซียม เหล็กและแมงกานีสเป็นส่วนใหญ่ ส่วนโลหะสารหนู แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ก็พบได้ในตัวอย่างกากตะกอน และดิน การละลายของธาตุรองที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันนี้สามารถใช้ประโยชน์จากเทคนิคการสกัดแบบ BCR ในการทำนายการเคลื่อนไหวทั้งในระยะสั้นและระยะยาวของธาตุต่างๆได้ ตัวอย่างโดยผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การกระจายของโลหะในตัวอย่างกากตะกอนที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 21 เดือน
ที่มา : Pueyo et al. (2008)

ภาพ ก และ ข จะพบว่าโลหะแต่ละชนิดจะพบการสะสมขึ้นต่างๆ ต่างกัน จึงทำให้สามารถเรียงลำดับความยากง่ายในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและพืชจะนำไปใช้ในอนาคตได้ ผลรวมของเหล็กจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 40 ของรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการเกิดออกซิเดชันในเขตพื้นที่และการละลายที่ดีขึ้นจากการชะด้วยน้ำฝนทำให้เหล็กที่อยู่ในกากตะกอนลดลงได้ ผลรวมของแมงกานีสจะพบมากที่สุดโดยพบถึงร้อยละ 80 โดยพบได้มากในรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้และจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้นอาจเกิดจากการเกิดออกซิเดชันกับซัลไฟด์ทำให้สามารถ

ละลายได้มากขึ้นและสามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย แคลเซียมสามารถพบได้มากประมาณร้อยละ 95 ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าไปสะสมในสิ่งแวดล้อมได้ง่าย แคลเซียม สังกะสี และทองแดงพบส่วนใหญ่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ตะกั่วพบมากในรูปแบบของรูปสารประกอบออกไซด์ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นในรูปแบบรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และรูปแบบคงค้าง แต่สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรด สารหนูพบได้มากในรูปสารประกอบออกไซด์ สารหนูเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะอยู่ในรูปรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์มากขึ้นทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้น จากภาพจะพบได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของโลหะ เกิดสารประกอบเชิงซ้อน หรือสามารถกลับไปรวมอยู่ในผลึกแร่ทำให้ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้น พิษนำไปใช้ประโยชน์ได้ลดลง



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษา เป็นปุ๋ยหมักที่ผลิตจากพื้นที่ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม นำตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานเพื่อนำมาเป็นตัววัดคุณภาพเทียบกับมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การหมักและเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและการสกัดลำดับส่วน และการวิเคราะห์ทางสถิติ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์

สารเคมีและรีเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง บริษัทผู้ผลิต และCAS No. (Chemical Abstracts Service number) แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 7 ตารางที่ 7 รายการสารเคมีที่ใช้และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต	CAS number
กรดอะซิติก (CH_3COOH)	Merck	1.00063.2500
ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$)	Ajax finechem	362-500G
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	Ajax finechem	H8087.1.2500
แอมโมเนียมอะซิเตท ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$)	Merck	A27-500G
กรดไนตริก (HNO_3)	Merck	1.00456.2500
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	Merck	1.00317.2500

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ของบริษัท Perkin Elmer

3.2.2 เครื่องชั่ง (Analytical Balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น AB204

3.2.3 เครื่องเขย่าแนวราบ (Horizontal Shaker)

เครื่องเขย่าแนวราบของบริษัท Gallenkamp สามารถเขย่าได้ 20-400 รอบต่อนาทีและสามารถตั้งอุณหภูมิและเวลาการเขย่าได้

2.4 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

เครื่องหมุนเหวี่ยงรุ่น Rotanta 46R D78532 Tullingen 4810 ของบริษัท Hettich zentrifugen สามารถปรับความเร็วในการหมุนเหวี่ยงได้สูงสุด 4500 รอบต่อนาที และตั้งเวลาได้

3.2.5 ตู้อบ (Dry Oven)

ตู้อบใช้ในการอบตัวอย่างและสารเคมี ของบริษัท Medcenter ยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtungn GmbH MMM-group

3.2.6 เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

เครื่องวัดการนำไฟฟ้า ของบริษัท Sartorius AG Gottingen Germany รุ่น Professional Meter PP-50

3.2.7 ตู้เย็น (Refrigerator)

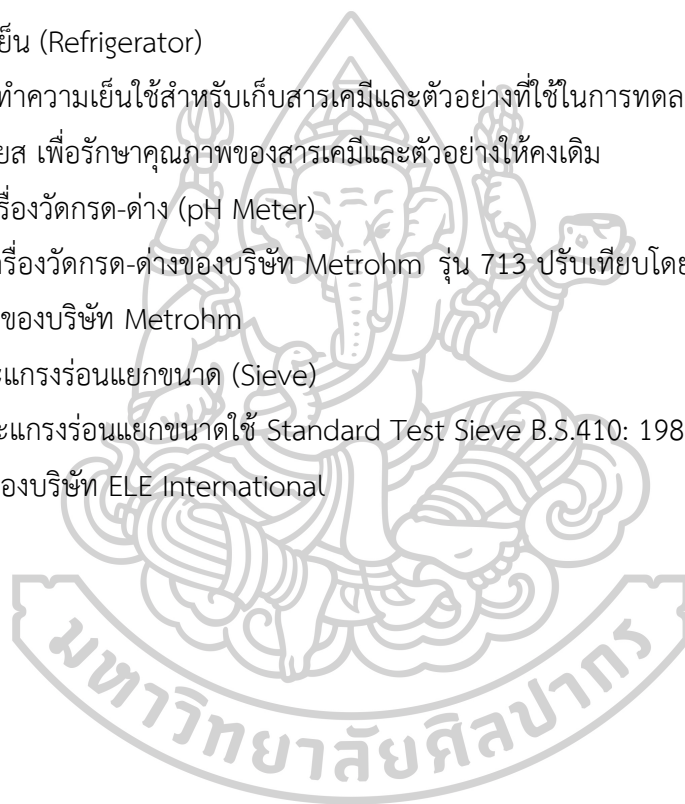
ตู้ทำความเย็นใช้สำหรับเก็บสารเคมีและตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของสารเคมีและตัวอย่างให้คงเดิม

3.2.8 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH Meter)

เครื่องวัดกรด-ด่างของบริษัท Metrohm รุ่น 713 ปรับเทียบโดยใช้ buffer pH 4 และ buffer pH 7 ของบริษัท Metrohm

3.2.9 ตะแกรงร่อนแยกขนาด (Sieve)

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





ภาพที่ 17 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การหมักปุ๋ย เก็บตัวอย่างปุ๋ย และเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

3.3.1.1 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษาเป็นปุ๋ยหมักในโครงการวิจัยเรื่อง ผลกระทบของระดับการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตของพืชบางชนิดของนันทิธีราและคณะ (2554) ทำการหมัก ณ ศูนย์การเรียนรู้ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ส่วนผสมที่ใช้ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประกอบด้วยส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก ประกอบด้วย

ปลาน้ำจืด ร้อยละ 8.98

กากน้ำตาล ร้อยละ 2.99

สับปะรด ร้อยละ 0.30

สารเร่ง พด.2 ร้อยละ 0.01

รำละเอียด ร้อยละ 1.50

ส่วนที่ 2 ส่วนผสมของแห้ง ประกอบด้วย

รำละเอียด ร้อยละ 0.90

กระดุกวัวปน ร้อยละ 1.50

มูลค่างคาว ร้อยละ 0.60

ธาตุอาหารรอง ร้อยละ 0.60

โคโลไมท์ ร้อยละ 0.30

นอกจากส่วนผสมที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วยังมีส่วนผสมของมูลไก่ และขี้แสดนาเกลือมีส่วนผสมและแหล่งที่มาดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ส่วนผสมและปริมาณที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม		ปริมาณ (ร้อยละ)	แหล่งที่มา	อายุส่วนผสม
น้ำหมัก	ปลาน้ำจืด	8.98	กลุ่มเกษตรกรอินทรีย์ ตำบลบางช้าง อำเภอบางช้าง จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	กากน้ำตาล	2.99		
	สับปะรด	0.30		
	สารเร่ง พด.2	0.01		
	รำละเอียด	1.50		

ตารางที่ 8 ส่วนผสมและปริมาณที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก (ต่อ)

ส่วนผสม		ปริมาณ (ร้อยละ)	แหล่งที่มา	อายุส่วนผสม
ของแห้ง	กระดูกวัวป่น	1.50	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ ตำบลบางช้าง อำเภอบางช้าง จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	รำละเอียด	0.90		
	มูลค่างคว	0.60		
	ธาตุอาหารรอง (Mg, Ca และ Fe)	0.60		
	โดโลไมท์	0.30		
มูลไก่		76.63	วัดไร่ขิง ตำบลไร่ขิง อำเภอบางช้าง จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
ซีแตดนาเกลือ		5.69	นาเกลือ จังหวัดสมุทรสาคร	2 เดือน

ขั้นตอนการทำปุ๋ยหมักมูลไก่ เริ่มจากนำมูลไก่มาใส่ในเครื่องบดผสม เติมน้ำลงไป จากนั้นผสมให้เข้ากัน โดยให้ความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 จากนั้นใส่ซีแตดนาเกลือ ตามด้วยน้ำหมักประมาณ 10 ลิตร และของแห้งตามปริมาณที่กำหนดไว้ คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำส่วนผสมที่ได้มาบรรจุใส่ในกระสอบปุ๋ย กระสอบละ 15 กิโลกรัม รัดปากกระสอบ และหมักปุ๋ยจนครบระยะเวลาที่กำหนด

3.3.1.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างหมักปุ๋ย

ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักแบบสุ่มตัวอย่างจากตรงกึ่งกลางกระสอบเพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่าง ในการเก็บตัวอย่างจะมีการวัดอุณหภูมิของปุ๋ยหมัก และบันทึกลักษณะต่างๆของปุ๋ยหมักในแต่ละครั้งที่เก็บ เก็บตัวอย่างกระสอบละ 200 กรัม ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วันของการหมัก

3.3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

เมื่อได้ตัวอย่างปุ๋ยหมักตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำตัวอย่างมาทำให้แห้งในห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ทำการคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุไม้คั้น และโลหะอื่นๆ ออก จากนั้นนำมาคัดแยกขนาด โดยนำมาร่อนผ่านตระแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำปุ๋ยที่ผ่านกระบวนการข้างต้นดังกล่าวนี้ มาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและการสกัดลำดับส่วนเพื่อหารูปแบบของสังกะสี และเหล็กต่อไป

3.3.2 วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานนี้ จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังนี้

1. วิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature)

วัดอุณหภูมิในการเก็บตัวอย่างทุกครั้งโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ โดยวัดที่กึ่งกลางกระสอบของตัวอย่าง ทำ 3 ซ้ำ

2. วิเคราะห์ความชื้น (Moisture content)

การวิเคราะห์ความชื้นเป็นการหาค่าความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบกับหลังอบ โดยชั่งตัวอย่างปุ๋ยหมัก 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนัก หลังจากนั้นนำตัวอย่างใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบครั้งที่ 1 จากนั้นนำตัวอย่างไปอบซ้ำอีกครั้ง นำไปใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบครั้งที่ 2 ทำซ้ำจนน้ำหนักคงที่หรือค่าความแตกต่างไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ คำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ}} \times 100 \quad (5)$$

3. วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ชั่งตัวอย่างปุ๋ย 2 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออน นำไปเขย่าเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องวัดกรด-ด่าง จดบันทึกค่าที่อ่านได้ ทิ้งตัวอย่างปุ๋ยไว้อีก 1 ชั่วโมง นำมาวัดซ้ำอีกครั้ง ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ

4. วิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

การหาปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน สามารถหาได้จากการหาค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดหารด้วยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดดังสมการที่ 2 นำ boat มาเผาด้วยเครื่อง Total organic carbon analyzer ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส นำไปไว้ในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำอีกครั้งจนน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ชั่งตัวอย่างปุ๋ย 1 กรัม ใส่ boat เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้เทียบกับค่ามาตรฐานจะเป็นปริมาณคาร์บอนทั้งหมด การวิเคราะห์ไนโตรเจนจะใช้วิธี Kjeldahl method ของ AOAC Official Method 955.04 นำค่าทั้ง 2 มาคำนวณดังสมการที่ 6

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน} = \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (mg/g compost)}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/g compost)}} \quad (6)$$

3.3.3 เทคนิคการสกัดด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR)

วิธีวิเคราะห์โลหะด้วยวิธี BCR แบ่งโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็งดังภาพที่ 12

1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

ชั่งปุ๋ย 1 กรัม เติมสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.11 โมล/ลิตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส นำไปเซนต์พิวจ์ที่ 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที เก็บสารละลายใสเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะ (หากไม่วิเคราะห์ทันทีต้องเก็บรักษาด้วยการปรับด้วยกรด HNO_3 ให้มีความเป็นกรด-ด่าง < 2) ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (DI) 20 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงซ้ำอีกครั้ง เทน้ำ DI ที่

2. รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

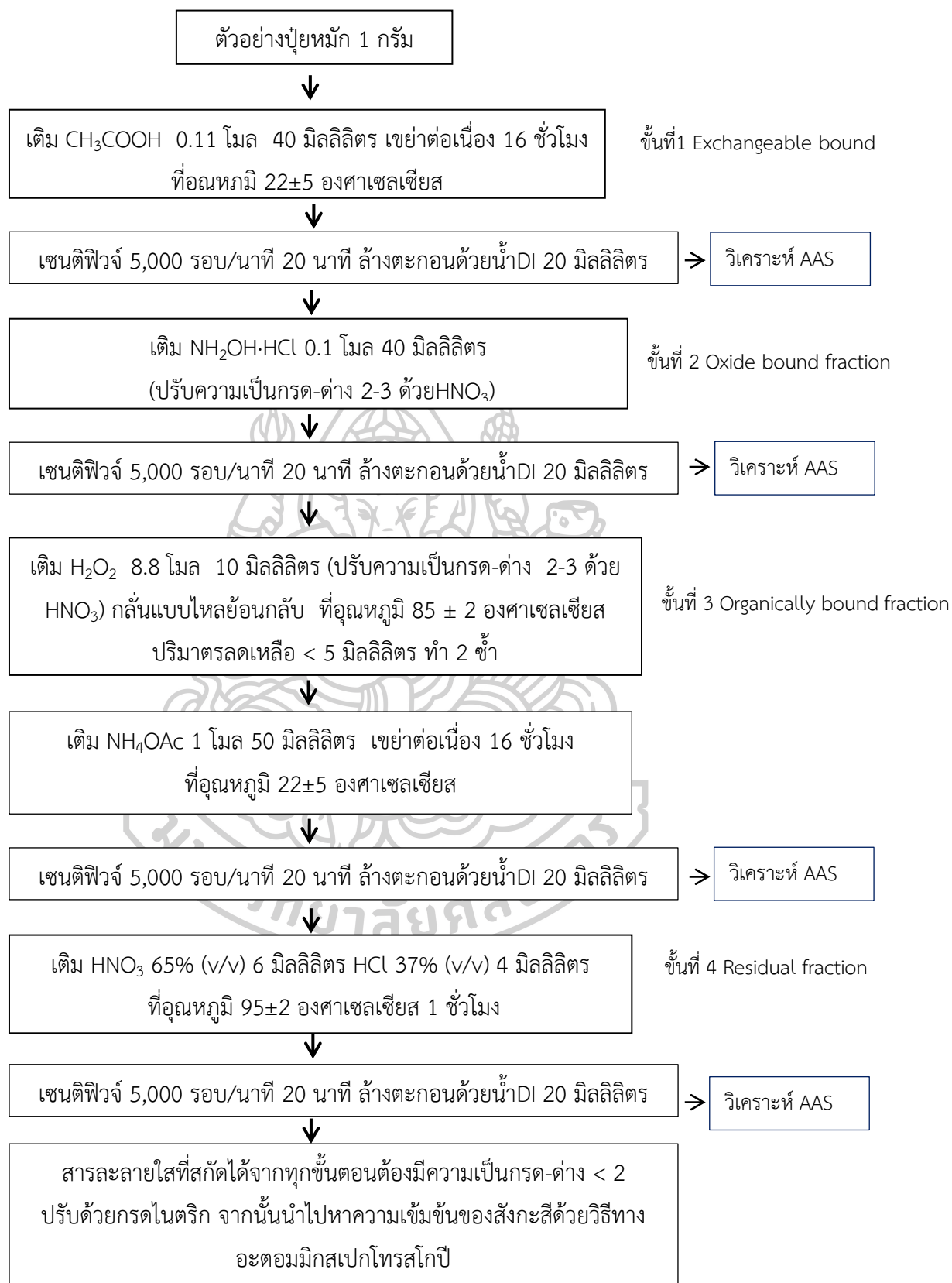
รูปที่เกิดสารประกอบออกไซด์สกัดโดยใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์คลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) 0.1 โมล ปริมาณ 40 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 2-3 ด้วย กรด HNO_3 เขย่าอย่างต่อเนื่อง 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส แยกสารละลายส่วนใสออกมาเก็บเพื่อการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (DI) 20 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงซ้ำอีกครั้ง เทน้ำ DI ที่

3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์สกัดโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 8.8 โมล ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 2-3 ด้วยกรด HNO_3 เขย่าเป็นครั้งคราวทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ลดปริมาตรสารละลายให้น้อยกว่า 5 มิลลิลิตร ด้วยการกลั่นแบบไหลย้อนกลับที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส แล้วกลั่นแบบเดิมอีก 1 รอบให้ปริมาตรสารละลายให้น้อยกว่า 5 มิลลิลิตร เติม NH_4OAc 1 โมล ปริมาณ 50 มิลลิลิตร (ปรับความเป็นกรด-ด่าง < 2 ด้วยกรด HNO_3) เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วแยกสารละลายส่วนใสออกมาเก็บเพื่อวิเคราะห์ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน (DI) 20 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงซ้ำอีกครั้ง เทน้ำ DI ที่

4. รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)

เติมกรด HNO_3 65% (v/v) ปริมาณ 6 มิลลิลิตร และ HCl 37% (v/v) 4 มิลลิลิตร สกัดแบบไหลย้อนกลับที่อุณหภูมิ 95 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เขย่าเป็นครั้งคราว ทิ้งให้เย็นแล้วแยกสารละลายส่วนใสออกมาเก็บเพื่อวิเคราะห์



ภาพที่ 18 ลำดับขั้นตอนการสกัดแบบ BCR

3.3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

นำสารละลายที่ได้จากการสกัดในแต่ละชั้นมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.4 การแปลผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Statistical Package for Social Science (SPSS)

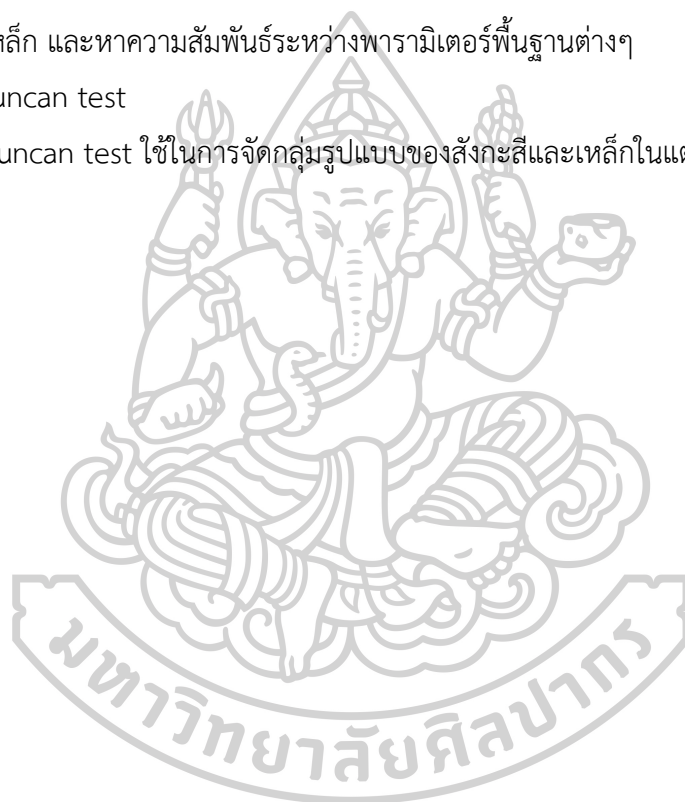
Version 23

3.4.1 Correlations test

Correlations test ใช้ในการแปลผลเพื่อหาความสัมพันธ์ทางสถิติ ระหว่างรูปแบบของสังกะสี และเหล็ก และหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ

3.4.2 Duncan test

Duncan test ใช้ในการจัดกลุ่มรูปแบบของสังกะสีและเหล็กในแต่ละรูปแบบ



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบของโลหะเหล็กและสังกะสีในปุยหมักมูลไก่ที่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น BCR (Wada & Wada, 1999) โดยแบ่งรูปแบบออกเป็น 4 รูปแบบดังนี้ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อน อินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง ทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทั้งทางด้านกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) จากนั้นหาความสัมพันธ์ของแต่ละรูปแบบกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนอิทธิพลของกระบวนการหมักที่มีต่อรูปแบบที่เกิดขึ้น ณ เวลาการหมักต่างๆ อันนำไปสู่การใช้ปุ๋ยที่เหมาะสมต่อไป มีรายละเอียดผลการศึกษาต่อไปนี้

4.1 การแบ่งระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นดัชนีที่นิยมใช้ในการตรวจสอบการเจริญเต็มที่และคุณภาพของปุ๋ยหมัก (Bernal et al., 2009; Jiwan Singh & Kalamdhad, 2013; Tuomela et al., 2000; Zeng et al., 2009) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกษตรกรสามารถนำมาใช้ในการเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ได้ รวมไปถึงการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานทั้งทางกายภาพและทางเคมีตลอดระยะเวลาการหมักที่มีผลต่อคุณภาพของปุ๋ย สามารถนำมาแบ่งระยะของปุ๋ยหมักได้ดังนี้

1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสม เป็นวันแรกของการหมักปุ๋ย (วันที่ 0) อุณหภูมิของปุ๋ยมีค่า 32.7 องศาเซลเซียสซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล มองเห็นวัสดุที่นำมาใช้ในการหมักได้อย่างชัดเจน มีกลิ่นของส่วนผสมและกลิ่นแอมโมเนียรุนแรง ปุ๋ยมีความชื้นค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 47.4 ซึ่งเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40- 60 (ธงชัย, 2546) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.1 (ตารางที่ 9) ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ควรมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 – 9.0 (Bernal et al., 2009; Bertoldi et al., 1983) มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 13.4 เดซิซีเมน/เมตร ที่ค่อนข้างสูงจากองค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นส่วนผสม

ตารางที่ 9 คุณภาพปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)														
		ระยะเริ่มผสม	ระยะอุณหภูมิสูง							ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่						
			0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
อุณหภูมิ	ไม่ได้กำหนด	31.5	53.7	38.7	37.3	35.0	38.7	37.3	30.3	28.8	29.2	29.2	27.0	28.7	28.0	
สี	ไม่ได้กำหนด	สีน้ำตาล							สีน้ำตาลออกเทา							
กลิ่น	ไม่ได้กำหนด	กลิ่นวัสดุส่วนผสมตั้งต้น	กลิ่นแอมโมเนียลดลง							กลิ่นแอมโมเนียเล็กน้อย						
ความชื้น	≤ 35 % โดยน้ำหนัก	47.4	35.4	32.0	27.3	24.3	24.9	19.1	16.2	15.8	15.7	14.6	13.8	14.3	12.6	
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5.5-8.5	7.1	8.3	8.3	7.9	7.6	7.8	7.6	7.1	7.6	7.5	7.4	7.2	7.3	7.3	
ค่าการนำไฟฟ้า	≤ 6 เดซิซีเมน/ เมตร	13.4	18.5	17.8	12.3	14.7	14.3	17.3	17.7	17.2	16.9	17.3	16.6	15.4	15.6	
ไนโตรเจน (total N)	≥ 1.0 % โดยน้ำหนัก	3.3	2.9	3.1	2.8	3.1	3.3	3.2	3.2	2.8	3.1	2.8	2.9	2.8	3.0	

ตารางที่ 9 คุณภาพปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)														
		ระยะเริ่มผสม	ระยะอุณหภูมิสูง							ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่						
			0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก	1.1	0.8	1.2	1.1	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	0.7	0.6	1.0	0.7	1.0	
โพแทสเซียม (K ₂ O)	≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	≥ 30 % โดยน้ำหนัก	74.77	57.31	52.34	44.57	51.34	47.31	49.60	47.58	46.96	47.36	45.73	41.79	41.66	43.51	
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	≤ 20 : 1	15.1:1	13.0:1	11.0:1	10.4:1	10.5:1	9.2:1	9.9:1	9.4:1	10.7:1	9.6:1	10.3:1	9.3:1	9.6:1	9.3:1	

ที่มา: จุฑาวรรณ สุคนธนิษฐ์ (2557)

หมายเหตุ โดย ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

* ขนาดของปุ๋ย ไม่เกิน 12.5x 12.5 มิลลิเมตร

** ปริมาณหินและกรวด พบว่ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน 5 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

*** ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท (mercury) พบว่ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน 50, 5, 300, 500, 500 และ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

**** พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นไม่พบ

2. ระยะเวลาอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะเวลาอุณหภูมิสูงพบในช่วงวันที่ 1-41 เนื่องจากการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากต่างๆ เช่น ลิกนิน และเซลลูโลส เป็นต้น แล้วปลดปล่อยความร้อนออกมา (Bernal et al., 2009; Sarkar, Pal, & Chanda, 2016) ทำให้อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 3 จากนั้นอุณหภูมิจะลดต่ำลง โดยอุณหภูมิที่พบในระยะนี้มีค่าอยู่ในช่วง 35.0-53.7 องศาเซลเซียส และเป็นอุณหภูมิที่พบได้ทั่วไปในปุ๋ยหมักในเขตร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส (Lu et al., 2014; Jiwan Singh & Kalamdhad, 2013) ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล มีลักษณะที่จับตัวกันเป็นก้อนและแห้ง กลิ่นฉุนคล้ายแอมโมเนียลดลงจากวันเริ่มผสม รวมไปถึงความชื้นที่ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 19.1-35.4 จากการที่จุลินทรีย์ใช้ในกิจกรรมย่อยสลายสารอินทรีย์ตลอดจนอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วของปุ๋ยหมักส่งผลให้ความชื้นในปุ๋ยหมักลดลง มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7.1-8.3 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี (Ahmed et al., 2007; Hosseini & Aziz, 2013) และมีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างแปรปรวนอยู่ในช่วง 12.3 -18.5 เดซิซีเมน/เมตร จากกระบวนการหมักที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปลดปล่อยออกมาในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Jiwan Singh & Kalamdhad, 2013; Wang et al., 2016)

3. ระยะเวลาเจริญเต็มที่ (Maturation phase)

ระยะเวลาเจริญเต็มที่คือตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป เป็นระยะที่ปุ๋ยมีกระบวนการหมักที่เสร็จสมบูรณ์ ปุ๋ยเย็นตัวลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ระยะนี้ปุ๋ยมีอุณหภูมิเย็นลงเป็นระยะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ทางการเกษตร โดยในระหว่างกระบวนการหมักจุลินทรีย์จะเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุบางส่วนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ฮิวมัส ธาตุอาหารและความร้อน เมื่อกระบวนการหมักเข้าสู่ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่จุลินทรีย์ในกลุ่มอุณหภูมิสูงจะมีความทำงานลดลง และจุลินทรีย์ในกลุ่มอุณหภูมิต่ำปานกลางจะกลับมาย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างเสถียรเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ที่เหลืออยู่อีกครั้ง (Bernal et al., 2009; Tuomela et al., 2000) ทำให้ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิลดต่ำลงมาใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27.0-30.3 องศาเซลเซียส ปุ๋ยมีลักษณะแห้งและร่วน มองเห็นวัสดุอื่นไม่ชัดเนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุบางส่วนถูกย่อยสลายหมดไปแต่ยังคงเห็นส่วนผสมที่เป็นแกลบ (ภาพที่ 19) ปุ๋ยหมักในระยะนี้มีกลิ่นเล็กน้อยจนถึงไม่ได้กลิ่น ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 12.6-16.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7.3-7.6 ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่เหมาะแก่การจำหน่ายที่กำหนดไว้ให้ เช่นความชื้นไม่เกินร้อยละ 35 และค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.5-8.5 (ตารางที่ 9) ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15.4 -17.3 เดซิซีเมน/เมตร ซึ่งนอกจากจะหมายถึงปุ๋ยหมักมีธาตุอาหารสูงแล้วอาจมาจากโซเดียมไอออนที่มีอยู่



ภาพที่ 19 ลักษณะปุ๋ยหมักมูลไก่

(ก) วันเริ่มผสม (0 วัน) (ข) วันสุดท้ายของการหมัก (119 วัน)

ในซีเมนต์นาเกลือ ส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่หากใช้ปุ๋ยในปริมาณที่มากเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อทำให้ดินเค็มได้

4.2 ปริมาณธาตุอาหารหลัก

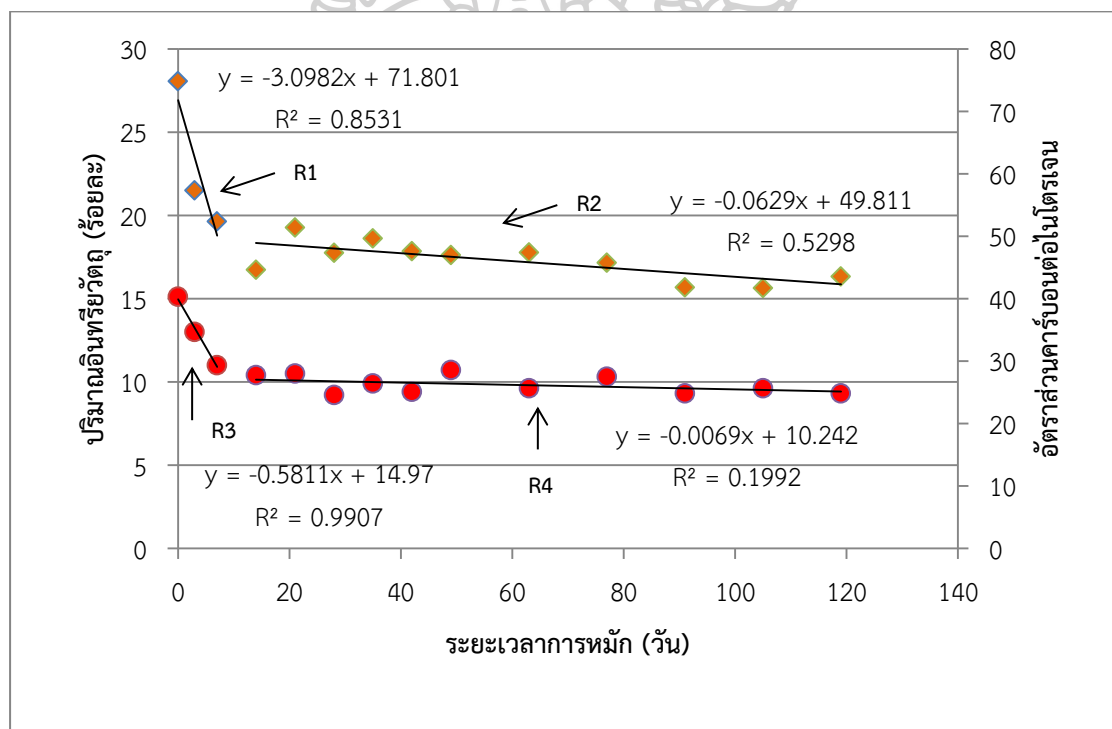
ธาตุอาหารหลักเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก พืชต้องการในปริมาณที่มากและไม่สามารถขาดได้ กรมวิชาการเกษตร (2548) จึงได้กำหนดปริมาณของปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักไว้ที่ไม่น้อยกว่า 1.0, 0.5 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยตั้งแต่ระยะเริ่มผสมจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมักมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ และผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 1 โดยปริมาณธาตุไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 2.8 - 3.3 โดยน้ำหนัก ฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 0.6 - 1.2 โดยน้ำหนัก และโพแทสเซียมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.7 - 1.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความเกี่ยวข้องกักระดับความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุอาหารโดยถ้ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากจะส่งเสริมให้ธาตุอาหารบางธาตุอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ง่าย (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) เช่น ตรึงจุลธาตุอาหาร (Jiwan Singh & Kalamdhad, 2013) ในระยะเริ่มผสมของการหมักปุ๋ยปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าร้อยละ 74.77 (ตารางที่ 9) ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในส่วนผสมที่เป็นเศษพืช และมูลสัตว์ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนซึ่งเป็นดัชนีวัดความสมบูรณ์การย่อยสลายของปุ๋ยหมัก (Brewer & Sullivan, 2003; ยงยุทธ โอสภสภ et al., 2551) ในระยะเริ่มผสม

จะมีค่าเท่ากับ 15.1 จากนั้นกระบวนการหมักจะทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนต่อไนโตรเจน ลดต่ำลงโดยระยะอุณหภูมิสูงมีค่าอินทรีย์วัตถุลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 44.57-57.31 และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 9.2-13.0 เมื่อเข้าสู่ระยะสุดท้ายที่เป็นระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเหลือเพียงร้อยละ 41.7- 47.6 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 9.3-10.7 แต่ยังผ่านมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่กำหนดให้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยกว่า 20

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งภาพที่ 20 พบว่าวันที่ 0 -7 ซึ่งเป็นระยะแรกของการหมักในช่วงอุณหภูมิสูงการย่อยสลายปริมาณอินทรีย์วัตถุจะลดลงอย่างรวดเร็วในอัตราร้อยละ 3.0982 ต่อวัน จากนั้นในช่วงวันที่ 14-119 ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะลดลงอย่างช้าๆ ในอัตราร้อยละ 0.0629 ต่อวัน ดังตารางที่ 10 โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ที่มีอัตราการลดลงในช่วงวันที่ 0- 7 เป็น 0.5811 ต่อวันและในช่วงวันที่ 14-119 จะลดลงน้อยมากในอัตราเพียง 0.0069 ต่อวัน



◆ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ) ● อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.643$ และ $r = -0.595$, $p < 0.01$ ตามลำดับ)

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	อัตราการการเปลี่ยนแปลง (ต่อวัน)	R ²
อัตราการลดลงของอินทรีย์วัตถุ (R1) (ระหว่างวันที่ 0 – 7)	-3.0982	0.8531
อัตราการลดลงของอินทรีย์วัตถุ (R2) (ระหว่างวันที่ 14 – 119)	-0.0629	0.5298
อัตราการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (R3) (ระหว่างวันที่ 0 – 7)	-0.5811	0.9907
อัตราการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (R4) (ระหว่างวันที่ 14 – 119)	-0.0069	0.1992

4.4 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่ปลดปล่อยออกจากปุ๋ยหมักด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ธาตุเหล็กเป็นธาตุที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตซึ่งมักจะบริโภคได้ในปริมาณมาก แตกต่างจากสังกะสีที่สิ่งมีชีวิตต้องการในปริมาณที่น้อยกว่าและหากมีมากเกินไปจะก่อให้เกิดโทษได้ ทำให้พบเหล็กในปุ๋ยหมักที่มาจากวัสดุอินทรีย์ในปริมาณที่มากกว่าสังกะสีมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.18-10.62 มิลลิกรัมต่อกรัม และสังกะสีมีปริมาณรวมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.64-1.69 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังไม่มีกำหนดค่ามาตรฐานของเหล็กในปุ๋ยหมักเพื่อการนำไปใช้ทางการเกษตร ขณะที่ในภาคตะกอนกำหนดไว้เพื่อการนำไปใช้ไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อกรัม (กรมวิชาการเกษตร, 2559) จากการศึกษาปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักมูลไก่ได้แก่ เหล็กและสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex และ Zn-Ex) เหล็กและสังกะสีรูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox และ Zn-Ox) เหล็กและสังกะสีรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (Fe-Org และ Zn-Org) และเหล็กและสังกะสีรูปคงค้างของแข็ง (Fe-Res และ Zn-Res) ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นตลอดระยะเวลาการหมัก มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณของเหล็ก และสังกะสีที่พบทั้ง 4 รูปแบบมีความแตกต่างกันเรียงลำดับปริมาณเฉลี่ยจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้

Fe-Res >>> Fe-Ex > Fe-Ox > Fe-Org

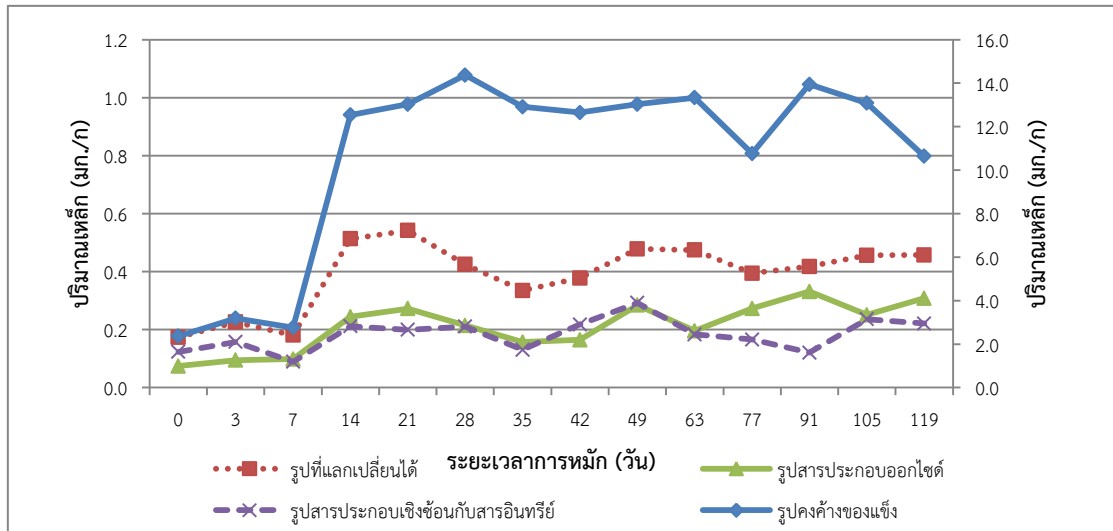
10.6 >>> 0.39 > 0.21 > 0.18 มิลลิกรัม/กรัม

Zn-Res > Zn-Org, Zn-Ex > Zn-Ox

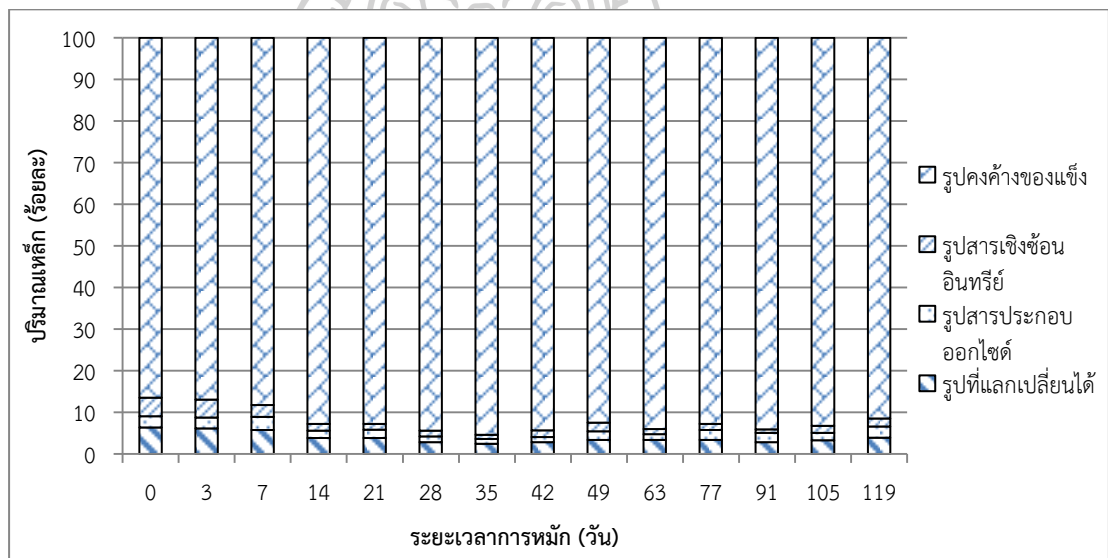
1.69 > 1.34, 1.16 > 0.64 มิลลิกรัม/กรัม

โดยสัดส่วนที่พบของเหล็กจะอยู่ในรูปคั่งค้างของแข็งในตารางที่ 11 อยู่ในช่วงร้อยละ 86.47-95.4 ขณะที่สังกะสีอยู่ในช่วงร้อยละ 21.19-45.12 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่พบมากที่สุดเนื่องจากวัฏจักรอินทรีย์ที่มีธาตุทั้งสองเป็นองค์ประกอบและมักพบรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่เด่นในปุ๋ยหมักประเภทต่างๆ เช่นปุ๋ยหมักขี้เลื่อยและปุ๋ยหมักมูลวัวจากการศึกษาของ J Singh and Kalamdhad (2012) โดยเหล็กจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าสังกะสี (Winter, 1994) ทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรงในรูปคั่งค้างของแข็งเช่น สารประกอบ $Fe(OH)_3(s)$ ที่ค่อนข้างคงตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสังกะสี เหล็กจึงพบในรูปแบบนี้เป็นรูปที่เด่นมีปริมาณมากกว่ารูปแบบอื่นๆ สำหรับสังกะสีจะถูกแทนที่และแลกเปลี่ยนให้ออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าจึงพบในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปสารประกอบออกไซด์ ในปริมาณที่มากกว่าเหล็กดังภาพที่ 21 และ 22 ตารางที่ 11 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	เหล็ก		สังกะสี	
	ความเข้มข้น (มก./ก.)	ช่วง (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ก.)	ช่วง (ร้อยละ)
รูปที่แลกเปลี่ยนได้	0.17-0.48	2.47-6.35	0.63-1.47	21.1-38.4
รูปสารประกอบออกไซด์	0.07-0.31	1.16-3.14	0.33-1.01	8.77-19.1
รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับ สารอินทรีย์	0.08-0.29	0.81-4.50	0.32-2.03	19.6-31.7
รูปคั่งค้างของแข็ง	2.36-14.4	86.5-95.4	0.34-2.22	21.2-45.1

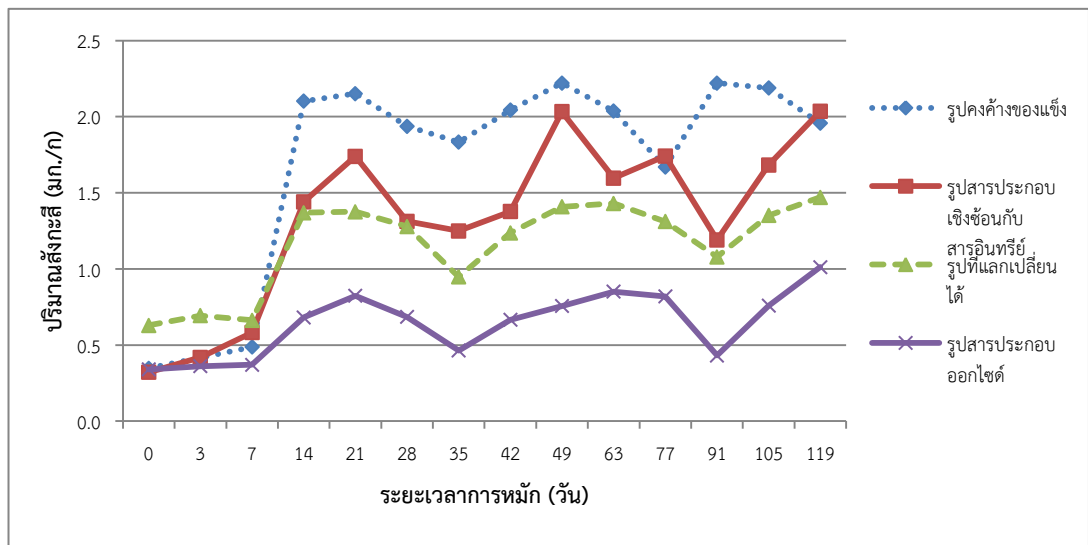


(ก)

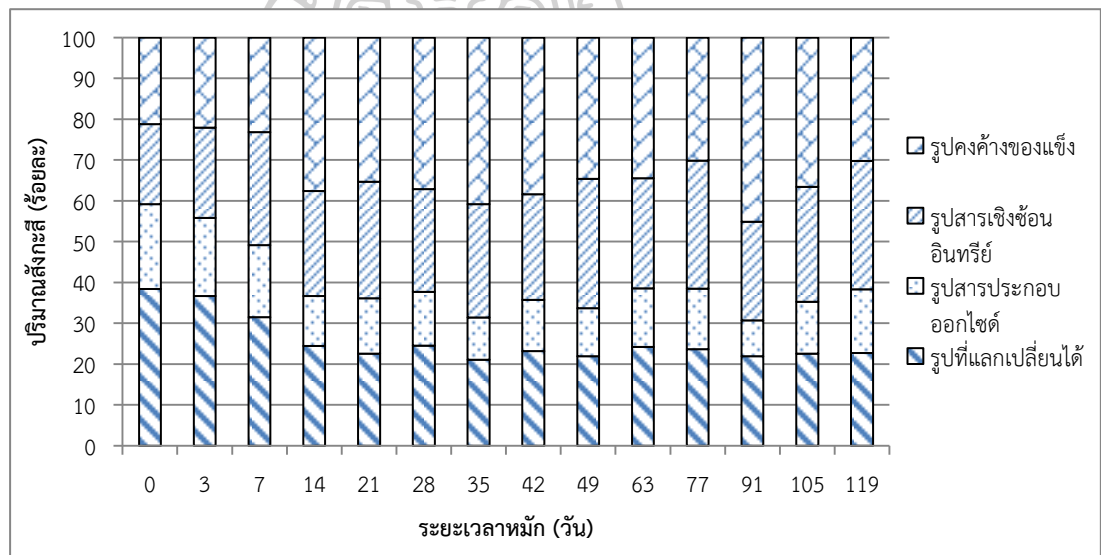


(ข)

ภาพที่ 21 ปริมาณเชื้อรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 ปริมาณสิ่งกะสี้รูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

4.5 การเปรียบเทียบรูปแบบของเหล็กและสิ่งกะสี้ที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมัก

ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสิ่งกะสี้ทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักมูลไก่มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันตลอดระยะเวลาการหมัก สามารถเปรียบเทียบรูปแบบและสัดส่วนเหล็กและสิ่งกะสี้รูปแบบต่างๆ ที่พบได้ดังนี้

4.5.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปแบบของโลหะที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายจะอยู่ในรูปไอออนอิสระ และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Lu et al., 2014; Xuejiang, Ling, Siqing, & Jianfu, 2008) โดยพบว่าทั้งสัดส่วนและปริมาณของเหล็กที่พบในรูปแบบนี้น้อยกว่าสังกะสีมากคิดเป็นร้อยละ 3.87 ของปริมาณเหล็กทั้งหมดและมีปริมาณเฉลี่ยคิดเป็น 0.39 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่มีส่วนสังกะสีคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 25.7 และปริมาณเฉลี่ยคิดเป็น 1.16 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการที่เหล็กที่พบในรูปแบบนี้น้อยกว่าสังกะสีมากเนื่องจากในธรรมชาติเหล็กมักอยู่ในรูป Fe(II) และ Fe(III) (Barber, 1995) โดยรูป Fe(III) ที่อยู่ในรูปของแข็งเป็นรูปที่มีความเสถียรมากที่สุดทำให้เหล็กส่วนใหญ่ชอบอยู่ในรูปของสารประกอบที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็กออกไซด์ซึ่งคงตัวอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง (Hem, 1972) มีค่าคงที่การละลายของ Fe(OH)₃ ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ 2.79×10^{-39} ขณะที่สังกะสีที่พบในธรรมชาติมักอยู่ในรูป Zn(II) (Barber, 1995) มีค่าคงที่การละลายของ Zn(OH)₂ ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ 3×10^{-17} (N C, 2017) อย่างไรก็ตามการหมักมีอิทธิพลต่อการเพิ่มปริมาณของเหล็กและสังกะสีในรูปแบบนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.473$ และ $r = 0.590$, $p < 0.01$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 23 (ก) และ (ข) และภาพที่ 24 แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายวัตถุดิบที่มีจุลธาตุอาหารทั้งสองเป็นองค์ประกอบให้อยู่ในรูปที่พืชพร้อมที่จะนำไปใช้ได้มากขึ้น

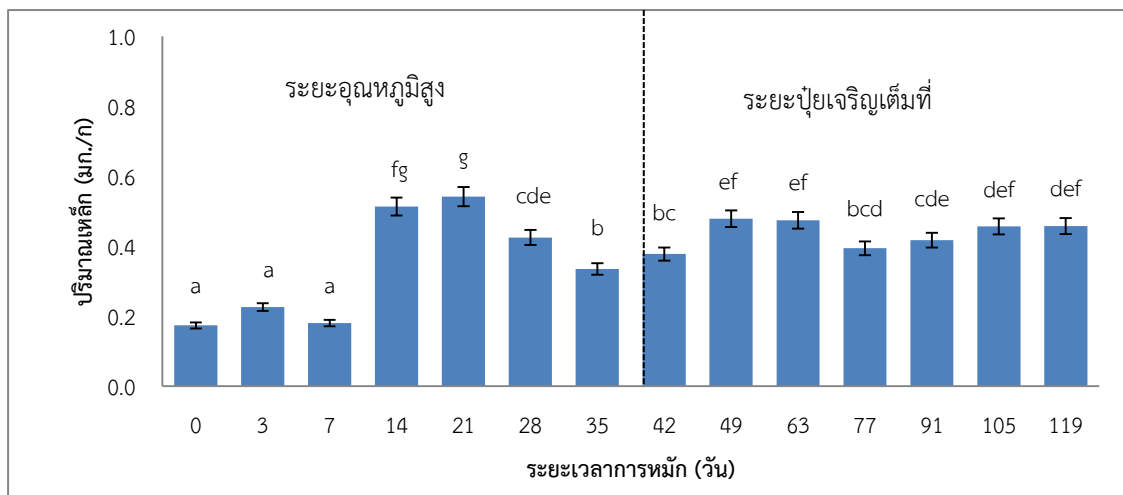
โดยในช่วงแรกของการหมักวันที่ 0 - 7 จะพบปริมาณจุลธาตุอาหารทั้งสองชนิดต่ำมากจากการจัดกลุ่มของ Duncan ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิในปุ๋ยหมักสูงที่สุด เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการย่อยสลายค่อนข้างมากมีการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ลิกนิน และเซลลูโลส เป็นต้น (Sarkar et al., 2016; สมเจต จันทวัฒน์, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, จงรักษ์ จันทรเจริญสุข, วิโรจน์ อัมพิทักษ์, & อัญชลี สุทธิประการ, 2526) จากนั้นเมื่อผ่านช่วงเวลานี้ไป (หลังจากวันที่ 14 เป็นต้นไป) อุณหภูมิของปุ๋ยหมักค่อยๆ ลดต่ำลงขณะที่ปริมาณของเหล็กและสังกะสีจะเพิ่มขึ้น ($r = -0.430$ และ $r = -0.535$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ตารางที่ 12) โดยในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่หลังวันที่ 49 เป็นต้นไปทั้งปริมาณของเหล็กและสังกะสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจัดอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณสูงและสูงที่สุด ทำให้วันที่ 49 เป็นระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการพิจารณานำปุ๋ยหมักไปใช้ให้เกิดประโยชน์จากจุลธาตุอาหารทั้งสองได้มากที่สุดด้วย

นอกจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะสัมพันธ์โดยตรงกับรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของจุลธาตุอาหารทั้งสองชนิดแล้ว การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุที่ลดลงตลอดกระบวนการหมักเช่นเดียวกับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เป็นดัชนีสำคัญในการบ่งบอกการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุล้วนสัมพันธ์ต่อการเพิ่มปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสองนี้ด้วย (เหล็ก $r = -0.661$ และ -0.639 ตามลำดับ: สังกะสี $r = -0.673$ และ -0.664 ตามลำดับ, $p < 0.01$ ตารางที่ 4)

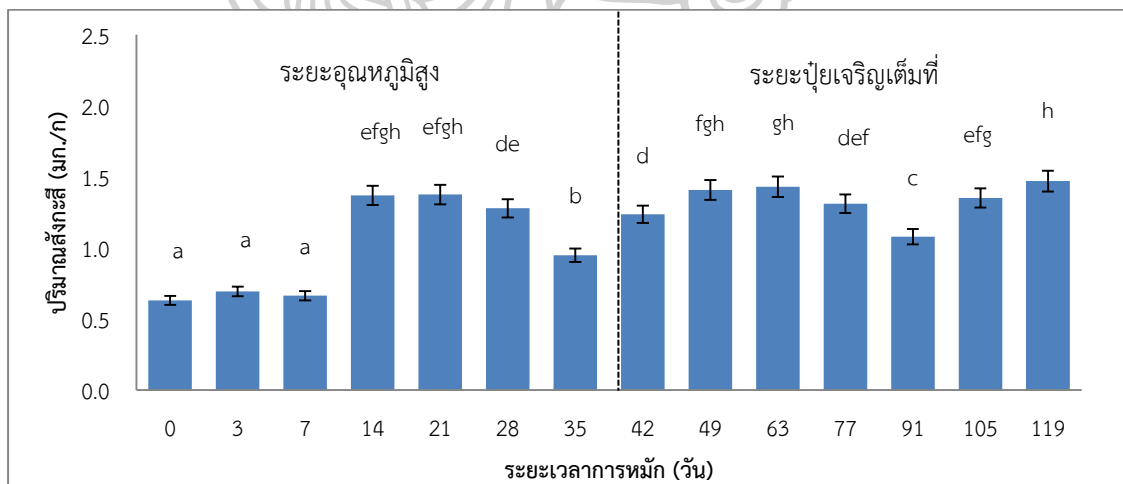
เมื่อนำปัจจัยจากตารางที่ 12 ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอิทธิพลต่อรูปที่แลกเปลี่ยนได้มาวิเคราะห์หาสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้วิธี stepwise selection พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของเหล็กและสังกะสี โดยอธิบายได้ถึงร้อยละ 51 และ 52 ตามลำดับ มีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Fe-Ex} = 0.885 - 0.010\text{OM} \quad R^2 = 0.505 \quad n = 14 \quad (7)$$

$$\text{Zn-Ex} = 2.444 - 0.026\text{OM} \quad R^2 = 0.521 \quad n = 14 \quad (8)$$

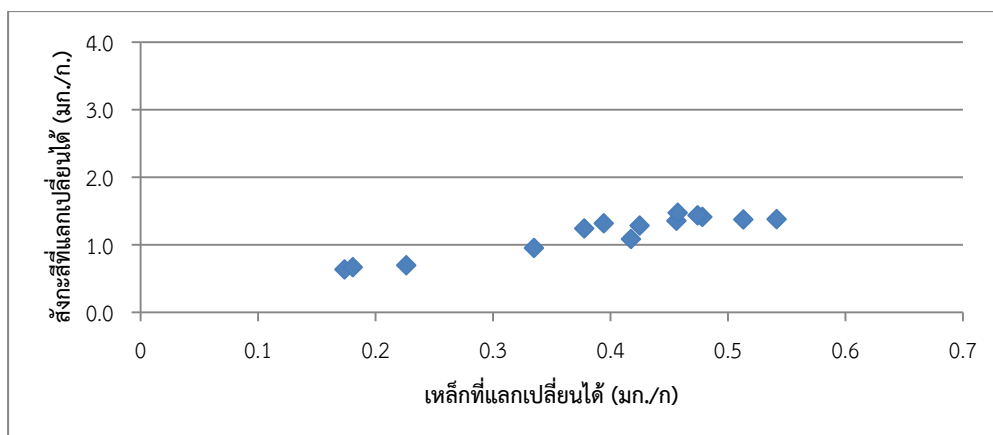


(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = 0.917$, $p < 0.01$)

ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณ อินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้

พารามิเตอร์	ระยะเวลาหมัก	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เหล็ก	0.473**	-0.430**	-0.661**	-0.639**
สังกะสี	0.590**	-0.535**	-0.673**	-0.664**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

4.5.2 รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

รูปสารประกอบออกไซด์หรือที่เรียกว่ารูปที่ถูกรีดิวซ์ (Reducible fraction) (Cuong & Obbard, 2006; Tokalioglu, Kartal, & Elci, 2000; Walter et al., 2006) เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์เปลี่ยนโลหะในกระบวนการรีดักชันโดยการรับอิเล็กตรอน ให้อยู่ในรูปไอออน เช่น สารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ (ทววงมหาวิทยาลัย, 2540) ให้อยู่ในรูป Fe^{2+} และ Zn^{2+} เนื่องจากเหล็กมีสารประกอบที่มีเลขออกซิเดชันที่สูงกว่าได้แก่ Fe(III) รูปแบบที่ปรากฏของเหล็กส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ที่คงตัวและเป็นของแข็งมากกว่ารูปที่ถูกรีดิวซ์ได้ (ภาพที่ 4) จึงทำให้พบเหล็กในรูปแบบนี้น้อย โดยมีสัดส่วนของเหล็กคิดเป็นร้อยละ 2.03 ของปริมาณเหล็กทั้งหมด มีปริมาณเฉลี่ยคิดเป็น 0.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่มีส่วนของสังกะสีในรูปแบบนี้คิดเป็นร้อยละ 14.1 ซึ่งมากกว่าเหล็กมาก โดยมีปริมาณเฉลี่ยของสังกะสีคิดเป็น 0.64 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ เช่นเดียวกับการหมักปุ๋ยจากกากตะกอนของ Walter et al. (2006) ที่พบว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อโลหะทั้งสองโดยพบเหล็กออกไซด์ร้อยละ 0.42 ของปริมาณ

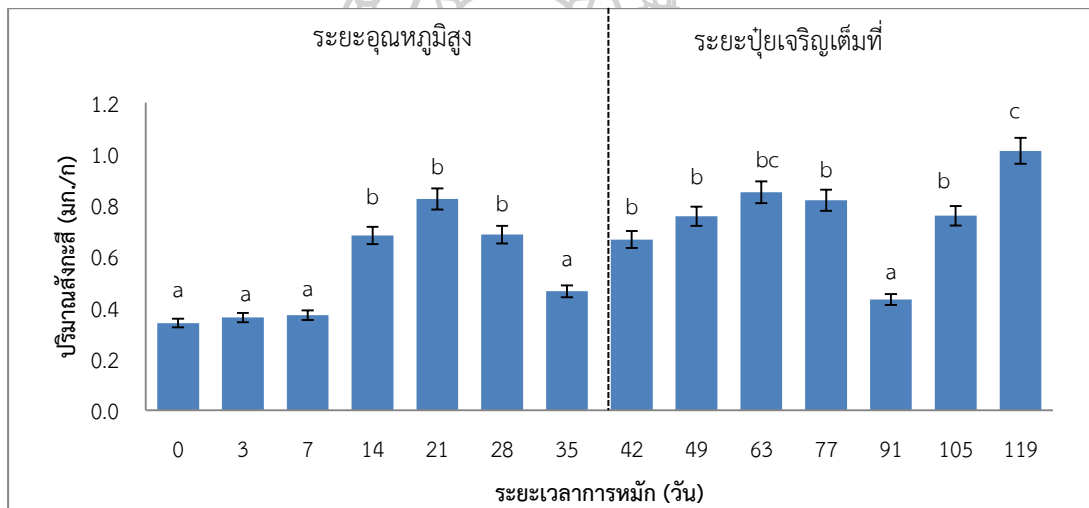
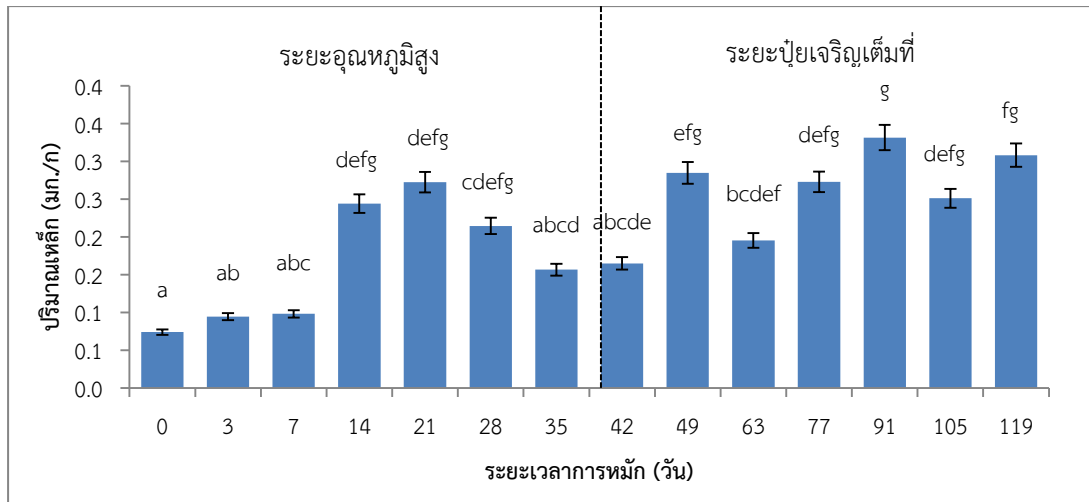
เหล็กทั้งหมด แต่พบสังกะสีออกไซด์ถึงร้อยละ 8.67 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโลหะทั้งสองตลอดระยะเวลาการหมักดังภาพที่ 25 (ก) และ (ข)

อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของรูปแบบนี้ยังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.648$, $p < 0.01$ ดังภาพที่ 26) ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาของการหมักโดยมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.609$ และ $r = 0.563$ ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยการจัดกลุ่ม Duncan พบว่าระยะแรกของการหมักวันที่ 0 - 7 ซึ่งอยู่ในกลุ่มอุณหภูมิสูงจะพบปริมาณจุลธาตุอาหารทั้งสองชนิดน้อยที่สุด จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่คือหลังจากวันที่ 14 เป็นต้นไปปริมาณของเหล็กและสังกะสีจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น โดยในระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (หลังวันที่ 42 เป็นต้นไป) วันที่ 49-63 และ 105-119 จะอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณมากถึงมากที่สุด สอดคล้องกับดัชนีการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ การลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ล้วนสัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสองนี้ด้วย (เหล็ก $r = -0.548$ และ -0.463 ตามลำดับ; สังกะสี $r = -0.475$ และ -0.484 ตามลำดับ, $p < 0.01$ ตารางที่ 5)

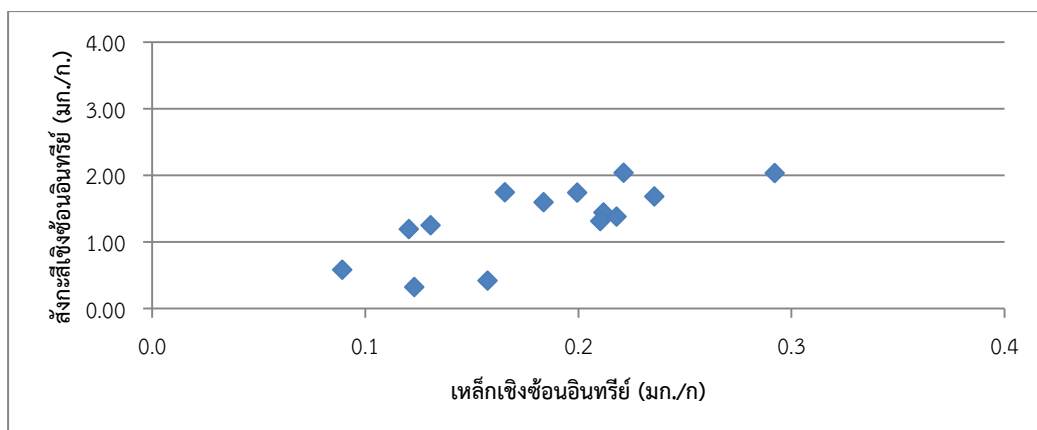
เมื่อนำปัจจัยจากตารางที่ 13 ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอิทธิพลต่อรูปออกไซด์มาวิเคราะห์หาสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้วิธี stepwise selection พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นปัจจัยที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบออกไซด์ของเหล็กได้ร้อยละ 57 และระยะเวลาการหมักสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีได้ร้อยละ 37 มีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Fe-Ox} = 0.579 - 0.007\text{OM} \quad R^2 = 0.567 \quad n = 14 \quad (9)$$

$$\text{Zn-Ox} = 0.489 - 0.003\text{Time} \quad R^2 = 0.368 \quad n = 14 \quad (10)$$



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เถ้า (ข) ลิกนิน



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = 0.648$, $p < 0.01$)

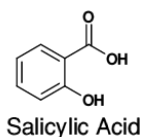
ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีออกไซด์

พารามิเตอร์	ระยะเวลาหมัก	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เหล็ก	0.609**	-0.494**	-0.548**	-0.463**
สังกะสี	0.563**	-0.468**	-0.475**	-0.484**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

4.5.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์หรือโดยทั่วไปเรียกว่ารูปที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidable fraction) เป็นรูปที่โลหะจับกับสารอินทรีย์และซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติและสามารถถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดซ์ (Long, Hu, Fang, Wu, & Shen, 2009; Keivan Nemat, Bakar, Sobhanzadeh, & Abas, 2009) โดยพบว่าความชอบของสังกะสีที่ชอบเกิดสารประกอบกับลิแกนด์อินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นผู้ใช้ให้อิเล็กตรอนมากกว่าเหล็ก เช่น ตัวอย่างลิแกนด์ salicylate ที่พบมากมายในโครงสร้างกรดฮิวมิกมีลำดับความชอบในการเกิดปฏิกิริยาเรียงตามลำดับดังนี้



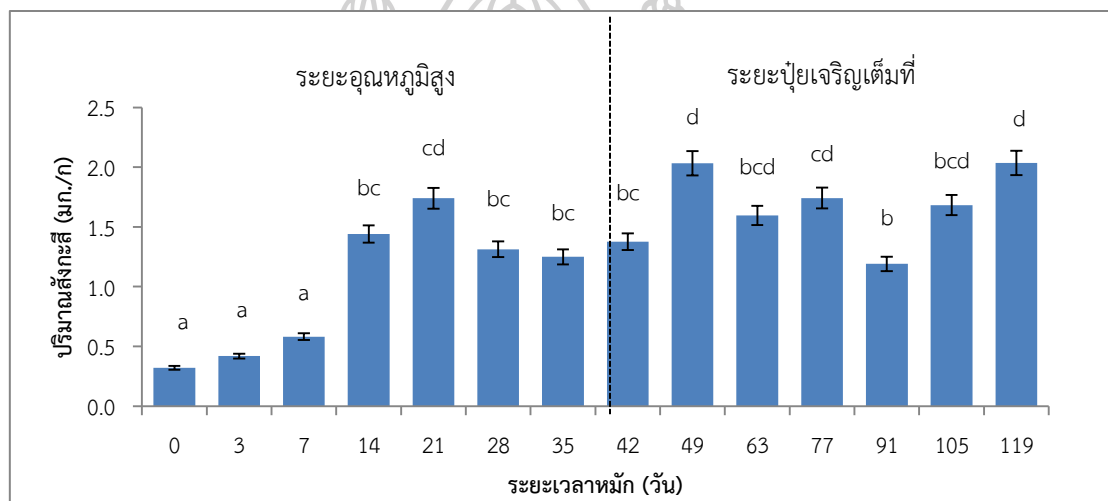
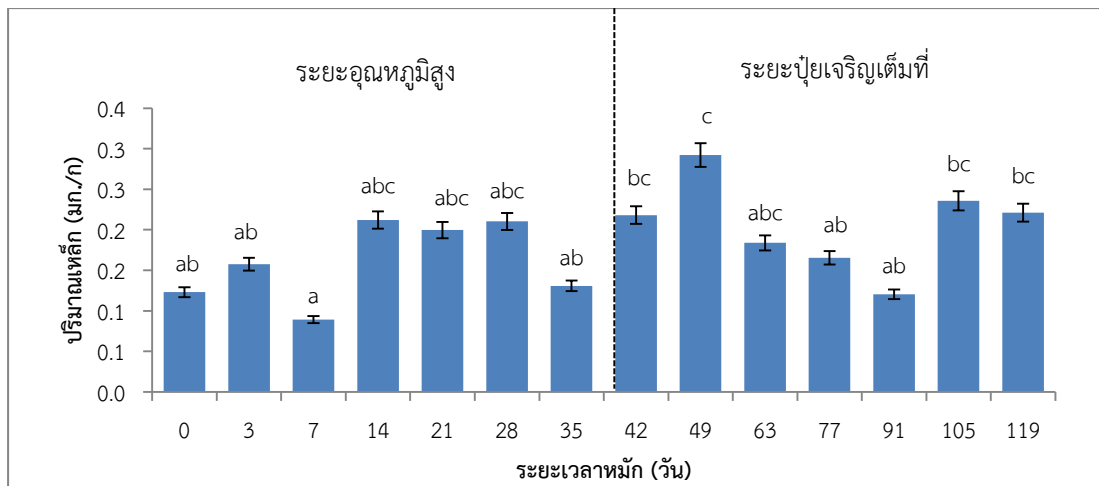
(Stumm & Morgan, 1981)

และเมื่อเปรียบเทียบกับลิแกนด์ที่พบมากในสิ่งแวดล้อมพบว่าสังกะสีมีความชอบในการเกิดสารประกอบกับกรดฮิวมิกได้มากกว่าเหล็กที่ชอบอยู่ในรูปออกไซด์ที่มีความคงตัวมากกว่าเรียงลำดับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้ (Gay & Chakrabarti, 1975)



ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการหมักปุ๋ยจากของเสียชุมชนและกากตะกอนที่พบสังกะสีในรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่เด่นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น (Ciba, Korolewicz, & Turek, 1999; Ciba, Zolotajkin, Kluczka, Loska, & Cebula, 2003; Walter et al., 2006) จากคุณลักษณะดังกล่าวทำให้พบสัดส่วนและปริมาณของสังกะสีในรูปเชิงซ้อนอินทรีย์ในปริมาณที่มากกว่าเหล็ก โดยพบว่าสังกะสีมีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 26.9 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นปริมาณเฉลี่ย 1.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่เหล็กมีสัดส่วนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.99 ของปริมาณเหล็กทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นปริมาณเฉลี่ย 0.18 มิลลิกรัมต่อกรัม

นอกจากนี้ยังพบว่ามีเพียงสังกะสีเท่านั้นที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.620$, $p < 0.01$) ในขณะที่เหล็กซึ่งมีปริมาณน้อยมากจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างแปรปรวนตลอดระยะเวลาการหมักดังภาพที่ 27 (ก) และ (ข) โดยปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงซึ่งบ่งบอกถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ปลดปล่อยปริมาณสังกะสีออกมาดังกล่าว ($r = -0.677$ และ $r = -0.663$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ตารางที่ 14) เมื่อนำปริมาณจุลธาตุอาหารทั้งสองมาจัดกลุ่มโดยใช้ Duncan พบว่าระยะแรกของการหมักวันที่ 0 - 7 ซึ่งอยู่ในกลุ่มอุณหภูมิสูงจะพบปริมาณจุลธาตุอาหารทั้งสองได้น้อยเหมือนกัน หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะปุ๋ยระยะเจริญเต็มที่ในช่วงวันที่ 42-77 และวันที่ 105-119 จะพบรูปแบบนี้จัดอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณมากและมากที่สุด



ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เทลลิก (ข) ลิ่งกะสี

เมื่อนำปัจจัยจากตารางที่ 14 ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอิทธิพลต่อรูปออกไซด์มาวิเคราะห์หาสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้วิธี stepwise selection พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของลิ่งกะสีได้ร้อยละ 68 มีสมการดังต่อไปนี้

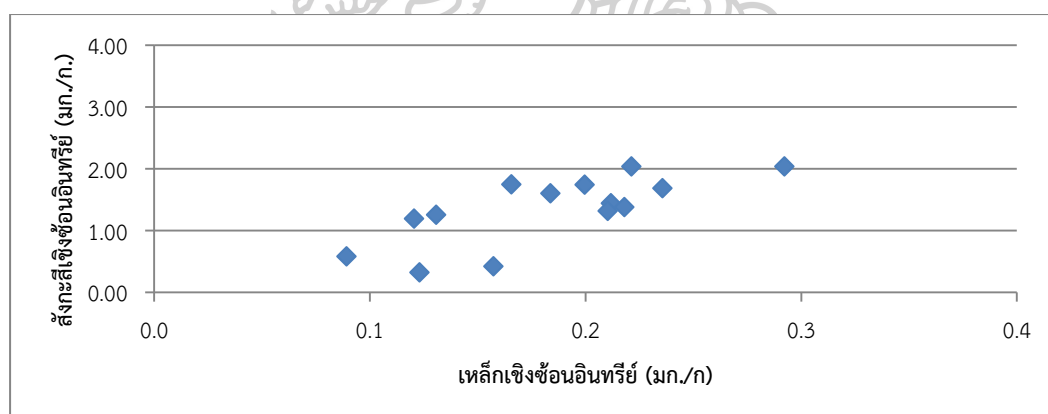
$$\text{Zn-Org} = 4.327 - 0.039\text{OM} - 0.031\text{Temp} \quad R^2 = 0.679 \quad n = 14 \quad (11)$$

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณ อินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์

พารามิเตอร์	ระยะเวลาหมัก	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เหล็ก	0.232	-0.195	-0.284	-0.237
สังกะสี	0.620**	-0.550**	-0.677**	-0.663**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อรูปแบบของสังกะสีเชิงซ้อนอินทรีย์อย่างชัดเจนมากกว่าเหล็กจากความสัมพันธ์และปัจจัยที่มีอิทธิพลของกระบวนการย่อยสลายที่สัมพันธ์กับปริมาณของสังกะสีที่เกิดขึ้น ($r = 0.645$, $p < 0.01$) แม้กระนั้นก็ตามการเปลี่ยนแปลงของเหล็กในรูปแบบนี้ยังเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับสังกะสีดังภาพที่ 28 โดยพบปริมาณน้อยในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะเจริญเต็มที่ (ภาพที่ 27) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักโดยอ้อมต่อเหล็กในรูปแบบนี้ดังกล่าว



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = 0.645$, $p < 0.01$)

4.5.4 รูปค่างของแข็ง (Residual fraction)

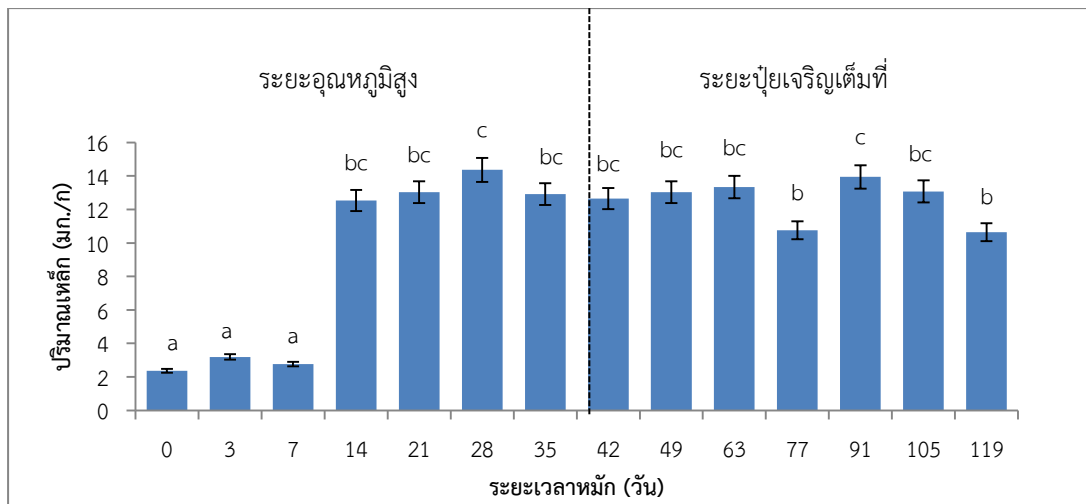
รูปค่างของแข็งเป็นรูปที่โลหะจะอยู่ในโครงสร้างผลึกแร่ธาตุปฐมภูมิและทุติยภูมิที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Tokalioglu et al., 2000) หรือวัตถุอินทรีย์ตั้งต้นที่นำมาใช้ทำปุ๋ยหมัก เป็นรูปแบบที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายเสียก่อนพีจึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยพบว่าเหล็กในรูปแบบนี้จะมีสัดส่วนและปริมาณที่มากกว่าสังกะสีอยู่มาก คิดเป็นร้อยละ 92.1 ของปริมาณเหล็กทั้งหมดและมีปริมาณเฉลี่ย 10.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่สังกะสีจะมีสัดส่วนและปริมาณคิดเป็นร้อยละ 33.3 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด และมีปริมาณเฉลี่ย 1.69 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจากที่กล่าวมาแล้วว่าเหล็กชอบอยู่รูป Fe(III) ซึ่งเป็นของแข็งขณะที่สังกะสีที่พบรูปของแข็งจะอยู่ในรูป Zn(II) ที่มีเสถียรภาพของสารประกอบน้อยกว่าเหล็ก (Stumm & Morgan, 1981) และทำให้พบสัดส่วนของสังกะสีในรูปแบบนี้น้อยกว่าเหล็กดังกล่าว

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของเหล็กและสังกะสีในรูปค่างของแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.497$ และ $r = 0.586$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 29 (ก) และ (ข) และมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.950$, $p < 0.01$ ภาพที่ 30) สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เป็นดัชนีของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ลดลงอีกด้วย (เหล็ก $r = -0.702$ และ -0.760 ตามลำดับ; สังกะสี $r = -0.767$ และ $-0.0.794$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ตารางที่ 15) เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเหล็กและสังกะสีมาจัดกลุ่มโดยใช้ Duncan พบว่าตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไปซึ่งเป็นช่วงวันที่ปุ๋ยอยู่ในระยะเจริญเต็มที่พร้อมนำไปใช้งานจัดอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณมากถึงมากที่สุด

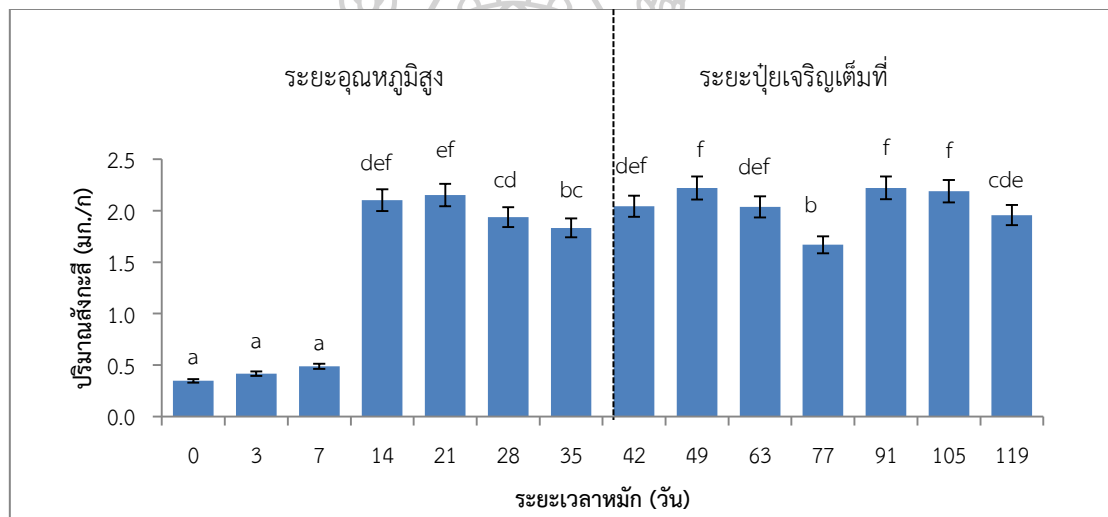
โดยปัจจัยจากตารางที่ 15 ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอิทธิพลต่อรูปค่างของแข็งสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้วิธี stepwise selection พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปค่างของแข็งของเหล็กและสังกะสีได้ร้อยละ 68 และ 67 ตามลำดับ มีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Fe-Res} = 33.540 - 2.179\text{C/N} \quad R^2 = 0.679 \quad n = 14 \quad (12)$$

$$\text{Zn-Res} = 5.364 - 0.350\text{C/N} \quad R^2 = 0.671 \quad n = 14 \quad (13)$$

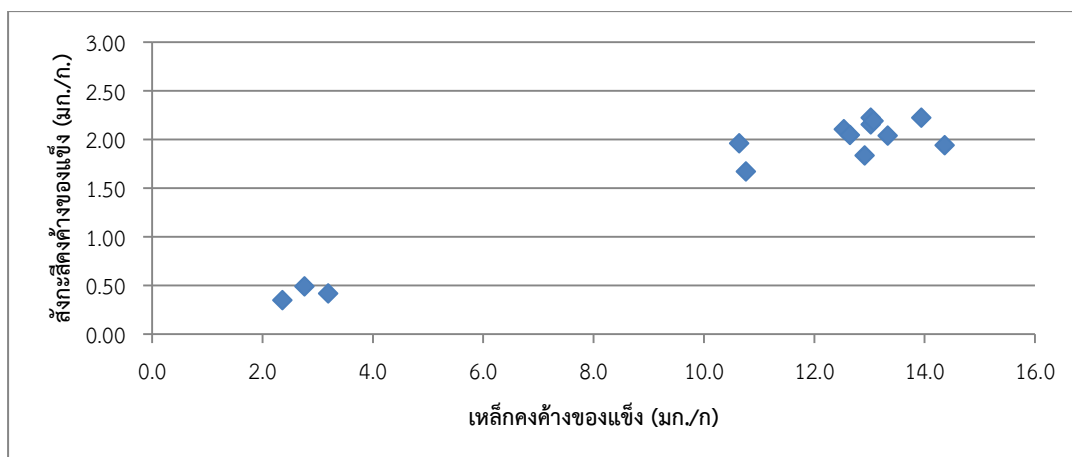


(ก)



(ข)

ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของรูปคั่งค้างของแข็งเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) เหล็ก (ข) สังกะสี



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปค่างของแข็งของสังกะสีและเหล็กตลอดระยะเวลาการหมัก
($r = 0.950$, $p < 0.01$)

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลาหมัก อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับเหล็กและสังกะสีค่างของแข็ง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาหมัก	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เหล็ก	0.497**	-0.473**	-0.702**	-0.760**
สังกะสี	0.586**	-0.566**	-0.767**	-0.794**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักมูลไก่จากรูปแบบและปริมาณของจุลธาตุอาหาร ที่มีอยู่ในปุ๋ยหมัก 2 ชนิดได้แก่ เหล็กและสังกะสี เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับพืช ณ เวลาการหมักต่างๆ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นโดยแบ่งรูปแบบของจุลธาตุอาหารทั้งสอง ออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน และเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก ในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 จากนั้นนำมาศึกษา คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548)

จากการศึกษาทางกายภาพและเคมีสามารถแบ่งระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ได้ 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (0 วัน) เป็นระยะที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับภายนอก ลักษณะปุ๋ยมีสีน้ำตาล มองเห็นวัสดุหมักได้ชัดเจน มีความชื้นสูง กลิ่นแอมโมเนียรุนแรง มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงที่สุด มีคาร์บอนละ 74.77 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 15.1 ระยะอุณหภูมิสูง (1-41 วัน) เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงที่สุดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลและเริ่มจับตัวกันเป็นก้อน กลิ่นแอมโมเนียลดลง มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 44.57-57.31 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงจากระยะเริ่มผสมมีค่า 9.2-13.0 และระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (42 วันเป็นต้นไป) อุณหภูมิของปุ๋ยหมักลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล ความชื้นลดลง กลิ่นแอมโมเนียลดลงจนถึงไม่ได้กลิ่น มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 41.7-47.6 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่า 9.30-10.7 ซึ่งหลังจากวันที่ 42 เป็นต้นไปปุ๋ยมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) เป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับพืช

การศึกษาปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีที่ปลดปล่อยออกมาจากการสกัดลำดับขั้น พบว่าเหล็กและสังกะสีจะอยู่ในรูปคงค้างของแข็งมากที่สุด เรียงลำดับปริมาณเฉลี่ยจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้

Fe-Res >>> Fe-Ex > Fe-Ox > Fe-Org
10.6 >>> 0.39 > 0.21 > 0.18 มิลลิกรัม/กรัม

Zn-Res > Zn-Org, Zn-Ex > Zn-Ox

1.69 > 1.34, 1.16 > 0.64 มิลลิกรัม/กรัม

โดยรูปค่างของแข็งจะมีปริมาณมากที่สุด จากวัตถุดิบอินทรีย์ที่มีธาตุทั้งสองเป็นองค์ประกอบและเป็นรูปที่เด่นในปุ๋ยหมักประเภทต่างๆ (J Singh & Kalamdhad, 2012) รวมทั้งเสถียรภาพของสารประกอบเหล็กไฮดรอกไซด์ที่มีมากกว่าสังกะสี ทำให้ถูกแทนที่และแลกเปลี่ยนออกมาได้ยาก (Winter, 1994) โดยรูปแบบของเหล็กและสังกะสีมีปริมาณมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักมากขึ้น ($p < 0.01$) เช่นเดียวกับการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($p < 0.01$) ที่บ่งบอกถึงกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก มีเพียงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็กที่ไม่สัมพันธ์กับปัจจัยดังกล่าว เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยมากและมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างแปรปรวน นอกจากนี้การที่สังกะสีถูกแทนที่และแลกเปลี่ยนได้ง่ายจึงทำให้พบสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และจากความชอบของสังกะสีในการเกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิกที่มากกว่าเหล็กที่มักชอบอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ที่มีความคงตัวมากกว่า (Gay & Chakrabarti, 1975) จึงทำให้พบสังกะสีในรูปสารประกอบออกไซด์น้อยที่สุดเช่นเดียวกับที่พบเหล็กในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ได้น้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาการนำปุ๋ยหมักไปใช้ให้เกิดประโยชน์พบว่าตั้งแต่ 49 เป็นต้นไปปุ๋ยหมักจะมีปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้และพีชพร้อมนำไปใช้อยู่ในกลุ่มมากและมากที่สุด โดยรูปแบบอื่นๆ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายๆ ของระยะเวลาการหมักแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มศักยภาพของปุ๋ยหมักที่จะปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งสองในภายหลัง

โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อรูปแลกเปลี่ยนได้ของเหล็กและสังกะสีจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุโดยใช้วิธี stepwise selection อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้มีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Fe-Ex} = 0.885 - 0.010\text{OM} \quad R^2 = 0.505 \quad n = 14$$

$$\text{Zn-Ex} = 2.444 - 0.026\text{OM} \quad R^2 = 0.521 \quad n = 14$$

ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสังกะสีและเหล็กนอกจากจะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบที่พีชจะนำไปใช้และศักยภาพของปุ๋ยหมักที่จะปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปแบบอื่นๆ แล้วยังทราบถึงระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติอีกด้วย ซึ่งแม้ปุ๋ยหมักจะอยู่ในมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรและพร้อมที่จะนำไปใช้ในวันที่ 42 เป็นต้นไปแต่คุณภาพในเชิงการปลดปล่อยธาตุอาหารเหล็กและสังกะสีที่มากถึงมากที่สุดจะอยู่ในช่วงวันที่ 49 เป็นต้นไป โดยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นปัจจัยที่กำหนดรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ความรู้นี้จะป็นฐานข้อมูลที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยให้เกิดประโยชน์มากขึ้นในอนาคตต่อไป

รายการอ้างอิง

- Ahmed, M., Idris, A., & Omar, S. R. S. (2007). Physicochemical characterization of compost of the industrial tannery sludge. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), 81-94.
- Barber, S. A. (1995). *Soil Nutrient Bioavailability* (2 ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Baudo, R. (1982). *The role of the speciation in the transfer of heavy metals along the aquatic food web*. Italy: Unpubilshed manuscript.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*(100), 5444-5453.
- Bertoldi, M., Vallini, G., & Pera, A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Management & Research*(1), 157-176.
- Bourg, A. C. M., & Filby, R. H. (1974). *Absorption isotherms for the uptake of Zn²⁺ by clay minerals in a freshwater medium*. Cannada.
- Brewer, L. J., & Sullivan, D. M. (2003). Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. *Compost Science & Utilization*, 11(2), 96-112.
- Ciba, J., Korolewicz, T., & Turek, M. (1999). The occurenace of metals in composted municipal wastes and their removal. *Water, Air and Soil Pollution*(111), 159-170.
- Ciba, J., Zolotajkin, M., Kluczka, J., Loska, K., & Cebula, J. (2003). Comparison of methods for leaching heavy metals from composts. *Waste Management*(23), 897-905.
- Cuong, D. T., & Obbard, J. P. (2006). Metal speciation in coastal marine sediments from Singapore using a modified BCR-sequential extraction procedure. *Applied Geochemistry*(21), 1335-1346.
- Gay, R. D., & Chakrabarti, C. L. (1975). *Analytical techniques for speciation in trace metals*. Paper presented at the Proceeding Internatinal Conference on Heavy Metals in the Environment, Toronto.
- Gigliotti, G., Valentini, F., Erriquens, F. G., & Pullicino, S. (2005). Evaluating the efficiency of the composting process: a comparison of different parameters. *Geophysical*

Research Abstracts, 7.

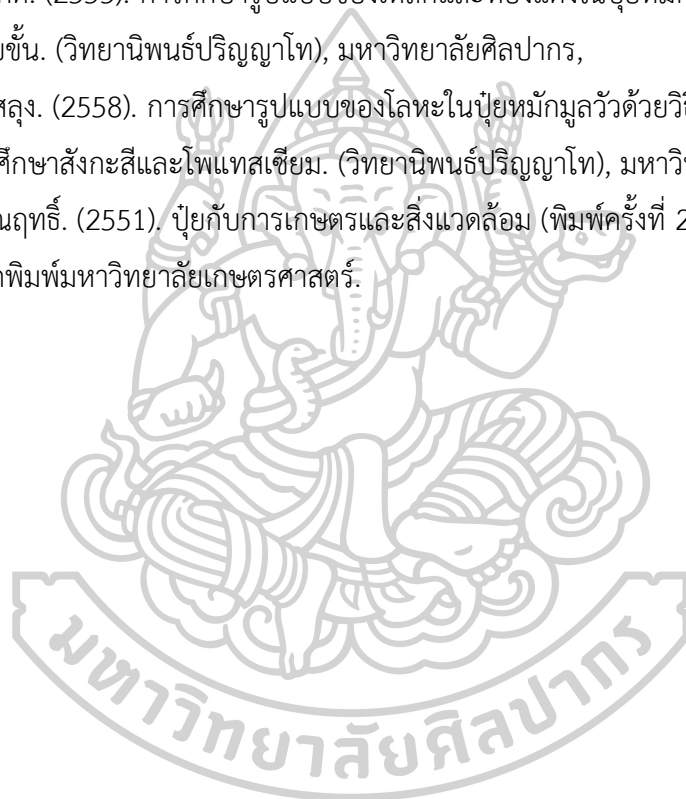
- Hem, J. D. (1972). Chemistry and Occurrence of Cadmium and Zinc in surface water and groundwater. *Water resources research*(8), 661-679.
- Hosseini, S. M., & Aziz, H. A. (2013). Evaluation of thermochemical pretreatment and continuous thermophilic condition in rice straw composting process enhancement. *Bioresource Technology*(133), 240-247.
- Long, Y.-Y., Hu, L.-F., Fang, C.-R., Wu, Y.-Y., & Shen, D.-S. (2009). An evaluation of the modified BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility of copper and zinc in MSW. *Microchemical Journal*(91), 1-5.
- Lu, D., Wang, L., Yan, B., Ou, Y., Guan, J., Bian, Y., & Zhang, Y. (2014). Speciation of Cu and Zn during composting of pig manure amended with rock phosphate. *Waste Management*(34), 1529-1536.
- Mustafa, M. K., Fajkoviv, H., Roncevic, S., & Curkovic, L. (2015). Assessment of metal risks from different depths of jarosite tailing waste of Trepca zinc industry, Kosovo based on BCR procedure. *Journal of Geochemical Exploration*(148), 161-168.
- N C. (2017). Solubility Product Constants. Retrieved from http://www4.ncsu.edu/~franzen/public_html/CH201/Solubility-Product-Constants.pdf.
- Nemati, K., Bakar, N. K. A., Sobhanzadeh, E., & Abas, M. R. (2009). A modification of the BCR sequential extraction procedure to investigate the potential mobility of copper and zinc in shrimp aquaculture sludge. *Microchemical Journal*(92), 165-169.
- Nemati, K., Bakar, N. K. A., Sobhanzadeh, E., & Abas, M. R. (2011). A modification of the BCR sequential extraction procedure to investigate the potential mobility of copper and zinc in shrimp aquaculture sludge. *Microchemical Journal*(192), 402-410.
- Pueyo, M., Mateu, J., Rigol, A., Vidal, M., Lopez-Sanchez, J. F., & Rauret, G. (2008). Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils. *Environmental Pollution*(152), 330-341.
- Sarkar, S., Pal, S., & Chanda, S. (2016). Optimization of a vegetable waste composting

- process with a significant thermophilic phase. *Procedia Environmental Sciences*(35), 435-440.
- Shuai, L., Xu-dong, W., Li-lan, L., Shi-rong, D., & Jun-feng, Z. (2008). Competitive Complexation of Copper and Zinc by Sequentially Extracted Humic Substances from Manure Compost. *Agricultural Sciences in China*, 7(10), 1253-1259.
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresource Technology*, 124, 169-179.
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2013). Assessment of bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of green waste (Water hyacinth). *Ecological Engineering*(52), 59-69.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1981). *Aquatic Chemistry*. New York: Wiley.
- Suler, D. J., & Finstein, M. S. (1977). Effect of temperature, aeration, and moisture on CO₂ formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(2), 345-350.
- Tokalioglu, S., Kartal, S., & Elci, L. (2000). Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure. *Analytical Chimica Acta*(413), 33-40.
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itavaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*(72), 169-183.
- Wada, D., & Wada, S.-I. (1999). Kinetics of speciation of copper, lead and zinc loaded to soils that differ in cation exchanger composition at low moisture content. *Soil.Sci. Plant Anal*, 30(17&18), 2363-2375.
- Walter, I., Martinez, F., & Cala, V. (2006). Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution*(139), 507-514.
- Wang, Q., Wang, Z., Awasthi, M. K., Jiang, Y., Li, R., Ren, X., . . . Zhang, Z. (2016). Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting. *Bioresource Technology*(220), 297-304.
- Xuejiang, W., Ling, C., Siqing, X., & Jianfu, Z. (2008). Changes of Cu, Zn, and Ni chemical speciation in sewage sludge co-composted with sodium sulfide and lime.

Journal of Environmental Sciences(20), 156-160.

- Zemberyova, M., Bartekova, J., & Hagarova, I. (2006). The utilization of modified BCR three-step sequential extraction procedure for the fractionation of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in soil reference materials of different origins. *Talanta*, 70, 973-978.
- Zeng, G. M., Huang, H. L., Huang, D. L., Yuan, X. Z., Jiang, R. Q., Yu, M., . . . Liu, X. L. (2009). Effect of inoculation white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochemistry*(2009), 396-400.
- Zhang, F., Li, Y., Xiong, X., Yang, M., & Li, W. (2012). Effect of Composting on Dissolved Organic Matter in Animal Manure and Its Binding with Cu. *The Scientific World Journal*, 1-9.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2546). สารเร่งประเภทจุลินทรีย์ พด.1 พด.2 พด.3 สำหรับเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตการเกษตร. Retrieved from <http://www.ldd.go.th>
- กรมวิชาการเกษตร. (2548). ปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. In เอกสารวิชาการ ลำดับที่ 17/2548 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมวิชาการเกษตร. (2559). ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนัก. Retrieved from <http://www.doa.go.th/hort/images/stories/gaphort/banana/bananadoc04.pdf>
- จุฬารัตน สุนทรนิตย์. (2557). การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี: การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท), มหาลัยศิลปากร, ชัยมงคล สุวานิช. (2526). คู่มือสำหรับนักเกษตรกร. กรุงเทพฯ.
- ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์. (2528). เอกสารการสอนชุดวิชา เกษตรทั่วไป 4: ดิน น้ำ และปุ๋ย (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). นนทบุรี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. (2540). เคมี เล่ม 2 (พิมพ์ครั้งที่ 7 ed.). นนทบุรี: บริษัท ไทยร่มเกล้า จำกัด.
- ธงชัย มาลา. (2546). ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.
- นันทิรา สรรมณี. (2555). โลหะในแหล่งน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสินทวงศ์การพิมพ์.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. (2544). ความอุดมสมบูรณ์ของดิน (*Soil Fertility*) (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์.
- ยงยุทธ โอสธสภ, ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชัยสิทธิ์ ทองจุ. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 8 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.

- ยงยุทธ โอสดสภ, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชวลิต ฮงประยูร. (2551). ปู่เพื่อการเกษตรยั่งยืน (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รสสุคนธ์ พุ่มพันวงศ์. (2549). การผลิตปุ๋ยอินทรีย์ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดเอ็มพอร์เรียม.
- สมเจต จันทวัฒน์, ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, จงรักษ์ จันทรเจริญสุข, วิโรจน์ อิมพิทักษ์, & อัญชลี สุทธิประการ. (2526). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 5 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สาวิตรี กาฬภักดี. (2553). การศึกษารูปแบบของเหล็กและทองแดงในปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท), มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- อมรรัตน์ เอื้อสลุง. (2558). การศึกษารูปแบบของโลหะในปุ๋ยหมักมูลวัวด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นกรณีศึกษาสังกะสีและโพแทสเซียม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท), มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- อำนาจ สุวรรณฤทธิ. (2551). ปู่กับการเกษตรและสิ่งแวดล้อม (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์การสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยมูลไก่

ตารางที่ 16 ปริมาณของเหลือรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยมูลไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน

ระยะเวลาหมัก (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (mean \pm SD)	รูปสารประกอบออกไซด์ (mean \pm SD)	รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (mean \pm SD)	รูปคงค้างของแข็ง (mean \pm SD)
0	0.1736 \pm 0.006	0.0740 \pm 0.005	0.1231 \pm 0.079	2.3648 \pm 0.174
3	0.2262 \pm 0.008	0.0945 \pm 0.006	0.1574 \pm 0.071	3.1909 \pm 0.551
7	0.1807 \pm 0.009	0.0983 \pm 0.023	0.0892 \pm 0.007	2.7652 \pm 0.201
14	0.5133 \pm 0.020	0.2441 \pm 0.042	0.2119 \pm 0.104	12.5394 \pm 1.284
21	0.5417 \pm 0.010	0.2726 \pm 0.039	0.1996 \pm 0.109	13.0281 \pm 0.127
28	0.4250 \pm 0.083	0.2146 \pm 0.038	0.2103 \pm 0.069	14.3695 \pm 1.139
35	0.3350 \pm 0.011	0.1568 \pm 0.024	0.1308 \pm 0.063	12.9152 \pm 1.641
42	0.3778 \pm 0.039	0.1650 \pm 0.016	0.2180 \pm 0.041	12.6471 \pm 2.038
49	0.4784 \pm 0.036	0.2848 \pm 0.049	0.2923 \pm 0.059	13.0279 \pm 3.024
63	0.4742 \pm 0.033	0.1955 \pm 0.027	0.1838 \pm 0.038	13.3324 \pm 1.144
77	0.3944 \pm 0.025	0.2729 \pm 0.017	0.1656 \pm 0.031	10.7615 \pm 0.276
91	0.4176 \pm 0.041	0.3316 \pm 0.204	0.1205 \pm 0.029	13.9447 \pm 0.521
105	0.4564 \pm 0.018	0.2511 \pm 0.036	0.2357 \pm 0.048	13.0791 \pm 0.855
119	0.4575 \pm 0.054	0.3082 \pm 0.066	0.2213 \pm 0.062	10.6396 \pm 0.821

ตารางที่ 17 ปริมาณของสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้นของปุยมูลไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน

ระยะเวลาหมัก (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (mean ± SD)	รูปสารประกอบออกไซด์ (mean ± SD)	รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (mean ± SD)	รูปคงค้างของแข็ง (mean ± SD)
0	0.6294 ± 0.014	0.3399 ± 0.021	0.3207 ± 0.007	0.3469 ± 0.081
3	0.6935 ± 0.011	0.3615 ± 0.022	0.4186 ± 0.031	0.4163 ± 0.048
7	0.6630 ± 0.020	0.3705 ± 0.054	0.5818 ± 0.045	0.4877 ± 0.151
14	1.3692 ± 0.124	0.6819 ± 0.146	1.4410 ± 0.355	2.1026 ± 0.201
21	1.3760 ± 0.048	0.8240 ± 0.073	1.7399 ± 0.194	2.1520 ± 0.037
28	1.2789 ± 0.066	0.6851 ± 0.140	1.3126 ± 0.427	1.9371 ± 0.147
35	0.9481 ± 0.033	0.4640 ± 0.044	1.2499 ± 0.314	1.8328 ± 0.061
42	1.2365 ± 0.069	0.6662 ± 0.084	1.3767 ± 0.180	2.0432 ± 0.091
49	1.4081 ± 0.096	0.7567 ± 0.126	2.0326 ± 0.161	2.2209 ± 0.167
63	1.4307 ± 0.089	0.8505 ± 0.124	1.5965 ± 0.488	2.0374 ± 0.090
77	1.3115 ± 0.024	0.8192 ± 0.079	1.7417 ± 0.235	1.6688 ± 0.167
91	1.0793 ± 0.084	0.4318 ± 0.197	1.1907 ± 0.054	2.2217 ± 0.030
105	1.3516 ± 0.029	0.7590 ± 0.073	1.6823 ± 0.400	2.1886 ± 0.046
119	1.4705 ± 0.038	1.0121 ± 0.060	2.0349 ± 0.165	1.9573 ± 0.050

ตารางที่ 18 ร้อยละเฉลี่ยของเหล็กรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยมูล
ไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน

ระยะเวลา หมัก (วัน)	รูปที่ แลกเปลี่ยนได้	รูปสารประกอบ ออกไซด์	รูปสารเชิงซ้อน อินทรีย์	รูปคงค้าง ของแข็ง	ร้อยละการ คืนกลับ
0	6.35	2.71	4.50	86.45	60.44
3	6.17	2.58	4.29	86.97	52.99
7	5.77	3.14	2.85	88.25	64.38
14	3.80	1.81	1.57	92.82	95.62
21	3.86	1.94	1.42	92.78	69.25
28	2.79	1.41	1.38	94.42	94.27
35	2.47	1.16	0.97	95.40	97.53
42	2.82	1.23	1.63	94.33	80.20
49	3.40	2.02	2.08	92.51	64.93
63	3.34	1.38	1.30	93.98	77.94
77	3.40	2.35	1.43	92.82	91.33
91	2.82	2.24	0.81	94.13	89.29
105	3.25	1.79	1.68	93.27	81.76
119	3.93	2.65	1.90	91.51	70.03



ตารางที่ 19 ร้อยละเฉลี่ยของสังกะสีรูปแบบต่างๆ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยมูล
ไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก 119 วัน

ระยะเวลา หมัก (วัน)	รูปที่ แลกเปลี่ยนได้	รูปสารประกอบ ออกไซด์	รูปสารเชิงซ้อน อินทรีย์	รูปคงค้าง ของแข็ง	ร้อยละการ คืนกลับ
0	38.45	20.76	19.59	21.19	78.75
3	36.70	19.13	22.15	22.03	68.37
7	31.53	17.62	27.67	23.19	100.88
14	24.47	12.19	25.76	37.58	161.34
21	22.59	13.53	28.56	35.33	152.00
28	24.53	13.14	25.18	37.15	134.96
35	21.09	10.32	27.81	40.78	128.90
42	23.23	12.52	25.87	38.39	135.53
49	21.94	11.79	31.67	34.60	154.97
63	24.19	14.38	26.99	34.44	148.29
77	23.67	14.78	31.43	30.12	167.05
91	21.92	8.77	24.18	45.12	137.82
105	22.60	12.69	28.13	36.59	152.73
119	22.71	15.63	31.43	30.23	163.55





ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	.1736						
7	3	.1807						
3	3	.2262						
35	3		.3350					
42	3		.3778	.3778				
77	3		.3944	.3944	.3944			
91	3			.4176	.4176	.4176		
28	3			.4250	.4250	.4250		
105	3				.4564	.4564	.4564	
119	3				.4575	.4575	.4575	
63	3					.4742	.4742	
49	3					.4784	.4784	
14	3						.5133	.5133
21	3							.5417
Sig.		.092	.058	.142	.056	.070	.084	.328

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	.0740						
3	3	.0945	.0945					
7	3	.0983	.0983	.0983				
35	3	.1568	.1568	.1568	.1568			
42	3	.1650	.1650	.1650	.1650	.1650		
63	3		.1955	.1955	.1955	.1955	.1955	
28	3			.2146	.2146	.2146	.2146	.2146
14	3				.2441	.2441	.2441	.2441
105	3				.2511	.2511	.2511	.2511
21	3				.2726	.2726	.2726	.2726
77	3				.2729	.2729	.2729	.2729
49	3					.2845	.2845	.2845
119	3						.3082	.3082
91	3							.3316
Sig.		.128	.092	.053	.063	.056	.071	.061

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหลือรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก
ปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
7	3	.0892		
91	3	.1206	.1206	
0	3	.1231	.1231	
35	3	.1308	.1308	
3	3	.1574	.1574	
77	3	.1656	.1656	
63	3	.1838	.1838	.1838
21	3	.1995	.1995	.1995
28	3	.2103	.2103	.2103
14	3	.2119	.2119	.2119
42	3		.2180	.2180
119	3		.2213	.2213
105	3		.2357	.2357
49	3			.2924
Sig.		.052	.070	.080

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของเหลือรูปค้ำของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก
ปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	2.3648		
7	3	2.7652		
3	3	3.1909		
119	3		10.6396	
77	3		10.7615	
14	3		12.5394	12.5394
42	3		12.6471	12.6471
63	3		12.6657	12.6657
35	3		12.9153	12.9153
49	3		13.0279	13.0279
21	3		13.0281	13.0281
105	3		13.0791	13.0791
91	3			13.9447
28	3			14.3695
Sig.		.470	.057	.150

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0	3	.6294							
7	3	.6630							
3	3	.6935							
35	3		.9481						
91	3			1.0793					
42	3				1.2365				
28	3				1.2788	1.2788			
77	3				1.3115	1.3115	1.3115		
105	3					1.3516	1.3516	1.3516	
14	3					1.3692	1.3692	1.3692	1.3692
21	3					1.3760	1.3760	1.3760	1.3760
49	3						1.4081	1.4081	1.4081
63	3							1.4307	1.4307
119	3								1.4705
Sig.		.250	1.000	1.000	.179	.101	.103	.180	.087

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	.3399		
3	3	.3615		
7	3	.3705		
91	3	.4318		
35	3	.4640		
42	3		.6662	
14	3		.6819	
28	3		.6851	
49	3		.7566	
105	3		.7590	
77	3		.8192	
21	3		.8241	
63	3		.8505	.8505
119	3			1.0121
Sig.		.191	.064	.061

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสังกะสีรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	.3207			
3	3	.4186			
7	3	.5818			
91	3		1.1907		
35	3		1.2500	1.2500	
28	3		1.3126	1.3126	
42	3		1.3767	1.3767	
14	3		1.4410	1.4410	
63	3		1.5965	1.5965	1.5965
105	3		1.6823	1.6823	1.6823
21	3			1.7399	1.7399
77	3			1.7417	1.7417
49	3				2.0326
119	3				2.0349
Sig.		.266	.057	.059	.084

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของสิ่งกระสิรูปค่างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.3470					
3	3	.4163					
7	3	.4878					
77	3		1.6688				
35	3		1.8328	1.8328			
28	3			1.9371	1.9371		
119	3			1.9573	1.9573	1.9573	
63	3				2.0374	2.0374	2.0374
42	3				2.0432	2.0432	2.0432
14	3				2.1027	2.1027	2.1027
21	3					2.1520	2.1520
105	3						2.1886
49	3						2.2210
91	3						2.2217
Sig.		.157	.084	.210	.116	.066	.089

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของเหล็กกับปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหมักปุ๋ยมูลไก่

Correlations

		Day	Ex	Ox	Org	Res	Temp	Mois	OM	HA	pH	CN	MnO	FeO
Day	Pearson Correlation	1	.473**	.609**	.232	.497**	-.683**	-.818**	-.643**	-.324*	-.539**	-.595**	.612**	.609**
	Sig. (2-tailed)		.002	.000	.140	.001	.000	.000	.000	.036	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ex	Pearson Correlation	.473**	1	.646**	.500**	.816**	-.430**	-.673**	-.661**	-.453**	-.250	-.639**	.913**	.646**
	Sig. (2-tailed)	.002		.000	.001	.000	.005	.000	.000	.003	.110	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ox	Pearson Correlation	.609**	.646**	1	.308*	.616**	-.494**	-.641**	-.548**	-.419**	-.285	-.463**	.688**	1.000**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.047	.000	.001	.000	.000	.006	.067	.002	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Org	Pearson Correlation	.232	.500**	.308*	1	.359*	-.195	-.342*	-.284	-.192	-.176	-.237	.495**	.308*
	Sig. (2-tailed)	.140	.001	.047		.019	.217	.027	.069	.222	.265	.131	.001	.047
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Res	Pearson Correlation	.497**	.816**	.616**	.359*	1	-.473**	-.763**	-.702**	-.556**	-.346*	-.760**	.902**	.616**
	Sig. (2-tailed)	.001	.000	.000	.019		.002	.000	.000	.000	.025	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ 29 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีกับปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการหมักปุ๋ยมูลไก่

		Correlations												
		Day	Ex	Ox	Org	Res	Temp	Mois	OM	HA	pH	CN	MnO	FeO
Day	Pearson Correlation	1	.590**	.563**	.620**	.586**	-.683**	-.818**	-.643**	-.324*	-.539**	-.595**	.612**	.609**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.036	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ex	Pearson Correlation	.590**	1	.899**	.872**	.858**	-.535**	-.751**	-.673**	-.442**	-.323*	-.664**	.929**	.682**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.000	.003	.037	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ox	Pearson Correlation	.563**	.899**	1	.813**	.612**	-.468**	-.622**	-.475**	-.341*	-.287	-.484**	.767**	.648**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.000	.002	.000	.001	.027	.065	.001	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Org	Pearson Correlation	.620**	.872**	.813**	1	.774**	-.550**	-.771**	-.677**	-.458**	-.335*	-.663**	.887**	.653**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.002	.030	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Res	Pearson Correlation	.586**	.858**	.612**	.774**	1	-.566**	-.822**	-.767**	-.518**	-.393**	-.794**	.958**	.669**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.010	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ตารางที่ 30 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของสังกะสีและรูปแบบของเหล็กในกระบวนการหมักปุ๋ยมูลไก่

Correlations

		FeEx	FeOx	FeOrg	FeRes
ZnEx	Pearson Correlation	.917 ^{**}	.682 ^{**}	.606 ^{**}	.792 ^{**}
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
ZnOx	Pearson Correlation	.723 ^{**}	.648 ^{**}	.586 ^{**}	.560 ^{**}
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
ZnOrg	Pearson Correlation	.772 ^{**}	.653 ^{**}	.645 ^{**}	.689 ^{**}
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
ZnRes	Pearson Correlation	.892 ^{**}	.669 ^{**}	.406 ^{**}	.950 ^{**}
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.008	.000
	N	42	42	42	42

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

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

วิทยาลัยศิลป

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวเจตจรินทร์ ทำสะอาด
วัน เดือน ปี เกิด	11 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	2 หมู่ 17 ตำบลด่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี 70150
ผลงานตีพิมพ์	การศึกษารูปแบบของสังกะสีระหว่างการทำหมักปุ๋ยมูลไก่ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference

