



การศึกษารูปแบบทองแดงและแมงกานีสระหว่างการทำปุ๋ยมูลไก่ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ
Community Bureau of Reference (BCR)



โดย
นางสาวสวิตรี ธีรัมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารูปแบบทองแดงและแมงกานีสระหว่างการผลิตหมักปุ๋ยมูลไก่ ด้วยเทคนิคการสกัด
แบบ Community Bureau of Reference (BCR)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE STUDY OF COPPER AND MANGANESE 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 การศึกษารูปแบบทองแดงและแมงกานีสระหว่างการผลิตหมักปุ๋ยมูลไก่ ด้วย
เทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference (BCR)
โดย สาวิตรี ธีรัง
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรมนี

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

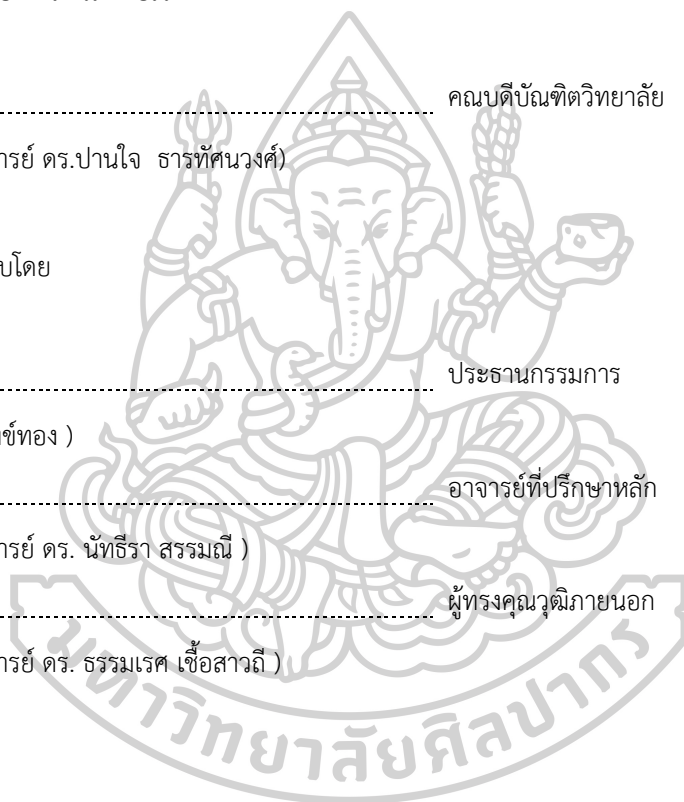
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทศนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

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

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

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



57311316 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : รูปแบบของทองแดง, รูปแบบของแมงกานีส, การสกัดแบบ BCR

นางสาว สาวิตรี ริรัมย์: การศึกษารูปแบบทองแดงและแมงกานีสระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบ Community Bureau of Reference (BCR) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษารูปแบบของทองแดง และแมงกานีส จากการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 4 เดือน โดยปุ๋ยหมักแบ่งตามอุณหภูมิได้ 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 1-35) และระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป) การสกัดลำดับขั้นแบบ Community Bureau of Reference (BCR) ถูกนำมาใช้แบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) พบว่าโลหะทั้งสองมีปริมาณที่แตกต่างกัน เรียงตามลำดับ ดังนี้

ทองแดง : รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปคงค้างของแข็ง > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปสารประกอบออกไซด์

แมงกานีส : รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปคงค้างของแข็ง

โดยทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($p < 0.01$) บ่งบอกถึงกระบวนการเพิ่มปริมาณของโลหะจากกระบวนการหมักที่เมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงทุกรูปแบบจะมีปริมาณมากขึ้น อย่างไรก็ตามรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสองพบปริมาณมากที่สุดในวันที่ 49 แสดงถึงเวลาที่เหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ แม้กระนั้นก็ตามระยะเวลาการหมักยังคงเพิ่มรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งพร้อมที่จะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้เมื่อผ่านระยะเวลาไปช่วงหนึ่ง ดังนั้นการหมักไม่เพียงแต่จะเพิ่มรูปที่นำไปใช้ได้แต่ยังเพิ่มรูปแบบอื่นที่มีศักยภาพที่พร้อมจะนำไปใช้ได้ด้วย โดยสรุปการศึกษานี้ช่วยในการเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมของการหมัก รวมถึงระยะเวลาของการเก็บที่จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาปุ๋ยหมักต่อไป

57311316 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : COPPER, MANGANESE, COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE

MISS Sawitree RIRANG : The Study of copper and manganese 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 this research was to study the dynamic of copper and manganese species through the composting period for 4 months. The compost was divided after temperature into 3 stages: initial stage (day 0), thermophilic stage (day 1-35) and mature stage (since day 42). The sequential extraction technique after Community Bureau of Reference (BCR) was employed to separate metals into 4 fractions—exchangeable (ex), oxide (ox), organically (org) and residual (res) fractions. Both metals' species were found differently in the following order:

Cu-Org > Cu-Res > Cu-Ex > Cu-Ox

Mn-Ex > Mn-Ox > Mn-Org > Mn-Res

All increased corresponding to the time of composting ($p < 0.01$) implying the condensation of metals. As organic matters and C/N ratio decreased, all the fractions increased. However, the exchangeable fraction of both metals found highest at day 49 indicating the appropriate time to use the compost. Nevertheless, longer period of composting yielded more other fractions. They still were environmentally available after some period of times. Therefore, composting increased not only available fraction but also potentially available fractions. In conclusion, regarding of both metals this study helped in selecting the appropriate time of the compost including the storage time which would be benefit to develop the compost in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรพณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือให้ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และ ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้ด้วย

และผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทยูไนเต็ด แอนนาลิสต์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้โอกาสสำคัญ จึงทำให้เกิดความรู้ ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในทุก ๆ ด้าน รวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนคุณบิดามารดา และครอบครัวที่อบอุ่น ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ ซึ่งเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแต่บุรพคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย

สาวิตรี ธีร์รัง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปุ๋ยหมัก (Compost).....	4
2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก.....	4
2.1.2 กระบวนการหมักปุ๋ย.....	4
2.1.3 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักปุ๋ย.....	5
2.1.4 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก.....	7
2.2 การประเมินคุณภาพและการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก.....	8
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	8
2.2.2 ลักษณะทางเคมี.....	8

2.3 จุลธาตุอาหาร.....	9
2.3.1 ทองแดง (Copper : Cu).....	9
2.3.2 แมงกานีส (Manganese : Mn).....	10
2.4 รูปแบบและบทบาทของโลหะในสิ่งแวดล้อม	12
2.6 เสถียรภาพของสารประกอบ	16
2.5 เทคนิคการสกัดลำดับขั้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 สารเคมีและรีเอเจนท์ (chemical and reagents) ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance).....	28
3.2.2 เครื่องเขย่าแนวนราบ (Horizontal shaker).....	28
3.2.3 เซนตริฟิวจ์ (Centrifuge).....	28
3.2.4 ตู้อบ (Hot air oven).....	28
3.2.5 ตู้เย็น (Refrigerator).....	28
3.2.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath).....	29
3.2.7 ตะแกรงร่อน (Sieve).....	29
3.2.8 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH Meter).....	29
3.2.9 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3.1 การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก	29
3.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและแมงกานีสด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น	31
3.3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	33
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการศึกษา	34

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร	34
4.1.1 อุณหภูมิ.....	34
4.1.2. ความชื้น กลิ่น สี และลักษณะของวัสดุหมัก.....	36
4.1.3. ความเป็นกรด-ด่าง.....	37
4.1.4 ค่าการนำไฟฟ้า	37
4.1.5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	39
4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารหลัก	40
4.2 ปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและแมงกานีส ที่ปลดปล่อยออกจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบ BCR.....	40
4.3 อิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อรูปแบบของทองแดงและแมงกานีส	44
4.3.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)	44
4.3.2 รูปสารประกอบออกไซด์.....	49
4.3.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์.....	54
4.3.4 รูปคงค้างของแข็ง	59
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์การสกัดลำดับขั้นของปุ๋ยหมักมูลไก่.....	74
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางสถิติ	80
ภาคผนวก ค มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548.....	93
ประวัติผู้เขียน	95

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมัก	8
ตารางที่ 2 การจำแนกไอออนของโลหะแบบกรด-เบส	17
ตารางที่ 3 ลักษณะทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลวัวตลอดระยะเวลาการหมัก	19
ตารางที่ 4 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และบริษัทผู้ผลิต	28
ตารางที่ 5 ปริมาณ แห่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก	30
ตารางที่ 6 คุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักมูลไก่	35
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548	38
ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีส รูปที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	45
ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีส รูปสารประกอบออกไซด์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และอุณหภูมิ	51
ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีส รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความชื้น และความเป็นกรด-ด่าง	56
ตารางที่ 11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีส รูปคังคางของแข็ง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	61
ตารางที่ 12 ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่ สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น	75
ตารางที่ 13 ปริมาณแมงกานีส (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น	76
ตารางที่ 14 ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่ สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น	77
ตารางที่ 15 ร้อยละเฉลี่ยของทองแดงในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	78

ตารางที่ 16 ร้อยละเฉลี่ยของแมงกานีสในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	79
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก	81
ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก	82
ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก	83
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปค่างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก	84
ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก	85
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก	86
ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก	86
ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปค่างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก	88
ตารางที่ 25 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของทองแดงที่เกิดขึ้น	89
ตารางที่ 26 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของแมงกานีสที่เกิดขึ้น	90
ตารางที่ 27 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของทองแดงและแมงกานีส	91
ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปค่างของแข็งของทองแดง แมงกานีสและเหล็ก	92
ตารางที่ 29 คุณภาพปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548	94

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมัก.....	4
ภาพที่ 2 การขาดทองแดงในข้าวบาร์เลย์.....	10
ภาพที่ 3 อาการเป็นพิษของแมงกานีส.....	11
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิต.....	12
ภาพที่ 5 ปฏิกริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	13
ภาพที่ 6 รูปแบบต่างๆ ของแมงกานีสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างและพีอี.....	14
ภาพที่ 7 การดูดซับของแมงกานีสออกไซด์กับลิแกนด์ต่างๆ.....	14
ภาพที่ 8 โครงสร้างการจับกันของทองแดงกับหมู่ฟังก์ชันของสารชีวโมเลกุล.....	15
ภาพที่ 9 ความเข้มข้นรวมทั้งหมดของทองแดง แมงกานีส และสังกะสี.....	19
ภาพที่ 10 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดง (a) แมงกานีส (b) และสังกะสี (c).....	20
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุ ทองแดง และสังกะสีตามระยะเวลาการหมัก.....	21
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนระหว่างการผลิตปุ๋ยมูลหมูลูกหมูที่เติมด้วยหินฟอสเฟต.....	22
ภาพที่ 13 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดง (Cu) ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตปุ๋ยมูลหมูลูกหมูที่เติมด้วยหินฟอสเฟต A= เติมหินฟอสเฟต 0%, B= เติมหินฟอสเฟต 2.5%, C= เติมหินฟอสเฟต 5.0% และ ...	23
ภาพที่ 14 ร้อยละของทองแดงและแมงกานีสในรูปแบบต่าง ๆ จากการเติมปุ๋ยความเข้มข้นต่าง ๆ.....	24
ภาพที่ 15 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงและสังกะสีจากการหมักกากตะกอน.....	25
ภาพที่ 16 สัดส่วนรูปแบบทองแดงในดินตัวอย่าง.....	26
ภาพที่ 17 แผนผังการทดลองโดยรวม.....	27
ภาพที่ 18 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น.....	32
ภาพที่ 19 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย.....	36

ภาพที่ 20 ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยมูลไก่.....	37
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น.....	39
ภาพที่ 22 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	41
ภาพที่ 23 ปริมาณแมงกานีสรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	42
ภาพที่ 24 ปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	45
ภาพที่ 25 ปริมาณแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	45
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส.....	47
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของทองแดงและแมงกานีสในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ($r = 0.952, p < 0.01$)..	47
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับแมงกานีสออกไซด์ ($r = 0.920, p < 0.01$).....	49
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับเหล็กออกไซด์ ($r = 0.756, p < 0.01$).....	50
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ ($r = 0.689, p < 0.01$).....	51
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปสารประกอบออกไซด์ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส.....	52
ภาพที่ 32 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	54
ภาพที่ 33 ปริมาณแมงกานีสรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	54
ภาพที่ 34 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	55
ภาพที่ 35 ปริมาณแมงกานีสรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	56
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส.....	57
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ของทองแดงและแมงกานีสในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์.....	58
ภาพที่ 38 ปริมาณทองแดงรูปคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก.....	60
ภาพที่ 39 ปริมาณแมงกานีสรูปคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก.....	60

ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปคาง ค้ำของแข็ง ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส.....	61
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับรูปคางค้ำของแข็งของแมงกานีสและเหล็ก.....	63



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำเกษตรกรรมนับว่าเป็นอาชีพหลักของประเทศไทยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการทำเกษตรกรรมอย่างซ้ำๆ เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสูญเสียหน้าดินรวมทั้งอินทรีย์วัตถุด้วย เนื่องจากหน้าดินเดิมที่มีความอุดมสมบูรณ์ถูกชะล้างไปจนหมด และไม่มีการเติมอินทรีย์วัตถุลงในดิน จึงทำให้ดินเสื่อมสภาพลงรวมทั้งการใช้ปุ๋ยเคมียังทำให้ดินมีความแข็งตัว การระบายอากาศและน้ำในดินลดน้อยลงจึงจำเป็นต้องเติมอินทรีย์วัตถุต่างๆ ลงสู่ดินเพื่อเพิ่มการปรับปรุงดิน ซึ่งอินทรีย์วัตถุที่นิยมใช้ คือ ปุ๋ยหมัก โดยปุ๋ยหมักนั้นเกิดจากการนำเอาวัสดุอินทรีย์ที่เหลือใช้ทางการเกษตรต่างๆ มาหมักรวมกับซากพืช ซากสัตว์ตลอดจนมูลสัตว์ จนกลายเป็นขุยสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ มีลักษณะพรุน ยุ่ย และร่วนซุย (บัญชา รัตนีฑู & ศิราณี วงศ์กระจ่าง, 2556; ยงยุทธ โอสดสภา, อรรถศิษฏ์ วงศ์มณีโรจน์, & ขวลิต ฮงประยูร, 2551) นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินด้านต่างๆ อาทิ เช่น ทำให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำ ปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดียิ่งขึ้น ช่วยในการดูดซับธาตุอาหารพืชที่เป็นประจุบวก เพื่อพืชจะได้นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งมีธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ทองแดง และแมงกานีส เป็นต้น

อย่างไรก็ดีการที่พืชสามารถนำเอาจุลธาตุอาหารไปใช้ได้นั้น ต้องอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Baudo, 1982) เนื่องจากในธรรมชาติรูปแบบของโลหะมีหลายรูปแบบด้วยกันและมีความยากง่ายต่อการนำไปใช้ของพืชที่แตกต่างกัน เช่น ทองแดงในดินที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปซัลไฟด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต หรือแมงกานีสที่มักพบอยู่ในรูปของแร่ (Baker, 1990) ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไอออนที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย เช่น รูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยไอออนของโลหะที่พืชนำไปใช้ได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปประจุ +2 (Bradt, 2004) ขณะที่รูปแบบอื่นๆ ต้องมีการเปลี่ยนรูปทางกายภาพและเคมีเสียก่อน พืชจึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งหากมีมากหมายถึงศักยภาพในการกักเก็บเพื่อปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายหลัง (Silveira, Alleoni, O'Connor, & Chang, 2006) ตัวอย่างในรูปแบบนี้ได้แก่ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง เป็นต้น

ดังนั้นการศึกษารูปแบบที่เป็นประโยชน์และศักยภาพในการปลดปล่อยโลหะทองแดงและแมงกานีสที่เกิดจากกระบวนการหมักจึงมีความสำคัญเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ ในการเลือกอายุปุ๋ยหมัก ตลอดจนระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ หรือการเก็บรักษาเพื่อให้เกิดประโยชน์แก่พืชภายหลัง ซึ่งการศึกษารูปแบบโลหะโดยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential

extraction) ตามวิธีของ Community Bureau of Reference (BCR) เป็นที่นิยมแพร่หลาย (Dundar, Altundag, Eyupoglu, Keskin, & Tutunoglu, 2012; Fuentes et al., 2004; Lu et al., 2014; Peruzzi et al., 2011; Sungur, Soylak, Yilmaz, & Ozcan, 2014) แบ่งโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) โดยเลือกปุ๋ยหมักมูลไก่จากโครงการวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิราและคณะ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ทำการเก็บตัวอย่างตลอดกระบวนการหมักเป็นเวลา 4 เดือน ศึกษารูปแบบของทองแดงและแมงกานีสตลอดจนอิทธิพลหรือปัจจัยต่างๆ ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของโลหะทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษารูปแบบของทองแดงและแมงกานีสในปุ๋ยหมักมูลไก่
2. เพื่อศึกษาความเป็นประโยชน์ของทองแดงและแมงกานีสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ณ เวลาการหมักต่างๆ ตลอดจนศักยภาพการปลดปล่อยทองแดงและแมงกานีสที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากรูปแบบต่างๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมัก
3. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยหมักต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยที่ต่างกันส่งผลให้ปริมาณและรูปแบบของทองแดงและแมงกานีสในปุ๋ยหมักแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

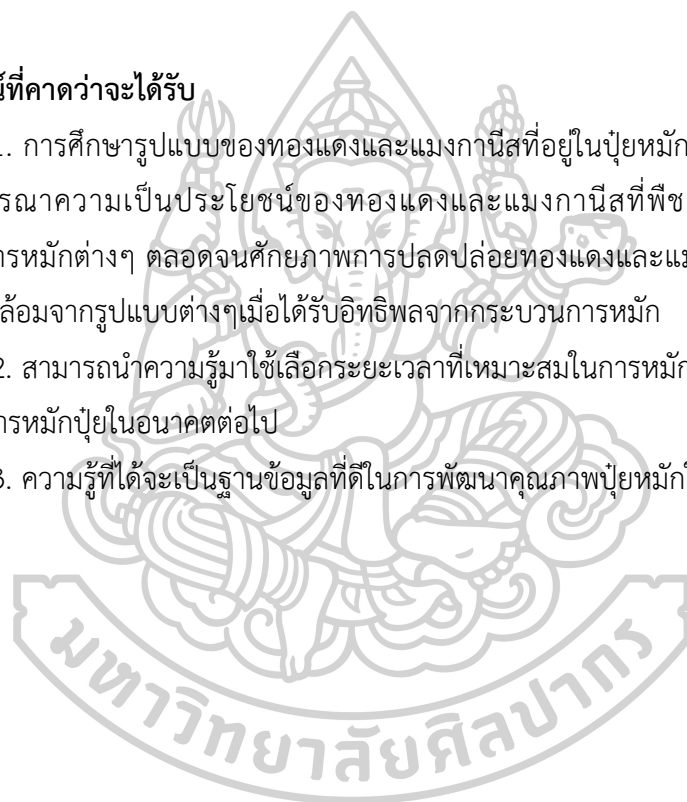
ปุ๋ยหมักที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นปุ๋ยหมักที่ได้จากโครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก และผลของการเป็นสารคีเลตต่อความสามารถในการปลดปล่อยจุลธาตุอาหารของ นันทิราและคณะ (2558) โดยการหมักปุ๋ยนั้นนำมูลไก่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาได้จากท้องถิ่น หมักเป็นระยะเวลา 4 เดือนและทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และสักรูปแบบต่างๆ ของทองแดงและแมงกานีสระหว่างการทำปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคการสกัดลำดับชั้นแบบ BCR จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) นำผลการศึกษามาแปลผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมตัวอย่างปัญหามูลค่า วิธีการ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
3. เตรียมการทดลอง
4. วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษา
5. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ
6. สรุปผลการทดลอง
7. เขียนรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การศึกษารูปแบบของทองแดงและแมงกานีสที่อยู่ในปัญหา สามารถนำไปประยุกต์ต่อการพิจารณาความเป็นประโยชน์ของทองแดงและแมงกานีสที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ ระยะเวลาการหมักต่างๆ ตลอดจนศึกษาภาพการปลดปล่อยทองแดงและแมงกานีสที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากรูปแบบต่างๆเมื่อได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมัก
2. สามารถนำความรู้มาใช้เลือกระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ย อันเป็นแนวทางแก่เกษตรกรในการหมักปุ๋ยในอนาคตต่อไป
3. ความรู้ที่ได้จะเป็นฐานข้อมูลที่ดีในการพัฒนาคุณภาพปุ๋ยหมักให้ดีขึ้นในอนาคตต่อไป



บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปุ๋ยหมัก (Compost)

2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก หมายถึงปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่างๆ มาหมักรวมกัน แล้วปรับสภาพให้เกิดกระบวนการย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ จนกระทั่งได้วัสดุที่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย มีสีน้ำตาลปนดำ ดังภาพที่ 1 โดยปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยสมบูรณ์จนได้เนื้อปุ๋ยที่มีลักษณะนุ่มยุ่ย ขาดจากกันง่าย มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิภายนอกและมีลักษณะที่ตรวจสอบได้ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 (สาส์น ชินสถิต & หลุทัย แก่นลา, 2548)



ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมัก

ที่มา: พีชเกษตร (2560)

2.1.2 กระบวนการหมักปุ๋ย

กระบวนการหมักปุ๋ยเป็นกระบวนการในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต่างๆ โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในดินภายใต้ปัจจัยหรือสภาวะที่เหมาะสม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เป็นต้น (Stenvenson, 1994) กระบวนการหมักปุ๋ยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ กระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน

(aerobic decomposition) เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและได้ผลิตภัณฑ์เป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความคงตัว น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และพลังงานความร้อน ส่วนกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic decomposition) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจน การหมักแบบนี้ก่อให้เกิดแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น คือ แก๊สแอมโมเนียและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาในการหมักนานกว่ากระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน เนื่องจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างช้าๆ

กระบวนการหมักปุ๋ยก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักทำให้สภาพแวดล้อมภายในกองปุ๋ยหมักเปลี่ยนแปลงไป แบ่งออกเป็น 4 ระยะ (M.P. Bernal, Paredes, Sanchez-Monedero, & Cegarra, 1998; Guang et al., 2009) ได้แก่ ระยะที่ 1 คือระยะเริ่มผสม (mesophilic phase) เป็นระยะแรกของกระบวนการหมัก (0 วัน) ในระยะนี้อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก และยังไม่มีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ระยะที่ 2 คือ ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic phase) เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบอุณหภูมิสูง เพื่อลดความร้อนจากกองปุ๋ยหมักดังนั้นควรมีการพลิกกลับกองปุ๋ยหมัก ระยะที่ 3 คือ ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (end of active phase) อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักเริ่มลดต่ำลงค่อนข้างคงที่ และในขณะเดียวกันจะพบว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เคยย่อยสลายสารอินทรีย์ก็เริ่มเกิดขึ้นน้อยลงตามด้วย และระยะที่ 4 คือระยะอุณหภูมิคงที่ (maturation phase) เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักเริ่มเย็นตัวลงเนื่องจากการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์เมื่อถึงระยะเวลานี้เริ่มมีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (M.P. Bernal, Albuquerque, & Moral, 2009) จึงสามารถใช้เป็นดัชนีในการติดตามการเจริญเติบโตของปุ๋ยหมักได้

2.1.3 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักปุ๋ย

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในกองปุ๋ยหมัก เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง โดยต้องมีปัจจัยที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ รายละเอียดมีดังนี้

1. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จัดว่าเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการหมักปุ๋ย โดยคาร์บอนเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งของคาร์บอนที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต ส่วนไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการในปริมาณมาก เนื่องจากส่วนประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นพวกโปรตีนและกรดนิวคลีอิกซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) สำหรับวัสดุที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง อัตราการย่อยสลายจะต่ำเนื่องจากความไม่สมดุลของคาร์บอนและไนโตรเจน หากมีไนโตรเจนน้อยการย่อยสลายเกิดได้ช้า

เนื่องจากจุลินทรีย์ถูกจำกัดการเจริญเติบโต แต่ถ้าหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมจะเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแก๊สแอมโมเนีย (Fourni, 2013; Tuomela, Vikman, Hatakka, & Itavaara, 2000) ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักจะอยู่ในช่วง 20-25 (Fourni, 2013) และเมื่อกระบวนการหมักเสร็จสิ้นลงต้องมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 กำหนดอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพเหมาะแก่การจำหน่ายให้มีค่าไม่เกิน 20:1 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) แสดงให้เห็นถึงการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักที่สามารถนำมาใช้ได้ (Guang et al., 2009)

2. ความชื้นในกองปุ๋ยหมัก

ความชื้นในกองปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ในการหมักปุ๋ย เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้เป็นปัจจัยในการดำรงชีวิตการเจริญเติบโต ดังนั้นในกองปุ๋ยหมักต้องมีความชื้นร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก (ธงชัย มาลา, 2546) หากความชื้นต่ำเกินไป คือต่ำกว่าร้อยละ 40 การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะเกิดช้า ทำให้ใช้เวลาในการหมักนาน แต่ถ้าหากความชื้นสูงเกินกว่าร้อยละ 80 ปริมาณอากาศไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายช้าลงเป็นผลทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพต่ำลง (ยงยุทธ โอสถสสา et al., 2551)

3. ปริมาณออกซิเจนหรือการระบายอากาศ

กระบวนการย่อยสลายในกองปุ๋ยหมักนั้นเกิดขึ้นได้โดยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้อากาศในการหายใจและการทำงาน ดังนั้นจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีก็ต่อเมื่อในกองปุ๋ยหมักมีอากาศแพร่กระจายถ่ายเทอย่างทั่วถึง ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำกระบวนการย่อยสลายจะเกิดช้าลง เกิดเป็นกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนที่ก่อให้เกิดแก๊สมีเทนและแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น โดยวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการเติมอากาศคือการพลิกกลับกองปุ๋ยหมัก เป็นต้น (สุธรรม ประทุมสวัสดิ์, 2545)

4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการหมัก โดยมีความเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ เนื่องจากจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความชอบที่แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของกองปุ๋ยหมักนั้นเกิดจากความร้อนจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ (กาญจนา สุรภา, 2557) ความร้อนที่เกิดขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ และได้ปุ๋ยหมักที่ปลอดภัยสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การศึกษาของ Tiquia, Tan, and Hodgkiss (1998) ที่ทำการศึกษาระบวนการหมักปุ๋ยมูลหมูในฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งทำการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ประเทศฮ่องกงพบว่าการหมักปุ๋ยมูลหมูในฤดูร้อนเกิดกระบวนการหมักได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าในฤดูหนาว เนื่องจากในฤดูหนาวอุณหภูมิต่ำทำให้ปฏิกิริยาของกระบวนการหมักปุ๋ยเกิดช้ากว่าในฤดูร้อน

5. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่างเป็นอีกปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งต่อกระบวนการหมัก เนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์จะมีความสามารถในการเจริญเติบโตที่ความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยความเป็นกรด-ด่างจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของการหมัก ในช่วงระยะแรกของการหมักความเป็นกรด-ด่างจะลดลงและหลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนระยะการหมักสุดท้ายความเป็นกรด-ด่างจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลางคือ 6.5-8.5 (ยงยุทธ โอสดสภา et al., 2551)

2.1.4 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักนั้นจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อพืชพรรณทุกชนิด โดยสามารถแบ่งประโยชน์ของปุ๋ยหมักออกเป็น 2 ด้านใหญ่ๆ ดังนี้ (ธงชัย มาลา, 2546)

1. ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ทำมาจากเศษพืช วัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้ ผสมกับมูลสัตว์ต่างๆ โดยสารฮิวมิกทำให้สีของดินเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีดำ เนื่องจากฮิวมัสที่ได้จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลเข้ม โดยทั่วไปเมื่อดินมีสีดังกล่าวถือได้ว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง จึงสามารถปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น ลดความหนาแน่นรวมของดินลงทำให้การระบายน้ำ การระบายอากาศและการซึมผ่านของน้ำลงไปในดินดีขึ้น ทำให้ระบบรากของพืชสามารถแผ่กระจายในดินได้อย่างกว้างขวางและแตกแขนงได้มาก จึงดูดซับแร่ธาตุต่างๆ และน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้นและสามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างในดิน รวมถึงชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดกิจกรรมในดินอย่างต่อเนื่องซึ่งช่วยในการส่งเสริมความอุดมสมบูรณ์ของดิน

2. ด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารของพืชโดยจะปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ โดยทั่วไปปุ๋ยหมักจะมีแร่ธาตุอาหารพืชที่สำคัญ คือ ไนโตรเจนทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.45 ถึง 2.5 ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชประมาณร้อยละ 0.2 ถึง 2.5 และโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 0.5 ถึง 1.8 นอกจากนี้แร่ธาตุทั้ง 3 ที่สำคัญสำหรับพืชแล้วยังมีแร่ธาตุสำหรับพืชที่ต้องการในปริมาณน้อยแต่มีความจำเป็นคือ จุลธาตุอาหาร ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม และคลอรีน ซึ่งธาตุอาหารหลักและจุลธาตุอาหารต่างมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่แตกต่างกัน แต่ต่างกันตรงปริมาณที่พืชต้องการเท่านั้น นอกจากนี้จะเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชแล้วปุ๋ยหมักยังช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชในดินแปรสภาพไปอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่าย ช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกน้ำฝนหรือน้ำชลประทานชะล้างสูญหายไปได้ง่าย

2.2 การประเมินคุณภาพและการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก

การประเมินคุณภาพและการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักนั้น เป็นการบ่งบอกว่าปุ๋ยหมักที่ได้ผ่านกระบวนการหมักอย่างสมบูรณ์ ในสภาวะที่เหมาะสม เมื่อนำไปใส่ในดินจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อดิน และพืชอีกทั้งยังช่วยประหยัดเวลาในการหมักปุ๋ยด้วย การประเมินการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือ ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมี ดังนี้

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักสามารถตรวจวัดได้ในภาคสนาม โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากลักษณะทางกายภาพ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเครื่องมือไม่แพง เช่น สีของปุ๋ยหมักเมื่อเจริญเต็มที่แล้วจะมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำ ร่วนซุย กลิ่นของแก๊สแอมโมเนียลดลง ความชื้นควรมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักลดลงเท่ากับอุณหภูมิภายนอก เป็นต้น รวมทั้งยังมีการเจริญเติบโตของพืชบนกองปุ๋ยหมักด้วย (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมัก

ดัชนี	ลักษณะของปุ๋ยหมัก	
	ก่อน	หลัง
ลักษณะของวัสดุหมัก	มองเห็นวัสดุหมักชัดเจน	ร่วน ซุย เปื่อยและยุ่ย
สี	สีน้ำตาล	สีน้ำตาลเข้มถึงดำ
กลิ่น	กลิ่นฉุนคล้ายแอมโมเนีย	ไม่มีกลิ่นฉุน
อุณหภูมิ	สูง	ใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก
ความชื้น	ร้อยละ 40-60	ไม่เกินร้อยละ 35

2.2.2 ลักษณะทางเคมี

การประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักโดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงคุณสมบัติทางเคมี ปริมาณธาตุอาหาร และระดับของโลหะหนักได้ จึงจำเป็นต้องมีการประเมินคุณลักษณะทางเคมีร่วมด้วยซึ่งจะต้องนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่าย พ.ศ.2548 แสดงดังตารางที่ 29 โดยพิจารณาจากความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนจากกระบวนการหมักปุ๋ยได้ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นดัชนีบ่งบอกความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (Ko, Kim, Kim, Kim, & Umeda, 2008; Moharana & Biswas, 2016) เนื่องจากในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะมีไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์หรือไม่และทำให้การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ (ยง

ยุทธ โอสธสภา et al., 2551) ดังนั้นเกณฑ์ที่เหมาะสมของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่ควรเกิน 20:1 ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

2.3 จุลธาตุอาหาร

2.3.1 ทองแดง (Copper : Cu)

ทองแดงจัดอยู่ในกลุ่มจุลธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อพืช ซึ่งในเปลือกโลกมีปริมาณทองแดงอยู่ระหว่าง 24-55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่สำหรับดินทั่วไปจะพบทองแดงอยู่ที่ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในธรรมชาติทองแดงจะอยู่ในรูปซัลไฟด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต และอยู่ในรูปสารประกอบอื่นๆ ทองแดงมีความเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ในดิน ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส แร่ดินเหนียว รวมทั้งแร่ธาตุอื่นๆ โดยการกระจายของทองแดงในดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและวัตถุต้นกำเนิด (Alloway, 1990) เช่น หินบะซอลต์ อาจมีทองแดงมากถึง 90 ppm กราไนต์ มีทองแดงเพียง 15 ppm เท่านั้น และในธรรมชาติแร่ทองแดงมักอยู่ร่วมกับซัลไฟด์ เช่น คาลโคไพไรต์ (CuFeS_2) เมื่อผุพังทองแดงจะถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปของแร่ธาตุที่มีประจุ +2 ที่สามารถละลายได้ (Baker, 1990)

1. บทบาทของทองแดงต่อการเจริญเติบโตของพืช

ทองแดงเป็นจุลธาตุอาหารที่มีความสำคัญสำหรับพืช โดยมีหน้าที่ทางอ้อมในกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์ เพิ่มโมเลกุลของคลอโรฟิลล์และช่วยป้องกันการทำลายคลอโรฟิลล์ที่อาจเกิดขึ้น ทำให้พืชมีอายุยืนยาวขึ้น เป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันต่างๆ ในพืชโดยทำหน้าที่เป็น electron carrier ในเอนไซม์ ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชันในพืช และช่วยในกระบวนการหายใจของพืชและทำให้พืชใช้เหล็กได้มากขึ้น

2. อาการเมื่อพืชขาดธาตุทองแดง

พืชที่ขาดทองแดงโดยปกติใบพืชจะมีสีเขียวจัดผิดสังเกตในระยะแรกๆ ต่อมาจะค่อยๆ เหลืองลง จนในที่สุดจะชะงักการเจริญเติบโต สำหรับพืชบางจำพวก เช่น ท้อและส้ม เมื่อเกิดอาการขาดทองแดงจะแสดงอาการคลอโรซิสหรือตายจากยอดลงมา แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การขาดทองแดงในข้าวบาร์เลย์

ที่มา: Mosaic cropnutrition (2016)

3. อาการเป็นพิษ

เมื่อพืชได้รับทองแดงมากเกินไปพืชจะมีการเจริญเติบโตลดลง เช่น ส้มจะแสดงอาการทองแดงเป็นพิษเมื่อดินมีทองแดงทั้งหมดอยู่ระหว่าง 125-250 ppm และมีความเป็นกรด-ด่างไม่เกิน 5 สำหรับดินบางแห่งทองแดงจะเป็นพิษกับพืชเมื่อดินมีทองแดงสูงกว่า 400 ppm ด้วยเหตุนี้การใช้ยาบอร์โด (Bordeaux mixture) เพื่อที่จะฆ่าเชื้อราติดต่อกันเป็นเวลานานอาจจะทำให้เกิดทองแดงเป็นพิษแก่พืชได้

2.3.2 แมงกานีส (Manganese : Mn)

แมงกานีสเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับ 12 ของธาตุทั้งหมดที่อยู่บนเปลือกโลก ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรูปของออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันตั้งแต่ +2 ถึง +7 โดย Mn^{2+} Mn^{3+} และ Mn^{4+} จะเป็นองค์ประกอบของแร่ที่สามารถเกิดสารประกอบร่วมกับออกซิเจน คาร์บอนและซิลิกา เช่น แร่ไพโรลูไซต์ (MnO_2) แร่โรโดโครไซต์ ($MnCO_3$) แร่โรโดไนต์ ($MnSiO_3$) รวมทั้งสารประกอบอื่นๆ ในรูปออกไซด์และออกซิไฮดรอกไซด์ ซึ่งการเปลี่ยนรูปจาก Mn^{2+} และ Mn^{3+} ไปเป็น Mn^{4+} นั้นสามารถเกิดขึ้นได้อย่างกว้างขวาง โดยแมงกานีสไอออนที่อยู่ในรูปออกไซด์เหล่านี้สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้และเมื่อเลขอะตอมเปลี่ยนไปก็จะทำให้โครงสร้างไม่เสถียรและมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่เกิดขึ้น (Smith, 1990) ซึ่งแมงกานีสจะมีอยู่ในดิน 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในเปลือกโลกเท่ากับ 950 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่แมงกานีสเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ยากในต้นพืชและละลายได้ดีในดินกรดที่มีความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 4.5-5.5 (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) ดังนั้นแม้แมงกานีสจะมีมากในดินเป็นอันดับ 14 ของโลก (Sposito, 1989) แต่ก็อยู่ในรูปแบบที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย

1. บทบาทของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของพืช

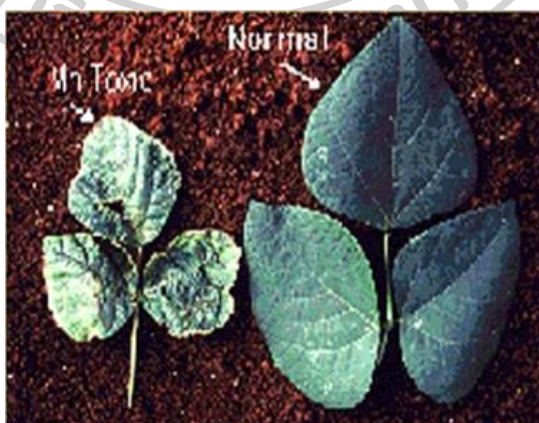
แมงกานีสเป็นจุลธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อพืชแต่พืชต้องการปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุอาหารหลัก โดยแมงกานีสมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงและช่วยในการดูดซึมคาร์บอนในกระบวนการนี้ด้วย เป็นตัวปลุกฤทธิ์ (activator) ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น ฟอสโฟกลูโคมิวเตส (phosphoglucomutase), โคลีนเอสเตอเรส (choline esterase) และ บีตา-คีโตดีคาร์บอกซิเลส (beta-ketodecarboxylases) ซึ่งส่วนมากเป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ของพืช และเมื่ออยู่ร่วมกับเหล็กจะเป็นตัวควบคุม oxidation-reduction potential (redox potential หรือ Eh) กระตุ้นการงอกของเมล็ด และการสุกแก่ของผลผลิตพืช (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

2. อาการเมื่อพืชขาดธาตุแมงกานีส

พืชที่ได้รับแมงกานีสไม่เพียงพอจะแสดงอาการผิดปกติที่ใบดังนี้คือ ใบจะมีสีเหลืองตามระหว่างเส้นใบ เพราะขาดคลอโรฟิลล์ ส่วนเส้นใบยังเขียวอยู่เป็นปกติและมักจะเกิดที่ใบอ่อนก่อนหรือบางที่อาจเกิดเป็นจุดสีขาวหรือเหลืองบนใบพืช พุ่มของใบจะน้อยเนื่องจากมีใบไม่สมบูรณ์ การเจริญเติบโตช้า ไม่ออกดอกออกผล พืชตระกูลหญ้ามีความไวต่อการขาดแมงกานีสมาก (ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, 2528)

3. อาการเป็นพิษ

พืชที่ได้รับปริมาณแมงกานีสมากเกินไปจะแสดงอาการเป็นพิษต่อเมื่อได้รับปริมาณแมงกานีสสูงกว่า 550 ppm มีการสร้างแคลลัส (callose) และต่อมาเป็นรอยด่างสีน้ำตาลที่ใบแก่ (ดังภาพที่ 3) อีกทั้งความเป็นพิษของแมงกานีสจะกระตุ้นให้เกิดการขาดแคลเซียมได้ เนื่องจากทำให้แคลเซียมเคลื่อนย้ายสู่ใบอ่อนได้น้อยลง

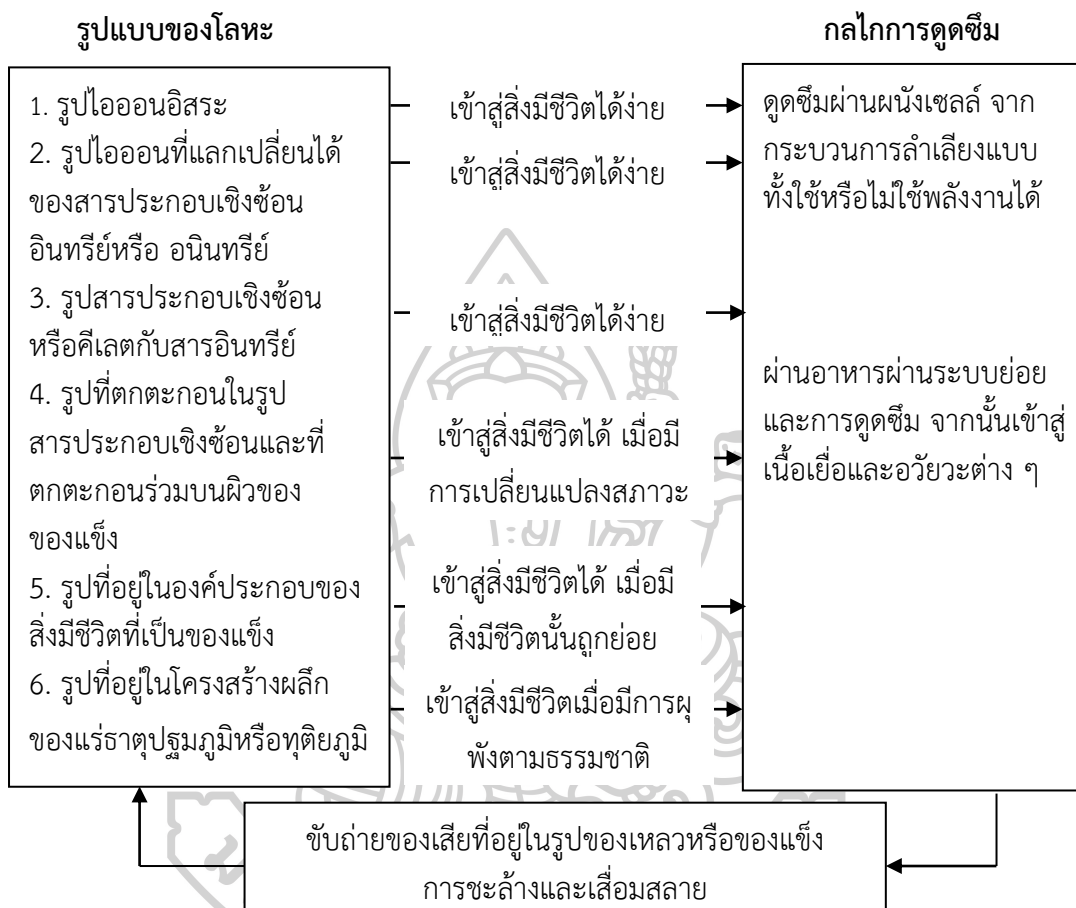


ภาพที่ 3 อาการเป็นพิษของแมงกานีส

ที่มา: สมพร (2545)

2.4 รูปแบบและบทบาทของโลหะในสิ่งแวดล้อม

การสะสมของโลหะในสิ่งแวดล้อมมีด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายได้ โดยจะเกิดประโยชน์หรือโทษขึ้นอยู่กับรูปแบบต่างๆ ที่ถูกนำเข้าไป สามารถแบ่งรูปแบบการสะสมของโลหะในสิ่งมีชีวิตเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก ดังภาพที่ 4 ได้ดังนี้

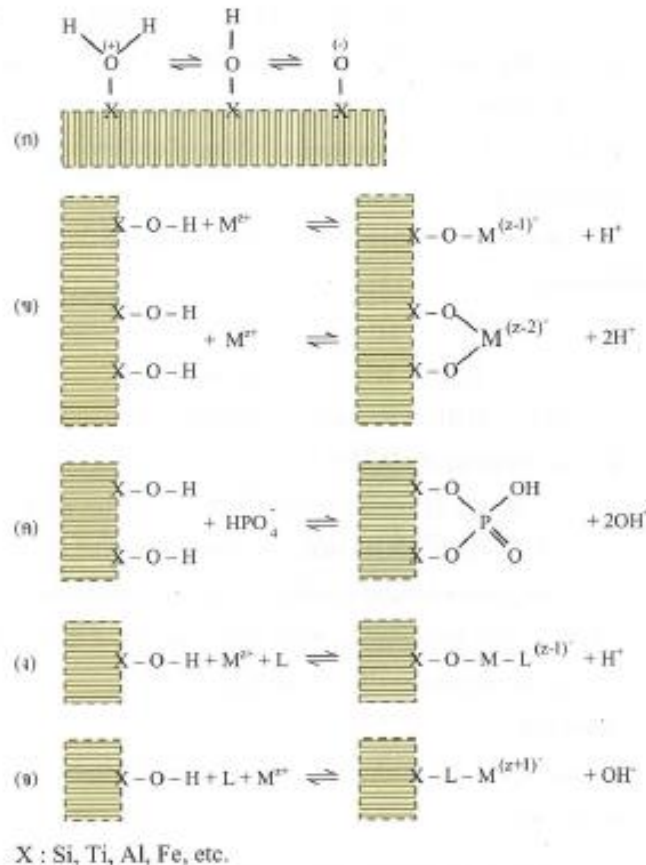


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิต
ที่มา: ดัดแปลงจาก Baudo (1982)

1. รูปีออนอิสระ รูปีออนประกอบอนินทรีย์ หรือรูปีออนอินทรีย์ที่ละลายนี้จะอยู่ในรูปีออนที่ดูดยึดเอาไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดิน โดยเฉพาะแร่ดินเหนียว สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายที่สุด และเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที เช่น Cu^{2+} และ Mn^{2+} เป็นต้น

2. รูปีออนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์หรืออนินทรีย์ โลหะที่อยู่ในรูปแบบนี้จะอยู่ในรูปแบบของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบกับสารประกอบออกไซด์ได้ เช่น $\text{Cu}(\text{OH})_2$ และ $\text{Mn}(\text{OH})_2$ เป็นต้น โดยจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายรองจากรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ในธรรมชาติไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติเป็นทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อนทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับหรือเกิดตกตะกอนร่วมกับแคตไอออนและแอนไอออนได้ (ดังภาพที่ 5) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อไฮดรอก-

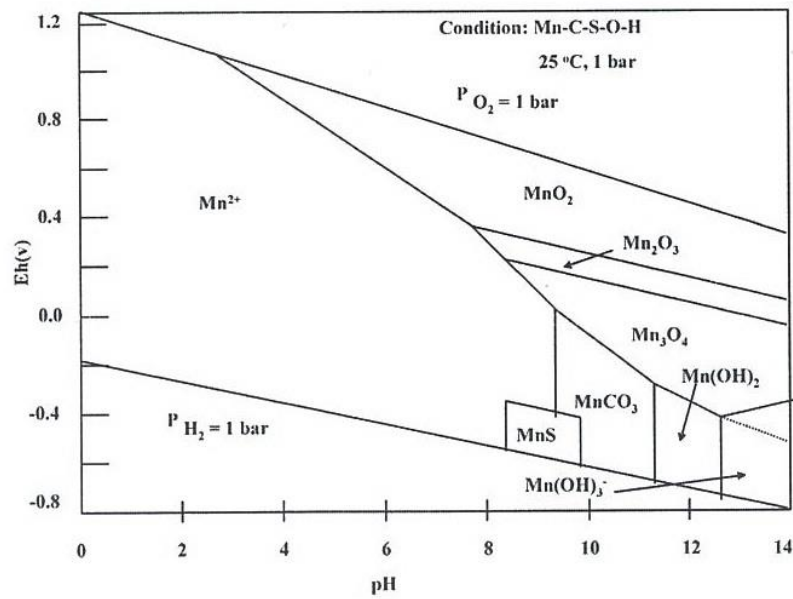
ออกไซด์ของโลหะมีหลายปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพีเอชไบคาร์บอเนต ซัลเฟตและฟอสเฟต สารอินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือคาร์บอกซิลิก และโลหะชนิดอื่น และจากภาพที่ 6 ที่ช่วงความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 7.1-8.3 จะพบ Mn(II) และ MnO_2 และ Mn_2O_3 อีกทั้งแมงกานีสยังมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับทองแดงได้มากกว่าลิแกนด์ประเภทอื่น (ดังภาพที่ 7)



ภาพที่ 5 ปฏิกริยาบนผิวของออกไซด์ที่อาจเกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ

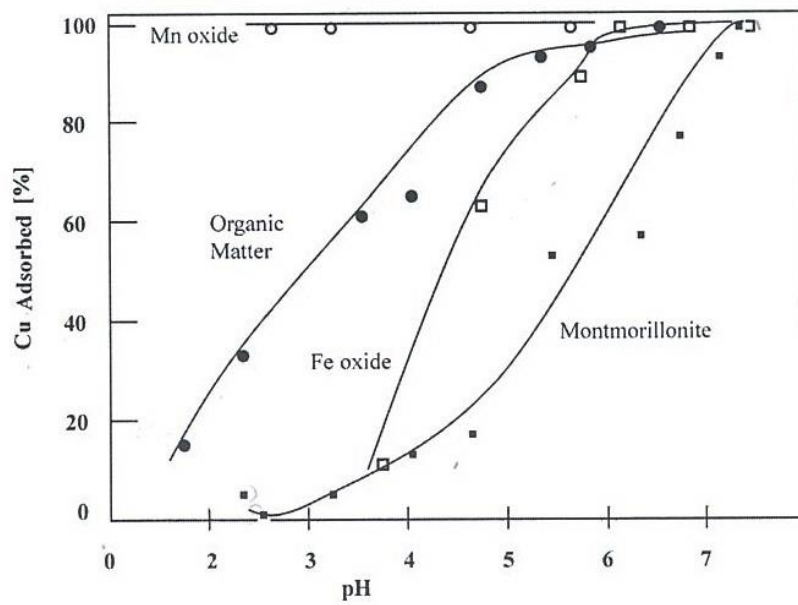
- (ก) ปฏิกริยากรด-เบส บริเวณผิวของออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล
- (ข) ไอออนของโลหะแทนที่ H^+ ของหมู่ไฮดรอกซิล
- (ค) หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยลิแกนด์อื่น ๆ
- (ง) ไอออนของโลหะเกิดพันธะโคออดิเนตกับลิแกนด์อื่นและเกิดการแทนที่ H^+ ของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของออกไซด์ด้วย
- (จ) Multidentate ligand ที่ละลายน้ำ ทำปฏิกริยาทั้ง X และไอออนของโลหะด้วยพันธะโคออดิเนต

ที่มา: Baudo (1982)



ภาพที่ 6 รูปแบบต่างๆ ของแมงกานีสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างและพีอี

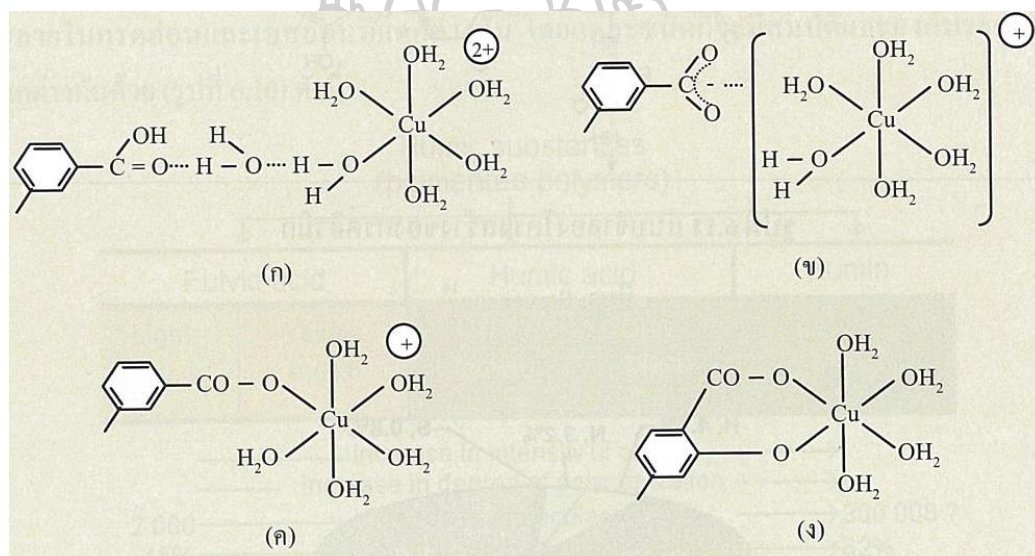
ที่มา: Bradl (2004)



ภาพที่ 7 การดูดซับของแมงกานีสออกไซด์กับลิแกนด์ต่างๆ

ที่มา: Bradl (2004)

3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนหรือสารประกอบคีเลตที่อยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ จัดเป็นรูปที่สามารถปลดปล่อยออกมาได้น้อย เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของแมงกานีสอินทรีย์ (Mn-org) สารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับกรดฮิวมิก (Cu-HA) (Stenvenson, 1994) โลหะในรูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์นั้นจะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อยๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยในธรรมชาติมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก แต่ที่พบปริมาณมากที่สุด ได้แก่ สารฮิวมิก ซึ่งกรดฮิวมิกจัดเป็นองค์ประกอบหลักของสารฮิวมิกในดินและปุ๋ยหมัก ส่วนมากจะมีสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ เกิดจากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ของจุลินทรีย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน โดยกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก มีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนโลหะ เพราะสามารถเกิดพันธะกับโลหะได้ โดยหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับโลหะ (Stenvenson, 1994) เช่น การจับกันของทองแดงกับหมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิก ซึ่งสามารถแบ่งตามพันธะและแรงยึดเหนี่ยว ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างการจับกันของทองแดงกับหมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิก

(ก) จับกันด้วย water bridge

(ข) จับกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับหมู่ COO^-

(ค) จับกันด้วยพันธะโคออร์ดิเนตโดยมีผู้ให้อิเล็กตรอนตัวเดียว (single donor group)

(ง) จับกันด้วยพันธะโคออร์ดิเนตเช่นกัน แต่โมเลกุลที่เข้าไปจับนั้นมีตำแหน่งที่ให้อิเล็กตรอนมากกว่า 1 หมู่

ที่มา: นัทธีรา สรรมณี (2555)

4. รูปที่ตกตะกอนในรูปสารละลายเชิงซ้อนและที่ตกตะกอนร่วมบนผิวของของแข็งจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีเท่านั้น เช่น สารประกอบไขมันของแมงกานีส (Mn-Lipids) (Stumm & Brauner, 1978)

5. รูปที่อยู่ในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมในกระดูกหรือซิลิกาในเปลือกหอย จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนแปลงสภาวะทางเคมีเท่านั้น

6. รูปที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแร่ธาตุปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ เช่น ทองแดง รูปที่พบคือแร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS_2) และแมงกานีสรูปที่พบคือแร่ไพโรลูไซต์ (MnO_2) เป็นต้น เป็นรูปแบบที่ถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้เมื่อเกิดการผุพังของแร่ธาตุและมีการเปลี่ยนแปลงสภาพตามกระบวนการทางธรรมชาติ โดยในปฏิกิริยาจะมีการเติมแร่ธาตุลงไปเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร เช่น มีการเติมธาตุอาหารรอง ในวัสดุหมัก รวมทั้งกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนองค์ประกอบที่ไม่สามารถสกัดได้ในวัสดุหมักมาอยู่ในรูปแบบนี้อีกด้วย

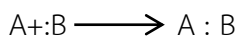
กระบวนการนำโลหะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตนั้นจะรับเข้าโดยการดูดซึมผ่านผนังเซลล์ หากเป็นโลหะที่โมเลกุลใหญ่จะเข้าสู่ระบบย่อยอาหารและถูกดูดซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อและอวัยวะต่างๆ ได้ และเมื่อสิ่งมีชีวิตตายลงและถูกย่อยสลายให้เน่าเปื่อยผุพัง โลหะในรูปแบบต่างๆ ก็จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมย้อนกลับเป็นวัฏจักรอีกครั้ง

2.6 เสถียรภาพของสารประกอบ

นอกจากโลหะจะปรากฏในโครงสร้างผลึกของแร่ หรือเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตแล้ว โลหะในสิ่งแวดล้อมยังปรากฏในรูปสารประกอบแบบอื่นๆ ได้ โดยทำปฏิกิริยากับลิแกนด์ซึ่งเป็นผู้รับอิเล็กตรอนที่อาจปรากฏอยู่ทั้งในรูปที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำ และในดิน เป็นต้น ซึ่งเสถียรภาพของสารประกอบที่เกิดขึ้นนี้มีความแตกต่างกันตามชนิดของโลหะและลิแกนด์ที่เข้าทำปฏิกิริยาโดยมีปัจจัยที่เอื้อต่อการเกิดสารประกอบและเสถียรภาพของสารประกอบ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง สภาวะรีดอกซ์ และไอออนิกสเตรนจ์ เป็นต้น

อย่างไรก็ดีสามารถจัดกลุ่มแนวโน้มการเกิดสารประกอบตามคุณสมบัติบางประการของโลหะที่แตกต่างกันได้ตามแนวโน้มการเกิดสารประกอบและเสถียรภาพของสารประกอบที่เกิดขึ้น โดยโลหะที่มีอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน d 9-12 ตัว จะจัดอยู่ในกลุ่มกรดอ่อน (Soft acid) เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ไม่มีอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน d พบว่าโลหะที่ไม่มีอิเล็กตรอนจะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าจึงจัดอยู่ในกลุ่มกรดแก่ (Hard acid) ขณะที่โลหะที่มีอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน d ระหว่าง 1-8 ตัว จะมีคุณสมบัติที่อยู่กึ่งกลางคล้ายทั้งกรดแก่และกรดอ่อน เรียกกลุ่มนี้ว่า Borderline เรียกการจัดกลุ่มแบบนี้ว่าการจัดกลุ่มกรด-เบสอ่อนแก่ (Hard and Soft acid-base) หรือ HSAB concept (ตารางที่ 2) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและคุณสมบัติของโลหะในการที่เป็น

ผู้รับอิเล็กตรอน (Lewis acid) จากผู้ให้อิเล็กตรอน (Lewis base) ของ Pearson หรือ HSAB concept เขียนได้ตั้งสมการ



โดยโลหะกลุ่มกรดแก่ (hard acid) ได้แก่ โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท ส่วนโลหะกลุ่มกรดอ่อน (soft acid) และกลุ่ม Borderline ได้แก่ โลหะกลุ่มแทรนซิชัน

ตารางที่ 2 การจำแนกไอออนของโลหะแบบกรด-เบส

	Hard	Borderline	Soft
Acids	H ⁺ , Sc ³⁺ , Cr ³⁺ , Cr ⁺⁶ , MoO ³⁺ , Ti ⁴⁺ , Zr ⁴⁺ , Hf ⁴⁺ , VO ²⁺ , Mn ²⁺ , Mn ⁷⁺ , Fe ³⁺ , Co ³⁺	Fe ²⁺ , Co ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Rh ³⁺ , Ir ³⁺ , Ru ³⁺ , Os ²⁺	Cu ⁺ , Ag ⁺ , Au ⁺ , Cd ²⁺ , Hg ⁺ , Hg ²⁺ , Pt ²⁺ , Pd ²⁺ , all <i>d</i> -block metals in zero oxidation state
bases	NH ³ , NH ₂ R, N ₂ H ₄ , OH ₂ , OH ⁻ , O ²⁻ , OHR, OR ⁻ , OR ₂ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , OClO ₃ , Cl ⁻ , F ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , OCOMe ⁻	NH ₂ Ph, N ₃ ⁻ , N ₂ , NO ₂ ⁻ , SO ₃ ²⁻ , Br ⁻	H ⁻ , R ⁻ , C ₂ H ₄ , C ₆ H ₆ , CN ⁻ , CO, SCN ⁻ , PR ₃ , P(OR) ₃ , AsR ₃ .SR ₂ , SHR, SR ⁻ , I ⁻

ที่มา: Winter (1994)

2.5 เทคนิคการสกัดลำดับขั้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นเป็นการศึกษารูปแบบของโลหะ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างของแข็งและของเหลว โดยการนำตัวทำละลายชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติในการสกัด การแยกหรือการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปแบบต่างๆ ตามความแรงของตัวทำละลายเป็นสารสกัดได้นอกจากสามารถหาปริมาณขององค์ประกอบแล้วยังสามารถทำนายพฤติกรรมของธาตุ รูปแบบของสารประกอบ การกระจายตัว แหล่งที่มา การเคลื่อนย้าย และการขนถ่ายได้อีกด้วย

การสกัดแบบลำดับขั้นที่นิยมใช้ทั่วไป คือวิธี Community Bureau of Reference หรือเรียกสั้นๆ ว่าวิธี BCR วิธีการสกัดโลหะในรูปแบบต่างๆ จะมีวิธีการสกัดที่แตกต่างกันออกไป โดยแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ละลายน้ำและละลายในกรด (Exchangeable, water and acid soluble fraction)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้คือโลหะจะอยู่ในรูปไอออน สามารถหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้สกัดในรูปแบบนี้จะมีความรุนแรงน้อยที่สุด

2. รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

รูปสารประกอบออกไซด์จะอยู่ในรูปของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ได้ โดยจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากกว่ารูปที่แลกเปลี่ยนได้

3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (Organically bound fraction)

รูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์เป็นรูปที่เกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์ โดยจะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อย ๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

4. รูปคงค้าง (Residual fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปคงค้างอยู่กับของแข็งนั้น จะมีโอกาสหลุดออกมาได้ยากที่สุด ยกเว้นเจอกับการชะล้างที่รุนแรง

เทคนิคการสกัดลำดับชั้นถูกนำมาใช้ในการพิจารณารูปแบบของโลหะต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาตัวอย่างนั้นๆ โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และวิธีวิเคราะห์ที่จะทำให้พบรูปแบบของโลหะต่างกัน อีกทั้งอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการเกิดรูปแบบของโลหะ ดังการศึกษาต่อไปนี้

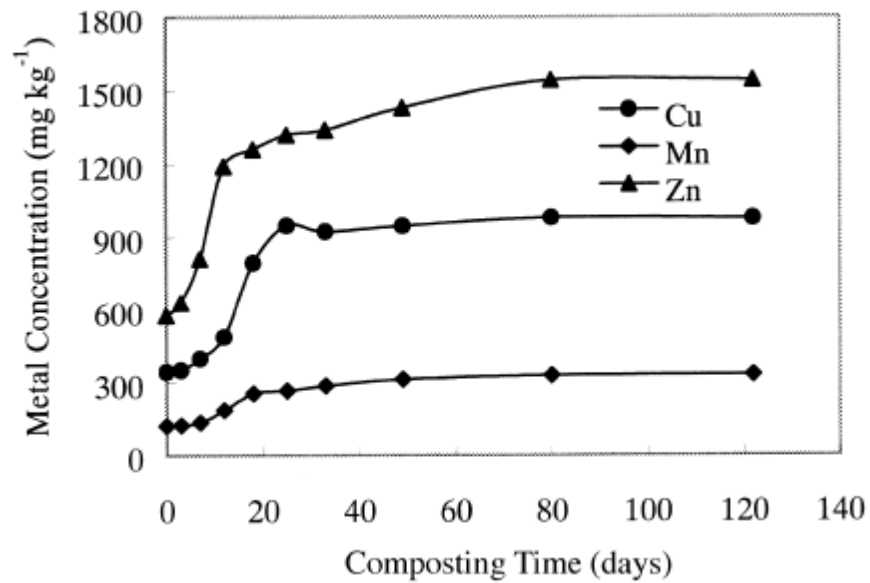
Hsu and Lo (2000) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการหมักต่อลักษณะทางเคมีและการชะทองแดง แมงกานีส และสังกะสี จากปุ๋ยหมักมูลวัว โดยทำการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 122 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักวันที่ 0, 3, 7, 12, 18, 25, 33, 49, 80, และ 122 วัน พร้อมทั้งศึกษาลักษณะทางเคมีของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น (ดังตารางที่ 3) สอดคล้องกับความเข้มข้นของทองแดงและแมงกานีสที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นเช่นกัน หรือที่เรียกว่า Condensation of Metals ดังภาพที่ 9

ตารางที่ 3 ลักษณะทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลวัวตลอดระยะเวลาการหมัก

Composting time (days)	Ash (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C/N	pH ^a
0	220	444	20.9	21.2	7.85
3	252	436	21.3	20.5	7.59
7	260	428	22.1	19.4	7.62
12	274	416	23.1	18.0	7.83
18	365	374	38.4	9.7	7.35
25	379	358	41.2	8.7	7.98
33	438	331	40.5	8.2	7.63
49	470	309	41.6	7.4	7.38
80	485	299	41.3	7.2	7.49
122	502	294	43.2	6.8	7.72

^a Measured on water extracts of compost samples.

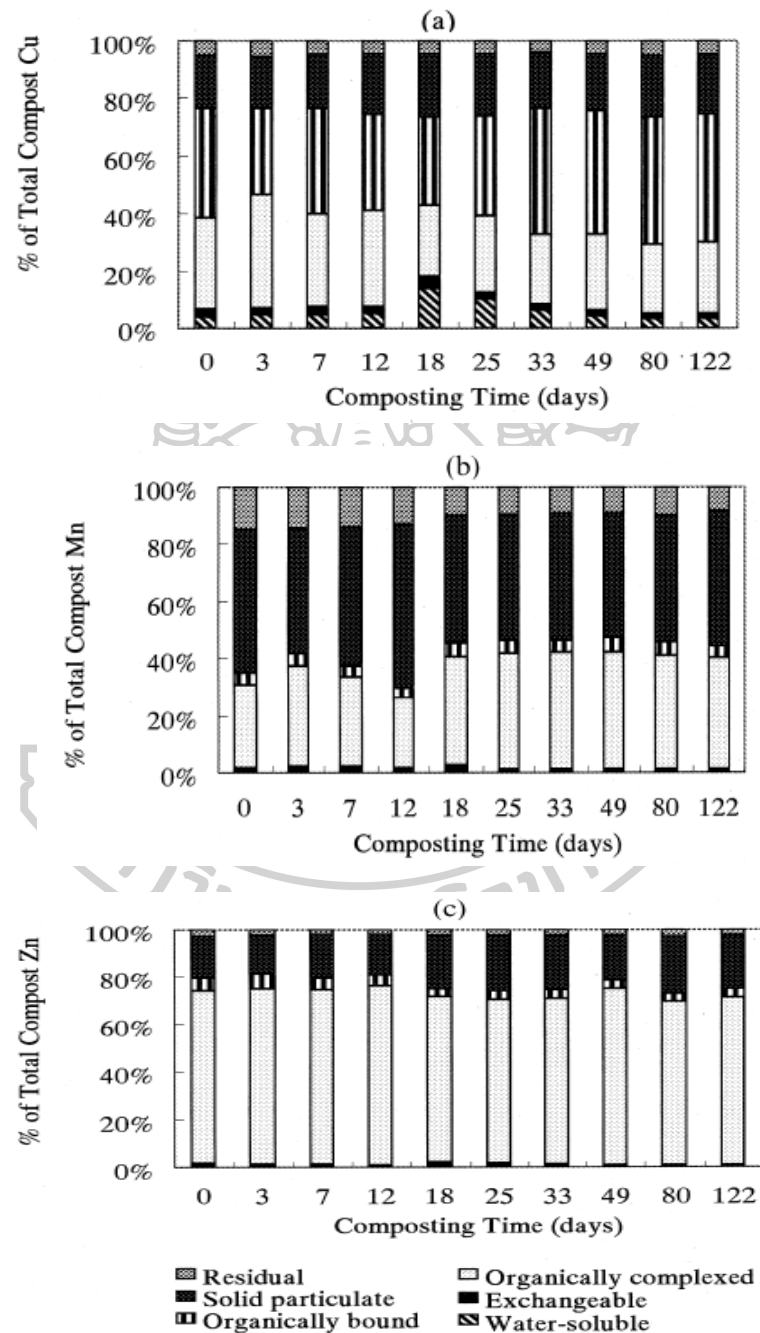
ที่มา: Hsu and Lo (2000)



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นรวมทั้งหมดของทองแดง แมงกานีส และสังกะสี

ที่มา: Hsu and Lo (2000)

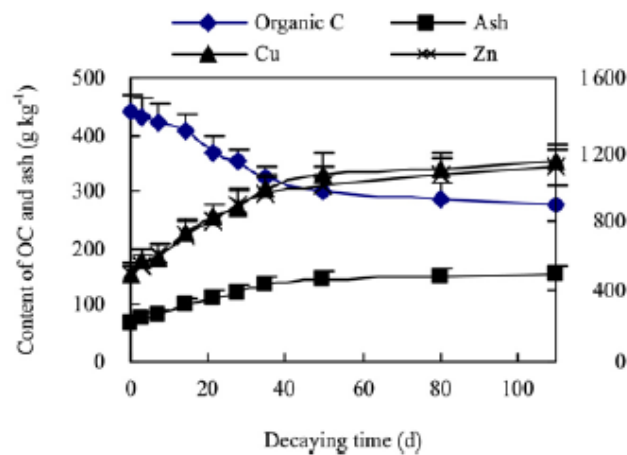
สำหรับรูปแบบของทองแดง แมงกานีส และสังกะสี ที่เกิดจากการสกัดลำดับชั้นในตัวอย่าง ปุ๋ยหมักมูลวัว สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ คือรูปที่จับกับสารอินทรีย์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปที่จับกับสารอินทรีย์ ตามลำดับ (ดังภาพที่ 10) จากรูปแบบที่พบของโลหะทั้งสามแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก และพืชสามารถนำไปใช้ได้น้อย



ภาพที่ 10 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดง (a) แมงกานีส (b) และสังกะสี (c)

ที่มา: Hsu and Lo (2000)

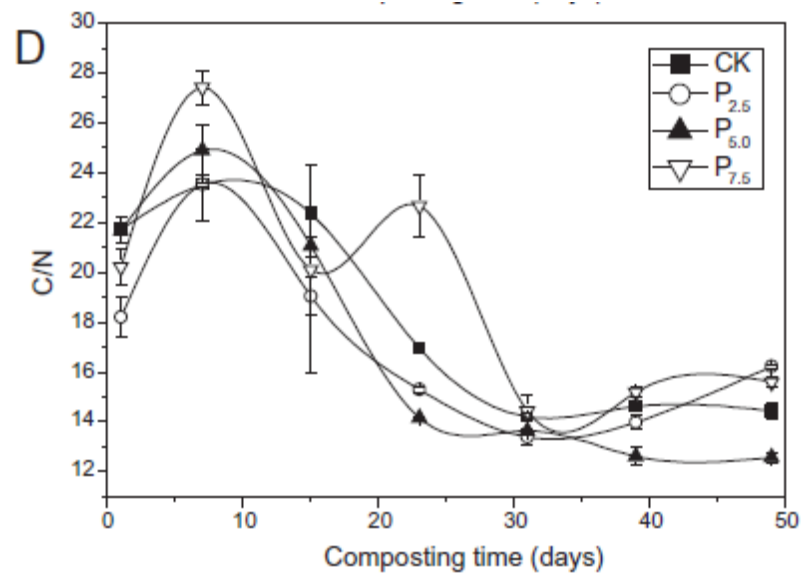
Shuai, Xu-dong, Li-Lan, Shi-rong, and Jun-feng (2008) ศึกษาหาสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เกิดระหว่างฮิวมิกกับทองแดงและสังกะสี จากปุ๋ยหมักมูลไก่ด้วยวิธีการสกัดลำดับชั้น พบว่าทองแดงจับกับสารฮิวมิกได้ดีกว่าสังกะสี โดยปริมาณรูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงและสังกะสีที่เพิ่มขึ้นในการทดลองมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุในกองปุ๋ยหมักที่ลดลงตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ดังภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเพิ่มปริมาณของทองแดงและสังกะสี



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุ ทองแดง และสังกะสีตามระยะเวลาการหมัก

ที่มา: Shuai et al. (2008)

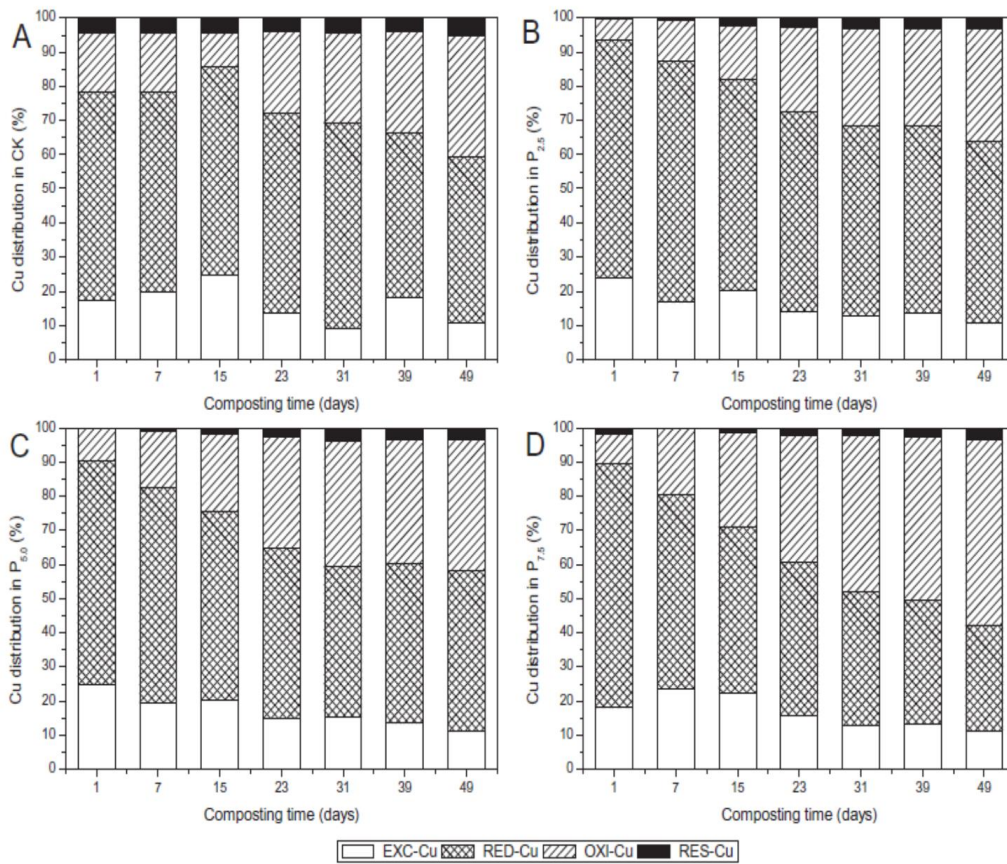
Lu et al. (2014) ศึกษารูปแบบของทองแดงและสังกะสี ระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูในการปรับปรุงปริมาณฟอสฟอรัสด้วยการเติมหินฟอสเฟต หมักปุ๋ยเป็นเวลา 49 วัน ด้วยวิธีการสกัดลำดับชั้นแบบ BCR มีทั้งหมด 4 รูปแบบได้แก่ รูปที่แตกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง พบว่าระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นปริมาณของทองแดงและสังกะสีจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดลงจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ (ดังภาพที่ 12) และเมื่อเติมหินฟอสเฟตลงในปุ๋ยหมักทำให้ในระหว่างกระบวนการหมักรูปแบบของทองแดงรูปที่แตกเปลี่ยนได้และรูปสารประกอบออกไซด์ซึ่งเป็นรูปที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายลดลง ในทางตรงกันข้ามรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปคงค้างของแข็งกลับมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักช่วยเพิ่มคุณภาพสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการตรึงทองแดงให้อยู่ในรูปดังกล่าวมากขึ้น และสามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่ถูกเติมด้วยหินฟอสเฟต

ที่มา: Lu et al. (2014)



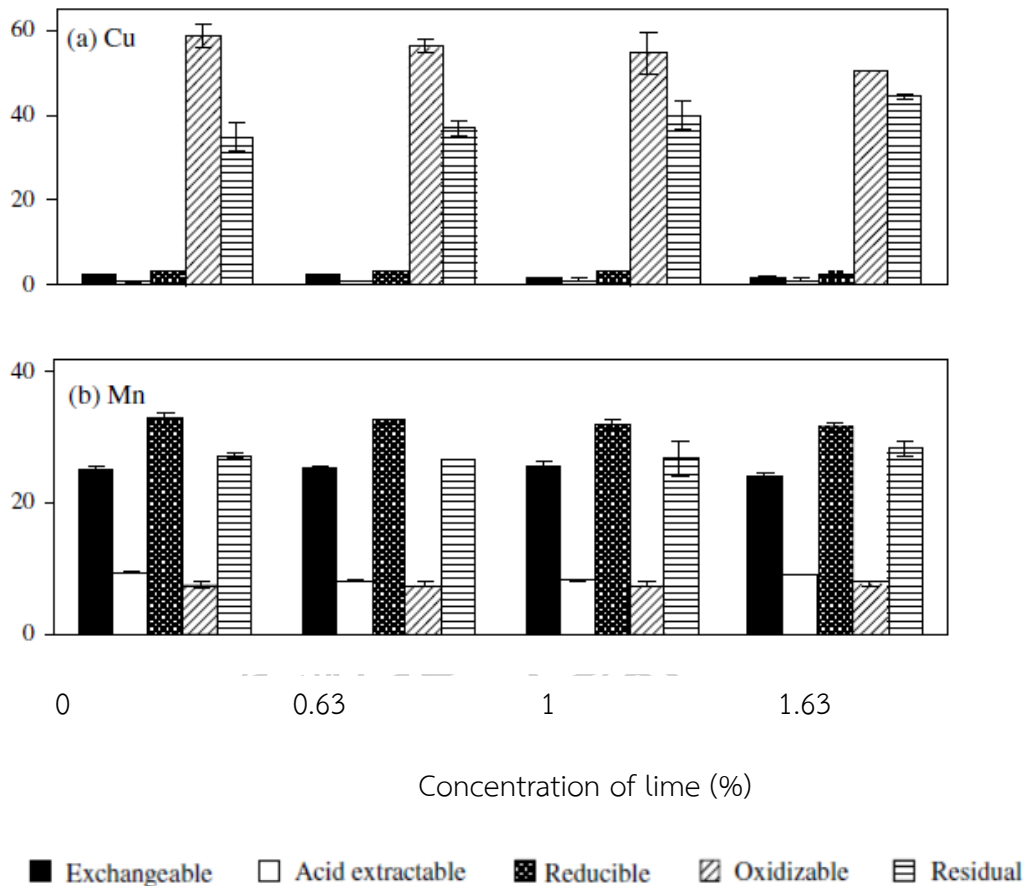


ภาพที่ 13 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดง (Cu) ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ยมูลหมูที่เติมด้วยหินฟอสเฟต A= เติมหินฟอสเฟต 0%, B= เติมหินฟอสเฟต 2.5%, C= เติมหินฟอสเฟต 5.0% และ D= เติมหินฟอสเฟต 7.5%

ที่มา: Lu et al. (2014)

Wong and Selvam (2006) ทำการศึกษารูปแบบของโลหะในระหว่างการหมักกากตะกอนน้ำเสียผสมกับขี้เลื่อยที่มีการปรับปรุงความเป็นกรด-ด่างด้วยการเติมปูนขาว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.63, 1.0 และ 1.63 ตามลำดับ พบว่ารูปแบบของทองแดงก่อนการหมักเรียงตามลำดับ ดังนี้ รูปคางของแข็ง > รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปที่ละลายในกรด > รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ แต่เมื่อผ่านกระบวนการหมักและการเติมปูนขาว พบว่ารูปแบบของทองแดงเปลี่ยนเป็นดังนี้ คือรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ > รูปคางของแข็ง > รูปสารประกอบออกไซด์ > รูปที่แลกเปลี่ยนได้ > รูปที่ละลายในกรด สำหรับแมงกานีสเมื่อผ่านกระบวนการหมัก รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปที่ละลายในกรด และรูปสารประกอบออกไซด์จะเพิ่มขึ้น โดยรูปสารประกอบออกไซด์มีปริมาณมากที่สุดดังภาพที่ 14 ซึ่งจากรูปแบบของทองแดงและแมงกานีสที่พบแสดงให้เห็น

ถึงการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่ยาก อย่างไรก็ตามรูปแบบนี้ก็ยังคงถูกเปลี่ยนแปลงและพืชนำมาใช้ได้
ภายหลัง

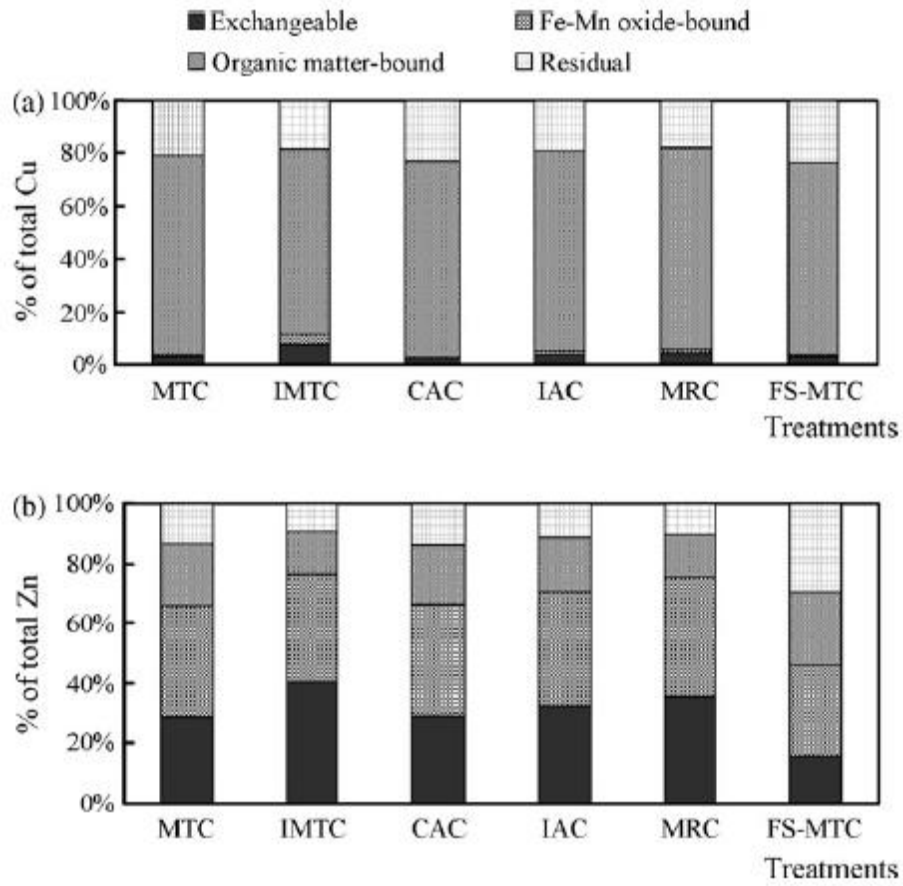


ภาพที่ 14 ร้อยละของทองแดงและแมงกานีสในรูปแบบต่าง ๆ จากการเติมปูนขาวความเข้มข้นต่าง ๆ

ที่มา: Wong and Selvam (2006)

Quan-Ying, Mo, Wu, Zeng, and Katsoyiannis (2007) ทำการศึกษาการหมักกากตะกอน 6 แห่ง ในระยะเริ่มผสม (0 วัน) และระยะสุดท้ายของการหมัก (56 วัน) ด้วยวิธีการสกัดลำดับชั้น 4 รูปแบบได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเมื่อการหมักนานขึ้นแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ และเมื่อศึกษา รูปแบบหลังการหมักวันที่ 56 ทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่ รูปคงค้างของแข็ง รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปสารประกอบออกไซด์ (ดังภาพที่ 15) สำหรับสังกะสีรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปสารประกอบออกไซด์มีค่าสูงขึ้นร้อยละ 20 แต่รูปสารประกอบ

เชิงซ้อนอินทรีย์มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทองแดงมีระดับเสถียรภาพ (degree of stabilization) จากสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักที่มีมากกว่าสังกะสี

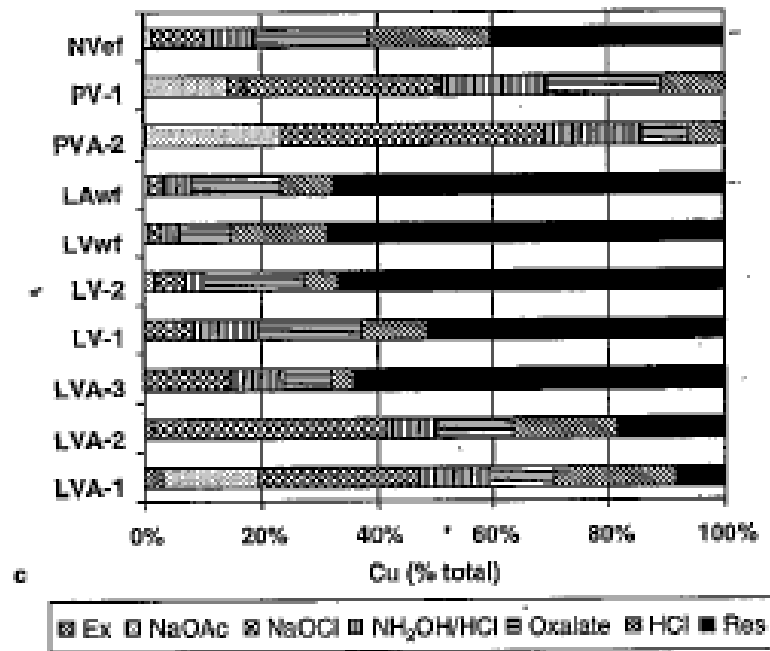


ภาพที่ 15 รูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงและสังกะสีจากการหมักกากตะกอน

ที่มา: Quan-Ying et al. (2007)

Silveira et al. (2006) ศึกษา รูปแบบของโลหะหนักจากดินเขตร้อนด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นที่แตกต่างกัน 3 วิธี วิธีที่ 1 ตามวิธีของ Tessier et al. (1979) วิธีที่ 2 Ahnstrom and Parker (1999) และวิธีที่ 3 วิธีใหม่ตามวิธีของ Silveira et al. (2006) โดยรูปคงค้างของแข็งที่สกัดด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ตามวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 สามารถจำแนกตามวิธีของ Silveira et al. (2006) ที่เพิ่มขั้นตอนการสกัดอีกสองขั้นตอน ได้แก่ การสกัดรูปผลึกเหล็กออกไซด์ที่ไม่แข็งแรง (Poor crystalline Fe oxides) และผลึกเหล็กออกไซด์ (Crystalline Fe oxide) ซึ่งส่วนที่คงค้างจะอยู่ต่อจากขั้นตอนนี้ โดยเมื่อทำการสกัดด้วยกรดไนตริก และกรดไฮโดร

คลอริก พบว่าสารประกอบในรูป amorphous หรือผลึกเหล็กออกไซด์จะทำให้ทองแดงถูกตรึงให้อยู่
 ในรูปคงค้างของแข็งเพิ่มมากขึ้น และยากต่อการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมดังภาพที่ 16



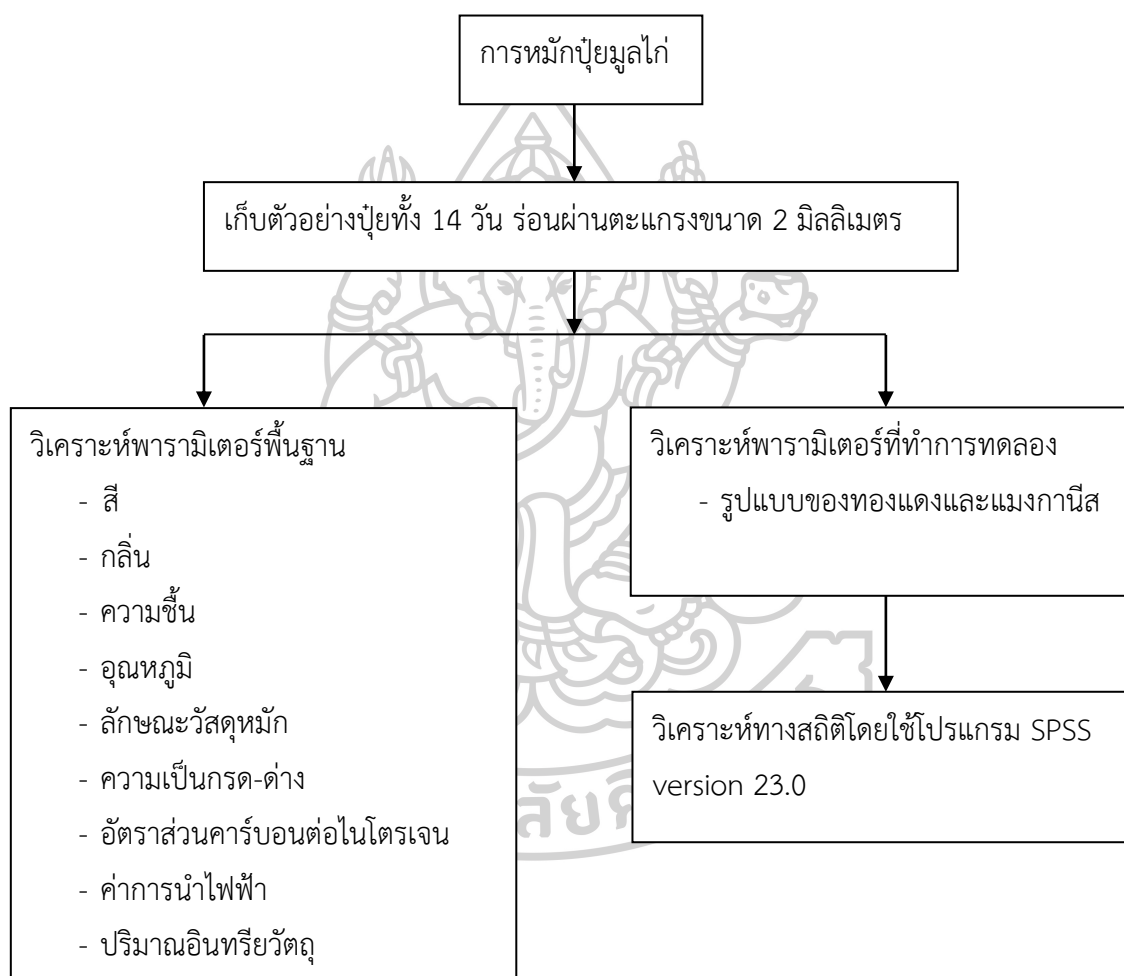
ภาพที่ 16 สัดส่วนรูปแบบทองแดงในดินตัวอย่าง

ที่มา: Silveira et al. (2006)



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้แบ่งกระบวนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานเทียบกับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่าย พ.ศ.2548 และการหารูปแบบพร้อมทั้งปริมาณของทองแดงและแมงกานีส และการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยแสดงแผนผังการทดลองโดยรวมดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แผนผังการทดลองโดยรวม

3.1 สารเคมีและรีเอเจนท์ (chemical and reagents) ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีและรีเอเจนท์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 4 โดยมีรายละเอียดต่างๆดังนี้ คือ Chemical Abstracts Service (CAS) number ของสารเคมี และบริษัทผู้ผลิตสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 4 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS number	บริษัท
Acetic acid	1.00063.2500	Merck
Hydroxylamine hydrochloride	263-500G	Ajax finechem
Suprapur Nitric acid 65%	1.00441.1000	Merck
Hydrogen peroxide 30%	H8087.1.2500	Merck
Ammonium acetate	A27-500G	Ajax finechem
Nitric acid	1.00456.2500	Merck
Hydrochloric acid	1.00317.2500	Merck

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204 ของบริษัท Mettler Toledo

3.2.2 เครื่องเขย่าแนวราบ (Horizontal shaker)

เครื่องเขย่าแนวราบของบริษัท Gallenkamp สามารถเขย่าได้ที่ความเร็วรอบ 20-400 RPM พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 4-60 องศาเซลเซียสและตั้งเวลาในการเขย่าได้

3.2.3 เซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)

เครื่องเซนตริฟิวจ์รุ่น ROTANTA 46R D78532 Tullingen 4810 ของบริษัท Hettichzentrifugen สามารถปรับความเร็วในการเหวี่ยงสูงสุด 4500 RPM และตั้งเวลาได้

3.2.4 ตู้อบ (Hot air oven)

ตู้อบใช้สำหรับอบเครื่องแก้วและสารเคมี โดยเป็นเครื่องมือยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtung GmbH MMM-group ซึ่งรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส

3.2.5 ตู้เย็น (Refrigerator)

ตู้ทำความเย็นใช้เก็บรักษาสารเคมีที่เตรียมไว้ใช้ในการทดลองและเก็บรักษาตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของสารเคมีให้คงเดิม

3.2.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Blupard HWS

3.2.7 ตะแกรงร่อน (Sieve)

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

3.2.8 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH Meter)

เครื่องวัดกรด-ด่างเป็นของบริษัท Metrohm รุ่น 713 โดยใช้ buffer pH 4 และ
buffer pH 7 ในการปรับเทียบ

3.2.9 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

เครื่อง AAS รุ่น SAVANTAAS ยี่ห้อ GBC

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ที่นำวัสดุเหลือ
ใช้ที่หาได้ทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐมมาเป็นส่วนผสมในการผลิต ซึ่งส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดังตาราง
ที่ 5 โดยสามารถแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 ส่วนผสมของน้ำหมัก ประกอบด้วย

ปลาน้ำจืด	จำนวน 8.98%
กากน้ำตาล	จำนวน 2.99%
รำละเอียด	จำนวน 1.50%
สับปะรด	จำนวน 0.30%
สารเร่งพด.2	จำนวน 0.01%

ชุดที่ 2 ส่วนผสมของของแข็ง ประกอบด้วย

กระดุกวัวปน	จำนวน 1.50%
รำละเอียด	จำนวน 0.90%
มูลค่างควา	จำนวน 0.60%
ธาตุอาหารรอง	จำนวน 0.60% (ยี่ห้อบิกโฟล)
โดโลไมท์	จำนวน 0.30%

ตารางที่ 5 ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม		ปริมาณ (ร้อยละ)	แหล่งที่มา	อายุ ส่วนผสม
น้ำหมัก	ปลาน้ำจืด	8.98	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ ต.บางช้าง อ.สามพราน จ.นครปฐม	1 เดือน
	กากน้ำตาล	2.99		
	รำละเอียด	1.50		
	สับปะรด	0.30		
	สารเร่งพด.2	0.01		
ของแข็ง	กระดุกวัวป่น	1.50	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ ต.บางช้าง อ.สามพราน จ.นครปฐม	1 เดือน
	รำละเอียด	0.90		
	มูลค่างควา	0.60		
	ธาตุอาหารรอง	0.60		
	โดโลไมท์	0.30		
มูลไก่	76.63	วัดไร่ขิง ต.ไร่ขิง อ.สามพราน จ.นครปฐม	1 เดือน	
ซีเมนต์นาเกลือ	5.69	นาเกลือ จ.สมุทรสาคร	2 เดือน	

1. ขั้นตอนของการหมักปุ๋ย

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสูตรปุ๋ยหมักมูลไก่ของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี โดยใช้พื้นที่ในการทำปุ๋ยหมัก ณ ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ห่างไกลจากแหล่งชุมชนเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนในการทำปุ๋ยหมักนั้น จะเริ่มจากการนำเอามูลไก่มาใส่ในเครื่องบดผสม เติมน้ำเพื่อให้มูลแยกจากกันและผสมให้เข้ากัน โดยให้ความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 หลังจากนั้นเติมน้ำซีเมนต์นาเกลือใส่ส่วนผสมของน้ำหมักชุดที่ 1 ประมาณ 10 ลิตร และส่วนผสมของของแข็งชุดที่ 2 ตามปริมาณที่กล่าวไว้ในตารางที่ 4 คลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วนำมาบรรจุใส่กระสอบปุ๋ยประมาณ 10 กระสอบ ปริมาณกระสอบละ 15 กิโลกรัมแล้วใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบไม่ให้แน่นมาก หลังจากนั้นนำปุ๋ยหมักมาหมักต่อที่เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

2. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

ก่อนที่จะทำการเก็บตัวอย่างปฏิกิริยา ต้องทำการพลิกกลับกระสอบปุยไปมา 2 ถึง 3 ครั้ง เพื่อให้ปฏิกิริยาในกระสอบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการเปิดปากกระสอบแล้ววัดอุณหภูมิ ทำการบันทึกอุณหภูมิที่วัดได้และบันทึกลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ของปฏิกิริยาภายในกระสอบ เช่น สี กลิ่น ลักษณะของวัสดุหนัก เป็นต้น และทำการเก็บตัวอย่างปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยามีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ โดยใช้ปิเกตเจอร์ตักบริเวณตรงกลางกระสอบปุยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของปฏิกิริยา ทำการเก็บให้ครบทุกกระสอบจำนวน 10 กระสอบ เก็บตัวอย่างปฏิกิริยาให้ได้ประมาณ 2 กิโลกรัม แล้วเขียนรายละเอียดของปฏิกิริยา คือ อายุปฏิกิริยา และวันที่เก็บตัวอย่าง ลงในฉลากเพื่อติดข้างถุงพลาสติกที่ใส่ตัวอย่างปฏิกิริยา ทำการเก็บตัวอย่างปฏิกิริยาข้างต้นเมื่อถึงวันครบกำหนดของอายุปฏิกิริยาที่ต้องการ เก็บไปจนครบอายุการหมักที่ 119 วัน โดยเก็บตัวอย่างปฏิกิริยาเข้ากระสอบเดิม ทั้งหมด 10 กระสอบ

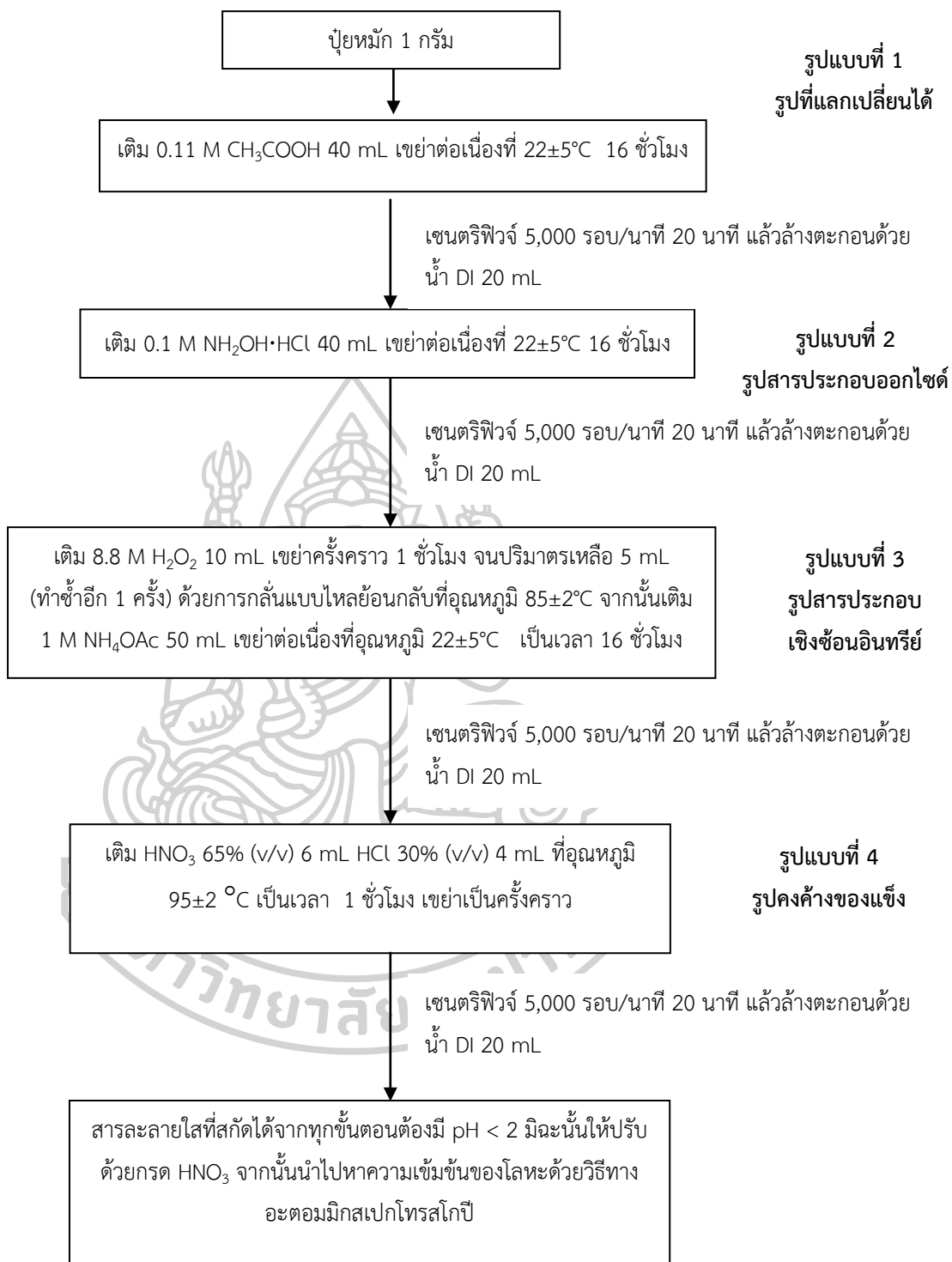
3. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

หลังจากเก็บตัวอย่างปฏิกิริยาแล้ว นำตัวอย่างปฏิกิริยามาผึ่งให้แห้ง ด้วยวิธี Air dry ในตู้ laminar flow ภายในห้อง clean room ทำการคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะ ออกตามมาตรฐานคุณภาพปฏิกิริยาอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 หลังจากนั้นคัดแยกขนาดของปฏิกิริยาโดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร ส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและอีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและแมงกานีสด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบ BCR ซึ่งมี 4 รูปแบบ โดยจะใช้กรดที่มีความรุนแรงน้อยในการสกัดไปจนถึงกรดที่มีความรุนแรงมาก

3.3.2 การวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและแมงกานีสด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นการนำตัวทำละลายชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติในการสกัด การแยกหรือการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปแบบต่างๆ ตามความแรงของตัวทำละลายให้เป็นสารสกัดได้นอกจากสามารถหาปริมาณขององค์ประกอบแล้วยังสามารถทำนายพฤติกรรมของธาตุ รูปแบบของสารประกอบ การกระจายตัว แหล่งที่มา การเคลื่อนย้ายและการขนถ่ายได้อีกด้วย

การสกัดแบบลำดับขั้นที่นิยมใช้ทั่วไป คือวิธี Community Bureau of Reference หรือเรียกว่าวิธี BCR วิธีการสกัดโลหะในรูปแบบต่างๆ จะมีวิธีการสกัดที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 18 โดยแบ่งรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่



ภาพที่ 18 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น

1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้จะอยู่ในรูปไอออน ที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เมื่อได้รับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและเหมาะสม โดยสารสกัดที่ใช้ในรูปแบบนี้คือ 0.11 โมลาร์ กรดอะซิติก (CH_3COOH) เขย่าต่อเนื่องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง

2. รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

โลหะในรูปแบบนี้ คือโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบออกไซด์ได้ โดยใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นจากรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ สารสกัดที่ใช้ในรูปแบบนี้คือ 0.1 โมลาร์ ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) และเขย่าต่อเนื่องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ปลดปล่อยออกมาได้ยากกว่ารูปแบบแรก

3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนสารอินทรีย์ (Organically bound fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบที่เกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์นั้น จะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อย ๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการสกัดโลหะในรูปแบบนี้จะใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงมากกว่าสองรูปแบบข้างต้น โดยใช้สารสกัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 8.8 โมลาร์ และแอมโมเนียมอะซิเตท (NH_4OAc) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และกลั่นแบบไหลย้อนกลับที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

4. รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปคงค้างอยู่กับของแข็งนั้น จะมีโอกาสหลุดออกมาได้ยากที่สุด จึงต้องใช้สารเคมีที่มีความรุนแรงในการสกัดมากกว่ารูปแบบทั้ง 3 ข้างต้นดังกล่าวมาแล้ว โดยเลือกใช้กรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นตัวสกัดในรูปแบบดังกล่าว

3.3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรม IBM SPSS 23.0 ทำการทดสอบ ดังนี้

1. ทดสอบความแตกต่างในเชิงปริมาณโดยการจัดกลุ่มด้วยวิธี Duncan test
2. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับรูปแบบต่างของทองแดงและแมงกานีส โดยใช้ความสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation)
3. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับรูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงและแมงกานีสในรูปแบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธี Multiple linear regression เลือกตัวแบบโดยวิธี stepwise

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการหารูปแบบและปริมาณทองแดงและแมงกานีสด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่เกิดจากการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร รวมระยะเวลาในการหมักทั้งสิ้น 119 วันเก็บตัวอย่างในช่วงอายุการหมัก 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วันเพื่อศึกษารูปแบบของทองแดงและแมงกานีสรวมทั้งระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษารูปแบบที่พืชพร้อมจะนำไปใช้ ตลอดจนศักยภาพที่จะทยอยปลดปล่อยรูปแบบอื่นๆ อันจะเป็นประโยชน์ในอนาคตต่อไป

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก และการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี มีความสำคัญในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปุ๋ยหมักซึ่งใช้ประกอบการพิจารณาความเหมาะสมของการนำไปใช้ตลอดจนการผลิตเพื่อการจำหน่ายตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (ดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 อุณหภูมิ

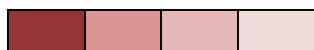
อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ (M.P. Bernal et al., 1998; Fourti, 2013; Guang et al., 2009; Tuomela et al., 2000; Zbytniewski & Busszewski, 2005) โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังภาพที่ 19 ได้แก่ 1) ระยะเริ่มผสม (Initial phase) เป็นระยะเริ่มกระบวนการหมักยังไม่มีกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักจึงมีค่าใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอกคือ 31.5 องศาเซลเซียส 2) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) เป็นระยะที่อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้นเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มที่ชอบอุณหภูมิสูงย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยยาก (กาญจนา สุรภา, 2557; ยงยุทธ โอสธสภา et al., 2551) ซึ่งอยู่ในช่วงการหมักวันที่ 1-35 มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35.0-53.7 องศาเซลเซียส ในระยะนี้ควรให้กองปุ๋ยมีการระบายความร้อนเพื่อเพิ่มอากาศให้กับกองปุ๋ย 3) ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturity phase) เป็นระยะที่กองปุ๋ยเริ่มเย็นตัวลงอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ซึ่งอายุของการหมักเริ่มตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป มีอุณหภูมิ 27.0-30.3 องศาเซลเซียส โดยในระยะนี้เป็นระยะที่ปุ๋ยพร้อมนำไปใช้มากที่สุด

ตารางที่ 6 คุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักมูลไก่

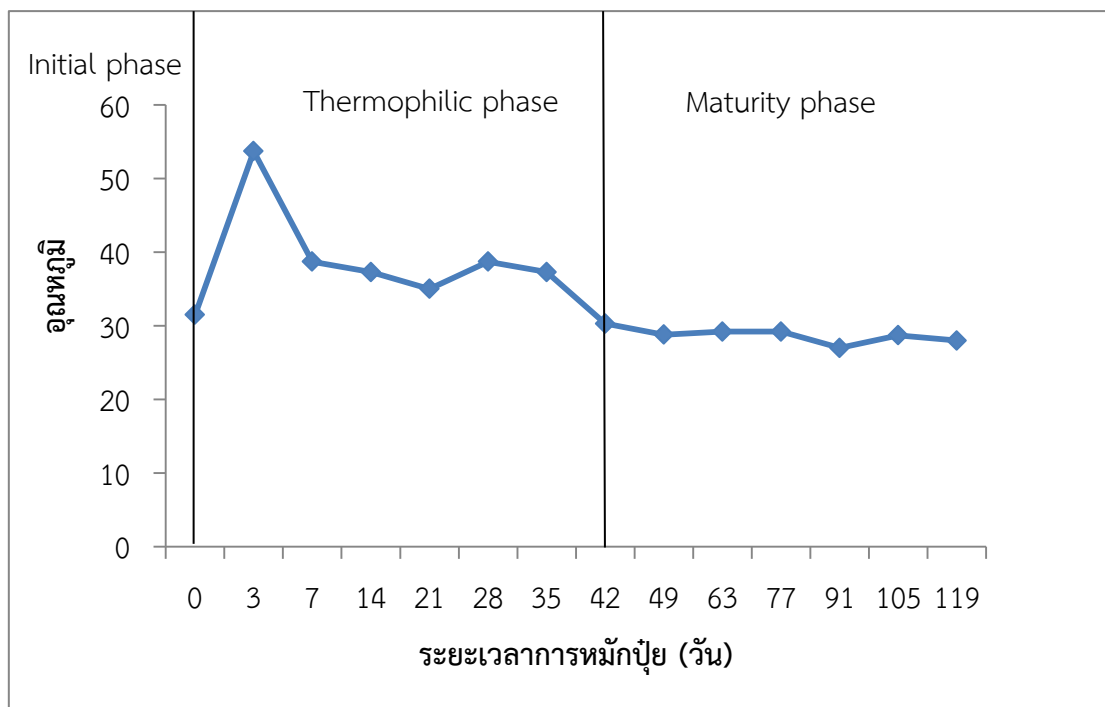
อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ระยะปุ๋ยหมักตามการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่				
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้น (ร้อยละ)	กลิ่น	สี	ลักษณะของวัสดุหมัก
0	ระยะเริ่มผสม (Initial phase)	31.5	47.4			มองเห็นวัสดุหมักแต่ละส่วนชัดเจน มีความชื้น
3	ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)	53.7	35.4			
7		38.7	32.0	ปุ๋ยหมักเริ่มแห้ง เกาะเป็นก้อน มีความชื้นและความร้อนลดลง		
14		37.3	27.3	ปุ๋ยหมักแห้ง เกาะเป็นก้อน มีความชื้นและความร้อนลดลง		
21		35.0	24.3	ปุ๋ยหมักแห้ง เกาะเป็นก้อน มีความชื้นและความร้อนลดลง		
28		38.7	24.9	ปุ๋ยหมักแห้ง เกาะเป็นก้อนและร่วน มีความชื้นและความร้อนลดลง		
35		37.3	19.1		สีน้ำตาลเทา	
42	ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Maturity phase)	30.3	16.2			
49		28.8	15.8			
63		29.2	15.7			
77		29.2	14.6			
91		27.0	13.8			
105		28.7	14.3			
119		28.0	12.6			

ที่มา: จุฑาวรรณ สุคนธนิษฐ์ (2557)

หมายเหตุ: ระดับกลิ่นของแอมโมเนีย มากที่สุด



น้อยที่สุด



ภาพที่ 19 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย

4.1.2. ความชื้น กลิ่น สี และลักษณะของวัสดุหมัก

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ภายในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งความชื้นในกองปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายจะอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 (Garcia, Moreno, Hernandez, Costa, & Polo, 1995; Sweeten & Auvermann, 2008; ธงชัย มาลา, 2546) ในระยะเริ่มผสมความชื้นมีค่าสูงถึงร้อยละ 47.4 เนื่องจากการผสมวัสดุตั้งต้นที่เป็นของเหลวลงในปุ๋ยหมัก จึงทำให้ในช่วงแรกความชื้นของปุ๋ยหมักมีค่าสูง และมีกลิ่นฉุนคล้ายแอมโมเนียจากกรดยูริกที่เป็นองค์ประกอบในมูลไก่ (ภัทรพร กังวานเจษฎา, 2555) มีสีน้ำตาลสามารถมองเห็นวัสดุหมักชัดเจน เมื่อเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูงความชื้นจะลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 19.1-35.4 กลิ่นของแอมโมเนียลดลง สีของปุ๋ยหมักสีน้ำตาล เนื้อปุ๋ยหมักเริ่มแห้ง เกาะเป็นก้อน ร่วน ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ความชื้นจะลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 12.6-16.2 ไม่มีกลิ่นของแอมโมเนีย สีน้ำตาลเทา (ดังภาพที่ 20) เนื้อปุ๋ยหมักเริ่มแห้งเป็นก้อน มองไม่เห็นวัตถุตั้งต้น โดยปุ๋ยหมักตั้งแต่อายุหมักวันที่ 7 เป็นต้นไปมีค่าความชื้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) เพื่อการจำหน่าย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 ลักษณะทางกายภาพของปุยมูลไก่

(ก) ปุยมักอายุ 0 วัน (ข) ปุยมักอายุ 119 วัน

4.1.3. ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างเป็นดัชนีที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.5-9.0 (Pace, Miller, & Farrell-Poe, 1995) จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยมักยังมีผลต่อดิน ดังนั้นปุ๋ยมักที่ดีจึงไม่ควรมีค่าสูงหรือต่ำจนเกินไป โดยกรมวิชาการเกษตร (2548) กำหนดมาตรฐานเพื่อการจำหน่ายอยู่ในช่วง 5.5-8.8 ซึ่งปุ๋ยมักตลอดการศึกษานี้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักและการจำหน่ายโดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.1-8.3

4.1.4 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าแสดงถึงปริมาณไอออนของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Ko et al., 2008; Mukesh et al., 2014; Rawoteea, Mudhoo, & Kumar, 2017) โดยค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยมักตลอดอายุการหมัก 119 วันมีค่าอยู่ในช่วง 12.3-18.4 ซึ่งไม่ผ่านค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต่อเมตร แสดงดังตารางที่ 7 โดยค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เป็นเกลือ เช่น ฟอสเฟต และแอมโมเนียมไอออน (Huang, Wong, Wu, & Nagar, 2004) นอกจากนี้ในการหมักมีการเติมขี้เถ้าดินในส่วนผสมเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหารและเกลือ และอาจมีผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินไป ดังนั้นในการหมักปุ๋ยครั้งต่อไปควรงดการเติมขี้เถ้าดินเพื่อป้องกันปัญหาดินเค็มจากการใช้ปุ๋ยมัก

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
pH	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 dS/m	13.4	18.5	17.8	12.3	14.7	14.3	17.3	17.7	17.2	17.0	17.3	16.6	15.4	15.6
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	≥ 30% โดยน้ำหนัก	74.8	57.3	52.3	44.6	51.3	47.3	49.6	47.6	47.0	47.4	45.7	41.8	41.7	43.5
C/N ratio	≤ 20:1	15.1:1	13.0:1	11.0:1	10.4:1	10.5:1	9.2:1	9.9:1	9.3:1	10.7:1	9.5:1	10.3:1	9.3:1	9.5:1	9.2:1
ปริมาณธาตุอาหารหลัก															
ไนโตรเจน (Total Nitrogen)	≥ 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
ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	11.1	8.2	11.8	11.1	9.9	9.9	12.0	11.0	11.1	7.2	6.3	10.4	7.1	10.1
โพแทสเซียม (K ₂ O)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	8.5	8.5	9.7	9.1	9.9	8.0	8.5	8.3	7.6	8.7	8.8	7.8	7.3	7.9

ที่มา: จุฑาวรรณ สุนทรนิตย์ (2557)

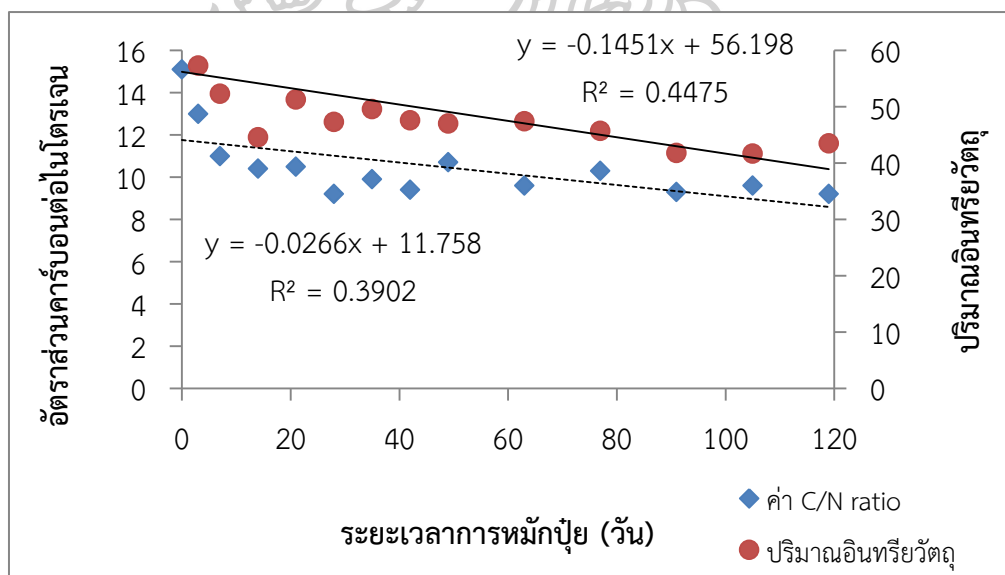
หมายเหตุ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

* สำหรับขนาดของปุ๋ย ปริมาณหินและกรวด และพลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่น ๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนปรอท (Hg) ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในครั้งนี้

** ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) และตะกั่ว (Lead) พบว่ามีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน (อมรรัตน์ เอื้อสลุง, 2559)

4.1.5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักมีค่าสูงในวันเริ่มผสมจากนั้นจะลดลงไปเรื่อยๆ สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.643$, $p < 0.01$) โดยพบว่าในระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 0-14) ของการหมักมีการลดลงของอินทรีย์วัตถุอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ยงยุทธ โอสดสภา et al., 2551) หลังจากนั้นอัตราการลดลงจะเป็นไปอย่างช้าๆ ขณะที่อุณหภูมิของปุ๋ยหมักค่อยๆ ลดลงเช่นกัน (ภาพที่ 19) แสดงให้เห็นถึงอัตราการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงที่ลดลงจากปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งต้นที่ลดลงดังกล่าว อย่างไรก็ตามปริมาณอินทรีย์วัตถุตลอดระยะเวลาการหมักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) เพื่อการจำหน่ายที่กำหนดให้ต้องมากกว่าร้อยละ 30 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 41.7-74.8 และเป็นผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงตามระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญด้วย ($r = -0.598$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 21 มีค่าอยู่ในช่วง 9.2-15.1 และมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิสูงวันที่ 0-14 เช่นกัน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการหมักที่ผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมวิชาการเกษตร (2548) กำหนดไว้ต้องไม่เกิน 20 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดสารฮิวมิกที่ดีตามคำแนะนำของ Tan (2003) ที่ระบุไว้ต้องอยู่ในช่วง 10-15



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น

- ก. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.643$, $p < 0.01$)
- ข. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.598$, $p < 0.01$)

4.1.6 ปริมาณธาตุอาหารหลัก

ปริมาณธาตุอาหารหลักเป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จากการหมักปุ๋ยพบว่าปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 2.8-3.3 โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 6.3-12.0 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 7.3-9.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งตลอดระยะเวลาการหมักปริมาณธาตุอาหารหลักทั้ง 3 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่กำหนดให้ปริมาณไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมมากกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

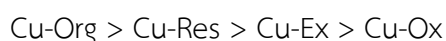
จากการประเมินคุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักและการเทียบปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการ (2548) สรุปได้ว่าช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่วันที่เหมาะสมสำหรับการนำปุ๋ยหมักมูลไก่ไปใช้ประโยชน์ คือตั้งแต่อายุการหมักวันที่ 42 เป็นต้นไปที่พารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

4.2 ปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและแมงกานีส ที่ปลดปล่อยออกจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบ BCR

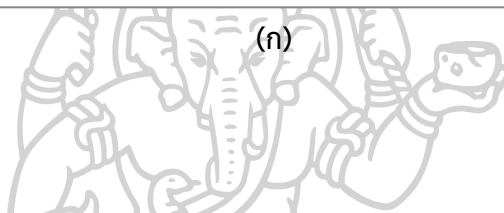
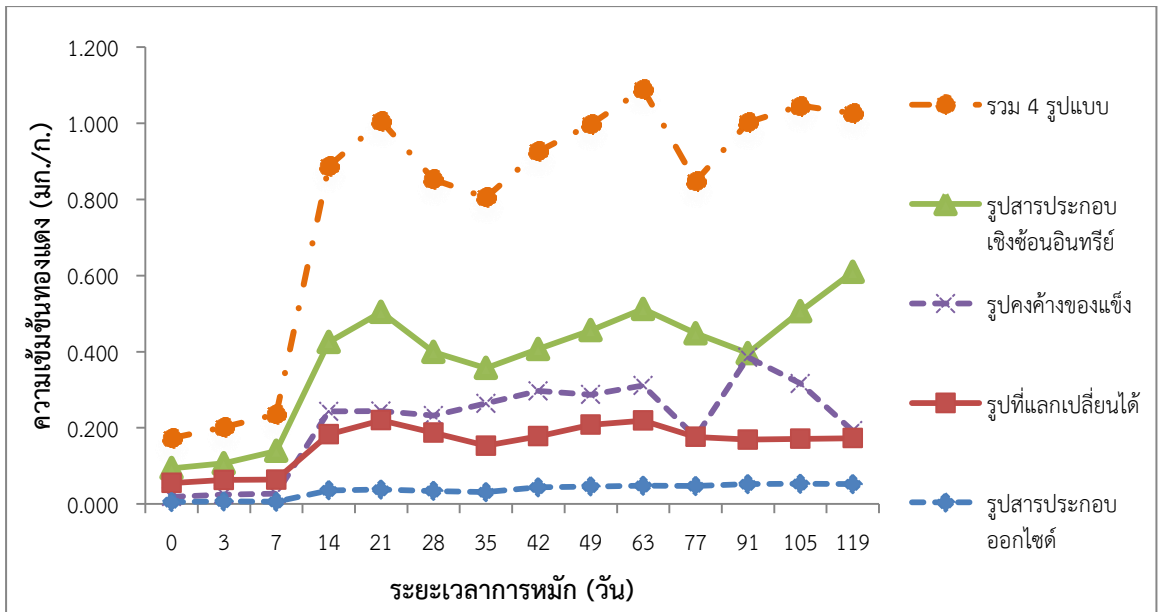
การศึกษาปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและแมงกานีสทั้ง 4 รูปแบบได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนสารอินทรีย์ (Organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นตลอดระยะเวลาการหมัก พบว่าทองแดงมีปริมาณรวมอยู่ในช่วง 0.036-0.383 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยทองแดงมีปริมาณไม่เกินค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ในภาคตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตรที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.900 มิลลิกรัมต่อกรัม (กรมวิชาการเกษตร, 2551) และแมงกานีสมีปริมาณรวมอยู่ในช่วง 0.645-3.62 มิลลิกรัมต่อกรัม แม้ยังไม่มีกำหนดมาตรฐานของแมงกานีสนำไปใช้ในการเกษตร แต่ก็พบว่าไม่เกินระดับที่ปนเปื้อนในดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) ที่กำหนดไว้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และจาก EPA (2003) ที่กำหนดค่าแมงกานีสในดินอยู่ในช่วงน้อยกว่า 0.002-7.0 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณของทองแดงและแมงกานีสรูปแบบต่างๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) หรือที่เรียกว่า Condensation of Metals โดยมีปริมาณแต่ละรูปแบบที่พบเรียงตามลำดับดังนี้

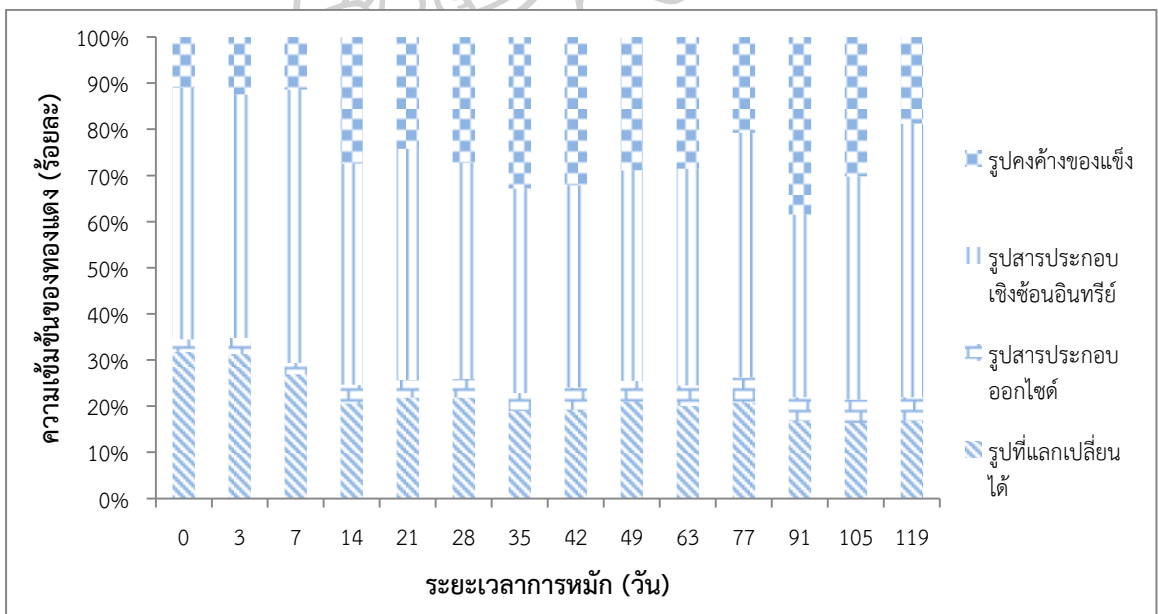
ปริมาณทองแดง (ภาพที่ 22)



โดยมีปริมาณเฉลี่ย $0.383 > 0.216 > 0.158 > 0.036$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



(ก)



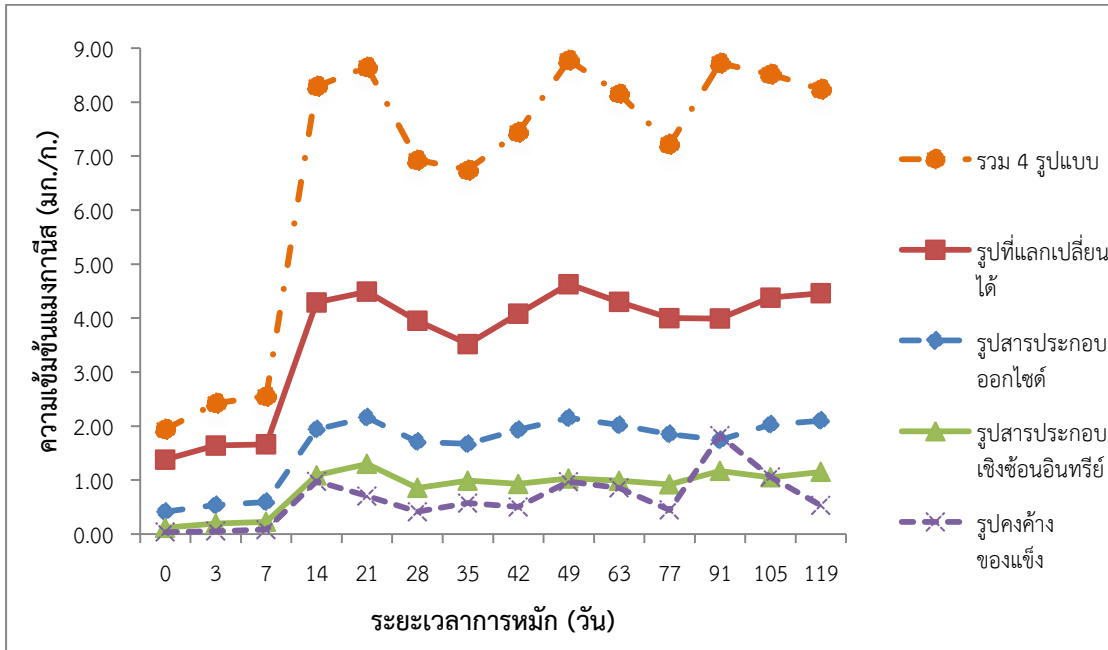
(ข)

ภาพที่ 22 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก

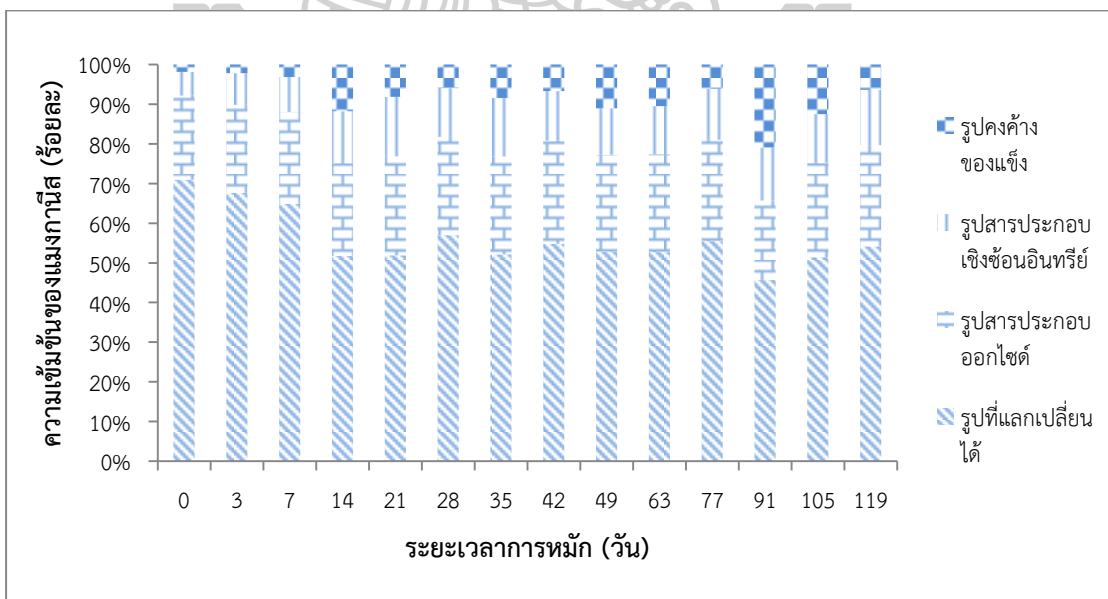
ปริมาณแมงกานีส (ภาพที่ 23)

Mn-Ex > Mn-Ox > Mn-Org > Mn-Res

โดยมีปริมาณเฉลี่ย 3.63 > 1.63 > 0.858 > 0.645 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 ปริมาณแมงกานีสรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก

เปรียบเทียบปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและแมงกานีสรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

รูปแบบ	ทองแดง		แมงกานีส	
	(มก./ก.)	ร้อยละ	(มก./ก.)	ร้อยละ
รูปที่แลกเปลี่ยนได้	0.055-0.220	16.4-31.8	1.38-4.63	45.7-70.9
รูปสารประกอบออกไซด์	0.005-0.053	2.43-5.49	0.413-2.16	19.9-25.9
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	0.094-0.609	39.5-59.4	0.116-1.30	5.96-15.0
รูปคงค้างของแข็ง	0.019-0.385	11.0-38.4	0.036-1.82	1.86-20.9

ซึ่งจากคุณสมบัติการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนตามทฤษฎี Irving and Williams (1953) ที่ $Mn^{2+} < Fe^{2+} < Co^{2+} < Ni^{2+} < Cu^{2+} > Zn^{2+}$ พบว่าทองแดงมีเสถียรภาพของสารประกอบมากกว่าแมงกานีสทำให้พบทองแดงในรูปสารประกอบเชิงซ้อน อีกทั้งความชอบในการเกิดรูปแบบของทองแดงในธรรมชาติกับลิแกนด์กลุ่มต่างๆ เรียงตามลำดับดังนี้ สารอินทรีย์ > เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ >> แร่ดินเหนียว (Alloway, 1990) ซึ่งผลการทดลองยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Quan-Ying et al. (2007) ที่ทำการหมักกากตะกอนจากน้ำทิ้งชุมชน 6 แห่ง ที่พบรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปที่เด่นเช่นกัน โดยการศึกษาของ Lu et al. (2014) พบว่ากระบวนการหมักเพิ่มคุณภาพสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการตรึงทองแดงให้อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปคงค้างของแข็งที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักเป็นผลให้พบรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาดังกล่าว

สำหรับแมงกานีสเสถียรภาพการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีน้อยกว่าไอออนโลหะ $2+$ ตัวอื่น จึงพบแมงกานีสในรูปสารประกอบในธรรมชาติมีน้อยกว่าส่งผลให้แมงกานีสส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ นอกจากนี้ที่ความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 9 ยังทำให้แมงกานีสได้รับอิทธิพลจากลิแกนด์ประเภทออกไซด์น้อย (Bradl, 2004) แมงกานีสส่วนใหญ่จึงไม่ชอบอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์แต่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุดและเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที ส่วนรูปแบบอื่นต้องได้รับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อนจึงสามารถเปลี่ยนแปลงไปสู่รูปที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายต่อไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และการนำไปใช้ของโลหะทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน ทองแดงมีความชอบที่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ทำให้เคลื่อนที่ได้น้อยกว่า และถูกนำไปใช้ได้น้อยกว่าแมงกานีสบ่งบอกถึงระดับเสถียรภาพ (degree of stabilization) ของทองแดงจากสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักที่มีมากกว่าแมงกานีสดังกล่าว

4.3 อิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อรูปแบบของทองแดงและแมงกานีส

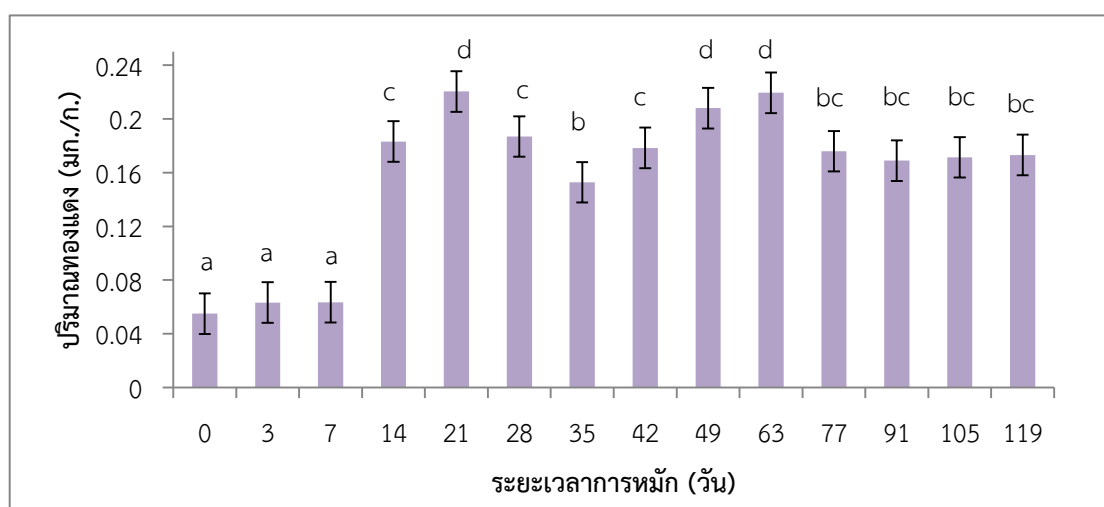
อิทธิพลของระยะเวลาการหมักมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงและแมงกานีสเป็นอย่างมาก โดยรูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็งแปรผันตามระยะเวลาการหมักอย่างชัดเจน โดยปริมาณทองแดงและแมงกานีสแต่ละรูปแบบเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) สอดคล้องกับการศึกษาของการย่อยสลายปุ๋ยหมักจากอินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่มักมีโลหะความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น เรียกว่า Condensation of metals (Hsu & Lo, 2000; Shuai et al., 2008; Singh & Kalamdhad, 2012) มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่ละลายน้ำ พืชจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Tessier, Campbell, & Bisson, 1979) ซึ่งรูปนี้พบปริมาณน้อยในช่วงวันที่ 0-7 ของการหมักโดยทองแดงและแมงกานีสมีค่าอยู่ในช่วง 5.5×10^{-2} - 6.4×10^{-2} และ 1.4-1.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากนั้นปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสองจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในวันที่ 14 ถึง 2.8-3.4 และ 2.5-2.7 เท่า ตามลำดับ และเปลี่ยนแปลงอีกเพียงเล็กน้อยตลอดกระบวนการหมักมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1.5×10^{-1} - 2.2×10^{-1} มิลลิกรัมต่อกรัม และ 3.5-4.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (ดังภาพที่ 24 และ 25) แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุโดยกระบวนการย่อยสลายในช่วงอุณหภูมิสูง (วันที่ 0-7) ช่วยปลดปล่อยทองแดงและแมงกานีสให้ออกมาอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้นและสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักดังกล่าว (ทองแดง $r = 0.471$ และแมงกานีส $r = 0.622$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ดังตารางที่ 8) ซึ่งลักษณะอินทรีย์วัตถุที่ถูกย่อยสลายนี้สังเกตได้จากความสัมพันธ์ของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ($r = -0.643$ และ $r = -0.598$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ดังตารางที่ 8) ที่สัมพันธ์เชิงผกผันกับรูปที่แลกเปลี่ยนได้เช่นกัน (ปริมาณอินทรีย์วัตถุ $r = -0.664$ และ $r = -0.758$ ตามลำดับ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน $r = -0.712$ และ $r = -0.766$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ดังตารางที่ 8)

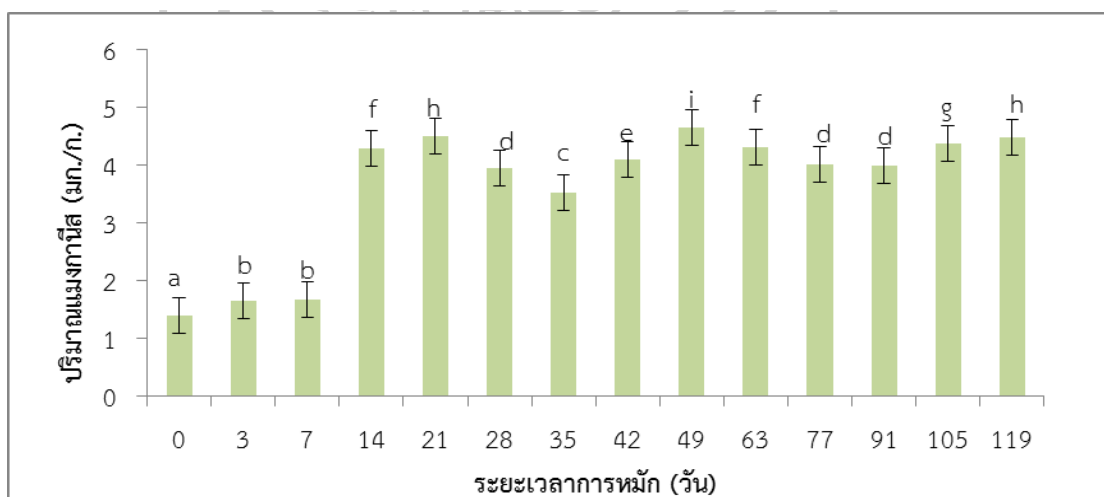
ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เวลา	1	-0.643**	-0.598**
ทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้	0.471**	-0.664**	-0.712**
แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้	0.622**	-0.758**	-0.766**



ภาพที่ 24 ปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

หมายเหตุ อักษร a,b,c และ d ที่แตกต่างกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$



ภาพที่ 25 ปริมาณแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

หมายเหตุ อักษร a,b,c,d,e,f,g,h และ i ที่แตกต่างกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$

โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของทองแดงร้อยละ 56.0 และ 48.7 ตามลำดับ และแมงกานีสได้ร้อยละ 62.4 และ 63.7 ตามลำดับดังนี้ (ภาพที่ 26)

ทองแดง (Cu)

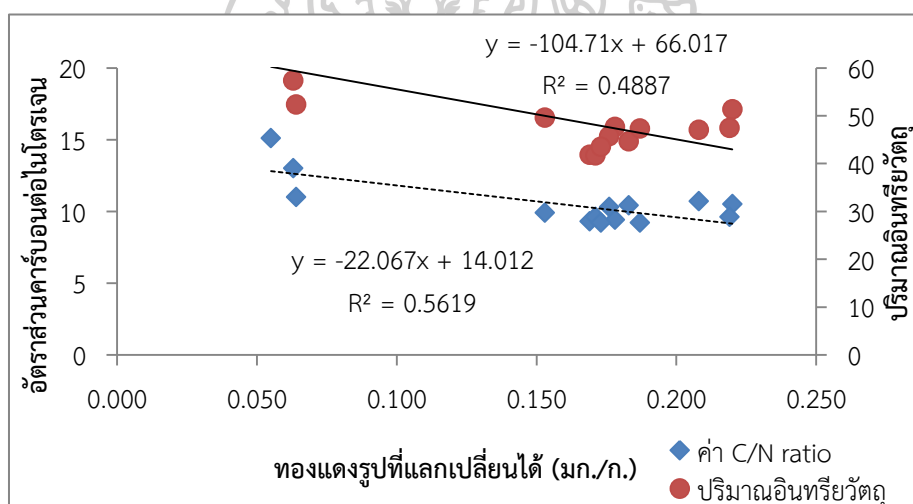
$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)} \quad \text{OM} = -21.992(\text{Cu}) + 14.002 \quad R^2 = 0.5602$$

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} \quad \text{C/N} = -104.37(\text{Cu}) + 65.972 \quad R^2 = 0.4874$$

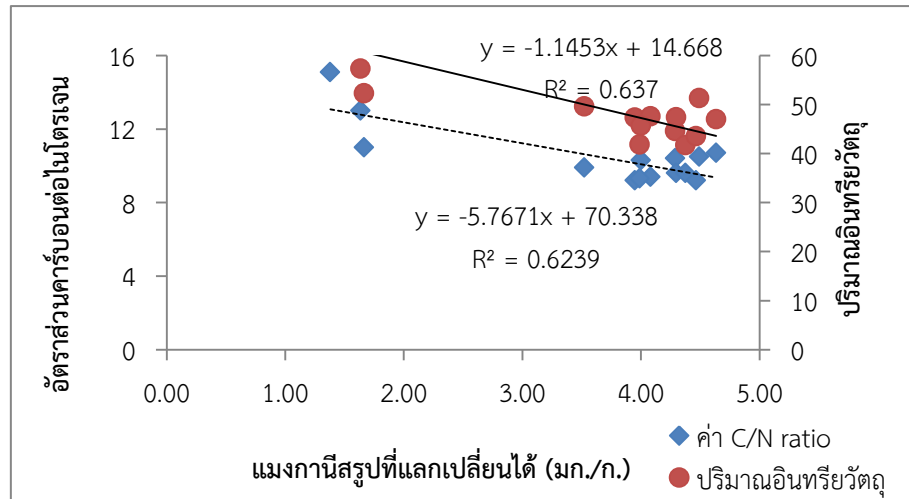
แมงกานีส (Mn)

$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)} \quad \text{OM} = -5.7671(\text{Mn}) + 70.338 \quad R^2 = 0.6239$$

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} \quad \text{C/N} = -1.1453(\text{Mn}) + 14.668 \quad R^2 = 0.6370$$



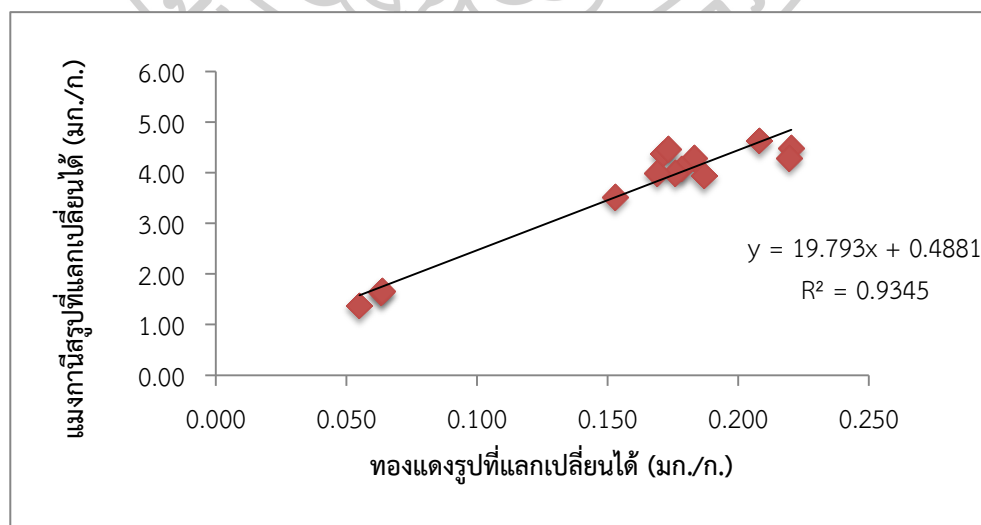
(ก)



(ข)

ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของโลหะทั้งสองสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.952$, $p < 0.01$) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในทิศทางเดียวกันอีกด้วย (ภาพที่ 27)



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของทองแดงและแมงกานีสในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ($r = 0.952$, $p < 0.01$)

เมื่อนำปัจจัยต่างๆ (ดังตารางที่ 8) ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายรูปที่แลกเปลี่ยนได้ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้ stepwise selection จะได้สมการต่อไปนี้

$$\text{Cu-Ex} = 0.253 - 0.004 \text{ OM} \quad R^2 = 0.588 \quad n = 13 \quad (1)$$

$$\text{Mn-Ex} = 5.760 - 0.095 \text{ OM} \quad R^2 = 0.709 \quad n = 13 \quad (2)$$

โดย Cu-Ex = รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของทองแดง Mn-Ex = รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของแมงกานีส
OM = ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

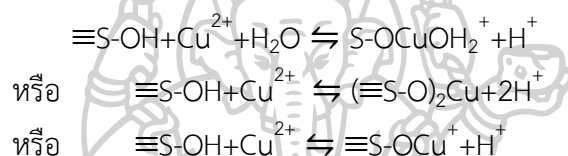
จากสมการข้างต้นพบว่า มีเพียงปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของทองแดงและแมงกานีส ดังสมการที่ (1) และ (2) ได้ถึงร้อยละ 58.8 และ 70.9 ตามลำดับ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่เด่นชัดในการใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสองชนิด

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักนี้ไปใช้จากปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในช่วงอายุการหมักต่างๆ พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มเชิงปริมาณของทองแดงและแมงกานีสด้วยวิธี Duncan ออกเป็น 4 กลุ่ม และ 9 กลุ่ม ตามลำดับ (ดังภาพที่ 24 และภาพที่ 25) โดยปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของทองแดงและแมงกานีสพบมากที่สุดในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่วันที่ 49 จากนั้นในช่วงท้ายของการหมักจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทำให้เมื่อพิจารณาเชิงปริมาณของโลหะทั้งสองชนิดแล้วพบว่าวันที่ 49 เป็นวันที่ปุ๋ยหมักเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด

ทองแดง	แมงกานีส
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน	กลุ่ม a วันที่ 0 วัน
กลุ่ม b วันที่ 35, 77-119 วัน	กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 3-7 วัน
กลุ่ม c วันที่ 14, 28, 42, 77-119 วัน	กลุ่ม c วันที่ 35 วัน
กลุ่ม d วันที่ 21, 49-63 วัน	กลุ่ม d วันที่ 28, 77-91 วัน
	กลุ่ม e วันที่ 42 วัน
	กลุ่ม f วันที่ 14, 63 วัน
	กลุ่ม g วันที่ 105 วัน
	กลุ่ม h วันที่ 21, 119 วัน
	กลุ่ม i วันที่ 49 วัน

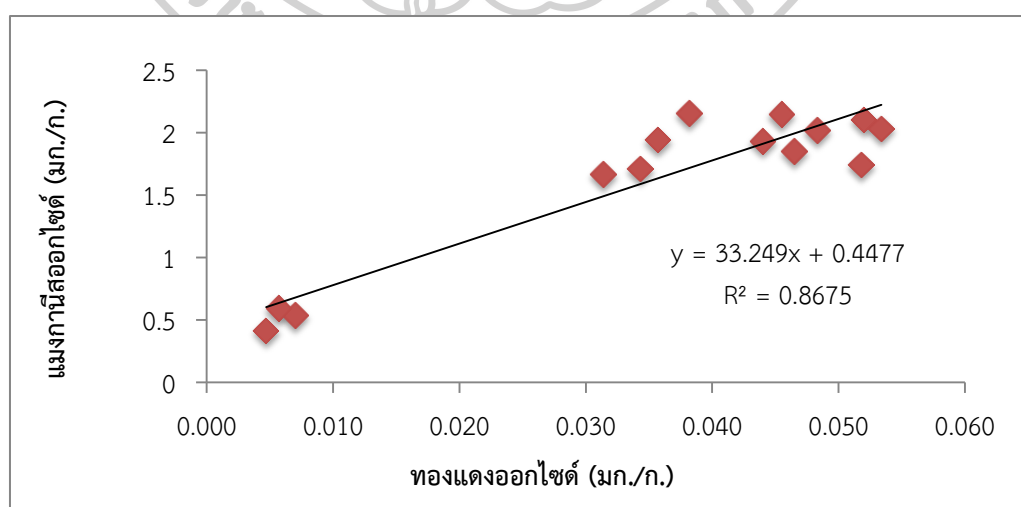
4.3.2 รูปสารประกอบออกไซด์

รูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงและแมงกานีสที่พบในชั้นตอนนี้ เช่น Cu_2O (Kumpiene et al., 2006) MnO_2 และ MnOOH เป็นต้น (Bradl, 2004) ซึ่งแมงกานีสออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการเป็นโพลิเมอร์ที่ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง และสามารถดูดซับแคทไอออนและแอนไอออนอื่น ๆ ได้เช่นเดียวกับเหล็ก (Essington, 2004; นันทิรา สรรพณี, 2555) ขณะที่ทองแดงไม่มีคุณสมบัตินี้ (McCleverty, 1999) โดยแมงกานีสที่พบในช่วงความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 7.1-8.3 จะปรากฏในรูป Mn^{2+} และแมงกานีสออกไซด์ (เช่น MnO_2 และ Mn_2O_3) โดยมีสัดส่วนในรูปสารประกอบออกไซด์มากกว่าดังภาพที่ 6 (Adriano, 2001) และมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับทองแดงได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับลิแกนด์อื่น ๆ ในช่วงความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 2 เป็นต้นไปดังภาพที่ 7 (Adriano, 2001; Barber, 1995) โดยมีสมการการดูดซับของทองแดงบนสารประกอบเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ดังนี้

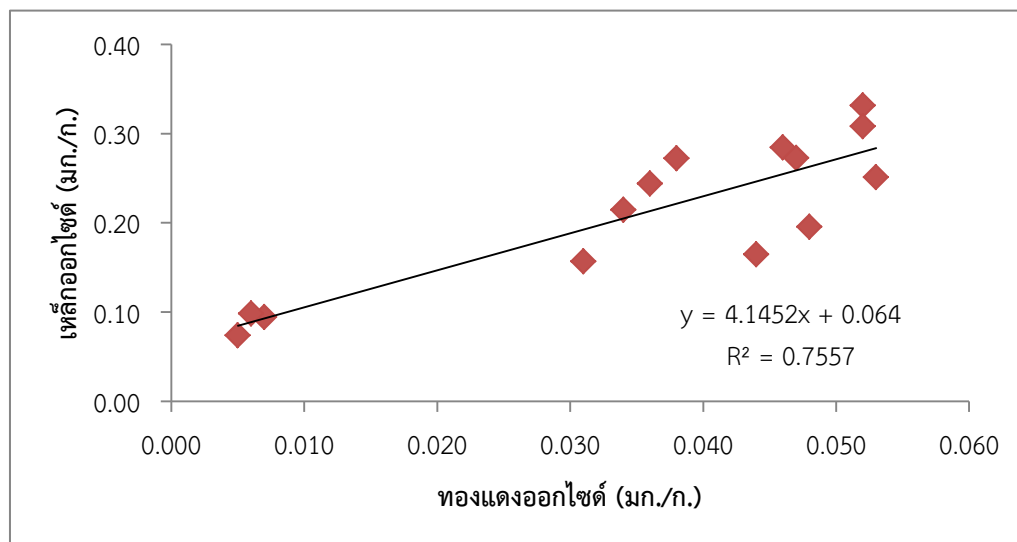


โดย S-OH หมายถึง เหล็กหรือแมงกานีส

ดังนั้นรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงที่เกิดขึ้นจึงแปรตามรูปแมงกานีสและเหล็กออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.920$ และ $r = 0.756$ ตามลำดับ, $p < 0.01$ ดังภาพที่ 28 และภาพที่ 29)



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับแมงกานีสออกไซด์ ($r = 0.920$, $p < 0.01$)

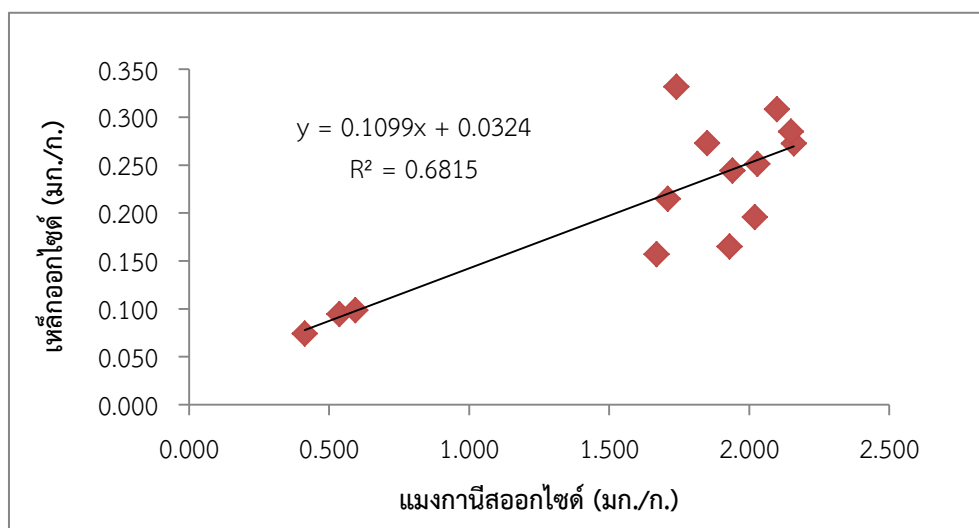


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับเหล็กออกไซด์ ($r = 0.756$, $p < 0.01$)

โดยมีกระบวนการเกิดของแมงกานีสและเหล็กออกไซด์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เช่นกัน ($r = 0.689$, $p < 0.01$ ดังภาพที่ 30) อย่างไรก็ตามสารประกอบออกไซด์ของแมงกานีสจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นจากกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจนที่เพิ่มรูปแมงกานีสที่ถูกออกซิไดส์ให้มากขึ้น จากวันที่ 0-7 มีปริมาณแมงกานีสอยู่ในช่วง 4.1×10^{-1} - 5.9×10^{-1} มิลลิกรัมต่อกรัม ไปเป็น 1.7-2.2 มิลลิกรัมต่อกรัมตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป ทำให้ปริมาณแมงกานีสออกไซด์สัมพันธ์กับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.574$, $p < 0.01$) เช่นเดียวกับทองแดงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิในเชิงผกผันด้วย ($r = -0.695$, $p < 0.01$ ดังตารางที่ 9) และสอดคล้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น (ปริมาณอินทรีย์วัตถุ $r = -0.758$ และ $r = -0.755$ ตามลำดับ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน $r = -0.750$ และ $r = -0.774$ ตามลำดับ , $p < 0.01$ ดังตารางที่ 9)

สำหรับสัดส่วนที่พบเมื่อเปรียบเทียบกับกัน (ภาพที่ 22 และภาพที่ 23) จะพบแมงกานีสในรูปสารประกอบออกไซด์มากเป็นลำดับที่ 2 จากความชอบในการเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ไฮดรอกไซด์และออกไซด์จากคุณสมบัติของการเป็น Hard acid ที่มีมากกว่าทองแดงที่อยู่ในกลุ่ม Borderline ดังตารางที่ 2 (McCleverty, 1999; Wilkins & Wilkins, 1997; Winter, 1994) ดังนั้นทองแดงที่พบจึงมักอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมากกว่าที่จะเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ออกไซด์และไฮดรอกไซด์เอง และพบในปริมาณที่น้อยแปรตามปริมาณสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในปุ๋ยหมักที่มีปริมาณน้อย ขณะที่ลิแกนด์สารอินทรีย์จะเป็นลิแกนด์ที่เด่นและมีปริมาณมากกว่า โดยปริมาณแมงกานีสออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง

0.4-2.2 มิลลิกรัมต่อกรัม เหล็กออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.33 มิลลิกรัมต่อกรัม (ตารางที่ 13 และ ตารางที่ 14) ขณะที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าอยู่ในช่วง 417-748 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของแมงกานีสและเหล็กออกไซด์ ($r = 0.689$, $p < 0.01$)

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีสรูปสารประกอบออกไซด์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และอุณหภูมิ

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	อุณหภูมิ
เวลา	1	-0.643**	-0.598**	-0.683**
ทองแดงออกไซด์	0.818**	-0.758**	-0.750**	-0.695**
แมงกานีสออกไซด์	0.611**	-0.755**	-0.774**	-0.574**

โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงร้อยละ 65.2 และ 63.3 ตามลำดับ และแมงกานีสได้ร้อยละ 60.2 และ 63.3 ตามลำดับ (ภาพที่ 31) ดังนี้

ทองแดง (Cu)

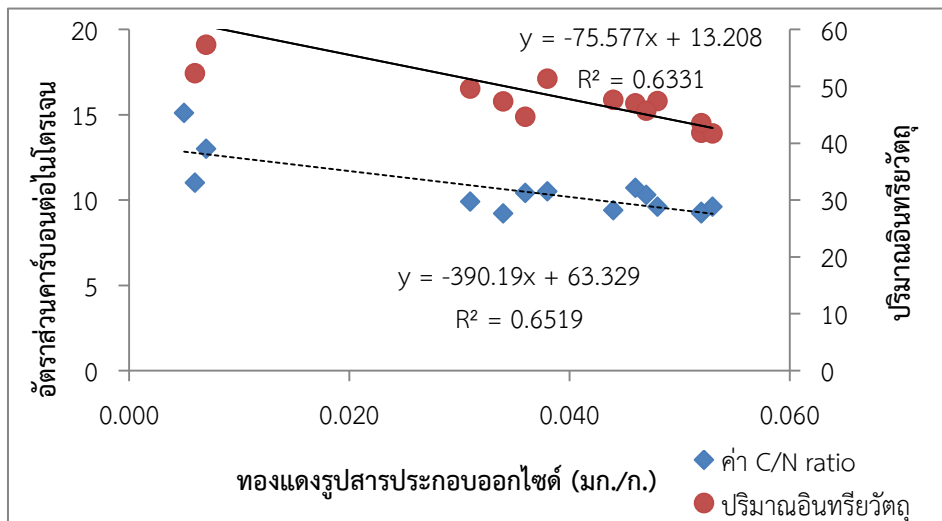
$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)} \quad (\text{OM}) = -390.19(\text{Cu}) + 63.329 \quad R^2 = 0.6519$$

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} \quad (\text{C/N}) = -75.577(\text{Cu}) + 13.208 \quad R^2 = 0.6331$$

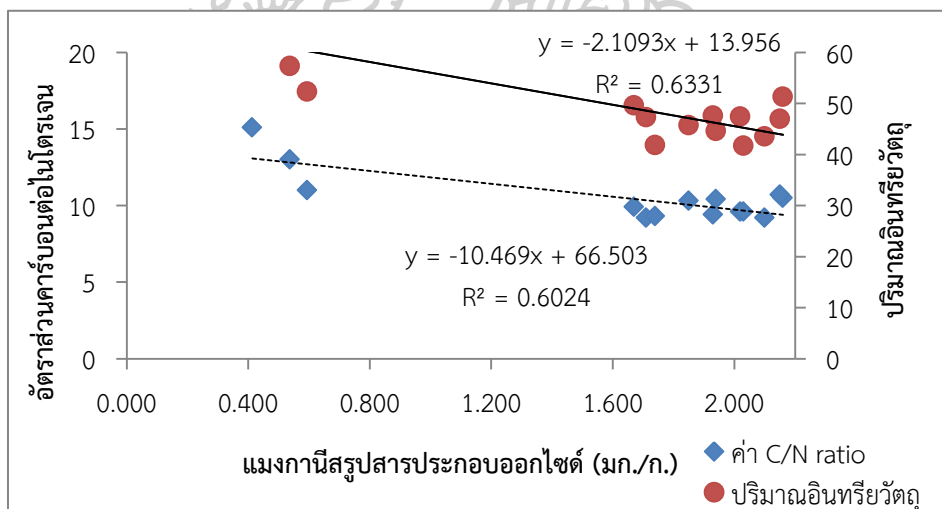
แมงกานีส (Mn)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) $(OM) = -10.469(Mn) + 66.503 \quad R^2 = 0.6024$

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) $(C/N) = -2.1093(Mn) + 13.956 \quad R^2 = 0.6331$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปสารประกอบออกไซด์ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส

เมื่อนำปัจจัยต่างๆ (ดังตารางที่ 9) ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และอุณหภูมิที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายรูปสารประกอบออกไซด์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้ stepwise selection จะได้สมการต่อไปนี้

$$\text{Cu-Ox} = 0.089 - 0.001 \text{ OM} - 0.001 \text{ Temp} \quad R^2 = 0.950 \quad n = 13 \quad (3)$$

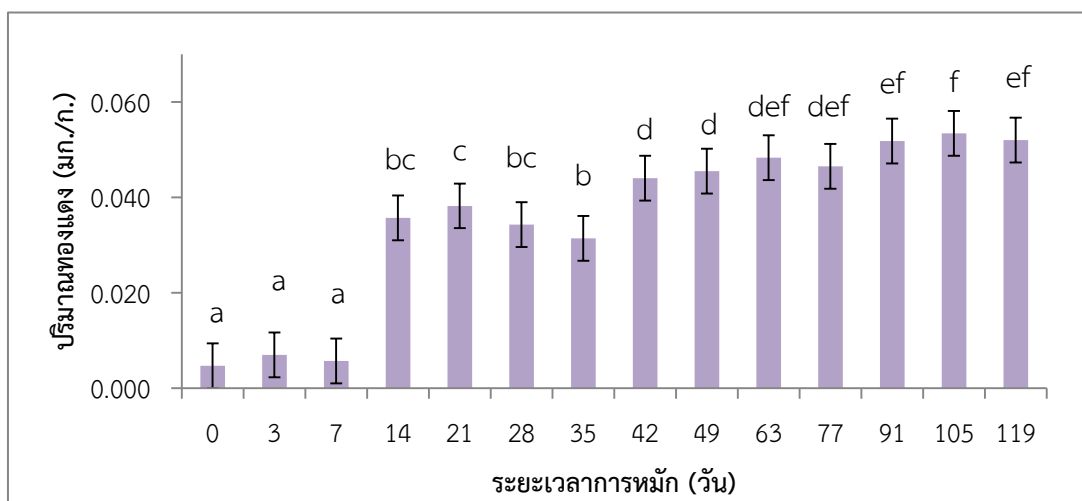
$$\text{Mn-Ox} = 2.795 - 0.052 \text{ OM} \quad R^2 = 0.848 \quad n = 13 \quad (4)$$

โดย Cu-Ox = รูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดง Mn-Ox = รูปสารประกอบออกไซด์ของแมงกานีส OM = ปริมาณอินทรีย์วัตถุ Temp = อุณหภูมิ

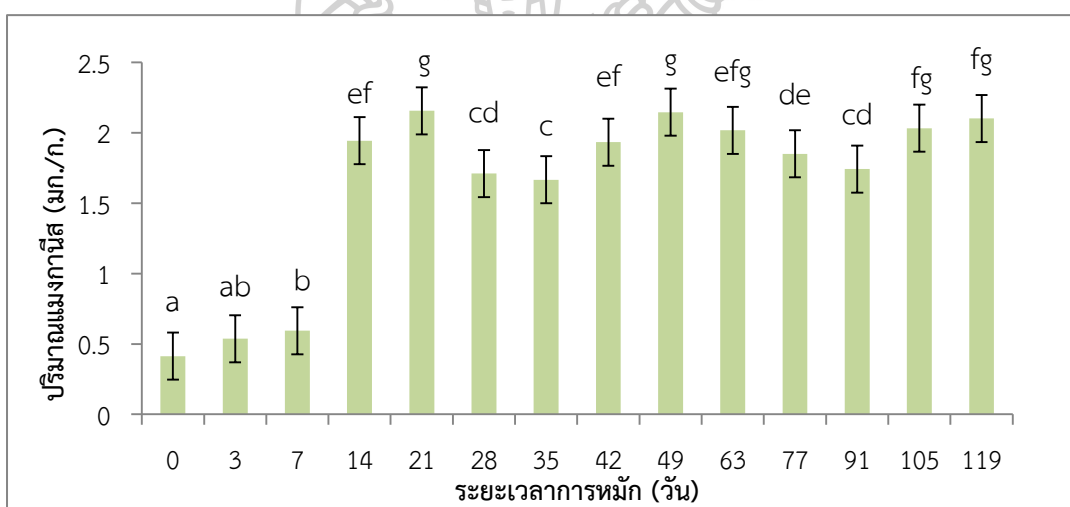
จากสมการข้างต้นพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุและอุณหภูมิสามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดง ดังสมการที่ (3) ได้ถึงร้อยละ 95.0 ส่วนแมงกานีสมีเพียงปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ของแมงกานีสออกไซด์ ดังสมการที่ (4) ได้ถึงร้อยละ 84.8

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักนี้ไปใช้จากปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ในช่วงอายุการหมักต่างๆ พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มเชิงปริมาณของทองแดงและแมงกานีสด้วยวิธี Duncan ออกเป็น 6 กลุ่ม และ 7 กลุ่ม ตามลำดับ (ดังภาพที่ 32 และ 33) โดยปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงและแมงกานีสพบมากที่สุดวันที่ 63-119

ทองแดง	แมงกานีส
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน	กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-3 วัน
กลุ่ม b วันที่ 14, 28-35 วัน	กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 3-7 วัน
กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 14-28 วัน	กลุ่ม c วันที่ 28-35, 91 วัน
กลุ่ม d ตั้งแต่วันที่ 42-77 วัน	กลุ่ม d วันที่ 28, 77-91 วัน
กลุ่ม e ตั้งแต่วันที่ 63-91, 119 วัน	กลุ่ม e วันที่ 14, 42, 63-77 วัน
กลุ่ม f ตั้งแต่วันที่ 63-119 วัน	กลุ่ม f วันที่ 14, 42, 63, 105-119 วัน
	กลุ่ม g วันที่ 21, 49-63, 105-119 วัน



ภาพที่ 32 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a,b,c,d,e และ f ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$



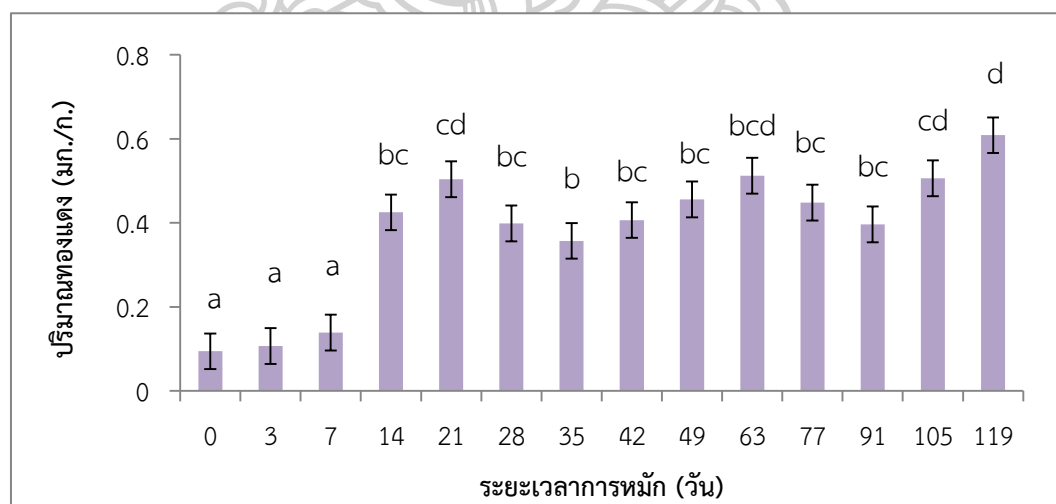
ภาพที่ 33 ปริมาณแอมโมเนียรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a,b,c,d,e,f และ g ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$

4.3.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์

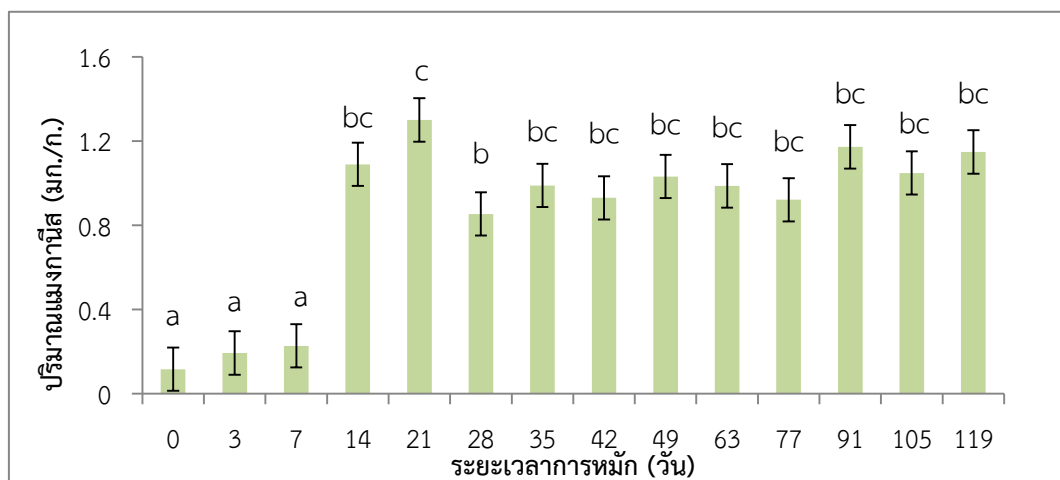
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปที่เกิดพันธะกับลิแกนด์สารอินทรีย์ (Fuentes et al., 2004; LIU & SUN, 2013; Lu et al., 2014) โดยรูปนี้จะพบในทองแดงมากกว่าแอมโมเนีย เนื่องจากทองแดงมีความชอบในการเกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์มากกว่า (Winter, 1994) จึงทำให้ทองแดงพบในรูปนี้เป็นลำดับแรก ส่วนแอมโมเนียพบเป็นลำดับที่ 3 ดังการศึกษาของ

Bradl (2004) ที่จัดลำดับความสามารถของโลหะกับสารฮิวมิคดังนี้ $Cu > Pb > Fe > Ni = Co = Zn > Mn = Ca$ ซึ่งปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในวันที่ 14 ถึง 3.8-4.4 และ 7.4-5.7 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยทองแดงจากวัตถุอินทรีย์ให้เปลี่ยนมาอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์มากขึ้น โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญในการควบคุมรูปแบบที่เกิดขึ้น (Stenvenson, 1994) เช่น ความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

จากการศึกษานี้พบว่าทั้งความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$, $p < 0.05$ ตามลำดับ) โดยความชื้นที่มีค่าสูงในช่วงแรก (ตารางที่ 6) มีความเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่กำหนดให้มีความชื้นในช่วงร้อยละ 40-60 (ธงชัย มาลา, 2546) เช่นเดียวกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่อยู่ในช่วง 5.5-9.0 (Pace et al., 1995) ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในช่วงนี้มีค่าสูงสอดคล้องกับอุณหภูมิที่มีค่าสูงดังกล่าว ซึ่งในระยะนี้ (วันที่ 0-7) ความเข้มข้นของทองแดงและแมงกานีสจึงยังมีค่าต่ำ แต่เมื่อผ่านระยะแรกของการย่อยสลายในช่วงอุณหภูมิสูงนี้ไป (ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป) ปริมาณรูปสารประกอบอินทรีย์ของทองแดงและแมงกานีสจะมีค่าสูงขึ้น และแปรผันในช่วงแคบโดยมีค่าอยู่ในช่วง $3.6-6.1 \times 10^{-1}$ มิลลิกรัมต่อกรัม และ $8.5-11.7 \times 10^{-1}$ มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มข้นมากที่สุดตามการจัดกลุ่มทางสถิติของ Duncan (ดังภาพที่ 34 และภาพที่ 35)



ภาพที่ 34 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a,b,c และ d ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$



ภาพที่ 35 ปริมาณแอมแกกานีสรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a,b และ c ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$

นอกจากนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ค่อยๆ ลดลงตลอดกระบวนการหมักยังสัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณของรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ (ทองแดง $r = -0.738$ และแอมแกกานีส $r = -0.754$, $p < 0.01$) เช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อย ๆ ลดลงจากการที่คาร์บอนอินทรีย์ถูกย่อยสลายผกผันกับปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว (ทองแดง $r = -0.767$ และแอมแกกานีส $r = -0.775$, $p < 0.01$) ดังตารางที่ 10 โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสอง ดังภาพที่ 36 ได้ดังนี้

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแอมแกกานีสรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ อุณหภูมิ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความชื้น และความเป็นกรด-ด่าง

พารามิเตอร์	เวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ความชื้น	ความเป็นกรด-ด่าง
เวลา	1	-0.683**	-0.643**	-0.598**	-0.818**	-0.530**
อุณหภูมิ	-0.683**	1	0.313*	0.375*	0.577**	0.791**
ทองแดงเชิงซ้อนอินทรีย์	0.684**	-0.570**	-0.738**	-0.767**	-0.789**	-0.386*
แอมแกกานีสเชิงซ้อนอินทรีย์	0.556**	-0.495**	-0.754**	-0.775**	-0.745**	-0.345*

ทองแดง (Cu)

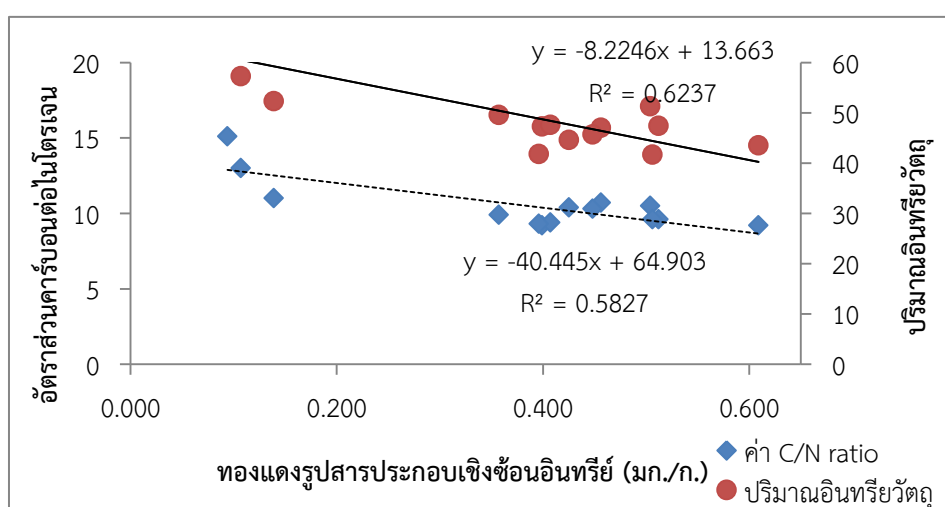
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) $(OM) = -40.445(Cu) + 64.903 \quad R^2 = 0.5827$

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) $(C/N) = -8.2246(Cu) + 13.663 \quad R^2 = 0.6237$

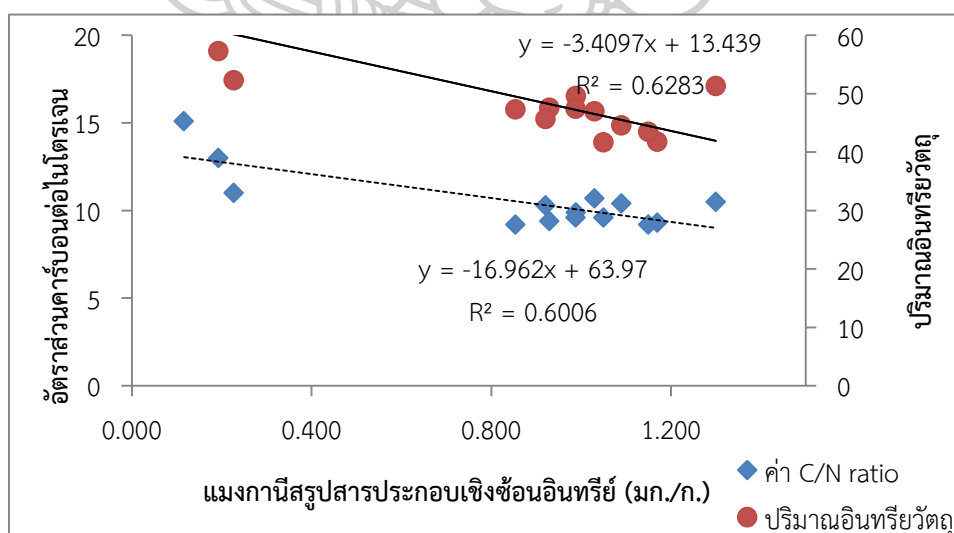
แมงกานีส (Mn)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) $(OM) = -16.962(Mn) + 63.017 \quad R^2 = 0.6006$

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) $(C/N) = -3.4097(Mn) + 13.439 \quad R^2 = 0.6283$



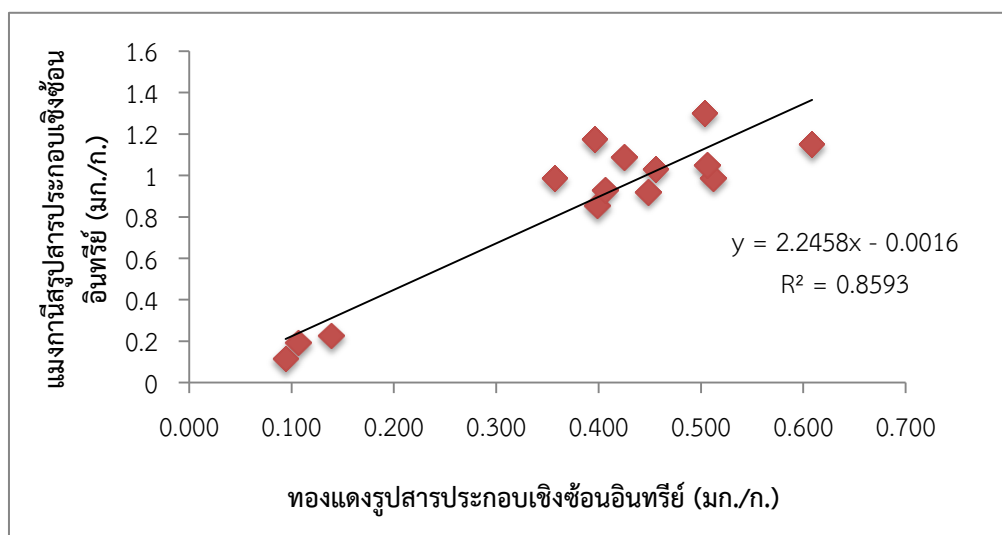
(ก)



(ข)

ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของโลหะทั้งสองสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.924$, $p < 0.01$) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ในทิศทางเดียวกันอีกด้วย (ภาพที่ 37)



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ของทองแดงและแมงกานีสในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ($r = 0.924$, $p < 0.01$)

เมื่อนำปัจจัยต่างๆ (ดังตารางที่ 10) ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก ปริมาณอินทรีย์วัตถุอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความชื้น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้ stepwise selection จะได้สมการต่อไปนี้

$$\text{Cu-Org} = 0.679 - 0.013 \text{ OM} \quad R^2 = 0.848 \quad n = 13 \quad (5)$$

$$\text{Mn-Org} = 1.548 - 0.031 \text{ OM} \quad R^2 = 0.816 \quad n = 13 \quad (6)$$

โดย Org = รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ OM = ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

จากสมการข้างต้นพบว่ามีเพียงปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงและแมงกานีส ดังสมการที่ (5) และ (6) ได้ถึงร้อยละ 84.8 และ 81.6 ตามลำดับ

โดยปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงและแมงกานีสตามการจัดกลุ่มทางสถิติของ Duncan พบมากถึงมากที่สุดตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป ซึ่งรูปแบบนี้เป็นรูปที่ถูกเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปที่มีศักยภาพพร้อมที่จะปลดปล่อยออกมาสู่รูปที่พืชสามารถใช้งานได้ภายหลังซึ่งปุ๋ยหมักที่ดีควรมีคุณสมบัติในการตรึงและทยอยปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ดังกล่าว

ทองแดง	แมงกานีส
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน	กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน
กลุ่ม b วันที่ 14, 28-91 วัน	กลุ่ม b วันที่ 14, 28-119 วัน
กลุ่ม c วันที่ 14-28, 42-105 วัน	กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 14-21, 35-119 วัน
กลุ่ม d วันที่ 21, 63, 105-119 วัน	

4.3.4 รูปค่างของแข็ง

รูปค่างของแข็งเป็นรูปที่ยากต่อการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบนี้ยังเป็นไปในทิศทางเดียวกับรูปแบบอื่นๆ โดยมีปริมาณน้อยที่สุดในการหมักปุ๋ยวันที่ 0-7 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป สอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มมากขึ้น (ทองแดง $r = 0.544$ และแมงกานีส $r = 0.533$, $p < 0.01$) (ดังภาพที่ 38 และภาพที่ 39) แสดงให้เห็นถึงกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่ไม่สามารถสกัดได้ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน (M.P. Bernal et al., 2009) มาอยู่ในรูปค่างของแข็งที่เป็นรูปที่แม้ยากต่อการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังสามารถปลดปล่อยออกมาได้หรือที่เรียกว่า Environmentally available (EPA, 1996) สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายตลอดระยะเวลาการหมักสัมพันธ์กับรูปค่างของแข็งของโลหะทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ (ทองแดง $r = -0.689$ และแมงกานีส $r = -0.619$, $p < 0.01$) เช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงแปรผกผันกับรูปแบบนี้อย่างมีนัยสำคัญ (ทองแดง $r = -0.731$ และแมงกานีส $r = -0.539$, $p < 0.01$) ดังตารางที่ 11 โดยสามารถอธิบายสมการสัมพันธ์เชิงเส้นของโลหะทั้งสองดังภาพที่ 40 ดังสมการต่อไปนี้

ทองแดง (Cu)

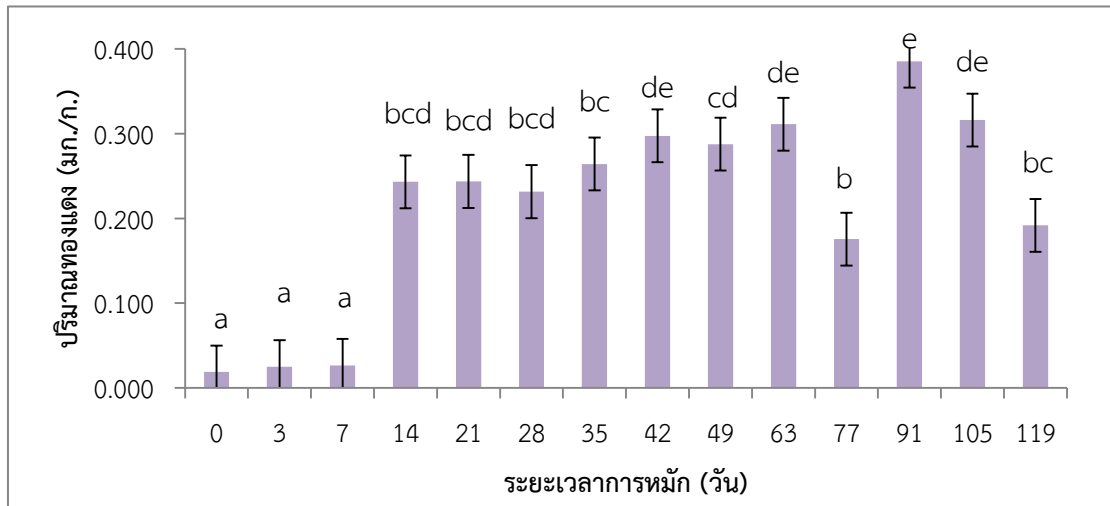
$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)} \quad \text{OM} = -11.02(\text{Cu}) + 12.89 \quad R^2 = 0.5992$$

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} \quad \text{C/N} = -53.456(\text{Cu}) + 60.945 \quad R^2 = 0.5447$$

แมงกานีส (Mn)

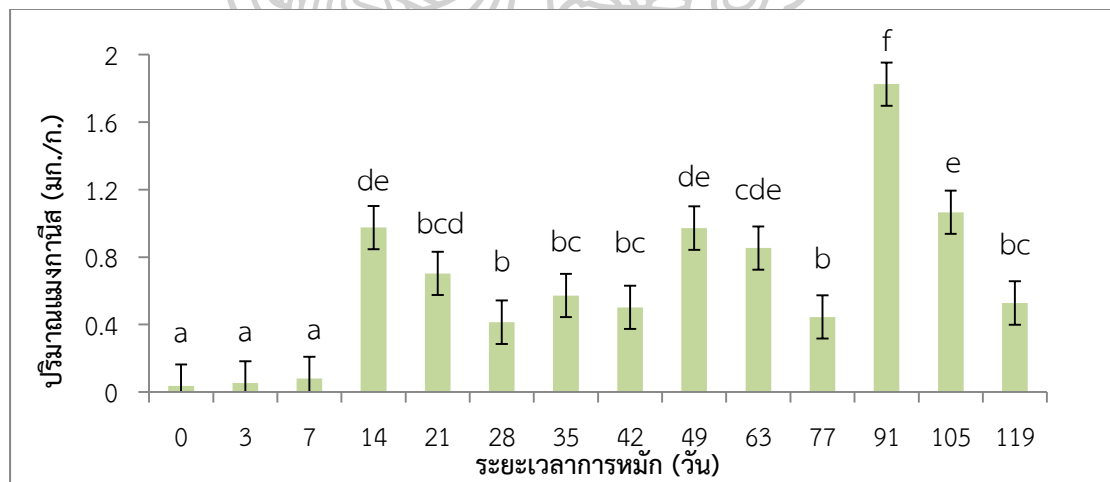
$$\text{ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)} \quad \text{OM} = -1.9439(\text{Mn}) + 11.766 \quad R^2 = 0.3157$$

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} \quad \text{C/N} = -11.521(\text{Mn}) + 56.839 \quad R^2 = 0.4284$$



ภาพที่ 38 ปริมาณทองแดงรูปคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

หมายเหตุ อักษร a,b,c,d และ e ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$

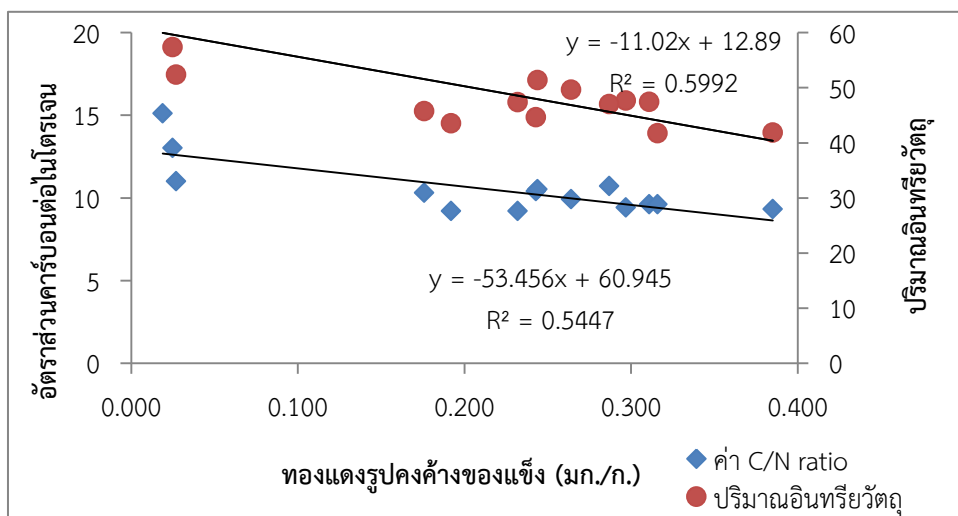


ภาพที่ 39 ปริมาณแมงกานีสรูปคั่งค้างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

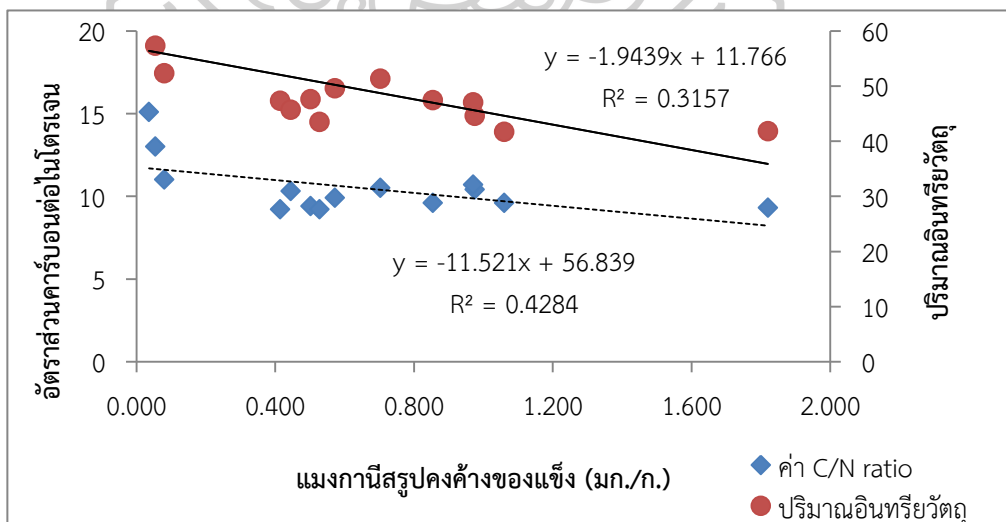
หมายเหตุ อักษร a,b,c,d,e และ f ที่แตกต่างกันหมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.01$

ตารางที่ 11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและแมงกานีสรูปคงค้างของแข็ง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เวลา	1	-0.643**	-0.598**
ทองแดงคงค้างของแข็ง	0.544**	-0.689**	-0.731**
แมงกานีสคงค้างของแข็ง	0.533**	-0.619**	-0.539**



(ก)



(ข)

ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับรูปคงค้างของแข็ง ($p < 0.01$) (ก) ทองแดง (ข) แมงกานีส

นอกจากนี้พบว่าแมงกานีสในรูปแบบนี้อาจพบอยู่ในรูปสารประกอบ amorphous หรือ crystalline ที่พบร่วมกับเหล็กออกไซด์ (Silveira et al., 2006) ซึ่งสามารถดึงทองแดงให้อยู่ในรูปแบบนี้เพิ่มขึ้น รูปค่างของแข็งของทองแดงที่เกิดขึ้นยังสัมพันธ์กับรูปค่างของแข็งของแมงกานีสและเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ (แมงกานีส $r = 0.845$ และเหล็ก $r = 0.879$ $p < 0.01$ ตามลำดับ) โดยสามารถอธิบายสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของทองแดงกับแมงกานีสและเหล็ก ดังภาพที่ 41 ดังสมการต่อไปนี้

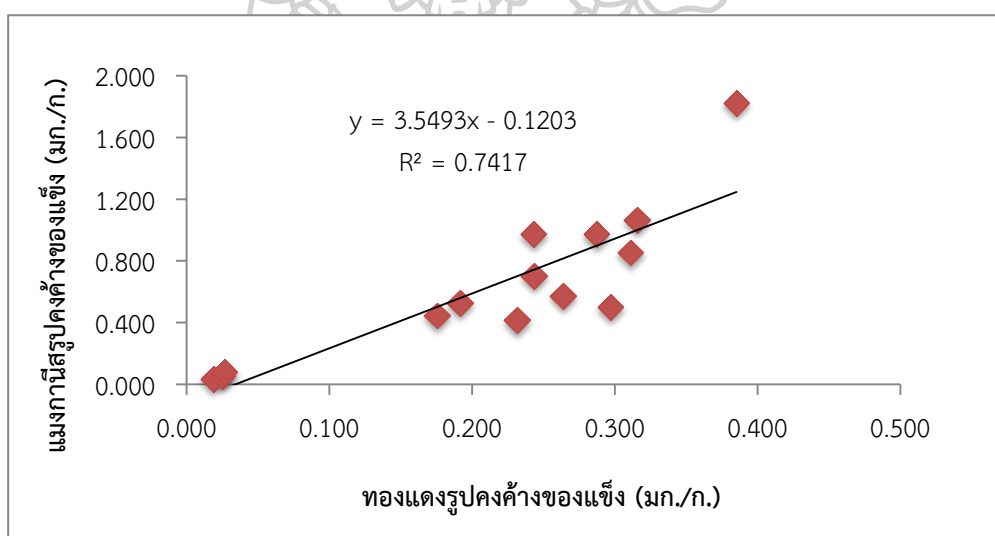
$$\text{Mn-Res} = 3.5493(\text{Cu-Res}) + 0.1203 \quad R^2 = 0.7417$$

$$\text{Fe-Res} = 35.216(\text{Cu-Res}) + 11.766 \quad R^2 = 0.3157$$

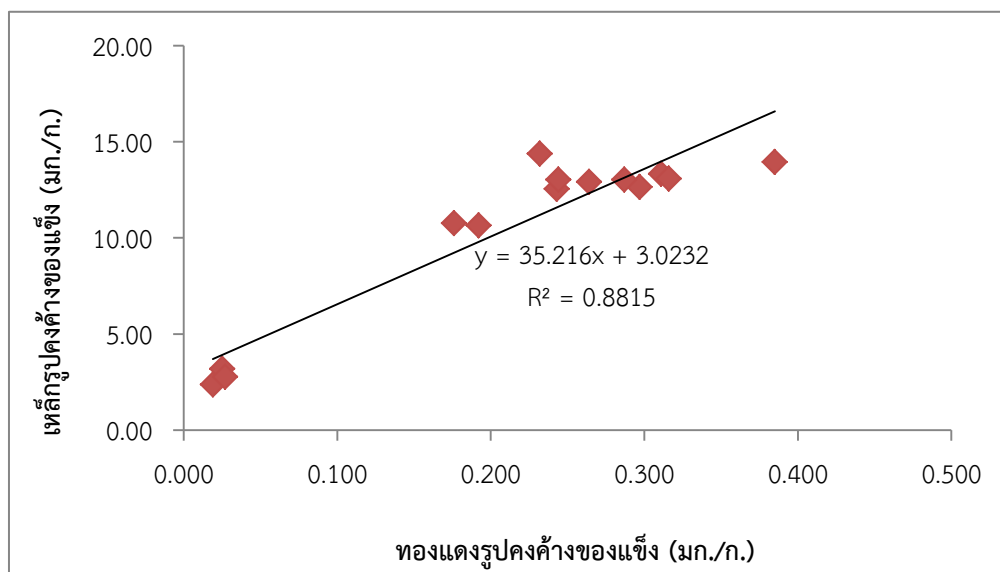
โดย Mn-Res คือ แมงกานีสรูปค่างของแข็ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Fe-Res คือ เหล็กรูปค่างของแข็ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Cu-Res คือ ทองแดงรูปค่างของแข็ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ของทองแดงกับรูปค่างของแข็งของแมงกานีสและเหล็ก

(ก) ทองแดงกับแมงกานีส ($r = 0.845$, $p < 0.01$)

(ข) ทองแดงกับเหล็ก ($r = 0.879$, $p < 0.01$)

เมื่อนำปัจจัยต่างๆ (ดังตารางที่ 11) ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายรูปค่างของแข็งด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression) โดยใช้ stepwise selection จะได้สมการต่อไปนี้

$$\text{Cu-Res} = 0.422 - 0.009 \text{ OM} \quad R^2 = 0.807 \quad n = 13 \quad (7)$$

$$\text{Mn-Res} = 1.313 - 0.030 \text{ OM} \quad R^2 = 0.635 \quad n = 13 \quad (8)$$

โดย Res = รูปค่างของแข็ง OM = ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

จากสมการข้างต้นพบว่า มีเพียงปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณรูปค่างของแข็งของทองแดงและแมงกานีส ดังสมการที่ (7) และ (8) ได้ถึงร้อยละ 80.7 และ 63.5 ตามลำดับ และเมื่อนำปริมาณมาเปรียบเทียบกับ Duncan test จะพบว่าในระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป) รูปค่างของแข็งของทองแดงและแมงกานีสมีปริมาณมากกว่าระยะเริ่มต้น (วันที่ 0) และระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 3-35)

ทองแดง	แมงกานีส
กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน	กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 0-7 วัน
กลุ่ม b วันที่ 14-35, 77, 119 วัน	กลุ่ม b วันที่ 21-42, 77, 119 วัน
กลุ่ม c วันที่ 14-35, 49, 119 วัน	กลุ่ม c วันที่ 21, 35-42, 63, 119 วัน
กลุ่ม d วันที่ 14-63, 105 วัน	กลุ่ม d วันที่ 14-21, 49-63 วัน
กลุ่ม e วันที่ 42, 63, 91-105 วัน	กลุ่ม e วันที่ 14, 49-63, 105 วัน
	กลุ่ม f วันที่ 91 วัน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงและแมงกานีสตลอดระยะเวลาการหมัก จะเห็นได้ว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อรูปแบบของโลหะทั้งสองอย่างเด่นชัด โดยทุกรูปแบบมี ปริมาณมากและมากที่สุดในระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป) และมีรูปแบบของ ทองแดงและแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้มากที่สุดในวันที่ 49 ซึ่งถึงแม้ว่ารูป สารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลา การหมักนานขึ้น แต่ทั้งสามรูปแบบต้องอาศัยปัจจัยทางกายภาพและเคมีในการเปลี่ยนรูปแบบทั้งสาม ไปอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เสียก่อนพืชจึงจะนำไปใช้ได้

การศึกษารูปแบบของทองแดงและแมงกานีสนอกจากจะทำให้ทราบถึงระยะเวลาการหมักที่ พบรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชแล้วยังทำให้ทราบถึงศักยภาพในการกักเก็บของโลหะทั้งสองในรูปแบบ อื่นที่อาจทยอยปลดปล่อยออกมาภายหลังอันเป็นประโยชน์ต่อความรู้ความเข้าใจในการปรับปรุง คุณภาพปุ๋ยหมัก การกำหนดระยะเวลาการหมัก อันจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการนำไปใช้ใน อนาคต



บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณและรูปแบบของทองแดงและแมงกานีสตลอดจนคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี ในปุ๋ยหมักมูลไก่ที่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อทราบถึงคุณภาพปุ๋ยหมักและอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุอาหารทั้งสอง ทั้งในด้านรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้ของพืช และรูปที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงก่อนที่พืชจะนำไปใช้ได้ โดยทำการหมักเป็นเวลา 119 วัน เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมักตลอดกระบวนการหมัก ได้แก่ วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบ Community Bureau of Reference (BCR) ที่แบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง นอกจากนี้ยังอภิปรายถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แปรตามกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและปริมาณของโลหะทั้งสองอันนำไปสู่การพิจารณาเลือกอายุปุ๋ยหมักเพื่อการนำไปใช้ต่อไป

คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักที่แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เป็น 3 ระยะ คือ 1) ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0) เป็นระยะที่อุณหภูมิใกล้เคียงบรรยากาศภายนอก มองเห็นวัสดุหมักชัดเจน ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล มีความชื้นสูง ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 74.8 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 15:1 2) ระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 1-35) เป็นระยะที่อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้น ปุ๋ยเริ่มแห้ง กลิ่นของแอมโมเนียลดลง ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อยๆ ลดลงเมื่อสิ้นสุดระยะนี้เหลือเพียงร้อยละ 49.6 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ที่ 9.9:1 3) ระยะปุ๋ยเจริญเต็มที่ (วันที่ 42 เป็นต้นไป) เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักเริ่มเย็นตัวลงอุณหภูมิใกล้เคียงภายนอก มองไม่เห็นวัตถุติดตั้งต้น ปุ๋ยมีสีน้ำตาลเข้มและไม่มีกลิ่นของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นระยะที่ปุ๋ยพร้อมที่จะนำไปใช้ได้ มีพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดของกรมวิชาการเกษตร (2548) และตรวจไม่พบโลหะหนัก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเมื่อสิ้นสุดระยะนี้เหลือเพียงร้อยละ 43.5 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเหลือเพียง 9.2:1 บ่งชี้ถึงการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุตลอดกระบวนการหมักมีผลทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = -0.643$, $p < 0.01$) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงแปรผกผันกับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญไปด้วย ($r = -0.598$, $p < 0.01$)

การศึกษารูปแบบของจุลธาตุอาหารทองแดงและแมงกานีสทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($p < 0.01$) จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่เป็นวัตถุดิบปลดปล่อยจุลธาตุอาหารโลหะทั้งสองออกมา เรียกลักษณะนี้ว่า Condensation of Metals (Hsu & Lo, 2000; LIU & SUN, 2013; Singh & Kalamdhad, 2012) โดยเรียงลำดับปริมาณที่พบดังต่อไปนี้

Cu-Org > Cu-Res > Cu-Ex > Cu-Ox

Mn-Ex > Mn-Ox > Mn-Org > Mn-Res

จะเห็นได้ว่าทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปที่เด่นชัดมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.094-0.609 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่เด่นชัดมีปริมาณอยู่ในช่วง 1.38-4.63 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนตามทฤษฎี Irving and Williams (1953) ที่พบว่าทองแดงมีเสถียรภาพของสารประกอบมากกว่าแมงกานีสจึงอยู่ในรูปที่พืชพร้อมนำไปใช้ได้ยากในปริมาณที่น้อยกว่า

เมื่อพิจารณาแต่ละรูปแบบในเชิงเปรียบเทียบกัน พบว่ารูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ได้ง่ายที่สุดของทองแดงและแมงกานีสมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.952$, $p < 0.01$) โดยมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ จึงมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงด้วย ($p < 0.01$) โดยการจัดกลุ่มของดินแดนพบว่าระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่มีปริมาณทองแดงและแมงกานีสอยู่ในกลุ่มที่มีค่าสูงที่สุด ได้แก่วันที่ 49 โดยทองแดงมีค่า 2.2×10^{-1} และแมงกานีสมีค่า 4.6 มิลลิกรัมต่อกรัม

รูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงและแมงกานีสมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันเช่นกัน ($r = 0.920$, $p < 0.01$) ซึ่งทั้งแมงกานีสออกไซด์และเหล็กออกไซด์ล้วนมีบทบาทสำคัญในการเป็นโพลิเมอร์ควบคุมความเป็นกรด-ด่างของดิน มีความสามารถดูดซับแคทไอออนอื่นๆ ได้ (Essington, 2004; นัทธีรา สรรมณี, 2555) ทองแดงในรูปแบบนี้จึงสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วย ($r = 0.756$, $p < 0.01$) และทำให้แมงกานีสในรูปแบบนี้เป็นรูปที่เด่นพบในปริมาณที่รองลงมาจากรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ขณะที่ทองแดงที่ไม่มีคุณสมบัตินี้พบในปริมาณที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุยังคงมีอิทธิพลกับรูปแบบนี้ ที่พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ($p < 0.01$) โดยการจัดกลุ่มของดินแดนพบว่าในช่วงวันที่ 63-119 เป็นช่วงที่มีปริมาณโลหะทั้งสองสูงที่สุด

รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงและแมงกานีส พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันเช่นกัน ($r = 0.924$, $p < 0.01$) โดยความชอบในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงกับสารฮิวมิกซึ่งเกิดจากกระบวนการหมักเป็นคุณลักษณะที่เด่นเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ (Hsu & Lo, 2000; Lu et al., 2014) ทำให้พบทองแดงในรูปแบบนี้มากที่สุด ขณะที่พบแมงกานีสใน

รูปแบบนี้เพียงเล็กน้อย โดยกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะเพิ่มปริมาณของโลหะทั้งสอง สังเกตได้จากปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงสัมพันธ์กับปริมาณของรูปแบบนี้ที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.01$) โดยการจัดกลุ่มของดินแดนพบว่าในช่วงวันที่ 14-119 เป็นช่วงที่มีปริมาณโลหะทั้งสองสูงที่สุด

รูปคงค้างของแข็งซึ่งเป็นรูปแบบที่พืชนำไปใช้ได้ยากที่สุด ซึ่งยังคงมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันเช่นกัน ($r = 0.845$, $p < 0.01$) โดยสัมพันธ์กับรูปคงค้างของเหล็ก ($r = 0.879$, $p < 0.01$) ที่มักพบในรูป amorphous หรือ crystalline ร่วมกับแมงกานีส (Silveira et al., 2006) ซึ่งจากคุณสมบัติการชอบเกิดสารประกอบของทองแดงทำให้ทองแดงพบในรูปแบบนี้มากเป็นอันดับที่สอง ขณะที่แมงกานีสในรูปแบบนี้พบน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามรูปแบบนี้ยังคงสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลง ($p < 0.01$) โดยการจัดกลุ่มของดินแดนให้วันที่ 91-105 อยู่ในกลุ่มที่มากที่สุดของโลหะทั้งสองชนิด

ดังนั้นการศึกษารูปแบบของโลหะทั้งสองชนิดตลอดกระบวนการหมักพบว่าโลหะที่แตกต่างกันจะพบในรูปแบบต่างๆ ในสัดส่วนที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยการปรากฏของรูปแบบต่างๆ นอกจากจะได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักแล้วยังมาจากลักษณะความชอบของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่ส่งผลต่อความยากง่ายในการปลดปล่อยรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่พืชนำไปใช้ได้ปริมาณเล็กน้อยแตกต่างกันไป ซึ่งนอกจากจะนำความรู้นี้ไปใช้ในการพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมักแล้ว ยังใช้ในการเลือกอายุปุ๋ยหมักที่ผ่านทั้งคุณภาพพื้นฐานตามกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่ดีและให้ปริมาณจุลธาตุอาหารทั้งสองชนิดในปริมาณที่มากอีกด้วย

รายการอ้างอิง

- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in Terrestrial environments*: SpringerVerlag.
- Alloway, B. J. (1990). *Heavy Metals in Soils*. New York: John Wiley and Sons.
- Baker, D. E. (1990). *Copper: Heavy Metals in Soil*: Blackie and Son.
- Barber, S. A. (1995). *Soil Nutrient Bioavailability : A Mechanistic Approach* (2 Ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Baudo, R. (1982). *The role of the speciation in the tranfer of heavy metals along the aquatic food wab*: Unpublished 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.
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sanchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63, 91-99.
- Bradl, H. B. (2004). Adsorption of Heavy metal ions on soils constituents. *Colloid and Interface Science*, 27, 1-18.
- Dundar, M. S., Altundag, H., Eyupoglu, V., Keskin, S. C., & Tutunoglu, C. (2012). Determination of heavy metals in lower Sakarya river sediments using a BCR-sequential extraction procedure. *Environ Monit Assess*, 184, 33-41.
- EPA, U. (1996). Method 3050B. Retrieved from www.epa.gov/safewater/ccl/pdf/manganese.htm
- EPA, U. (2003). Health effects support document for manganese.
- Essington, M. E. (2004). *Soil and Water Chemistry*: CRC.
- Fourti, O. (2013). The maturity tests during the composting of municipal solid wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 43-49.
- Fuentes, A., Llorens, M., Saez, J., Aguilar, M. I., Ortuno, J. F., & Mesegur, V. F. (2004). Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges *Journal of Hazardous Materials*, 108, 161-169.
- Garcia, C., Moreno, L., Hernandez, T., Costa, F., & Polo, A. (1995). Effect of composting

- on sewage sludges contaminated with heavy metals. *Bioresource Technology*, 53, 13-19.
- Guang, M. Z., Hong, L. H., Dan, L. H., Xing, Z. Y., Rong, Q. J., Man, Y., . . . Xiao, L. L. (2009). Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochemistry*, 44, 396-400.
- Hsu, J., & Lo, S. (2000). Recycling of separated pig manure: characterization of maturity and chemical fractionation of elements during compost. *Wat. Sci Technol*, 40, 121-127.
- Huang, G. F., Wong, J. W. C., Wu, Q. T., & Nagar, B. B. (2004). Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust *Waste Management*, 24, 805-813.
- Irving, H., & Williams, R. J. P. (1953). The stability of transition-metal complexes. *J. Chem. Soc.*, 637, 3192-3210.
- Ko, H. J., Kim, K. Y., Kim, H. T., Kim, C. N., & Umeda, M. (2008). Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. *Waste Management*, 28, 813-820.
- Kumpiene, J., Nordmark, D., Hamberg, R., Carabante, I., Simanaviciene, R., & Aksamitauskas, V. C. (2006). Leaching of arsenic, copper and chromium from thermally treated soil. *Journal of Environmental Management*, 183, 460-466.
- LIU, J.-y., & SUN, S.-y. (2013). Total concentrations and different fractions of heavy metals in sewage sludge from Guangzhou, China. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23, 2397-2407.
- 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.
- McCleverty, J. (1999). *Chemistry of the First-row Transition Metals*: OXFORD University.
- Moharana, P. C., & Biswas, D. R. (2016). Assessment of maturity indices of rock phosphate enriched composts using variable crop residues. *Bioresource Technology*, 222, 1-13.
- Mukesh, K. A., Akhilesh, K. P., Jamaluddin, K., Pushpendra, S. B., Jonathan, W. C. W., & Ammaiyappan, S. (2014). Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology*, 168, 214-

221.

- Pace, M. G., Miller, B. E., & Farrell-Poe, K. L. (1995). *The Composting Process*. Utah State University.
- Peruzzi, E., Masciandaro, G., Macci, C., Doni, S., Ravelo, S. G. M., Peruzzi, P., & Ceccanti, B. (2011). Heavy metal fractionation and organic matter stabilization in sewage sludge treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 37, 771-778.
- Quan-Ying, C., Mo, C.-H., Wu, Q.-T., Zeng, Q.-Y., & Katsoyiannis, A. (2007). Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. *Journal of Hazardous Materials*, 147, 1063-1072.
- Rawoteea, S. A., Mudhoo, A., & Kumar, S. (2017). Co-composting of vegetable wastes and carton: Effect of carton composition and parameter variations. *Bioresource Technology*, 227, 171-178.
- 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.
- Silveira, M. L., Alleoni, L. R. F., O'Connor, G. A., & Chang, A. C. (2006). Heavy metal sequential extraction methods-A modification for tropical soils. *Chemosphere*, 64, 1929-1938.
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresource Technology*, 124, 169-179.
- Smith, K. A. (1990). *Heavy Metals in Soils: Manganese and Cobalt*. 1 Wiley Drive, Somerset, New Jersey 08873: John Wiley & Sons, Inc.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. 198 Madison Avenue. New York, New York 10016-4314. USA.: Oxford University Press, Inc.
- Stenvenson, F. J. (1994). *Humus chemistry of soils*. New York, USA: OXFORD University.
- Stumm, W., & Brauner, P. (1978). *Chemical Speciation* (2 ed.). New York.
- Sungur, A., Soylak, M., Yilmaz, S., & Ozcan, H. (2014). Determination of heavy metals in sediments of the Ergene River by BCR sequential extraction method. *Environ Earth Sci*, 72, 3293-3305.
- Sweeten, J. M., & Auvermann, B. W. (2008). *Composting Manure and Sludge* (Vol. E-479): AgriLIFE EXTENSION.

- Tan, K. H. (2003). *Humic Matter in Soil and Environment*: Marcel Dekker.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. *Anal.Chem*, 51, 844-850.
- Tiquia, S. M., Tan, N. F. Y., & Hodgkiss, I. J. (1998). Composting of spent pig litter at different seasonal temperatures in subtropical climate. *Environmental Pollution*, 98(1), 97-104.
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itavaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72, 169-183.
- Wilkins, P. C., & Wilkins, R. G. (1997). *Inorganic Chemistry in Biology*. NEW YORK: OXFORD University.
- Winter, M. J. (1994). *d-Block Chemistry*: OXFORD University.
- Wong, J. W. C., & Selvam, A. (2006). Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere*, 63, 980-986.
- Zbytnewski, R., & Busszewski, B. (2005). Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties. *Bioresour Technol*, 96, 471-478.
- กรมวิชาการเกษตร. (2548). ปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. In. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมวิชาการเกษตร. (2551). ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนน้ำเสีย. Retrieved from
- กาญจนา สุรามา. (2557). การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีทางจุลินทรีย์. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2547). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2547) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. In.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2548). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น (10 ed.): มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- จุฑาวรรณ สุนทรนิตย์. (2557). การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี: การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์. (2528). เกษตรทั่วไป 4: ดิน น้ำและปุ๋ย (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

- ธงชัย มาลา. (2546). ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัทธีรา สรรมณี. (2555). โลหะในแหล่งน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.): บริษัทจรัสสินิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.
- บัญชา รัตน์ทุ, & ศิราณี วงศ์กระจ่าง. (2556). คุณค่าของปุ๋ยหมักในการเกษตร. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 174-173.
- พืชเกษตร. (2560). สารชะขาวเกษตร : ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยชีวภาพ และวิธีทำปุ๋ยหมัก. Retrieved from <http://puechkaset.com>
- ภัทรพร กังวานเฉษฎา. (2555). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเติบโตของปุ๋ยหมัก. (วิทยาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยศิลปากร,
- มุกดา สุขสวัสดิ์. (2544). ปุ๋ยอินทรีย์ (5 ed.): บ้านและสวน กรุงเทพฯ.
- ยงยุทธ โอสดสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, & ชวลิต ฮงประยูร. (2551). ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.): มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน.
- สาตี ชินสถิต, & ทฤทัย แก่นลา. (2548). คู่มือปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับเกษตรกร) (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- สุธรรม ประทุมสวัสดิ์. (2545). เทคนิคการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ (Composting). วิทยาศาสตร์พัฒนาเทคนิคศึกษา, 14(43), 38-42.
- อมรรัตน์ เอื้อสลุง. (2559). การศึกษารูปแบบของโลหะในปุ๋ยหมักมูลหมูด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นกรณีศึกษาสังกะสีและโพแทสเซียม. (วิทยาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยศิลปากร,





ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์การสกัดลำดับชั้นของปุ๋ยหมักมูลไก่

ตารางที่ 12 ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้	รูปสารประกอบออกไซด์	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	รูปคงค้างของแข็ง	รวม 4 รูปแบบ
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	
0	0.055 ± 0.0009	0.005 ± 0.0005	0.094 ± 0.0213	0.019 ± 0.0043	0.173
3	0.063 ± 0.0023	0.007 ± 0.0009	0.107 ± 0.0336	0.025 ± 0.0077	0.202
7	0.064 ± 0.0016	0.006 ± 0.0006	0.139 ± 0.0178	0.027 ± 0.0200	0.235
14	0.183 ± 0.0152	0.036 ± 0.0030	0.425 ± 0.0568	0.243 ± 0.1010	0.887
21	0.220 ± 0.0154	0.038 ± 0.0007	0.504 ± 0.0377	0.244 ± 0.0172	1.01
28	0.187 ± 0.0036	0.034 ± 0.0002	0.399 ± 0.0649	0.232 ± 0.0632	0.852
35	0.153 ± 0.0055	0.031 ± 0.0040	0.357 ± 0.0548	0.264 ± 0.0446	0.805
42	0.178 ± 0.0041	0.044 ± 0.0020	0.407 ± 0.0239	0.297 ± 0.0539	0.926
49	0.208 ± 0.0068	0.046 ± 0.0074	0.456 ± 0.1948	0.287 ± 0.0678	0.997
63	0.219 ± 0.0165	0.048 ± 0.0027	0.512 ± 0.1175	0.311 ± 0.0943	1.09
77	0.176 ± 0.0084	0.047 ± 0.0023	0.448 ± 0.0291	0.176 ± 0.0385	0.846
91	0.169 ± 0.0132	0.052 ± 0.0064	0.396 ± 0.0145	0.385 ± 0.0053	1.00
105	0.171 ± 0.0265	0.053 ± 0.0280	0.506 ± 0.0536	0.316 ± 0.0442	1.05
119	0.173 ± 0.0170	0.052 ± 0.0008	0.609 ± 0.0700	0.192 ± 0.0067	1.02

ตารางที่ 13 ปริมาณแมงกานีส (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับชั้น

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้	รูปสารประกอบออกไซด์	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	รูปคงค้างของแข็ง	รวม 4 รูปแบบ
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	
0	1.38 ± 0.0110	0.413 ± 0.0169	0.116 ± 0.0174	0.036 ± 0.0144	1.95
3	1.64 ± 0.0240	0.537 ± 0.0268	0.193 ± 0.0065	0.054 ± 0.011	2.42
7	1.66 ± 0.0159	0.594 ± 0.0168	0.227 ± 0.0325	0.080 ± 0.0564	2.57
14	4.29 ± 0.0436	1.94 ± 0.0974	1.09 ± 0.845	0.975 ± 0.4769	8.30
21	4.49 ± 0.0249	2.16 ± 0.0720	1.30 ± 0.0838	0.703 ± 0.1305	8.65
28	3.95 ± 0.0697	1.71 ± 0.0218	0.854 ± 0.135	0.414 ± 0.2426	6.93
35	3.52 ± 0.0261	1.67 ± 0.0317	0.989 ± 0.1447	0.572 ± 0.1591	6.75
42	4.08 ± 0.0466	1.93 ± 0.0378	0.930 ± 0.0465	0.502 ± 0.1284	7.45
49	4.63 ± 0.0447	2.15 ± 0.2158	1.03 ± 0.539	0.971 ± 0.197	8.78
63	4.30 ± 0.0719	2.02 ± 0.1395	0.988 ± 0.364	0.854 ± 0.1767	8.16
77	4.00 ± 0.0194	1.85 ± 0.0699	0.921 ± 0.0662	0.445 ± 0.0354	7.22
91	3.99 ± 0.0470	1.74 ± 0.0603	1.17 ± 0.0963	1.82 ± 0.100	8.73
105	4.38 ± 0.0457	2.03 ± 0.1298	1.05 ± 0.182	1.07 ± 0.2087	8.52
119	4.46 ± 0.0440	2.10 ± 0.1427	1.15 ± 0.1724	0.528 ± 0.1853	8.24

ตารางที่ 14 ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับชั้น

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้	รูปสารประกอบออกไซด์	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	รูปคงค้างของแข็ง	รวม 4 รูปแบบ
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	
0	0.1736± 0.006	0.0740 ± 0.005	0.1231 ± 0.079	2.3648 ± 0.174	2.7355
3	0.2262± 0.008	0.0945 ± 0.06	0.1574 ± 0.071	3.1909 ± 0.551	3.6690
7	0.1807 ± 0.009	0.0983 ± 0.023	0.0892 ± 0.007	2.7652 ± 0.201	3.1334
14	0.5133 ± 0.020	0.2441 ± 0.042	0.2119 ± 0.104	12.5394 ± 1.284	13.508
21	0.5417 ± 0.010	0.2726 ± 0.039	0.1996 ± 0.109	13.0281 ± 0.127	14.0420
28	0.4250 ± 0.083	0.2146 ± 0.038	0.2103 ± 0.069	14.3695 ± 1.139	15.2194
35	0.3350 ± 0.011	0.1568 ± 0.0024	0.1308 ± 0.063	12.9152 ± 1.641	13.5378
42	0.3778 ± 0.039	0.1656 ± 0.016	0.2180 ± 0.041	12.6471 ± 2.038	13.4079
49	0.4784 ± 0.036	0.2848 ± 0.049	0.2923 ± 0.059	13.0279 ± 3.024	14.0834
63	0.4742 ± 0.0033	0.1955 ± 0.027	0.1838 ± 0.038	13.3324 ± 1.144	14.1859
77	0.3944 ± 0.025	0.2729 ± 0.017	0.1656 ± 0.013	10.7615 ± 0.276	11.5944
91	0.4176 ± 0.041	0.3316 ± 0.204	0.1205 ± 0.029	13.9447 ± 0.521	14.8144
105	0.4564 ± 0.018	0.2511 ± 0.036	0.2357 ± 0.048	13.0791 ± 0.855	14.0223
119	0.4575 ± 0.054	0.3082 ± 0.066	0.2213 ± 0.062	10.6396 ± 0.821	11.6266

ตารางที่ 15 ร้อยละเฉลี่ยของทองแดงในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลาการหมัก (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ)	รูปสารประกอบออกไซด์ (ร้อยละ)	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (ร้อยละ)	รูปคงค้างของแข็ง (ร้อยละ)
0	31.8	2.72	54.5	11.0
3	31.3	3.46	52.8	12.4
7	27.0	2.43	59.2	11.4
14	20.6	4.03	47.9	27.4
21	21.9	3.80	50.1	24.2
28	21.9	4.03	46.8	27.2
35	19.0	3.90	44.3	32.8
42	19.3	4.75	43.9	32.1
49	20.9	4.56	45.7	28.8
63	20.1	4.43	46.9	28.5
77	20.8	5.49	53.0	20.7
91	16.8	5.17	39.5	38.4
105	16.4	5.10	48.4	30.2
119	16.9	5.07	59.4	18.7



ตารางที่ 16 ร้อยละเฉลี่ยของแมงกานีสในรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลาการหมัก (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ร้อยละ)	รูปสารประกอบออกไซด์ (ร้อยละ)	รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (ร้อยละ)	รูปคงค้างของแข็ง (ร้อยละ)
0	70.9	21.2	5.96	1.86
3	67.6	22.2	7.98	2.21
7	64.9	23.1	8.85	3.14
14	51.7	23.4	13.1	11.8
21	51.9	24.9	15.0	8.13
28	57.0	24.7	12.3	5.98
35	52.2	24.7	14.7	8.48
42	54.8	26.0	12.5	6.74
49	52.8	24.4	11.7	11.1
63	52.7	24.7	12.1	10.5
77	55.4	25.6	12.8	6.17
91	45.7	20.0	13.4	20.9
105	51.4	23.8	12.3	12.5
119	54.2	25.5	13.9	6.41



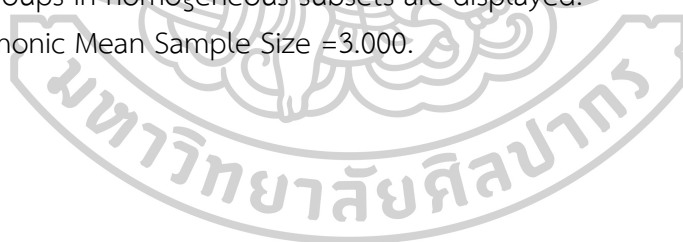


ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05			
		1	2	3	4
0	3	0.05500			
3	3	0.06333			
7	3	0.06367			
35	3		0.15300		
91	3		0.16867	0.16867	
105	3		0.17133	0.17133	
119	3		0.17300	0.17300	
77	3		0.17567	0.17567	
42	3			0.17867	
14	3			0.18300	
28	3			0.18700	
49	3				0.20800
63	3				0.21933
21	3				0.22033
Sig.		0.424	0.051	0.122	0.256

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.



ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	0.00433					
7	3	0.00567					
3	3	0.00700					
35	3		0.03133				
28	3		0.03433	0.03433			
14	3		0.03533	0.03533			
21	3			0.03833			
42	3				0.04400		
49	3				0.04533		
77	3				0.04633	0.04633	
63	3				0.04833	0.04833	0.04833
91	3					0.05167	0.05167
119	3					0.05200	0.05200
105	3						0.05333
Sig.		0.367	0.178	0.178	0.159	0.067	0.105

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05			
		1	2	3	4
0	3	0.09400			
3	3	0.10667			
7	3	0.13867			
35	3		0.35733		
91	3		0.39667	0.39667	
28	3		0.39867	0.39867	
42	3		0.40667	0.40667	
14	3		0.42500	0.42500	
77	3		0.44833	0.44833	
49	3		0.45600	0.45600	
21	3			0.50367	0.50367
105	3			0.50800	0.50800
63	3			0.51200	0.51200
119	3				0.60900
Sig.		0.487	0.160	0.107	0.116

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของทองแดงรูปค่างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05				
		1	2	3	4	5
0	3	0.01900				
3	3	0.02533				
7	3	0.02667				
77	3		0.17533			
119	3		0.19133	0.19133		
28	3		0.23133	0.23133	0.23133	
14	3		0.24300	0.24300	0.24300	
21	3		0.24367	0.24367	0.24367	
35	3		0.26367	0.26367	0.26367	
49	3			0.28733	0.28733	
42	3				0.29733	0.29733
63	3				0.31133	0.31133
105	3				0.31600	0.31600
91	3					0.38500
Sig.		0.865	0.072	0.051	0.091	0.064

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.



ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	1.3800								
3	3		1.6333							
7	3		1.6633							
35	3			3.5233						
28	3				3.9467					
91	3				3.9933					
77	3				4.0000					
42	3					4.0800				
14	3						4.2867			
63	3						4.2967			
105	3							4.3767		
119	3								4.4633	
21	3								4.4933	
49	3									4.6333
Sig.		1.000	0.396	1.000	0.159	1.000	0.776	1.000	0.396	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปสารประกอบออกไซด์ตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	0.4133						
3	3	0.5373	0.5373					
7	3		0.5940					
35	3			1.6667				
28	3			1.7100	1.7100			
91	3			1.7433	1.7433			
77	3				1.8500	1.8500		
42	3					1.9333	1.9333	
14	3					1.9433	1.9433	
63	3					2.0133	2.0133	2.0133
105	3						2.0300	2.0300
119	3						2.1000	2.1000
49	3							2.1467
21	3							2.1600
Sig.		0.126	0.477	0.367	0.103	0.066	0.067	0.105

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ตลอด
ระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05		
		1	2	3
0	3	0.1160		
3	3	0.1930		
7	3	0.2270		
28	3		0.8537	
77	3		0.9213	0.9213
42	3		0.9303	0.9303
63	3		0.9863	0.9863
35	3		0.9907	0.9907
49	3		1.0337	1.0337
105	3		1.0493	1.0493
14	3		1.0900	1.0900
119	3		1.1500	1.1500
91	3		1.1700	1.1700
21	3			1.3033
Sig.		0.527	0.108	0.054

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของแมงกานีสรูปค่างของแข็งตลอดระยะเวลาการหมัก

Duncan^a

DAY	N	Subset for alpha=0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	0.03633					
3	3	0.05367					
7	3	0.08033					
28	3		0.41433				
77	3		0.44500				
42	3		0.50200	0.50200			
119	3		0.52833	0.52833			
35	3		0.57200	0.57200			
21	3		0.70333	0.70333	0.70333		
63	3			0.85367	0.85367	0.85367	
49	3				0.97200	0.97200	
14	3				0.97533	0.97533	
105	3					1.06667	
91	3						1.82333
Sig.		0.793	0.112	0.051	0.121	0.222	0.067

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size =3.000.

ตารางที่ 25 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของทองแดงที่เกิดขึ้น

Correlations

	ระยะเวลาการหมัก	Ex	Ox	Org	Res	C/N	pH	Mois	MnO	FeO	Temp	HA	OM	
ระยะเวลาการหมัก	Pearson Correlation	1	.471**	.818**	.684**	.544**	-.598**	-.530**	-.818**	.611**	.608**	-.683**	-.321*	-.643**
	Sig. (2-tailed)		.002	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.038	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ex	Pearson Correlation	.471**	1	.845**	.834**	.776**	-.712**	-.311*	-.755**	.933**	.675**	-.512**	-.492**	-.664**
	Sig. (2-tailed)	.002		.000	.000	.000	.000	.045	.000	.000	.000	.001	.001	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ox	Pearson Correlation	.818**	.845**	1	.875**	.821**	-.750**	-.510**	-.913**	.920**	.756**	-.695**	-.450**	-.758**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.000	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Org	Pearson Correlation	.684**	.834**	.875**	1	.678**	-.767**	-.386*	-.789**	.920**	.628**	-.570**	-.440**	-.738**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000		.000	.000	.012	.000	.000	.000	.000	.004	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Res	Pearson Correlation	.544**	.776**	.821**	.678**	1	-.731**	-.397**	-.755**	.795**	.524**	-.548**	-.436**	-.689**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000		.000	.009	.000	.000	.000	.000	.004	.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 26 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของเมฆกานีสที่เกิดขึ้น

Correlations

	ระยะเวลาการหมัก	Ex	Ox	Org	Res	C/N	pH	Mois	MnO	FeO	Temp	HA	OM	
ระยะเวลาการหมัก	Pearson Correlation	1	.622**	.611**	.556**	.533**	-.598**	-.530**	-.818**	.611**	.608**	-.683**	-.321*	-.643**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.038	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ex	Pearson Correlation	.622**	1	.988**	.881**	.633**	-.766**	-.366*	-.841**	.988**	.718**	-.578**	-.521**	-.758**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.000	.017	.000	.000	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Ox	Pearson Correlation	.611**	.988**	1	.915**	.613**	-.774**	-.379*	-.839**	1.000**	.689**	-.574**	-.512**	-.755**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.000	.000	.013	.000	.000	.000	.000	.001	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Org	Pearson Correlation	.556**	.881**	.915**	1	.654**	-.775**	-.345*	-.745**	.915**	.623**	-.495**	-.479**	-.754**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000		.000	.000	.025	.000	.000	.000	.001	.004	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Res	Pearson Correlation	.533**	.633**	.613**	.654**	1	-.539**	-.307*	-.599**	.613**	.559**	-.514**	-.287	-.619**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000		.000	.048	.000	.000	.000	.001	.065	.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 27 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของทองแดงและแมงกานีส

		Correlations			
		Cu Exchange	Cu Oxide	Cu Organic	Cu Residual
Mn Exchange	Pearson	.952 ^{**}	.925 ^{**}	.895 ^{**}	.803 ^{**}
	Correlation				
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
Mn Oxide	Pearson	.933 ^{**}	.920 ^{**}	.921 ^{**}	.795 ^{**}
	Correlation				
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
Mn Organic	Pearson	.825 ^{**}	.828 ^{**}	.924 ^{**}	.765 ^{**}
	Correlation				
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42
Mn Residual	Pearson	.560 ^{**}	.695 ^{**}	.507 ^{**}	.845 ^{**}
	Correlation				
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42

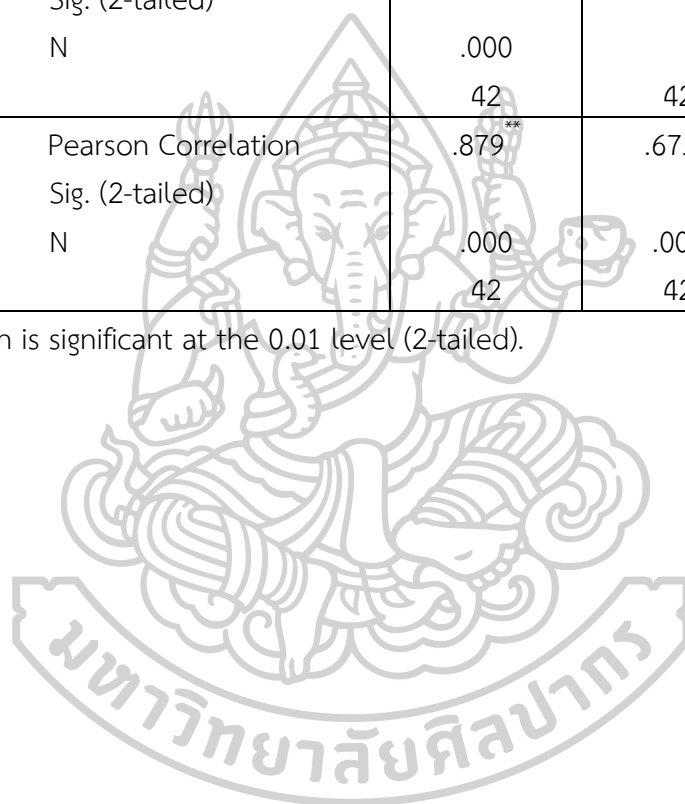
** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ตารางที่ 28 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างรูปคงค้างของแข็งของทองแดง แมงกานีสและเหล็ก

Correlations

		Cu Residual	Mn Residual	Fe Residual
Cu Residual	Pearson	1	.845 ^{**}	.879 ^{**}
	Correlation			
	Sig. (2-tailed)		.000	.000
	N	42	42	42
Mn Residual	Pearson Correlation	.845 ^{**}	1	.675 ^{**}
	Sig. (2-tailed)			
	N	.000		.000
		42	42	42
Fe Residual	Pearson Correlation	.879 ^{**}	.675 ^{**}	1
	Sig. (2-tailed)			
	N	.000	.000	
		42	42	42

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





ตารางที่ 29 คุณภาพปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิลิตร
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งิที่ระเหยได้	ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
3	ปริมาณหินและกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20:1
8	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก -ไนโตรเจน (total N) - ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅) - โพแทสเซียม (total K ₂ O)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า 1.0 ไม่น้อยกว่า 0.5 ไม่น้อยกว่า 0.5
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)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสาวิตรี รุ่ง
วัน เดือน ปี เกิด	15 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	302/256 ซ.ลาดพร้าว 87 ถ.ลาดพร้าว แขวงคลองเจ้าคุณสิงห์ เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310
ผลงานตีพิมพ์	ผลของกระบวนการหมักต่อปริมาณแมงกานีส. ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการงานเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 14 หัวข้อ “เกษตรและสุขภาพ (Agriculture and Health). ระหว่างวันที่ 1-2 พฤศจิกายน 2559 ณ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. หน้า 27-31.

