



การศึกษากระบวนการหมักต่อพลวัตของทองแดงและเหล็ก ด้วยเทคนิค Community Bureau of Reference (BCR)



โดย
นายธีรภัทร มีประมุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษากระบวนการหมักต่อพลวัตของทองแดงและเหล็ก ด้วยเทคนิค Community
Bureau of Reference (BCR)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY OF COMPOSTING PROCESS ON THE DYNAMICS OF COPPER AND IRON
SPECIATION BY USING COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE (BCR)
TECHNIQUE.



By
Mr. Teerapat MEEPRAMOON

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science ENVIRONMENTAL SCIENCE
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE
Academic Year 2025
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษากระบวนการหมักต่อพลวัตของทองแดงและเหล็ก ด้วย
เทคนิค Community Bureau of Reference (BCR)
โดย นายธีรภัทร มีประมุล
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

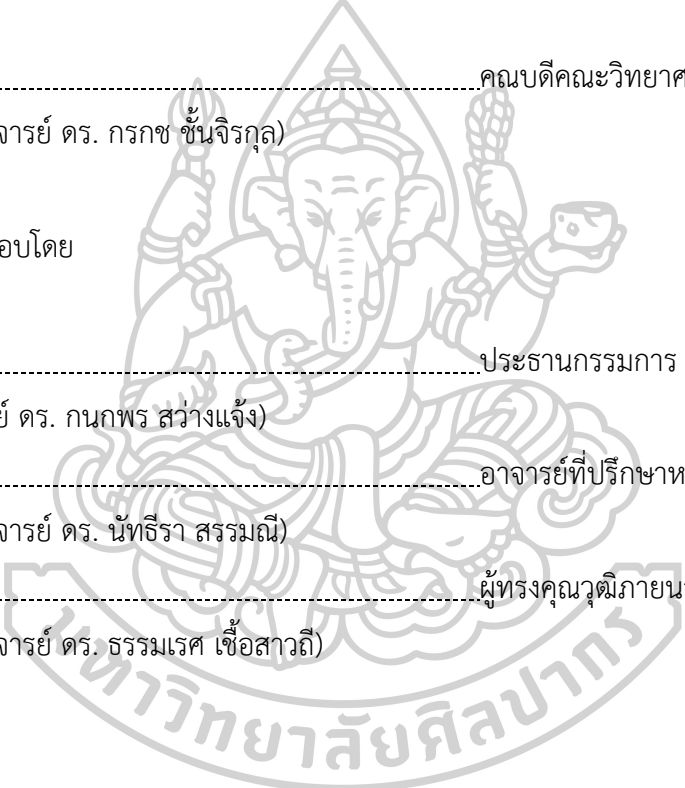
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. กรกช ชันจิริกุล)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. กนกพร สว่างแจ้ง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี)

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



660720070 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : การสกัดแบบลำดับชั้น, BCR, ทองแดง, เหล็ก, ปุ๋ยหมัก

นาย ชีรภัทร มีประมวล: การศึกษากระบวนการหมักต่อพลวัตของทองแดงและเหล็ก ด้วยเทคนิค Community Bureau of Reference (BCR) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการหมักและผลกระทบต่อพลวัตของรูปแบบทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) โดยใช้เทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้น แบ่งรูปแบบโลหะออกเป็น 4 รูป ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (-Ox) รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (-Org) และรูปคงค้างของแข็ง (-Res) ปุ๋ยหมักมีส่วนประกอบหลักมาจากมูลสุกร มูลโค และมูลค่างควา ร้อยละ 92.33 องค์ประกอบอื่น ได้แก่ รำข้าว กากน้ำตาล และน้ำหมักปลาหมัก ร้อยละ 7.67 กระบวนการหมักทำให้การปลดปล่อยทองแดงและเหล็กเพิ่มขึ้น ($r=0.737$ และ 0.803 , $p<0.01$) โดยผลรวมปริมาณทองแดงและเหล็กทั้งหมด (-Total) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตอนเริ่มผสม 9–9.40 เท่า และ 9.60–9.90 เท่า ตามลำดับ สัดส่วนเชิงปริมาณเฉลี่ยของทองแดงที่พบ เรียงตามลำดับดังนี้ Cu-Org Cu-Res Cu-Ex และ Cu-Ox คิดเป็นร้อยละ 50.11 27.24 18.99 และ 3.65 ตามลำดับ และสัดส่วนเชิงปริมาณเฉลี่ยของเหล็กที่พบเรียงตามลำดับดังนี้ Fe-Res Fe-Ox Fe-Ex และ Fe-Org คิดเป็นร้อยละ 86.67 4.44, 4.22 และ 4.66 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเหล็กมีแนวโน้มจะอยู่ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อยกว่าทองแดง ขณะเดียวกันทองแดงมีแนวโน้มในการจับกับสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าเหล็กจากการเพิ่มขึ้นของสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดง (Cu-Org) ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r=0.855$, $p<0.01$) ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็ก (Fe-Org) ลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r= -0.521$, $p<0.01$) แม้กระนั้นก็ตามการปลดปล่อยรูปแบบส่วนใหญ่ของทองแดงและเหล็กมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากระยะเริ่มผสมจนมีค่าสูงที่สุดในช่วงวันที่ 21-28 จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งตั้งแต่วันที่ 77 ไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก แต่ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่สูงเกินไป (>5 dS/m) หลังจากวันที่ 35 เป็นต้นไป กลับส่งผลต่อความเป็นพิษในการงอกของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) ดังนั้นการศึกษาระบบการหมักต่อการปลดปล่อยทองแดงและเหล็กร่วมกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี จะช่วยให้เข้าใจถึงกระบวนการหมักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของโลหะทั้งสอง อันนำไปสู่จัดการคุณภาพของปุ๋ยหมักเพื่อกำหนดระยะเวลาการหมักให้เกิดประโยชน์ต่อการนำไปใช้ต่อไป

660720070 : Major ENVIRONMENTAL SCIENCE

Keyword : Manure compost, sequential extraction, BCR, Cu, Fe

Mr. Teerapat MEEPRAMOON : Study of composting process on the dynamics of copper and iron speciation by using Community Bureau of Reference (BCR) technique. Thesis advisor : Associate Professor Nattdhera Sanmanee, Ph.D.

This research studied the composting process and its effect on the dynamics of copper (Cu) and iron (Fe) speciation using the Community Bureau of Reference technique; BCR sequential extraction technique. The metal speciation was divided into 4 fractions: exchangeable fraction (-Ex), oxide bound fraction (-Ox), organically bound fraction (-Org) and residual fraction (-Res). The compost was obtained mainly from mixed manure of porcine, bovine and bat accounting for 92.33%. Others were rice bran, molasses, and fish fermenting juice accounting for 7.67%. The composting process increased the releasing of most fractions of Cu and Fe responding to the increasing of total Cu and Fe through time ($r=0.737$ and 0.803 , $p<0.01$) within the range of 9-9.40 and 9.60-9.90 times, respectively comparing to the amounts at initial date. The average amounts of Cu speciation were found in the order: Cu-Org, Cu-Res, Cu-Ex, and Cu-Ox accounting for 50.11%, 27.24%, 18.99%, and 3.65%, respectively and the average amounts of Fe were found in the order: Fe-Res, Fe-Ox, Fe-Ex, and Fe-Org accounting for 86.67, 4.44, 4.22, and 4.66, respectively. This implied that Fe tends to be in the less mobility form than Cu. Meanwhile, Cu tended to strongly form complex with organic ligands than Fe as shown by the increasing of Cu-Org with time ($r=0.855$, $p<0.01$) while Fe-Org was reducing ($r= -0.521$, $p<0.01$). Nevertheless, the releasing of most fractions was in the same trend, which was rising from the starting date to be high during day 21-28. Later all fractions tended to decline and increased again after day 77 towards the end of composting. Too high electrical conductivity (EC) greater than 5 dS/m was observed day after day 35 responding to the toxicity of *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek as well. So, study the composting process on the releasing of Cu and Fe fractions together with physicochemical characteristics would help to understand the change among the metals species and help to manage the compost quality to determine the duration for effectively use.

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษารวมถึงข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย และให้ความรู้ วิธีการเขียนรายงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จผลสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สว่างแจ้ง เป็นอย่างสูงที่คอยแนะนำและตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านทั้งหลายมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนพระคุณแต่บิดา ร้อยตำรวจเอก พูลศักดิ์ มีประมุข มารดา นางวาสนา มีประมุข และเพื่อน ๆ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาตลอดถือเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จ

ธีรภัทร มีประมุข



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนในการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปัญหาและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก.....	5
2.2 คุณสมบัติของทองแดงและเหล็กและบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	10
2.3 รูปแบบของจุลธาตุอาหารโลหะต่อความยากง่ายของการนำไปใช้ในสิ่งมีชีวิต.....	13
2.4 เสถียรภาพของสารประกอบตามคุณสมบัติการจัดเรียงอิเล็กตรอนและทฤษฎี.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	27
3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์.....	27

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	28
3.4 การหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก.....	29
3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน.....	31
3.6 การวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและเหล็กด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น	33
3.7 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงและเหล็ก	36
3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ	36
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา.....	37
4.1 การแบ่งระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และศึกษาลักษณะพื้นฐานทางกายภาพ และเคมีของปุ๋ยหมัก	37
4.2 รูปแบบของทองแดงและเหล็กตลอดกระบวนการหมัก.....	44
4.3 ปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ตลอดกระบวนการหมัก	45
4.4 อิทธิพลของกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงและ เหล็ก.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ดัชนีการงอกของเมล็ด	81
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์การสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร.....	84
ภาคผนวก ค ข้อมูลทางสถิติ	89
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์	6
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง	10
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก	12
ตารางที่ 4 รูปแบบจุลธาตุอาหารและรูปแบบที่สกัดแบบลำดับขั้น (BCR).....	14
ตารางที่ 5 การจำแนกไอออนของโลหะตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้น d และ Hard and Soft acid and Base (HSAB concept).....	17
ตารางที่ 6 ความชอบของไอออนของโลหะกลุ่มต่าง ๆ กับลิแกนด์ชนิดต่าง ๆ	18
ตารางที่ 7 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	19
ตารางที่ 8 ส่วนผสมและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก 5 สูตร	24
ตารางที่ 9 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักทั้ง 5 สูตร	24
ตารางที่ 10 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS No. และบริษัทผู้ผลิต	27
ตารางที่ 11 รายการเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และบริษัทผู้ผลิต	28
ตารางที่ 12 อัตราส่วนผสมของการทำปุ๋ยหมัก.....	30
ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรกับประกาศของกรมวิชาการ เกษตร (2555) เรื่องการขอขึ้นทะเบียน การออกใบสำคัญการขึ้นทะเบียน การขอแก้ไขรายการ ทะเบียนและการแก้ไขรายการทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์.....	39
ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูป สารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total).....	48
ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบ ออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Fe-Res) และ ผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total).....	52

ตารางที่ 16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็กที่แลกเปลี่ยน
ได้ (-Ex) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....54

ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็ก
สารประกอบออกไซด์ (-Ox) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)57

ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็ก รูป
สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (-Org) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
(C/N)60

ตารางที่ 19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็กรูปคองค้ำ
ของแข็ง (-Res) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....63



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 อาการขาดธาตุทองแดงในพืช.....	11
ภาพที่ 2 อาการขาดธาตุเหล็กในพืช.....	13
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิต.....	15
ภาพที่ 4 ค่าคงที่เสถียรภาพของสารประกอบโลหะแทรนซิชัน และค่าคงที่ผลคูณการละลายของ สารประกอบในอัตราส่วนของลิแกนด์ต่อโลหะเท่ากับ 1:1	16
ภาพที่ 5 ปริมาณเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก	20
ภาพที่ 6 ปริมาณสังกะสีรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก	21
ภาพที่ 7 สัดส่วนปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	23
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบทองแดงในระหว่างการหมักปุ๋ย.....	26
ภาพที่ 9 แผนผังการทดลองโดยรวม	29
ภาพที่ 10 แผนภาพการสกัดลำดับขั้น (Sequential Extraction Techniques).....	34
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก.....	41
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = -0.674$, $p < 0.01$)	42
ภาพที่ 13 การย่อยสลายที่สมบูรณ์ด้วยปุ๋ยหมักของดัชนีการงอก (Germination Index; GI) ของ เมล็ดถั่วเขียว (<i>Vigna radiata</i> (L.) R. Wilczek) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC).....	44
ภาพที่ 14 ผลรวมปริมาณทองแดง (Cu-Total) และเหล็กทั้งหมด (Fe-Total) ที่สัมพันธ์กับ ระยะเวลา การหมัก ($r = 0.737$ และ $r = 0.803$ ตามลำดับ).....	45
ภาพที่ 15 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก ก) ปริมาณความเข้มข้น ของทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูป สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณทองแดง ทั้งหมด (Cu-Total) ข) สัดส่วนของทองแดงรูปแบบต่าง ๆ	47

ภาพที่ 16 ปริมาณเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก ก) ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total) ข) สัดส่วนของเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ51

ภาพที่ 17 ปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....55

ภาพที่ 18 ปริมาณเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) ตลอดระยะเวลาการหมัก55

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (-Ex) ($r = 0.749, p < 0.01$).....56

ภาพที่ 20 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....58

ภาพที่ 21 ปริมาณเหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) ตลอดระยะเวลาการหมัก58

ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กในรูปสารประกอบออกไซด์ (-Ox) ($r = 0.864, p < 0.01$).....59

ภาพที่ 23 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) ตลอดระยะเวลาการหมัก60

ภาพที่ 24 ปริมาณเหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) ตลอดระยะเวลาการหมัก61

ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (-Org) ($r = 0.494, p < 0.01$).....62

ภาพที่ 26 ปริมาณทองแดงรูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....64

ภาพที่ 27 ปริมาณเหล็กรูปคั่งค้างของแข็ง (Fe-Res) ตลอดระยะเวลาการหมัก65

ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กรูปคั่งค้างของแข็ง (-Res) ($r = 0.932, p < 0.01$).....65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปุ๋ยหมัก

ปัญหาดินเสื่อมโทรมจากการเพาะปลูกซ้ำ ๆ เป็นเวลานานทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินลดลงจึงต้องเติมปุ๋ยเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน และเพิ่มประสิทธิภาพในการเพาะปลูก แต่ปุ๋ยเคมีนั้นมีราคาแพง และหากใช้นานเกินไปดินจะแข็งแน่นทึบและอาจทำให้ดินเป็นกรดได้ (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดอำนาจเจริญ, 2564) สำหรับปุ๋ยอินทรีย์เป็นปุ๋ยที่ทำจากวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นจึงมีราคาต่ำเกษตรกรสามารถผลิตได้เอง ทำให้เกษตรกรเปลี่ยนมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์มากขึ้น นอกจากนี้ปุ๋ยอินทรีย์ยังมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพดิน ทั้งยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน ทำให้น้ำและอากาศถ่ายเทได้ดี ช่วยความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างในดิน ลดความเป็นพิษของโลหะบางชนิดได้ และอินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้จุลินทรีย์ในดินเจริญเติบโตและมีปริมาณเพิ่มขึ้น (กรมวิชาการเกษตร, 2564; บัญชา รัตนีทุ, 2552) นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุยังปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน เป็นต้น (International Fertilizer Association, 2009) แม้กระนั้นก็ตามปัญหาเชิงคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ยังพบได้ทั่วไปทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณธาตุอาหารที่มักเปลี่ยนแปลงไป ในการศึกษาจึงให้ความสนใจโลหะทองแดงและเหล็กที่มีความสำคัญต่อพืช ทั้งในด้านการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณในรูปแบบที่พืชสามารถดูดซึมได้และดูดซึมไม่ได้ โดยศึกษารูปแบบและปริมาณของโลหะ รวมทั้งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบต่าง ๆ และเลือกใช้มูลโคผสมมูลสุกรที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นอันเหมาะต่อการนำมาเพิ่มมูลค่าทางการเกษตร

สำหรับธาตุทองแดงและเหล็กเป็นธาตุที่พืชมีความต้องการน้อยแต่ขาดไม่ได้ โดยธาตุทั้งสองนั้นมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ทองแดงมีบทบาทในการสร้างคลอโรฟิลล์ และช่วยสังเคราะห์ลิคินินที่พบในผนังเซลล์ (Kaiser & Rosen, 2023) ขณะที่เหล็กมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และกระบวนการการหายใจในพืช (Marzorati et al., 2022) โดยรูปแบบที่พบบ่อยอยู่ในรูปแบบที่พืชไม่สามารถดูดซึมได้ ทำให้พืชขาดแคลนธาตุอาหารอันส่งผลต่อผลผลิตธาตุทองแดงจึงที่มีการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์นอกสุดเพียง 1 ตัว มีแนวโน้มจะให้อิเล็กตรอน

ดังกล่าวกับลิแกนด์และเกิดสารประกอบที่คงตัว ขณะที่ธาตุเหล็กที่ปรากฏอยู่ในสารละลายในดินมักอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์และไม่ใช้รูปแบบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (Morrissey & Guerinot, 2009) ทำให้การศึกษารูปแบบโลหะหนัก 2 ชนิด ต่อความยากง่ายในการปลดปล่อยรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจึงมีความสำคัญ อันนำไปสู่การพิจารณาเลือกอายุปุ๋ยหมักไปใช้ และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพในอนาคตต่อไป

สำหรับวิธีการศึกษารูปแบบโลหะตามลำดับความยากง่ายต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมนิยมใช้วิธีที่เรียกว่า “วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น” (Sequential extraction) ซึ่งจะใช้สารละลายที่มีความรุนแรงในการสกัดมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยรูปแบบในการสกัดสามารถแบ่งได้ดังนี้ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically complexed fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (residual fraction) (Mossop & Davidson, 2003) ในการศึกษาได้ให้ความสำคัญต่อโลหะที่สามารถปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยรูปที่แลกเปลี่ยนได้บ่งบอกถึงปริมาณที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้จากปุ๋ยหมัก ณ ช่วงเวลานั้น ๆ ในขณะที่รูปแบบอื่น ๆ ที่ถูกปลดปล่อยได้ยากกว่าจะบ่งบอกถึงศักยภาพที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการย่อยสลาย

ดังนั้นการศึกษารูปแบบที่เป็นประโยชน์และศักยภาพในการปลดปล่อยโลหะทองแดงและเหล็กที่เกิดจากกระบวนการหมักจึงมีความสำคัญในการเลือกอายุปุ๋ยหมัก ตลอดจนระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ ซึ่งการศึกษารูปแบบโลหะโดยการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction) ตามวิธีของ Community Bureau of Reference (BCR) ดัดแปลงมาจากวิธีของ Tessier et al. (1979) และเป็นที่นิยมแพร่หลาย (Dundar et al., 2011; Lu et al., 2014) ร่วมกับบอทธิพลของกระบวนการหมักที่มีต่อศักยภาพการปลดปล่อยทองแดงและเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ณ เวลาการหมักที่แตกต่างกัน อันนำไปสู่การเลือกปุ๋ยหมักและระยะเวลาในการเก็บรักษาให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อการจัดการปุ๋ยหมักในอนาคตได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาปริมาณและรูปแบบของทองแดงและเหล็กในปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่ปลดปล่อยด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ณ ระยะเวลาการหมักในช่วงเวลาต่าง ๆ
- 2) เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยหมักจากการคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักร่วมกับการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุอาหารทั้ง 2 ชนิด ต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยที่แตกต่างกัน มีผลต่อการปลดปล่อยปริมาณและรูปแบบของทองแดง และเหล็กในปุ๋ยหมักที่ต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษาคือปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกร ทำการหมักเป็นระยะเวลา 119 วันและทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 39, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (2548) ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (GI) รวมทั้งศึกษาปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของทองแดงและเหล็กที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ ตลอดการหมักปุ๋ย ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบ หาความสัมพันธ์ทางสถิติ อภิปรายและสรุป

1.5 ขั้นตอนในการศึกษา

- 1) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปุ๋ยหมักและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร วิธีการ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
- 3) เตรียมการทดลอง
- 4) วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษา
- 5) รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ
- 6) สรุปผลการทดลอง
- 7) เขียนรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบปริมาณและรูปแบบของทองแดงและเหล็กในปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่ปลดปล่อยด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น ณ ระยะเวลาการหมักในช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อพืช

2) ทราบช่วงระยะเวลาการหมักปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารที่พอเหมาะต่อพืช



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปุ๋ยหมักคือสิ่งที่มนุษย์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการหมักนั้นมีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น การระบายอากาศ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และจุลินทรีย์ อีกทั้งปุ๋ยหมักยังช่วยเพิ่มธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหารเป็นประโยชน์ต่อพืช ในการศึกษาครั้งนี้จึงให้ความสนใจคุณสมบัติของธาตุทองแดงและเหล็กที่มีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยธาตุทั้งสองจัดเป็นธาตุอาหารโลหะที่มีความยากง่ายของการนำไปใช้ในสิ่งมีชีวิตที่แตกต่างกัน และมีเสถียรภาพของสารประกอบตามคุณสมบัติการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ต่างกัน ทำให้อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการปลดปล่อยรูปแบบต่าง ๆ ของโลหะทั้งสองแตกต่างกันไปด้วย อันจะส่งผลต่อคุณสมบัติของปุ๋ยหมักต่อความเป็นประโยชน์ที่แตกต่างกันไป มีการรวบรวมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

2.1 ปุ๋ยหมักและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก

ปุ๋ยหมักคือปุ๋ยอินทรีย์ หรือปุ๋ยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำซากของสิ่งมีชีวิต เช่น ซากพืช ซากสัตว์ หรือจากการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นมูลสัตว์เลี้ยง เช่น มูลโค มูลไก่ และมูลสุกรที่ปะปนด้วยปัสสาวะของสัตว์ และวัสดุรองพื้นกรง (ถ้ามี) ปุ๋ยหมักที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะช่วยเพิ่มทั้งปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ทองแดง และเหล็ก (Biyada et al., 2021; Fan et al., 2019; Supriatna et al., 2022; สาลี ชินสถิต และหฤทัย แก่นลา, 2548) โดยปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพจะต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยสมบูรณ์จนได้เนื้อปุ๋ยที่มีลักษณะนุ่มยุ่ย มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิภายนอกและมีลักษณะที่ตรวจสอบได้ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) โดยมีลักษณะดังตารางที่ 1

นอกจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแล้วปุ๋ยหมักที่พร้อมนำไปใช้มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและไม่เป็นพิษ สามารถตรวจสอบทางดัชนีชีวภาพเพื่อประเมินการย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก ได้ด้วยการประเมินดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index) เมล็ดที่งอก

ต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548) เพื่อใช้บ่งบอกถึงคุณภาพของปุ๋ยหมักและธาตุอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืชที่มีอยู่ในปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษา

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์

ลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
ปริมาณหิน และกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ	ต้องไม่มี
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-8.5
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20 : 1
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	ไม่เกิน 10 เดซิซีเมน/เมตร
ปริมาณธาตุอาหารหลัก	
- ไนโตรเจน (total N)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก
- ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
- โพแทสเซียม (total K ₂ O)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณธาตุอาหารหลักรวม	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก
การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่าร้อยละ 80
สารหนู (Arsenic)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
โครเมียม (Chromium)	ไม่เกิน 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ทองแดง (Copper)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ตะกั่ว (Lead)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2555)

2.1.1 ประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดิน

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่สามารถช่วยบำรุงดินและปรับปรุงสภาพดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ดินร่วนซุยไม่จับตัวเป็นก้อน ช่วยดูดซับธาตุอาหารและทยอยปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืช อีกทั้งสามารถระบายอากาศและน้ำได้ดี เมื่อใช้ติดต่อกันเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อยู่นาน (ธงชัย มาลา, 2546) ประโยชน์ของปุ๋ยหมักมีดังนี้

1) ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติดินทางกายภาพและเคมี

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ทำมาจากเศษพืชวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้ผสมกับมูลสัตว์ต่างๆ โดยทั่วไปดินจะมีสีน้ำตาลเข้มถือได้ว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง จึงสามารถปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้นลดความหนาแน่นรวมของดินลงทำให้การระบายน้ำ การระบายอากาศและการซึมผ่านของน้ำลงไปในดินดีขึ้น ทำให้ระบบรากของพืชสามารถแผ่กระจายในดินได้อย่างกว้างขวางและแตกแขนงได้มาก จึงดูดซับแร่ธาตุต่าง ๆ และน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้นและสามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างในดิน รวมถึงชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดกิจกรรมในดินอย่างต่อเนื่องซึ่งช่วยในการส่งเสริมความอุดมสมบูรณ์ของดิน (บัญชา รัตน์ทิพย์, 2552)

2) ด้านการเพิ่มธาตุอาหารแก่ดิน

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชโดยจะปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ โดยทั่วไปปุ๋ยหมักจะมีธาตุอาหารพืชที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจนร้อยละ 0.45-2.5 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.2-2.5 และโพแทสเซียมร้อยละ 0.5-1.8 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) นอกจากนี้ปุ๋ยหมักทั้ง 3 ที่สำคัญสำหรับพืชและยังมีแร่ธาตุสำหรับพืชที่ต้องการในปริมาณน้อยแต่มีความจำเป็น คือจุลธาตุอาหาร ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม และคลอรีน ซึ่งธาตุอาหารหลักและจุลธาตุอาหารต่างมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่แตกต่างกัน (White & Brown, 2010) นอกจากนี้จะเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชแล้วปุ๋ยหมักยังช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชในดินแปรสภาพไปอยู่ในรูปแบบที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่าย และช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกชะล้างสูญหายไปได้ง่าย

2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในกองปุ๋ยหมัก เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง โดยต้องมีปัจจัยที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อให้จุลินทรีย์ เจริญเติบโต และสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ รายละเอียดมีดังนี้

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งต่อกระบวนการหมัก เนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์จะมีความสามารถในการเจริญเติบโตที่ความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยความกรด-ด่างเริ่มต้นควรมีค่าประมาณ 7 (แก่งกาจ จันทร์กวีกุล และ ฐนินยา รังษิสุริยะชัย, 2563) และเมื่อกระบวนการหมักเสร็จสมบูรณ์ ปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ได้ ควรมีความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 5.5-8.5 (กรมวิชาการเกษตร, 2555)

2) ความชื้น (moisture)

ระดับความชื้นที่เหมาะสมของกองปุ๋ยหมักต่อกระบวนการย่อยสลายประมาณ ร้อยละ 40-65 โดยน้ำหนัก หากมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 40 การย่อยสลายจะเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ เพราะจุลินทรีย์กระจายไม่ทั่วถึง นอกจากนี้หากความชื้นมากกว่าร้อยละ 65 ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนจะตายเกิดกลิ่นเน่าเหม็นได้ (Hiraoka, 2003; กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; ยงยุทธ โอสภสกา และคณะ, 2551) ดังนั้นความชื้นจึงมีผลโดยตรงต่อการเจริญและกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ และยังมีผลต่อการระบายอากาศอีกด้วย หากความชื้นมากเกินไปการแพร่กระจายของออกซิเจนในกองปุ๋ยหมักจะเกิดได้ยาก จนเกิดสภาพขาดออกซิเจนเป็นผลทำให้เกิดการหมักแบบไร้อากาศจนเกิดกลิ่นเหม็นภายในกองปุ๋ยหมักได้ ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) กำหนดให้มีความชื้นไม่มากกว่าร้อยละ 30

3) การระบายอากาศ (Air-Ventilation)

การระบายอากาศในกองปุ๋ยหมักเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการย่อยสลายเศษวัสดุโดยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนจะมีปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนหลายเท่า ดังนั้นถ้าไม่มีการระบายอากาศในกองปุ๋ยหมักจะทำให้เกิดสภาพขาดออกซิเจน ซึ่งส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นภายในกองปุ๋ยหมัก เกิดมาจากสารอินทรีย์ระเหยจำพวกมีเทนและไฮโดรเจนซัลเฟตโดยกลุ่มที่ไม่ต้องการอากาศ ทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารจากวัสดุเศษพืชในระหว่างการทำปุ๋ยหมัก เช่น ไนโตรเจนจะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายอากาศในกองปุ๋ย

เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอต่อการเจริญและย่อยสลายเศษพืชของจุลินทรีย์ (โสฬส แซ่ลิ่ม, 2559)

4) วัตถุประสงค์ตั้งต้น และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่นำมาใช้ในกระบวนการหมักปุ๋ยนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน หรือ C/N ratio โดยทั่วไปเมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมักปุ๋ยหมักควรมีองค์ประกอบคาร์บอนและไนโตรเจนสัดส่วนที่พอเหมาะโดยมีค่าอยู่ในช่วง 20:1–40:1 (Hiraoka, 2003) ซึ่งหากไนโตรเจนไม่เพียงพอทำให้ปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ จะเกิดการย่อยสลายต่อในดินและดึงไนโตรเจนจากดินมาใช้ทำให้ดินขาดแคลนไนโตรเจน (สังวรรณ เสนะโลหิต, 2557) ทำให้ปริมาณไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุสำหรับเศษวัสดุพืชที่นำมาใช้ทำปุ๋ยหมักสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ย่อยสลายได้ง่ายและกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก กลุ่มที่ย่อยสลายได้ง่าย ได้แก่ เศษวัสดุพืชที่มีค่าสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ เช่น ต้นพืชตระกูลถั่วต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ย 22.45 และกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก ได้แก่ เศษวัสดุพืชที่มีค่า C/N ratio สูง เช่น กากอ้อย ชี้อ้อย และขุยมะพร้าว เป็นต้น โดยมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน 179.68, 209.64 และ 140.22 ตามลำดับ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; ยงยุทธ โอสภสภา และคณะ, 2551; โสฬส แซ่ลิ่ม, 2559) และเมื่อกระบวนการหมักเสร็จสิ้นลงปุ๋ยหมักที่พร้อมจะนำไปใช้ควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนควรมีค่าไม่เกิน 20:1 (กรมวิชาการเกษตร, 2555) และหากมีค่าอยู่ระหว่าง 10:1-15:1 จะเกิดสารฮิวมิคที่เสถียร (Tan, 2003) นอกจากนี้มูลสัตว์ยังสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบได้ดี มีธาตุอาหารที่จำเป็นแก่พืช (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดปัตตานี, 2567) แต่การปรับปรุงดินโดยไม่ผ่านกระบวนการหมักในลักษณะปุ๋ยคอก อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของวัชพืชที่ปะปนมากับมูลสัตว์ รวมถึงเชื้อโรคที่มากับสิ่งขับถ่าย (Wander, 2009) โดยกระบวนการหมักที่ทำให้อุณหภูมิในกองปุ๋ยสูงขึ้นจึงช่วยฆ่าเชื้อโรคและเมล็ดวัชพืชเหล่านี้ได้ (คณวัฒน์ ธีรนิธิวัฒน์, 2567)

5) จุลินทรีย์

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในกองปุ๋ยหมักจนได้ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์นั้นเกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์เป็นหลัก และยังเกิดจากจุลินทรีย์หลายชนิดประกอบกัน มี 3 กลุ่มได้แก่ แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท และเชื้อรา โดยเชื้อราพบในระยะแรกของการหมักปุ๋ยร่วมกับแบคทีเรีย แต่เมื่อกองปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 65 องศาเซลเซียส แอคติโนมัยซีท จะเป็นจุลินทรีย์

กลุ่มที่เด่นและเชื้อราจะลดลง โดยมีแบคทีเรียที่พบได้ตลอดกระบวนการหมัก (Biyada et al., 2021; กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวโรจน์, 2557)

2.2 คุณสมบัติของทองแดงและเหล็กและบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืช

ธาตุทองแดงและธาตุเหล็กจัดเป็นจุลธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ที่พืชไม่อาจขาดธาตุอาหารเหล่านี้ได้ แต่สำหรับทองแดงหากมีปริมาณมากเกินไปก็อาจเป็นพิษต่อพืชได้ในปฏิกิริยาที่เกินกำหนดมาตรฐานของทองแดงไว้ให้มีได้ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ของดิน คุณสมบัติของโลหะทั้งสองและบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืชมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ทองแดง

ทองแดงจัดจำแนกตามตารางธาตุ โดยทองแดงมีเลขอะตอม 29 มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ จึงจัดอยู่ในแถวที่ 11 ของตารางธาตุ เลขออกซิเดชันคือ +1 และ +2 โดย Cu^{2+} เมื่อละลายน้ำมีความเสถียรมากกว่า Cu^+ จากพลังงานในการดึงชั้นน้ำที่ล้อมรอบที่มากกว่า (Rodríguez-Rodríguez et al., 2015) จึงเป็นรูปแบบที่พบในสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าและเป็นรูปแบบที่ละลายอยู่ในน้ำด้วย ทองแดงบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว 1,084.62 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดสูงถึง 2,562 องศาเซลเซียส (National Center for Biotechnology Information, 2025) (ตารางที่ 2) ทองแดงเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างมากมายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติการนำไฟฟ้า นำความร้อน ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง จัดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง

คุณสมบัติทั่วไปของธาตุทองแดง		
<p style="text-align: center;">29</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">Cu</p> <p style="text-align: center;">63.55</p>	จัดกลุ่ม	หมู่ 11 คาบที่ 4
	เลขอะตอม	26
	สถานะที่ 20 องศา	ของแข็ง
	จุดเดือด	2,562 องศาเซลเซียส
	จุดหลอมเหลว	1,083.4 องศาเซลเซียส

ที่มา: National Center for Biotechnology Information, (2025)

1) บทบาทของทองแดงต่อการเจริญเติบโตของพืช

ทองแดงจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ทองแดงจัดเป็นธาตุอาหารรอง ที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างส่วนที่เป็นสีเขียวของพืช ช่วยเพิ่มโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ ป้องกันการถูกทำลายของส่วนที่มีสีเขียว และกระตุ้นเอนไซม์บางชนิดที่มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์ลิแกติน ที่พบในผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยในพืช มีผลต่อการปรุงอาหารของพืชซึ่ง ผลต่อการเจริญเติบโตและการติดดอกออกผล และธาตุทองแดงยังส่งผลต่อความสามารถของพืชในการดูดเอาธาตุเหล็กที่อยู่ในดินนำมาใช้ประโยชน์ โดยหากมีทองแดงมากเกินไป ทำให้พืชดูดซึมธาตุเหล็กได้น้อยลง (Shabbir et al., 2020)

2) อาการเมื่อพืชขาดธาตุทองแดง

อาการขาดธาตุทองแดงจะแสดงออกทั้งทางใบและยอด อาการเริ่มแรก จะสังเกตเห็นว่าใบมีสีเข้มผิดปกติ หรืออาจมองเห็นเป็นรอยขีดน้ำเงิน ขอบใบม้วนขึ้นด้านบน ระยะต่อมาพืชมีลักษณะเหี่ยวเฉาเหมือนมีอาการขาดน้ำ ไม่ตอบสนองต่อการรดน้ำ สีใบจะค่อย ๆ ซีดลงจากปลายใบแต่เส้นกลางใบยังคงมีสีเขียว ต่อมาใบจะเริ่มแห้ง ยอดเกิดใหม่มีลักษณะแห้งจากปลายยอดลงมา และพืชจะตายในที่สุด (ภาพที่ 1) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2567)



ภาพที่ 1 อาการขาดธาตุทองแดงในพืช

ที่มา: สมศักดิ์ มณีพงษ์ (2568)

2.2.2 เหล็ก

เหล็กเป็นธาตุที่พบมากที่สุดในโลกเป็นอันดับที่ 2 พบว่าเหล็กส่วนใหญ่อยู่ภายในของแกนโลก โดยมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 บริเวณเปลือกโลกประมาณร้อยละ 5 มีลักษณะเป็นโลหะสีเงินสีขาวหรือสีเทาเป็นเงา ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Fe เลขอะตอม 26 มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ น้ำหนักมวลอะตอม 55.847 จุดเดือด 3,000 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,536.5 องศาเซลเซียส ทำให้มีสถานะเป็นของแข็งในสิ่งแวดล้อม (National Center for Biotechnology Information, 2025) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก

คุณสมบัติทั่วไปของธาตุเหล็ก		
26 Fe 55.842	จัดกลุ่ม	หมู่ 8 คาบที่ 4
	เลขอะตอม	26
	สถานะที่ 20 องศา	ของแข็ง
	จุดเดือด	3,000 องศาเซลเซียส
	จุดหลอมเหลว	1,536.5 องศาเซลเซียส

ที่มา: National Center for Biotechnology Information (2025)

2) บทบาทของเหล็กต่อการเจริญเติบโตของพืช

เหล็กจัดเป็นจุลธาตุ หรือธาตุอาหารเสริมที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่น้อยกว่าธาตุอาหารอื่น ๆ โดยเหล็กจะช่วยให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และการหายใจในพืชให้เป็นอย่างดีอย่างสมบูรณ์ (Ning et al., 2023)

3) อาการเมื่อพืชขาดธาตุเหล็ก

อาการขาดธาตุเหล็กส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยจะแสดงออกทั้งทางใบ ลำต้น และผล เช่น เส้นใบซีด ใบเหี่ยว ลำต้นแคระ อาการเริ่มแรกจะสังเกตเห็นว่าใบอ่อนจะสูญเสียสีเขียวระหว่างเส้นใบ ส่วนใบแก่ยังคงมีอาการปกติ ระยะต่อมาจะเหลืองซีดทั้งใบ ขนาดใบจะเล็กมากกว่าปกติ ระยะรุนแรงใบจะเหี่ยวเฉา เนื้อใบเน่า ลำต้นหยุดการเจริญเติบโต (ภาพที่ 2) (Ning et al., 2023) ส่วนอาการที่เกิดขึ้นกับผลผลิตคือผลผลิตจะลดลง ขนาดของผลเล็กลง และมีผิวที่ไม่สวย การ

ขาดธาตุเหล็กยังมีผลต่อการเจริญของยอดอ่อน (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2567)



ภาพที่ 2 อาการขาดธาตุเหล็กในพืช

ที่มา: จำเป็น อ่อนทอง (2568)

2.3 รูปแบบของจุลธาตุอาหารโลหะต่อความยากง่ายของการนำไปใช้ในสิ่งมีชีวิต

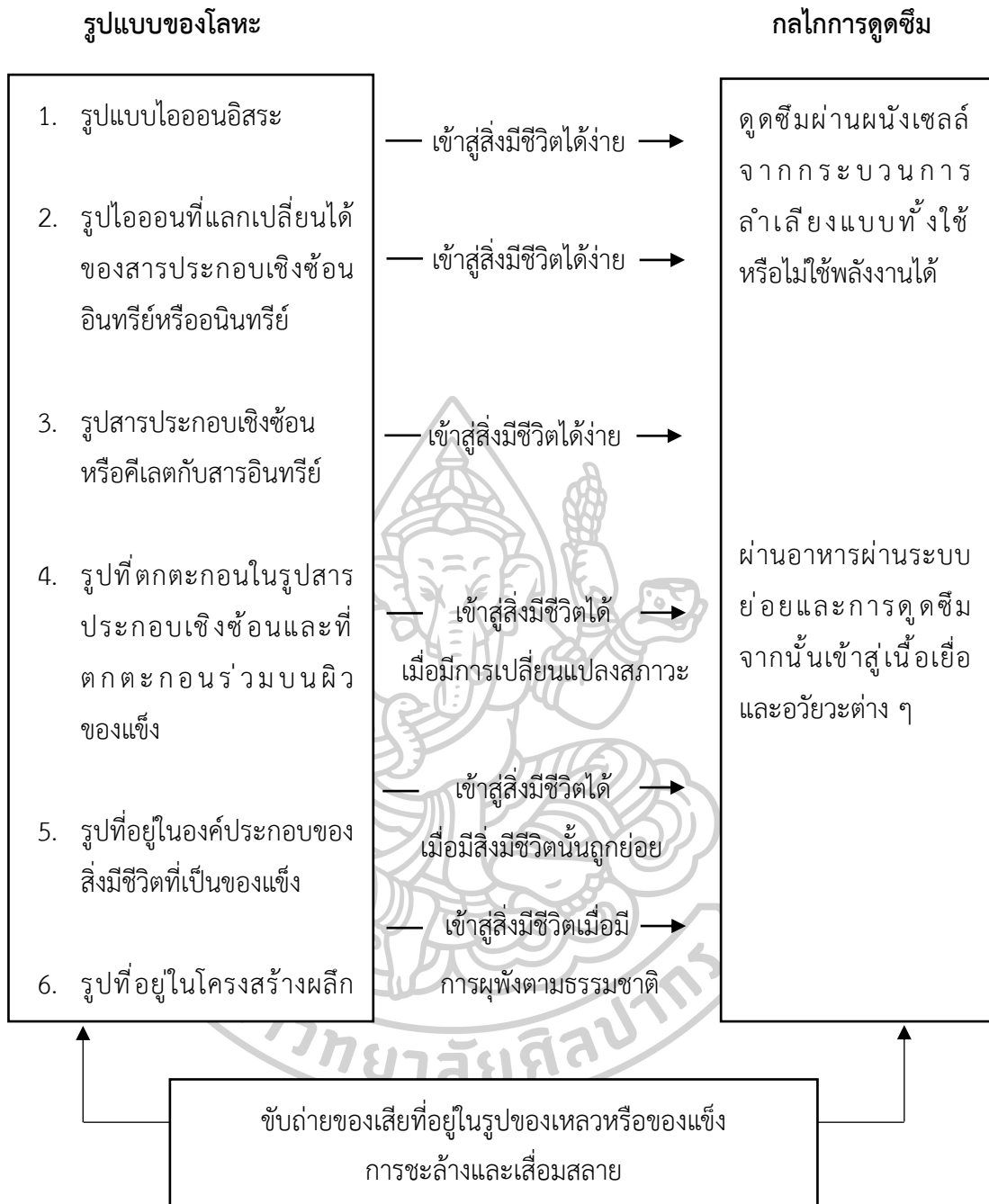
การสะสมของโลหะในสิ่งแวดล้อมมีด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายได้ โดยจะเกิดประโยชน์หรือโทษขึ้นอยู่กับรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกนำเข้าไป สามารถแบ่งรูปแบบการสะสมของโลหะในสิ่งมีชีวิตเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก (ตารางที่ 4) (ภาพที่ 3) ดังนี้

นอกจากนี้ในด้านการรับเข้าไปในสิ่งมีชีวิตก็มีหลายกระบวนการด้วยกัน สำหรับโลหะในรูปไอออนหรือสารประกอบขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ สิ่งมีชีวิตอาจรับเข้าไปโดยการดูดซึมผ่านผนังเซลล์ จากกระบวนการลำเลียงแบบทั้งใช้หรือไม่ใช้พลังงานได้ จากนั้นจึงถูกดูดกลืนเข้าไปในเซลล์ร่างกายต่อไป สำหรับสารประกอบโลหะที่ไม่ละลายน้ำที่มีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมสูง เมื่อโลหะในรูปดังกล่าวได้รับการย่อยสลาย หรือผุพังเป็นองค์ประกอบที่เล็กลงแล้วอาจเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ในรูปอาหารผ่านระบบย่อย และการดูดซึม จากนั้นเข้าไปสู่เนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้การสะสมตามห่วงโซ่อาหารยังมีส่วนทำให้ความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น (Biomagnification) และมีความเป็นพิษมากขึ้น

ตารางที่ 4 รูปแบบจุลธาตุอาหารและรูปแบบที่สกัดแบบลำดับขั้น (BCR)

รูปแบบจุลธาตุอาหาร	รูปแบบที่สกัดแบบลำดับขั้น
1. รูปไอออนอิสระ หรือรูปสารประกอบอนินทรีย์ และอินทรีย์ที่ละลายเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายที่สุด	1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction)
2. รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ของสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เช่น ของสารฮิวมิก และอนุภาคดินเหนียว เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายรองลงมาจากข้อ 1.	
3. รูปสารประกอบเชิงซ้อน หรือคีเลตกับสารอินทรีย์ เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายรองลงมา	2. รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)
4. รูปที่ตกตะกอนในรูปสารประกอบเชิงซ้อน และที่ตกตะกอนรวมบนผิวของของแข็ง จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะทางเคมีเท่านั้น	3. รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)
5. รูปที่อยู่ในองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมในกระดูก หรือซิลิกอน ในเปลือกหอย จะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ต่อไปได้เมื่อสิ่งมีชีวิตนั้นถูกย่อยสลายก่อน	4. รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)
6. รูปที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแร่ธาตุปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ พวกนี้มักอยู่ในรูปแร่ธาตุที่ต้องมีการผุพังตามธรรมชาติเสียก่อนจึงจะเข้ามาสู่สิ่งมีชีวิตได้ จึงจัดว่าเป็นรูปแบบที่ค่อนข้างคงทน ในสิ่งแวดล้อม เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยากที่สุด	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Baudo (1982)

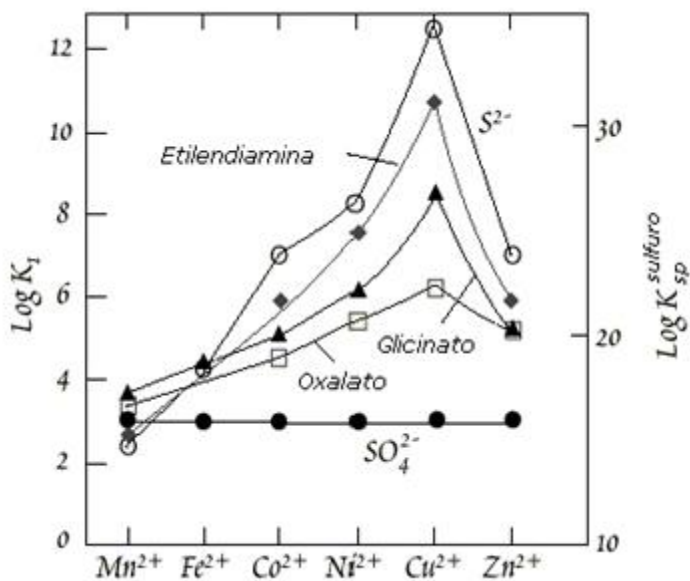
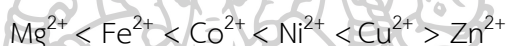


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของโลหะรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิต
ที่มา: ดัดแปลงจาก Baudo (1982)

2.4 เสถียรภาพของสารประกอบตามคุณสมบัติการจัดเรียงอิเล็กตรอนและทฤษฎี

การจัดจำแนกทองแดงและเหล็กสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการจัดเรียงรูปแบบอิเล็กตรอนในทางเคมีการจัดจำแนกโดยใช้การจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d และการจัดจำแนกตามทฤษฎีกรด-เบส แบบฮาร์ดและซอฟต์ (Hard and Soft Acid-Base; HSAB concept) ซึ่งไอออนทองแดงและเหล็กที่พบบ่อยในธรรมชาติจัดอยู่ในกลุ่มโลหะแทรนซิชันที่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน 1-9 ตัว ดังตารางที่ 5

โดยทองแดงและเหล็กซึ่งอยู่ในกลุ่มแทรนซิชันจะชอบเกิดกับลิแกนด์คล้ายทั้งโลหะกลุ่ม A และกลุ่ม B ทำให้ชอบเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ที่เป็นผู้ให้อิเล็กตรอนทั้ง F, O และ S (ตารางที่ 6) โดย Irving Williams series มีลำดับเสถียรภาพในการเกิดสารประกอบโลหะแทรนซิชันจะเพิ่มขึ้นโดยเรียงลำดับดังนี้ (ภาพที่ 4) (Sparks, 2003; นัทธีรา สรรมณี, 2555)



ภาพที่ 4 ค่าคงที่เสถียรภาพของสารประกอบโลหะแทรนซิชัน และค่าคงที่ผลคูณการละลายของสารประกอบในอัตราส่วนของลิแกนด์ต่อโลหะเท่ากับ 1:1

ที่มา: Stumm and Morgan (1995)

ตารางที่ 5 การจำแนกไอออนของโลหะตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนในระดับชั้น d และ Hard and Soft acid and Base (HSAB concept)

ไอออนของโลหะกลุ่ม A (A-Type Metal Cations)	ไอออนของโลหะทรานซิชัน (Transition-Metal Cations)	ไอออนของโลหะกลุ่ม B (B-Type Metal Cations)
<p>ไม่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d (d^0) ได้แก่</p> <p>H^+, Li^+, Na^+, K^+, Be^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Al^{3+}, Sc^{3+}, La^{3+}, Si^{4+}, Ti^{4+}, Zr^{4+}, Th^{4+}</p>	<p>มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d โดยมีอิเล็กตรอนระหว่าง 1-9 ตัว ได้แก่</p> <p>V^{2+}, Cr^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Ti^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Mn^{3+}, Fe^{3+}, Co^{3+}</p>	<p>มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงาน d โดยมีอิเล็กตรอนระหว่าง 10-12 ตัว ได้แก่</p> <p>Cu^+, Ag^+, Au^+, Tl^+, Ga^+, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, Pb^{2+}, Sn^{2+}, Tl^{3+}, Au^{3+}, In^{3+}, Bi^{3+}</p>
กรดแก่ (Hard Acids)	คุณสมบัติระหว่างกรดแก่และกรดอ่อน (Borderline)	กรดอ่อน (Soft Acids)
<p>H^+, Li^+, Na^+, K^+, Be^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Al^{3+}, Sc^{3+}, La^{3+}, Si^{4+}, Ti^{4+}, Zr^{4+}, Th^{4+}, Th^{4+}, Cr^{3+}, Mn^{3+}, Fe^{3+}, Co^{3+}, UO^{2+}, VO^{2+}</p>	<p>V^{2+}, Cr^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Ti^{3+}, V^{3+}, Cr^{3+}, Mn^{3+}, Fe^{3+}, Co^{3+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Bi^{3+}, SO^{2+}, NO^+, $B(CH_3)^3$</p>	<p>Cu^+, Ag^+, Au^+, Tl^+, Ga^+, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+}, Pb^{2+}, Sn^{2+}, Tl^{3+}, Au^{3+}, In^{3+}, Bi^{3+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Bi^{3+}</p>
<p>ความชอบในการเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้:</p>		
$N \gg P$		$P \gg N$
$O \gg S$		$S \gg O$
$F \gg Cl$		$I \gg F$

ที่มา: Stumm and Morgan (1995), นัทธีรา สรรมณี (2555)

ตารางที่ 6 ความชอบของไอออนของโลหะกลุ่มต่าง ๆ กับลิแกนด์ชนิดต่าง ๆ

ไอออนของโลหะกลุ่ม A (A-Type Metal Cations)	ไอออนของโลหะทรานซิชัน (Transition-Metal Cations)	ไอออนของโลหะกลุ่ม B (B-Type Metal Cations)
Ligands: $F > O > N = Cl > Br > I >$ $S OH^- > RO^- > RCO_2^-$ $CO_3^{2-} \gg NO_3^-$ $PO_4^{3-} \gg SO_4^{2-} \gg ClO_4^-$	มีแนวโน้มอยู่ระหว่างกลุ่ม A และ กลุ่ม B	Ligands: $S > I > Br > Cl = N > O >$ F

ที่มา: Stumm and Morgan (1995)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสกัดแบบลำดับชั้นของปุ๋ยหมักนั้นพบได้หลายงานวิจัย โดย การศึกษารูปแบบโลหะทั้งที่เป็นจุลธาตุและธาตุอาหารรอง มีมาแพร่หลายทั้งในไทยและต่างประเทศ เพื่อให้ทราบอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการปลดปล่อยรูปแบบโลหะต่าง ๆ อันนำไปสู่การเลือก อายุปุ๋ยหมักและการพิจารณาการเก็บรักษาปุ๋ยให้ยังคงมีปริมาณธาตุอาหารที่เพียงพอ อันจะเป็น ประโยชน์ในการจัดการปุ๋ยหมักในอนาคตต่อไป

เจตรินทร์ ทำสะอาด (2559) ที่ศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการผลิตปุ๋ยมูลไก่ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับชั้น ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษาเป็นปุ๋ยหมักมูลไก่ ปริมาณร้อยละ 76.63 ผสมส่วนผสมน้ำหมักประกอบด้วย ปลายน้ำจืด กากน้ำตาล สับปะรด สารเร่ง พด.2 และรำละเอียด ปริมาณร้อยละ 8.98, 2.99, 0.30, 0.01 และ 1.50 ตามลำดับ และส่วนผสมของแห้งประกอบด้วย รำละเอียด กระจุกวัวป่น มูลค่างควา ธาตุอาหารรองโดโลไมท์ และซีแตดนาเกลือปริมาณร้อยละ 0.90, 1.50, 0.60, 0.60 0.30 และ 5.39 ตามลำดับ หมักเป็นเวลา 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและเคมีได้แก่ วิเคราะห์ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และการสกัดรูปแบบต่าง ๆ ของเหล็กและสังกะสีระหว่างการผลิตปุ๋ยมูลไก่ จากการศึกษาพบปริมาณเหล็กในปุ๋ยหมักในปริมาณที่ มากกว่าสังกะสีมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.18-10.62 มิลลิกรัม/กรัม และสังกะสีมีปริมาณรวมเฉลี่ยอยู่ใน ช่วง 0.64-1.69 มิลลิกรัม/กรัม โดยมีปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่าง ๆ ตลอด ระยะเวลาการหมัก ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 5

ตารางที่ 7 ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กและสังกะสีรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

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

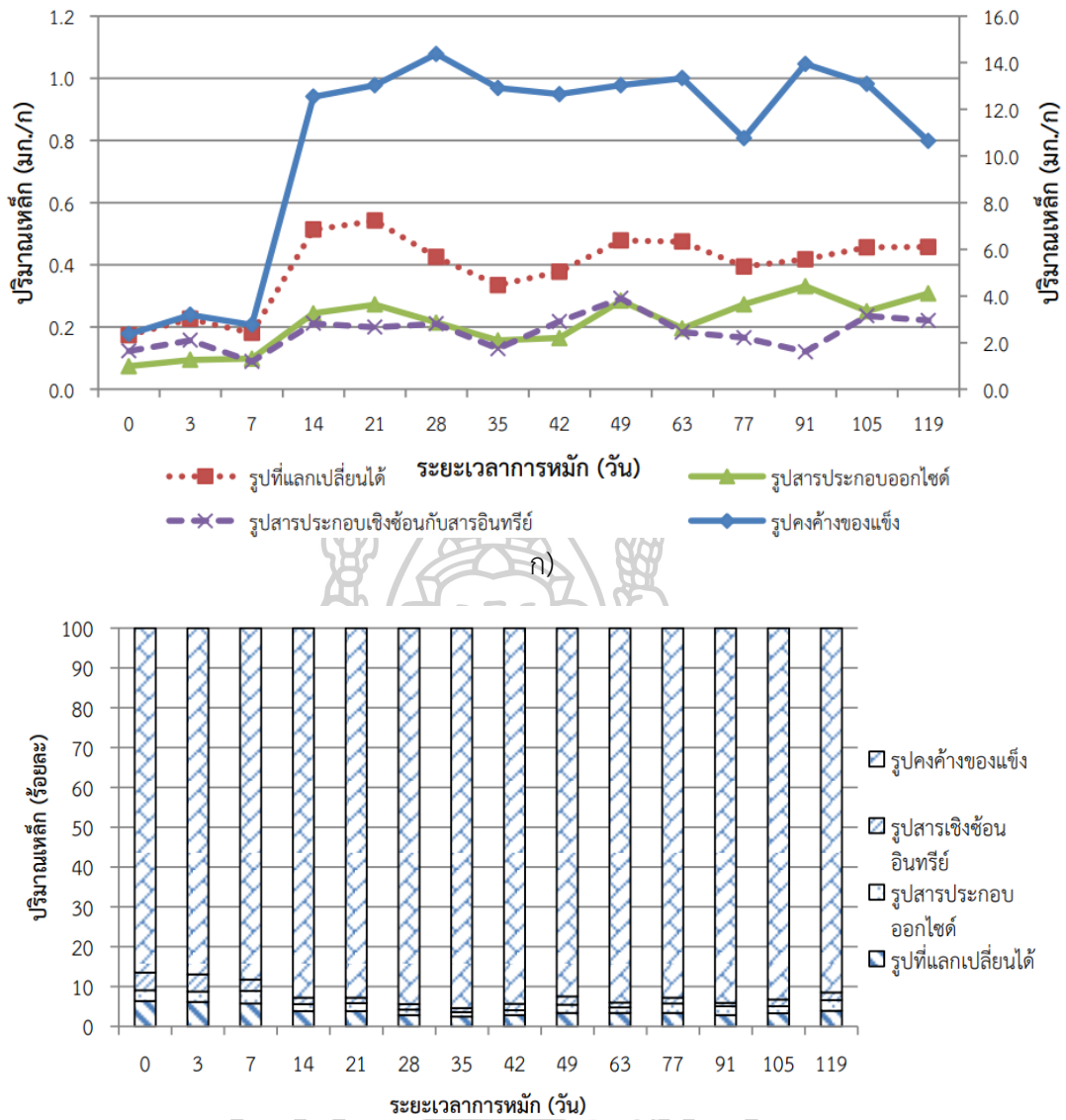
ที่มา: เจตรินทร์ ทำสะอาด (2559)

ปริมาณเหล็กที่พบทั้ง 4 รูปแบบมีความแตกต่างกันเรียงลำดับเฉลี่ยจากมากไปน้อยได้ดังนี้

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

10.6 >>> 0.39 > 0.21 > 0.18 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 5





ภาพที่ 5 ปริมาณเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก

ก) ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กรูปแบบต่าง ๆ และปริมาณเหล็กทั้งหมด

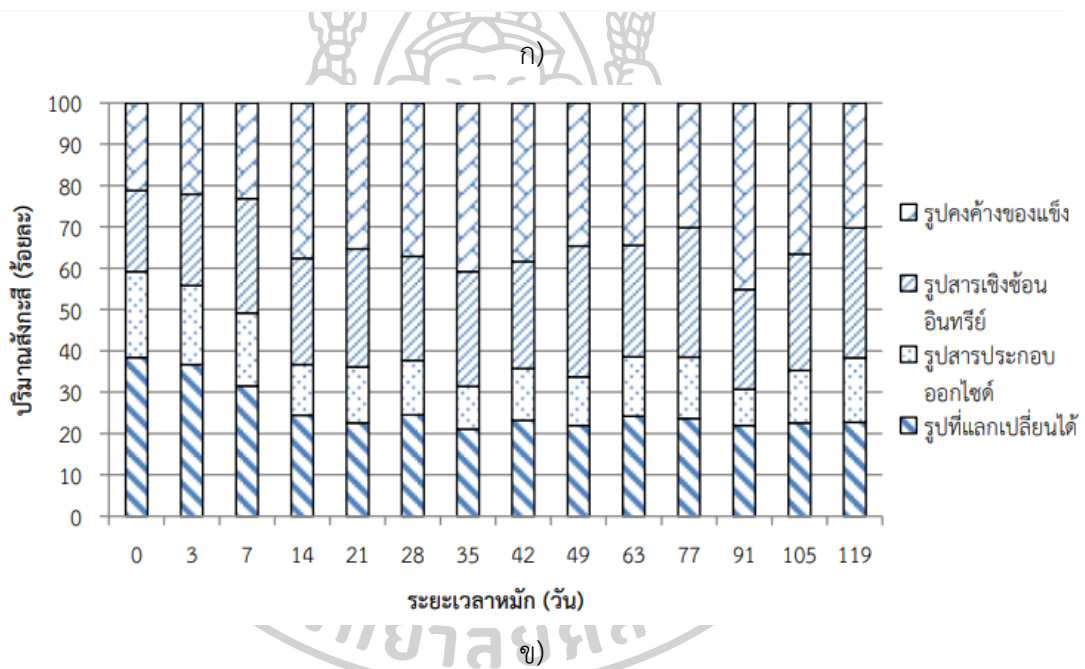
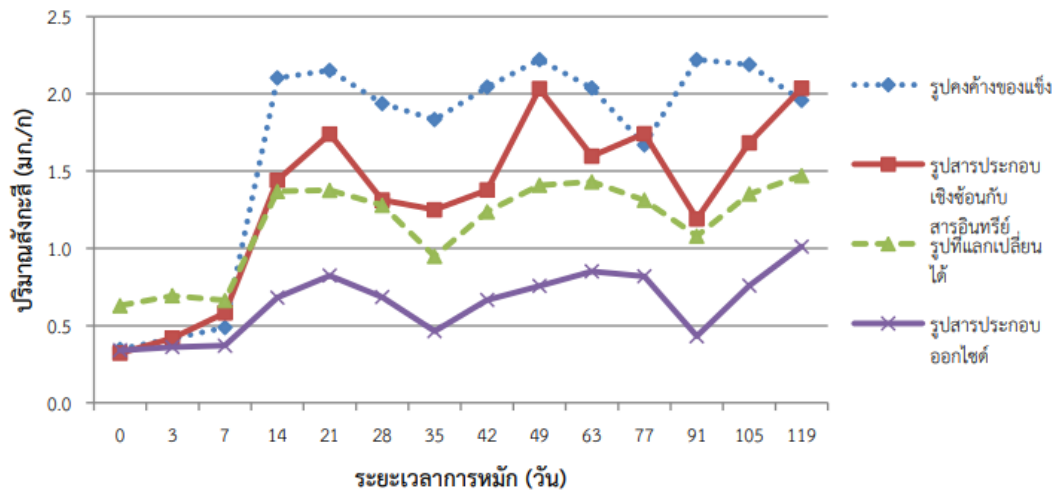
ข) สัดส่วนของเหล็กรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: เจตรินทร์ ทำสะอาด (2559)

ปริมาณสังกะสีที่พบทั้ง 4 รูปแบบมีความแตกต่างกันเรียงลำดับเฉลี่ยจากมากไปน้อยได้ดังนี้

$$\text{Zn-Res} > \text{Zn-Org} > \text{Zn-Ex} > \text{Zn-Ox}$$

$$1.69 > 1.34 > 1.16 > 0.64 \quad \text{มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 6}$$



ภาพที่ 6 ปริมาณสิ่งกะสี้รูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

ก) ปริมาณความเข้มข้นของสิ่งกะสี้รูปแบบต่าง ๆ และปริมาณสิ่งกะสี้ทั้งหมด

ข) สัดส่วนของสิ่งกะสี้รูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: เจตรินทร์ ทำสะอาด (2559)

พบว่าระยะเวลาการหมักมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปริมาณเหล็กและสิ่งกะสี้ โดยรูปแบบที่ปรากฏของเหล็กส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ หรือไฮดรอกไซด์ที่คงตัว มีลักษณะเป็นของแข็งมากกว่ารูปสารประกอบออกไซด์ จึงทำให้พบเหล็กในรูปแบบนี้น้อย มีสัดส่วนของเหล็กเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 2.03 ของปริมาณเหล็กทั้งหมด และมีปริมาณเฉลี่ยคิดเป็น 0.21

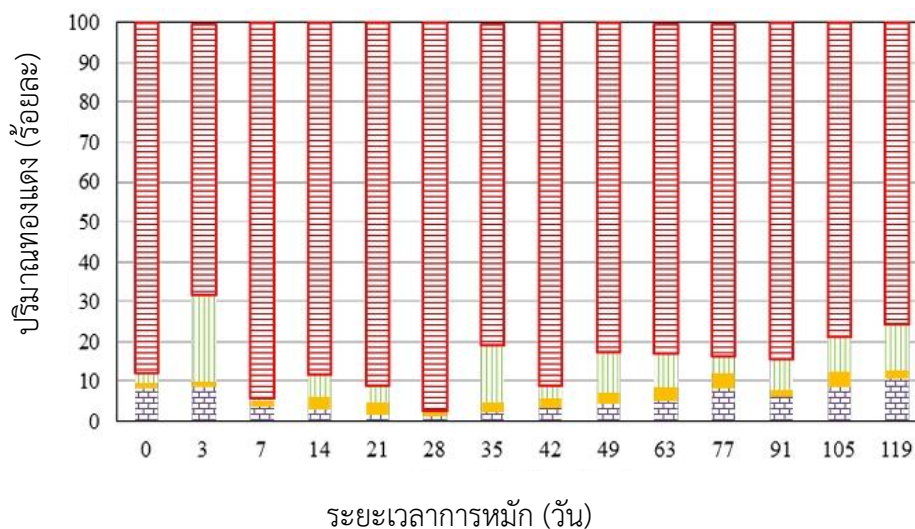
มิลลิกรัม/กรัม ขณะที่มีส่วนส่วนของสังกะสีเฉลี่ยในรูปแบบนี้คิดเป็นร้อยละ 14.1 ซึ่งมากกว่าเหล็ก โดยมีปริมาณเฉลี่ยของสังกะสีคิดเป็น 0.64 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งแม้โลหะทั้งสองชนิดจะอยู่ในกลุ่ม Borderline ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างกลุ่มที่เป็นกรดแก่และกรดอ่อนเหมือนกัน แต่แนวโน้มในการถูกไล่ที่และปลดปล่อยออกมามีความแตกต่างกัน โดยจากลำดับของ Irving Williams series พบว่า ความเสถียรภาพของสารประกอบเชิงซ้อนสูงกว่า เหล็กจึงพบในรูปสารประกอบต่าง ๆ ในสัดส่วนที่มากกว่า

Sanmanee and Nubdee (2020) ศึกษารูปแบบทองแดงระหว่างการผลิตหมักปุ๋ยมูลโคเทคนิค การสกัดแบบลำดับขั้น โดยมีส่วนผสมมูลโค กระจุกวัว รำละเอียด มูลค่างควา ชี้แดดนาเกลือ โดโลไมต์ และน้ำหมักปลา ปริมาณร้อยละ 76.6, 1.5, 0.9, 0.6, 5.7, 0.3 และ 14.4 และหมักเป็นเวลา 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและเคมี ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และรูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงระหว่างการผลิตหมักปุ๋ยมูลโค จากการศึกษาพบว่าปริมาณทองแดงทั้ง 4 รูปแบบมีความแตกต่างกันเรียงลำดับเฉลี่ยจากมากไปน้อยได้ดังนี้

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

66.9 >> 5.7 > 4.4 > 2.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 7

โดยปุ๋ยหมักมูลโคสามารถนำไปใช้ได้ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป และกระบวนการหมักส่งผลต่อการปลดปล่อยทองแดงเพิ่มเมื่อเทียบกับตอนเริ่มผสม 4.4-4.5 เท่า โดยทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมัก ทองแดงจะอยู่ในรูปคงค้างของแข็งมากที่สุด ร้อยละ 68.6-97.1 จากเสถียรภาพการคงตัวของสารประกอบที่มีมากที่สุดเนื่องจากขาดอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว (Breslyn, 2014) จึงปลดปล่อยทองแดงในรูปแบบอื่น ๆ ออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณทองแดงทั้งหมดจะเริ่มลดลงเมื่อเก็บไว้นานเกิน 105 วัน ดังนั้นการพิจารณานำปุ๋ยหมักไปใช้จึงต้องคำนึงถึงกระบวนการหมักที่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ที่ส่งผลต่อการลดปริมาณอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารเมื่อวัตถุดิบตั้งต้นหมดไป



ภาพที่ 7 สัดส่วนปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก

ที่มา: Sanmanee and Nubdee (2020)

Wu et al. (2017) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยมูลสุกร โดยผสมมูลสุกร ฟางข้าว และฟางข้าวโพด จำนวน 5 สูตร ให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เป็น 15, 20, 25, 20 และ 12.6 ตามลำดับ (ตารางที่ 8) หมักเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 13, 16, 21, 26, 31, 38, 45 และ 59 วัน นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและเคมี ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ปริมาณไนเตรต ปริมาณฟอสฟอรัส และปริมาณโพแทสเซียม เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการปรับปรุงรูปแบบของทองแดงและเหล็กพร้อมกับปัจจัยทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก ได้แก่ รูปที่แลกลเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปค่างของแข็ง ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้นแบบ BCR

พบว่ามูลสุกรที่ใช้ศึกษามีปริมาณทองแดงทั้งหมดสูงมาก ทำให้ทุกสูตรมีปริมาณทองแดงทั้งหมดสูงเกินมาตรฐานประเทศสเปนที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 1,100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Wu et al, 2017) ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ในการเพิ่มผลผลิตพืช ซึ่งแม้การเติมฟางข้าวและฟางข้าวโพดจะทำให้ปริมาณทองแดงทั้งหมดตอนเริ่มผสมลดลง แต่เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักกลับทำให้ปริมาณทองแดงรวมสูงเกินกว่ามาตรฐานอีกครั้งหนึ่ง ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 8

ตารางที่ 8 ส่วนผสมและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก 5 สูตร

ปุ๋ยหมัก	มูลสุกร (กิโลกรัม)	ฟางข้าว (กิโลกรัม)	ฟางข้าวโพด (กิโลกรัม)	อัตราส่วน คาร์บอนต่อ ไนโตรเจน
สูตรที่ 1	943	29.2	-	15
สูตรที่ 2	943	101.7	-	20
สูตรที่ 3	943	195.6	-	25
สูตรที่ 4	943	-	99.6	20
สูตรที่ 5	943	-	-	12.6

ที่มา: Wu et al. (2017)

ตารางที่ 9 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักทั้ง 5 สูตร

ปุ๋ย หมัก	วันที่	ทองแดง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			รูปคงค้าง ของแข็ง (Cu-Res)
		รูปที่แลกเปลี่ยน ได้ (Cu-Ex)	รูปสารประกอบ ออกไซด์ (Cu-Ox)	รูปสารเชิงซ้อน อินทรีย์ (Cu-Org)	
สูตรที่ 1	0	157.9±2.1	n.d.	n.d.	933.2±8.6
	21	103.3±5.2	n.d.	n.d.	1594.4±3.2
	38	116.1±1.5	n.d.	n.d.	1940.4±9.1
	59	143.2±1.0	n.d.	n.d.	2231.9±30.1
ร้อยละ		ลดลง 9.31	n.d.	n.d.	เพิ่มขึ้น 58.19

หมายเหตุ n.d. = not detect; ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

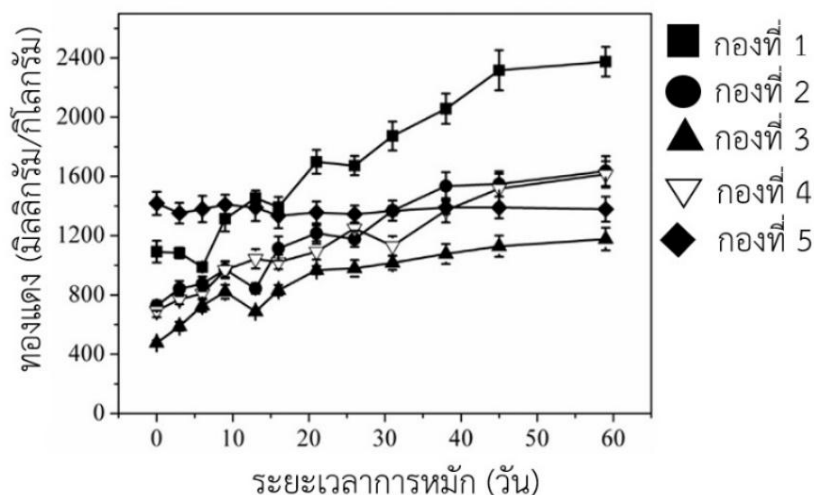
ที่มา: Wu et al. (2017)

ตารางที่ 9 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักทั้ง 5 สูตร (ต่อ)

ปุ๋ยหมัก	วันที่	ทองแดง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			
		รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex)	รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox)	รูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org)	รูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res)
สูตรที่ 2	0	104.4±12.9	n.d.	n.d.	623.8±13.1
	21	139.0±0.5	n.d.	n.d.	1076.2±24.9
	38	93.9±0.0	n.d.	n.d.	1440.0±15.3
	59	95.8±0.0	n.d.	n.d.	1539.1±3.2
	ร้อยละ	ลดลง 8.24	n.d.	n.d.	เพิ่มขึ้น 59.47
สูตรที่ 3	0	80.7±3.6	n.d.	n.d.	395.6±12.3
	21	64.6±11.1	n.d.	n.d.	903.0±2.6
	38	57.3±3.3	n.d.	n.d.	1019.0±23.5
	59	55.4±24.1	n.d.	n.d.	970.7±21.9
	ร้อยละ	ลดลง 31.35	n.d.	n.d.	เพิ่มขึ้น 59.25
สูตรที่ 4	0	137.8±6.5	n.d.	n.d.	555.7±27.1
	21	134.3±12.4	n.d.	n.d.	957.0±1.5
	38	121.7±7.4	n.d.	n.d.	1248.8±3.2
	59	118.9±15.5	n.d.	n.d.	1494.0±9.3
	ร้อยละ	ลดลง 13.72	n.d.	n.d.	เพิ่มขึ้น 62.80
สูตรที่ 5	0	141.6±18.2	n.d.	n.d.	1275.8±2.9
	21	130.3±5.4	n.d.	n.d.	1225.7±4.5
	38	179.3±0.0	n.d.	n.d.	1209.7±6.2
	59	182.4±0.0	n.d.	n.d.	1195.8±3.5
	ร้อยละ	เพิ่มขึ้น 22.37	n.d.	n.d.	ลดลง 6.27

หมายเหตุ n.d. = not detect; ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ที่มา: Wu et al. (2017)



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบทองแดงในระหว่างการหมักปุ๋ย

ที่มา: Wu et al. (2017)

ดังนั้นสำหรับทองแดงที่มีเสถียรภาพสารประกอบสูงจากการเกิดพันธะที่แข็งแรงทำให้ทองแดงอยู่ในรูปค่างของแข็งมากที่สุด และอิทธิพลของกระบวนการหมักไม่ได้ทำให้ทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้น แต่กลับทำให้รูปค่างของแข็งเพิ่มขึ้น ยกเว้นกองที่ 5 ที่พบปริมาณทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณทองแดงรูปค่างของแข็งลดลง ซึ่งแม้รูปแบบนี้จะมีอิทธิพลต่อพืชในเบื้องต้นน้อยแต่ในที่สุดก็จะทยอยปลดปล่อยออกมาแก่พืชและปริมาณทองแดงทั้งหมดเพิ่มขึ้น ทำให้การประเมินเชิงคุณภาพในเบื้องต้นไม่ผ่านมาตรฐานของประเทศสเปน

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์

สารเคมีและรีเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 10 โดยระบุถึงบริษัทผู้ผลิต และ Chemical Abstracts Service number (CAS No.) ของสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 10 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS No. และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS No.	บริษัทผู้ผลิต
Hydrogen chloride	7647-01-0	Merck
Acetic acid	64-19-7	Merck
Nitric acid	7697-37-2	Merck
Hydrogen peroxide 30%	7722-84-1	Merck
Ammonium acetate	631-61-8	Ajax finechem
Hydroxylammonium chloride	5470-11-1	Ajax finechem
Copper (II) sulfate pentahydrate	7758-99-8	Merck
Iron (III) nitrate solution	10421-48-4	Merck

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

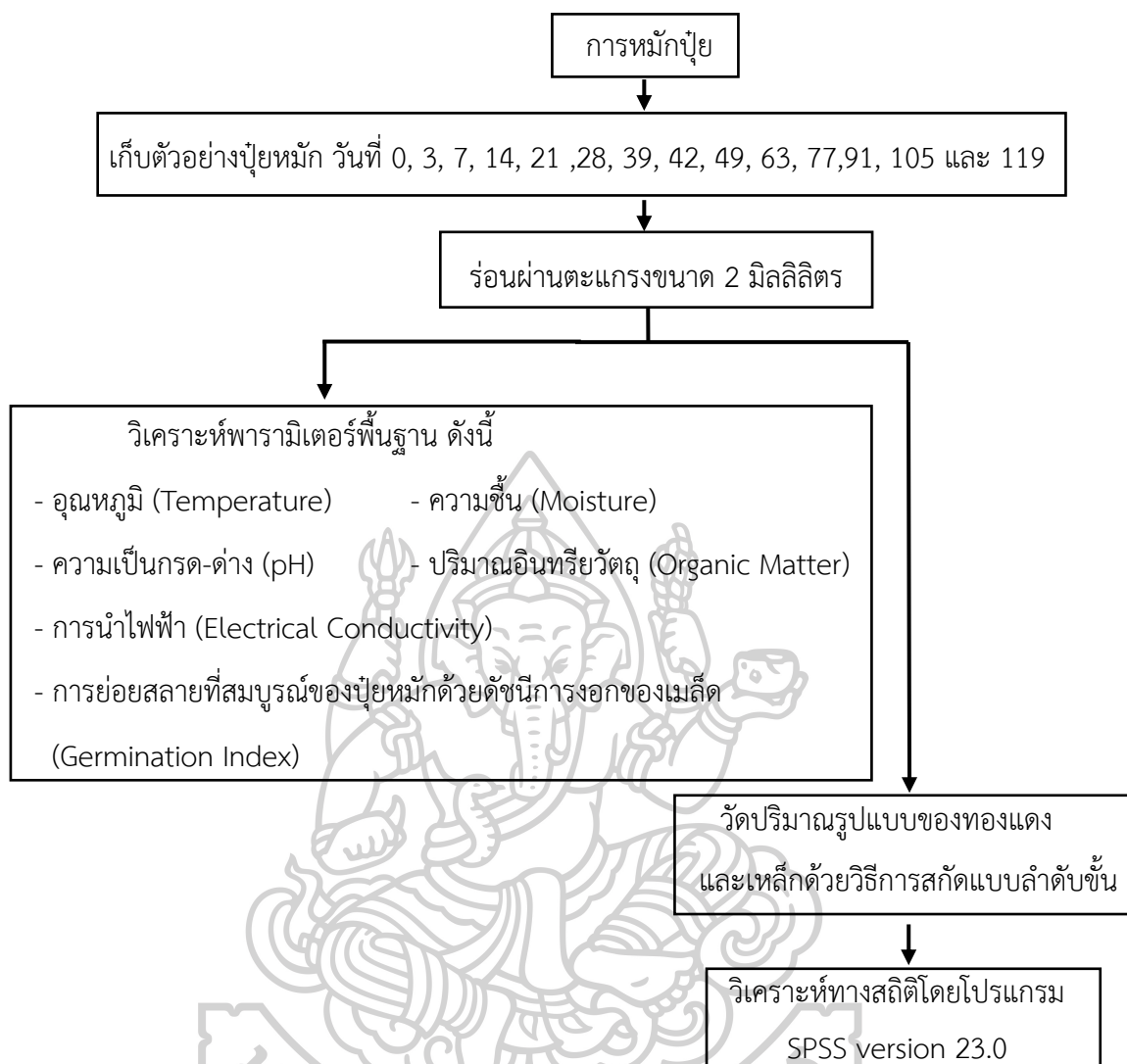
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปุ๋ยหมัก ดังตารางที่ 11 โดยมีการระบุบริษัทผู้ผลิตของเครื่องมือแต่ละชนิด ดังนี้

ตารางที่ 11 รายการเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และบริษัทผู้ผลิต

รายการ	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	Mettler Toledo
Atomic absorption spectrophotometer	Perkin Elmer
Desiccator	Bang Trading 1992 Co., Ltd
High speed centrifuge	Thai Victory Co., Ltd
Hot air oven	MM Medcenter Einrichtungen GmbH
Refrigerated incubator shaker	Gallenkamp
Water bath	BLUPARD HWS
pH meter	Fisher Scientific
Dry Oven	Medcenter
Chamber Furnace	Carbolite Gero
Conductivity meter	Hanna Instruments

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยแบ่งกระบวนการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) การหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก 2) การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานเทียบกับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548 3) การหารูปแบบพร้อมทั้งปริมาณของทองแดงและเหล็ก และ 4) การวิเคราะห์ทางสถิติ โดยแสดงแผนผังการทดลองโดยรวมดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แผนผังการทดลองโดยรวม

3.4 การหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

การหมักปุ๋ยทำได้โดยการนำอินทรีย์วัตถุ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ หรือส่วนผสมอื่น ๆ นำมาผสมคลุกเคล้าเข้าด้วยกัน และทำการหมักโดยใช้ระยะเวลา เพื่อให้อินทรีย์วัตถุเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมี จนสามารถนำปุ๋ยหมักเหล่านั้นมาใช้ในการเพิ่มธาตุอาหารแก่ดินได้

3.4.1 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

ส่วนผสมของการหมักปุ๋ยในการศึกษาครั้งนี้ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นของแห้งและส่วนที่เป็นน้ำหมัก โดยส่วนผสมที่เป็นของแห้ง เช่น มูลโค มูลสุกร มูลค่างควา และ รำละเอียด ในส่วนของส่วนผสมที่เป็นน้ำหมัก เช่น น้ำหมักปลา และกากน้ำตาล ซึ่งอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 12 โดยขั้นตอนการหมักปุ๋ยเริ่มจากคลุกเคล้าส่วนผสมที่เป็นของแห้ง ได้แก่ มูลโค มูลสุกร มูลค่างควา และ รำละเอียดให้เข้ากัน จากนั้นเติมส่วนผสมที่เป็นน้ำหมัก ได้แก่ น้ำหมักปลา และกากน้ำตาลลงไปคลุกเคล้าให้เข้ากัน เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ตักแบ่งใส่ถุงที่มีอากาศผ่านเข้าออกได้จำนวน 10 ถุง ถุงละ 25 กิโลกรัม แล้วมัดด้วยเชือกฟาง จากนั้นนำมาหมักต่อในสถานที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก

ตารางที่ 12 อัตราส่วนผสมของการทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม	ชนิดของส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้ (ร้อยละ)
ของแห้ง	มูลโค	37.50
	มูลสุกร	53.89
	มูลค่างควา	0.94
	รำละเอียด	3.15
น้ำหมัก	ปลาหมึก	1.14
	กากน้ำตาล	3.43

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยเพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยหมักที่ทำการหมักตลอดระยะเวลา 119 วัน โดยเก็บตัวอย่างทุกวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 39, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ซึ่งก่อนการเก็บตัวอย่างต้องมีการพลิกกลับถุงปุ๋ยเพื่อให้ปุ๋ยผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างปุ๋ยที่ตรงกลางของปุ๋ย ถุงละ 200 กรัม จำนวน 10 ถุง โดยมีน้ำหนักรวมกันประมาณ 2 กิโลกรัม และทำการบดปุ๋ย จากนั้นนำไปร่อนแห้ง (Dry sieving) โดยร่อนผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ทันที เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) พารามิเตอร์ที่สามารถเก็บไว้ได้ เช่น ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) กรดฮิวมิก (HA) และ ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

ซึ่งหากยังไม่วิเคราะห์ทันทีให้นำตัวอย่างไปเก็บในถุงพลาสติก และเก็บตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน

การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน ซึ่งแบ่งพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ดังนี้ คือ ความชื้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และดัชนีการงอกของเมล็ดพืช โดยข้อมูลพื้นฐานของปุ๋ยหมักนี้ได้มาจากการวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรพณี และคณะ

3.5.1 ความชื้น (Moisture)

การวิเคราะห์ความชื้นสามารถทำได้ด้วยการนำถ้ำยทำความชื้นไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้ำยชั่งน้ำหนัก และทำการชั่งน้ำหนักปุ๋ย ปริมาณ 2 กรัม ลงในถ้ำยที่ผ่านการอบ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักหลังการอบ หลังจากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักที่คงที่ คำนวณหาปริมาณความชื้นจากน้ำหนักส่วนที่หายของปุ๋ยหมัก

3.5.2 อุณหภูมิ (Temperature)

การวิเคราะห์อุณหภูมิของปุ๋ยสามารถทำได้โดยการนำเทอร์โมมิเตอร์วัดตรงกลางของกระสอบปุ๋ย เพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่างปุ๋ยทั้งหมดในกระสอบ

3.5.3 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยหมัก สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักปุ๋ย 2 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 15 นาที วัดค่าความเป็นกรด-ด่างในส่วนของสารแขวนลอยด้วย pH meter จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในส่วนของเหลวเหนือตะกอน

3.5.4 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

การวัดค่าการนำไฟฟ้าทำได้โดยการชั่งน้ำหนักปุ๋ย 4-6 กรัม ลงในปิเกตอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน อัตราส่วน 1:5 (น้ำหนัก:ปริมาตร) และกวนด้วย magnetic stirrer เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทิ้งตัวอย่างให้ตกตะกอน 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้า ในส่วนของเหลวเหนือตะกอน

3.5.5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Soil organic matter)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุทำตามวิธีของ Ben-Dor and Banin (1989) โดยการนำตัวอย่างที่แห้งจากการหาค่าความชื้นข้อ 3.5.1 มาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักปุ๋ย หลังการเผา หลังจากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักที่คงที่ คำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุ จากน้ำหนักส่วนที่หายของปุ๋ยหมัก

3.5.6 ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients)

การวิเคราะห์ปริมาณอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Kjeldahl Method ของ AOAC Official Method 955.04 จากนั้น คำนวณหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังสมการที่ 3.1

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} = \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด}} \dots\dots\dots (3.1)$$

หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดด้วยวิธีมาตรฐานของ Method of Soil Analysis Part 3 และหาปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดด้วยวิธี USEPA 3050B (United States Environmental Protection Agency, 1996) แล้ววิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrometer

3.5.7 การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination Index)

การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักทดสอบด้วยดัชนีการงอก (Germination Index; GI) ของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) ดัดแปลงมาจากวิธีของ (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548) ทดสอบการงอกโดยผสมปุ๋ยด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:10 เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสารละลายใส่ส่วนบน นำสารละลายใส่ในจานเพาะเชื้อจานละ 3 มิลลิลิตร วางเมล็ดถั่วเขียวจำนวน 10 เมล็ด บนกระดาษกรองเบอร์ 42 ปิดฝา และเก็บไว้ในที่มีดที่อุณหภูมิ 28–30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยชุดควบคุมใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออน และให้แต่ละชุดทดสอบมีจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นวัดการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) และความยาวรากของต้นพืช เพื่อนำค่ามาคำนวณดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ดัชนีการงอกของเมล็ด} = \frac{\text{เมล็ดที่งอก (ร้อยละ)} \times \text{ความยาวของรากของชุดทดสอบ}}{\text{เมล็ดที่งอก (ร้อยละ)} \times \text{ความยาวของรากของชุดควบคุม}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

3.6 การวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและเหล็กด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น

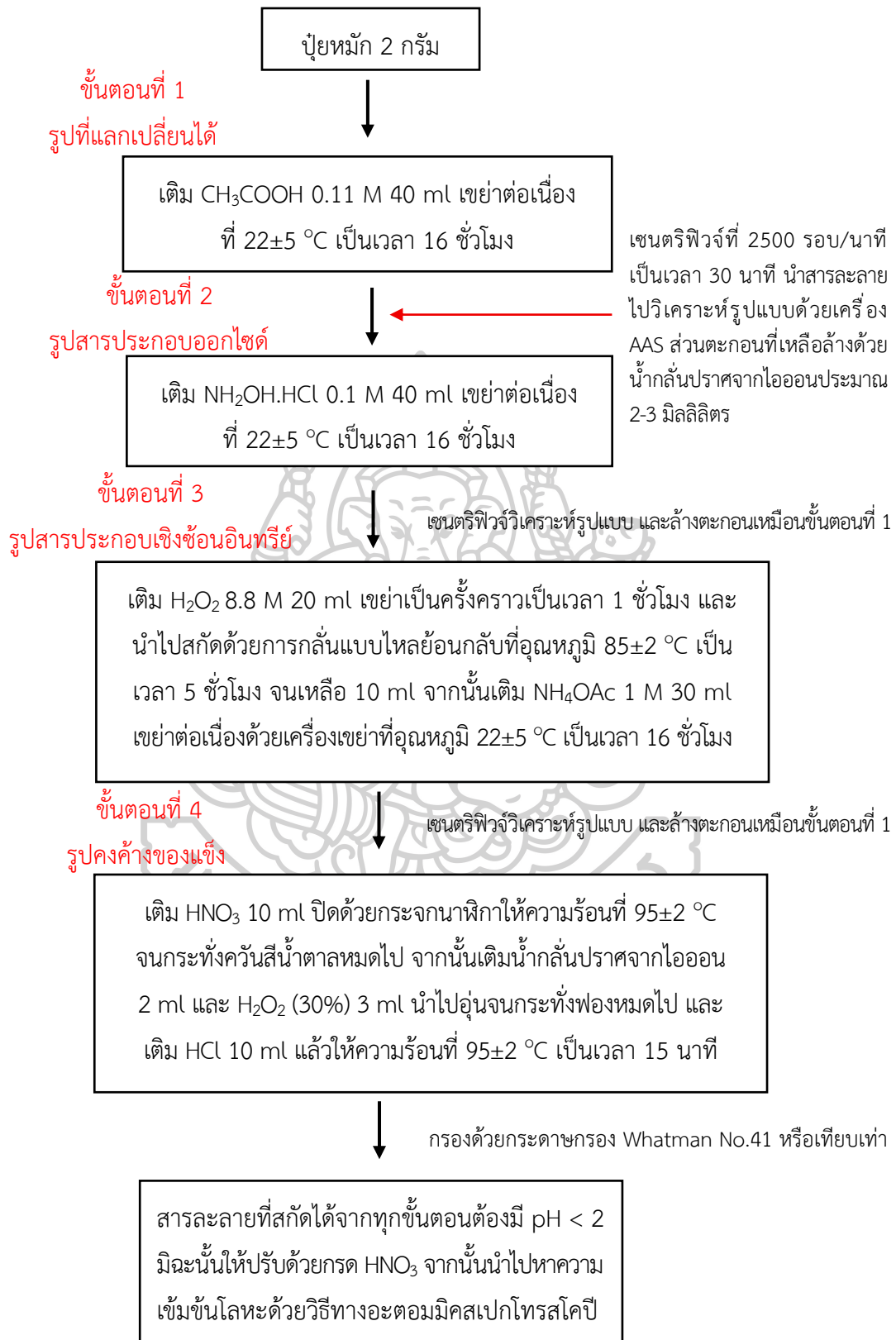
การวิเคราะห์รูปแบบของทองแดงและเหล็กด้วยเทคนิคสกัดแบบลำดับขั้น มีหลักการในการวิเคราะห์ ด้วยการใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงน้อยจากนั้นค่อย ๆ เพิ่มระดับความรุนแรงของตัวสกัดให้มากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (BCR) (Lestari et al, 2018) ถูกพัฒนามาจากแนวคิดของ Tessier et al. (1979) โดยจำแนกรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ดังนี้ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง ซึ่งวิธีการสกัดโลหะในรูปแบบต่าง ๆ จะมีวิธีการสกัดที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 10

3.6.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

นำปุ๋ย 2 กรัม ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติก (CH_3COOH) 0.11 โมล 40 มิลลิลิตร ทำเช่นนี้จำนวน 3 ซ้ำ เขย่าต่อเนื่องด้วย เครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง (High speed centrifuge) 2,500 รอบ/นาที นาน 20 นาที จากนั้นนำสารละลายด้านบนตะกอนไปวิเคราะห์รูปที่แลกเปลี่ยนได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ประมาณ 2-3 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์รูปสารประกอบออกไซด์ต่อไป

3.6.2 รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

รูปสารประกอบออกไซด์วิเคราะห์จากการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 1 (รูปที่แลกเปลี่ยนได้) ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมไฮดรอกไซด์อะมิโนไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_2\text{OH.HCl}$) 0.1 โมล 40 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง และวิเคราะห์รูปสารประกอบออกไซด์เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนประมาณ 2-3 มิลลิลิตร เพื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ต่อไป



ภาพที่ 10 แผนภาพการสกัดลำดับขั้น (Sequential Extraction Techniques)

3.6.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์วิเคราะห์โดยการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 2 (รูปสารประกอบออกไซด์) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 8.8 โมล 20 มิลลิลิตร เขย่าด้วยมือเป็นครั้งคราว 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปสกัดด้วยการกลั่นแบบไหลย้อนกลับ ที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จนเหลือปริมาณ 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติม แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4Oac) 1 โมล 30 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 22 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง และวิเคราะห์รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนประมาณ 2-3 มิลลิลิตร เพื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์รูปคงค้างของแข็งต่อไป

3.6.4 รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)

รูปคงค้างของแข็งวิเคราะห์โดยการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 3 (รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์) มาสกัดด้วยวิธีการสกัดโดยกรดเข้มข้นตามวิธีของ USEPA (United Environmental Protection Agency) วิธีการ 3050B (U.S. Environmental Protection Agency, 1996) โดยมีวิธีการสกัด ดังนี้

1) นำตะกอนจากขั้นตอนที่ 3 ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกจำนวน 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วปิดกระจกนาฬิกาให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-15 นาที โดยไม่ให้เดือด

2) ทิ้งให้เย็น จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนอีก 30 นาที ถ้ามีควันสีน้ำตาลเกิดขึ้นหมายถึงการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างของตัวอย่างกับกรดไนตริก แล้วทิ้งให้เย็น ทำขั้นตอนนี้จนกระทั่งควันสีน้ำตาลหมดไป

3) ปิดกระจกนาฬิกาและให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ให้เดือดเพื่อให้ไอสารละลายระเหยไปอย่างช้า ๆ จนกระทั่งสารละลายเหลือ 5 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งให้เย็น

4) เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน (DI) 2 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 30 3 มิลลิลิตร ปิดฝากระจกนาฬิกาแล้วนำไปอุ่นให้ร้อนเล็กน้อย (พออุ่น ๆ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเปอร์ออกไซด์ออกซิเดชัน (Peroxide oxidation) อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งฟองหมดไป แล้วทิ้งให้เย็น

5) เติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 ทีละ 1 มิลลิลิตร พร้อมให้ความร้อนเล็กน้อย (พออุ่น ๆ) ทำเช่นนี้จนกระทั่งฟองหมดไป ทั้งนี้ต้องเติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ รวมแล้วไม่เกิน 10 มิลลิลิตร

6) ปิดกระจกนาฬิกาและให้ความร้อนต่อจนกระทั่งปริมาตรลดลงเหลือ 5 มิลลิลิตร หรือให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไม่ให้เดือด โดยพยายามปิดฝาภาชนะที่ใส่สารละลายไว้เพื่อให้เกิดการระเหยอย่างช้าที่สุด

7) เติมกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร แล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกาให้ความร้อนที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

8) นำสารละลายไปวิเคราะห์รูปค่างของแข็งเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1

3.7 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงและเหล็ก

สารละลายมาตรฐานทองแดง (Copper (II) sulfate pentahydrate) และเหล็ก (Iron (III) nitrate solution) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เตรียมสารละลาย Stock solution ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1% (v/v) จากนั้นนำไปเจือจางแบบ ลำดับชั้นให้ได้ความเข้มข้น 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร และ 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งหากยังไม่วิเคราะห์พื้นที่ให้นำไปเก็บในอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส โดยทุกขั้นตอนใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออนตลอดการทดลอง

3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Statistics เวอร์ชัน 23.0 เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีของปริมาณทองแดงและเหล็กในปุ๋ยมูลโคและสุกร และระยะเวลาการหมัก โดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation) และการวิเคราะห์การถดถอย (Simple Regression) การทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ระหว่างระยะเวลาการหมักใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบทีละคู่ด้วยวิธีของดันแคน (Duncan)

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบและปริมาณทองแดงและเหล็กด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่เกิดจากการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกร ซึ่งเป็นปุ๋ยที่ได้มาจากงานวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี ทำการหมักเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 119 วัน เก็บตัวอย่างในช่วงอายุการหมัก 0, 3, 7, 14, 21, 28, 39, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน เปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบของทองแดงและเหล็กเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยและการเก็บรักษาที่ปุ๋ยยังคงมีคุณค่าทางอาหารที่เพียงพอ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการจัดการปุ๋ยหมักในอนาคตต่อไป

4.1 การแบ่งระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และศึกษาลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากกิจกรรมของจุลินทรีย์มีบทบาทต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของปุ๋ยหมักส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก ได้แก่ อุณหภูมิ อุณหภูมิบรรยากาศ ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด ปริมาณธาตุอาหารหลัก และดัชนีการงอกของเมล็ด โดยในการศึกษานี้แบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic Phase) และระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (Mature phase) มีรายละเอียดดังนี้

1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสมเป็นวันแรกของการหมักปุ๋ย (วันที่ 0) อุณหภูมิในระยะเริ่มผสมนี้ มีค่าเท่ากับ 33.3 องศาเซลเซียสซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล และมีกลิ่นของส่วนผสมและกลิ่นของแอมโมเนียอย่างรุนแรง ปุ๋ยมีความชื้นค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 54.23 ซึ่งเหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ได้กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 (ฐนินยา และกุลยา, 2017) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.52 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ใช้

ย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 3.38 เดซิซีเมน/เมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 65.62 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 15.24 ดังตารางที่ 13

2. ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงพบในช่วงวันที่ 1-13 มาจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูง เช่น เทอร์มัส อควาติกัส บาซิลลัส สเตียโรเทอร์โมฟิลัส และแอคติโนไมซีสต์ เป็นต้น (คณวัฒน์ ธีรนิจิวัฒน์, 2567) ทำหน้าที่ย่อยสลายองค์ประกอบสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก จากนั้นจึงปลดปล่อยความร้อนออกมา (Duan et al., 2019; Zhou, 2016) ทำให้อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักจะมีค่าที่สูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 3 มีค่าเท่ากับ 59.7 องศาเซลเซียส ซึ่งเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อโรคที่ปะปนมากับมูลสัตว์ที่ต้องไม่น้อยกว่า 55 องศาเซลเซียส (Wang et al., 2022) จากนั้นอุณหภูมิจะลดต่ำลง ลักษณะของปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้มและยังมองเห็นวัตถุติดตั้งต้นบ้าง มีกลิ่นของแอมโมเนียที่ค่อนข้างฉุนเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ ปุ๋ยมีความชื้นร้อยละ 36.02-44.08 มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 8.56-8.84 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วปลดปล่อยออกมาในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Singh & Kalamdhad 2016; Wang et al., 2016) และมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มผสมอยู่ในช่วง 3.39-4.02 เดซิซีเมน/เมตร ดังตารางที่ 13

3. ระยะพัฒนาเต็มที่ (Mature phase)

ระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป เป็นระยะที่ปุ๋ยมีกระบวนการหมักเสร็จสมบูรณ์ จุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงจะมามีการทำงานลดลง ปุ๋ยมีอุณหภูมิลดต่ำลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกมีค่าอยู่ในช่วง 20.6-32.6 องศาเซลเซียส สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.646, P < 0.01$) มีปริมาณความชื้นลดลงจากระยะเริ่มผสมอยู่ในช่วงร้อยละ 11.56-25.42 และสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักเช่นกัน ($r = -0.730, P < 0.01$) ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ทางการเกษตรที่กำหนดปริมาณความชื้นเพื่อการจำหน่ายไม่เกินร้อยละ 30 มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.82-8.25 ปุ๋ยมีลักษณะแห้งเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กอ่อนนุ่ม ยุ่ย และมีสีน้ำตาลเข้มปนดำไม่มีกลิ่นของแอมโมเนีย ระยะนี้มีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิต่ำปานกลางเพิ่มขึ้นแทนอินทรีย์วัตถุที่เกิดขึ้นใหม่มีความเสถียรมากขึ้น สำหรับค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตลอดกระบวนการหมักโดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.62-6.04 เดซิซีเมน/เมตร และสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก $r = 0.884, P < 0.01$) โดยปุ๋ยหมักทั้ง 119 วัน มีค่าไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 10 เดซิซีเมน/เมตร ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรกับประกาศของกรมวิชาการ
เกษตร (2555) เรื่องการขอขึ้นทะเบียน การออกใบสำคัญการขึ้นทะเบียน การขอแก้ไข
รายการทะเบียนและการแก้ไขรายการทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์

ระยะเวลาในการ หมักปุ๋ย (วัน)		คุณลักษณะ					
		อุณหภูมิ ปุ๋ยหมัก	อุณหภูมิ บรรยากาศ	ความชื้น	ค่าความ เป็น กรด-ด่าง	ค่าการ นำ ไฟฟ้า	อินทรีย์วัตถุ
		ไม่มี เกณฑ์ กำหนด	ไม่มีเกณฑ์ กำหนด	เกณฑ์ กำหนด ≤ ร้อยละ 30	เกณฑ์ กำหนด 5.5-8.5	เกณฑ์ กำหนด ≤ 10 dS/m	เกณฑ์ กำหนด ≥ ร้อยละ 30
ระยะเริ่ม ผล	0	33.3	33	54.23	7.52	3.38	65.62
ระยะ อุณหภูมิสูง	3	59.7	34	44.08	8.84	3.39	63.83
	7	39.3	34	36.02	8.56	4.02	62.92
ระยะปุ๋ย พัฒนา เต็มที่	14	30.7	35	19.75	8.25	4.62	63.27
	21	32.7	34	21.78	8.19	5.24	63.17
	28	29.7	28	25.42	8.10	4.68	60.68
	35	31.3	34	24.30	8.02	5.16	60.37
	42	29.3	29	21.59	6.95	5.06	58.45
	49	29.7	32	20.42	6.82	5.34	59.71
	63	29.0	29	15.29	7.35	5.45	57.32
	77	26.2	27	16.54	7.70	6.07	59.88
	91	25.5	26	14.71	8.16	5.98	61.66
	105	20.7	18	11.56	7.75	6.04	61.02
119	26.8	27	19.02	7.89	6.02	58.59	

หมายเหตุ

ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรกับประกาศของกรมวิชาการ เกษตร (2555) เรื่องการขอขึ้นทะเบียน การออกไปสำคัญการขึ้นทะเบียน การขอแก้ไข รายการทะเบียนและการแก้ไขรายการทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ (ต่อ)

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)		คุณลักษณะ				
		C/N ratio	ไนโตรเจนทั้งหมด	ฟอสฟอรัสทั้งหมด	โพแทสเซียมทั้งหมด	ปริมาณธาตุอาหารหลัก
		เกณฑ์กำหนด ≤ 20:1	เกณฑ์กำหนด ≥ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	เกณฑ์กำหนด ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	เกณฑ์กำหนด ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	เกณฑ์กำหนด ≥ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก
ระยะเริ่มผสม	0	15.24	2.49	1.61	1.47	5.57
ระยะ อุณหภูมิสูง	3	16.43	2.27	1.29	1.65	5.21
	7	14.04	2.55	1.40	1.54	5.49
ระยะปุ๋ย พัฒนาเต็มที่	14	14.04	2.58	1.32	1.60	5.49
	21	13.84	2.62	1.41	1.80	5.83
	28	13.39	2.68	1.67	1.72	6.06
	35	12.45	2.63	1.89	1.89	6.41
	42	13.09	2.73	2.02	1.97	6.71
	49	12.90	2.79	2.27	2.19	7.25
	63	13.16	2.68	1.57	2.21	6.46
	77	13.24	2.73	2.13	2.09	6.95
	91	13.46	2.69	1.10	1.93	5.73
	105	12.83	2.69	1.79	1.79	6.27
119	12.29	2.74	1.35	1.87	5.96	

หมายเหตุ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

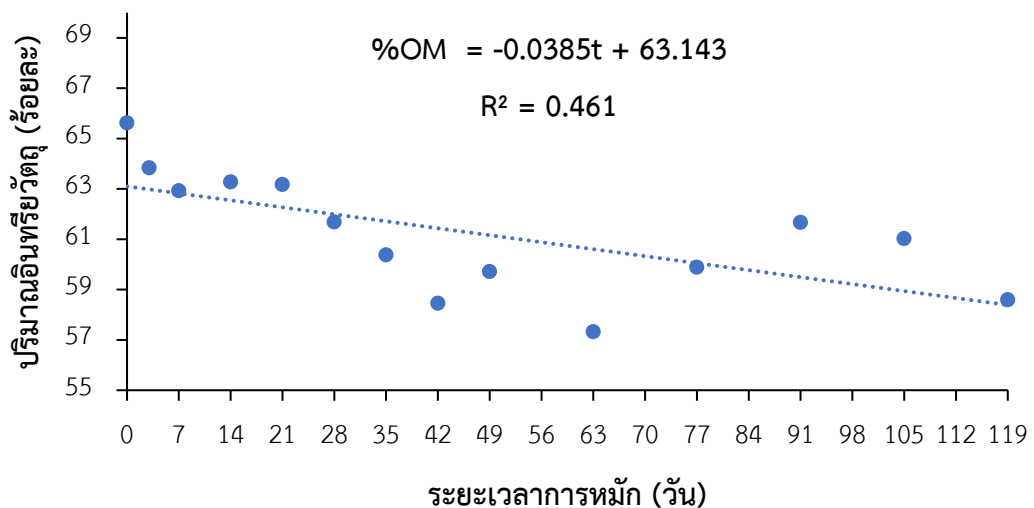
ข้อมูลพื้นฐานของปุ๋ยหมักได้มาจากการวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทธีรา สรรมณี และคณะ

4.1.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นดัชนีเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักที่บ่งบอกถึงกระบวนการสลายที่สำคัญ โดยในระหว่างกระบวนการหมักจุลินทรีย์จะเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุบางส่วนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ธาตุอาหารและความร้อน และสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายนี้มีความเสถียรมากขึ้น เรียกว่า สารฮิวมิก (humic substances) มีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินด้านต่าง ๆ (Mokgehle et al., 2021) กระบวนการย่อยสลายนี้ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีแนวโน้มลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.589, p < 0.01$) (ภาพที่ 11) ดังสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและระยะเวลาการหมัก ในสมการที่ 4.1 โดยในระยะเริ่มผสมปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าร้อยละ 65.62 และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่และพร้อมใช้งานมีปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงเหลือเพียงร้อยละ 58.45–63.27 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดคุณภาพอินทรีย์วัตถุไว้ไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้มีเพียงพอต่อการปรับปรุงคุณภาพดิน

$$\%OM = -0.0385t + 63.143 \quad R^2 = 0.461 \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

โดย OM คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
T คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



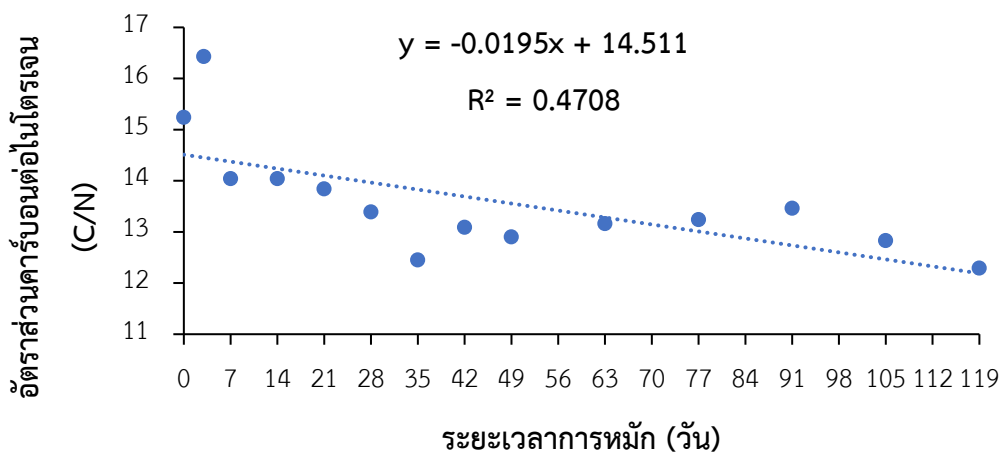
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก
($r = -0.589, p < 0.01$)

4.1.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนซึ่งเป็นดัชนีวัดความสมบูรณ์การย่อยสลายของปุ๋ยหมักที่จะลดลงเมื่อวัตถุดิบตั้งต้นถูกย่อยสลายในสภาวะที่มีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Brewer & Sullivan, 2003; ยงยุทธ โอสดสภ และคณะ, 2551) ในระยะเริ่มผสมปุ๋ยหมักจะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 15.24 จากนั้นกระบวนการย่อยสลายจะลดปริมาณอินทรีย์วัตถุลงทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดต่ำลงและสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = -0.674, p < 0.01$) ดังสมการ 4.2 (ภาพที่ 12) โดยในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะอยู่ในช่วง 12.29-14.04 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้ให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยกว่า 20 และเป็นช่วงที่เกิดสารฮิวมิกที่มีโครงสร้างเสถียรมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินได้ดี ที่มีค่าในช่วง 10:1-15:1 (Tan, 2003) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ การสูญเสียปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และการนำไปใช้ของจุลชีพ (Şevik et al., 2018) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและระยะเวลาดังนี้

$$C/N = -0.0195t + 14.511 \quad R^2 = 0.4708 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

โดย C/N คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
 t คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



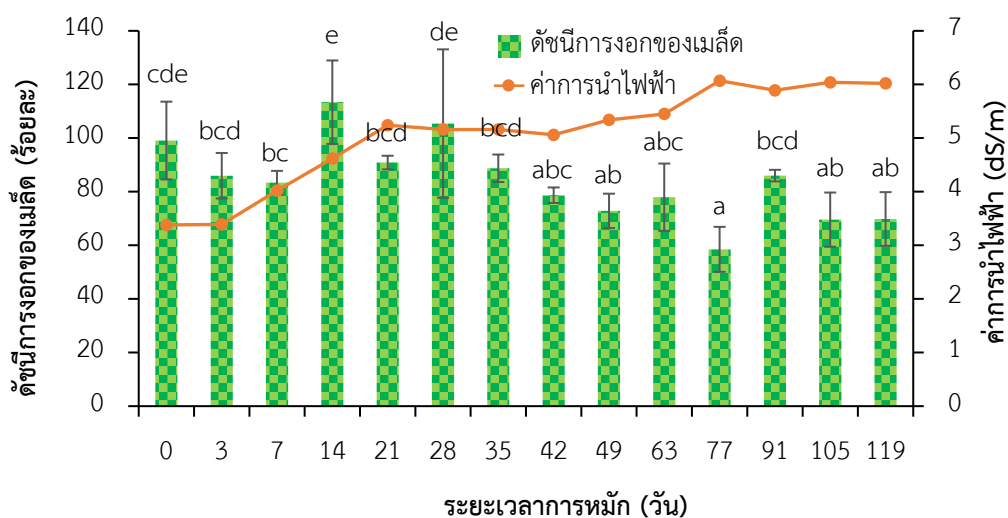
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = -0.674, p < 0.01$)

4.1.3 ปริมาณธาตุอาหารหลัก

ปริมาณธาตุอาหารหลักเป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมาก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จากการหมักปุ๋ยพบว่าปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 2.27–2.79 โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 1.10–2.27 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 1.47–2.21 โดยน้ำหนัก ซึ่งตลอดระยะเวลาการหมักปริมาณธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์มาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้ในปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มากกว่าร้อยละ 1.0, 0.5 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าปริมาณธาตุอาหารโดยรวมตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.21–7.25 (ตารางที่ 13) ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานธาตุอาหารหลักรวมที่กำหนดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 ถึง 2.6-3.6 เท่า แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารหลักที่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก

4.1.4 การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด

การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่กำหนดให้มีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548; กรมวิชาการเกษตร, 2555) เมื่อทดสอบโดยใช้เมล็ดถั่วเขียว พบว่าวันที่ปุ๋ยเข้าสู่ช่วงพัฒนาเต็มที่มีดัชนีการงอกผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้แก่วันที่ 14-35 และวันที่ 91 โดยตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป กระบวนการย่อยสลายปลดปล่อยไอออนที่มีประจุมากขึ้น ทำให้ปุ๋ยเค็มและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลต่อความเป็นพิษของพืชและทำให้ดัชนีการงอกมีแนวโน้มลดลง ($r = -0.482$, $p < 0.01$) (ภาพที่ 13) จากความเข้มข้นของธาตุอาหารที่มากเกินไป โดยจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 42 วัน เป็นต้นไป เมื่อมีค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินกว่า 5 เดซิซีเมนต์/เมตร ซึ่งแม้ค่าการนำไฟฟ้านี้จะต่ำกว่ามาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดค่าการนำไฟฟ้าไว้ไม่เกิน 10 เดซิซีเมนต์/เมตร แต่ก็ไม่เกิดความเป็นพิษต่อพืชสอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของ California Compost Quality Council (CCQC, 2002) และ The British Standard Institution (BSI) (2005) ที่กำหนดค่าการนำไฟฟ้าที่จะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชไว้ไม่เกิน 4 เดซิซีเมนต์/เมตร

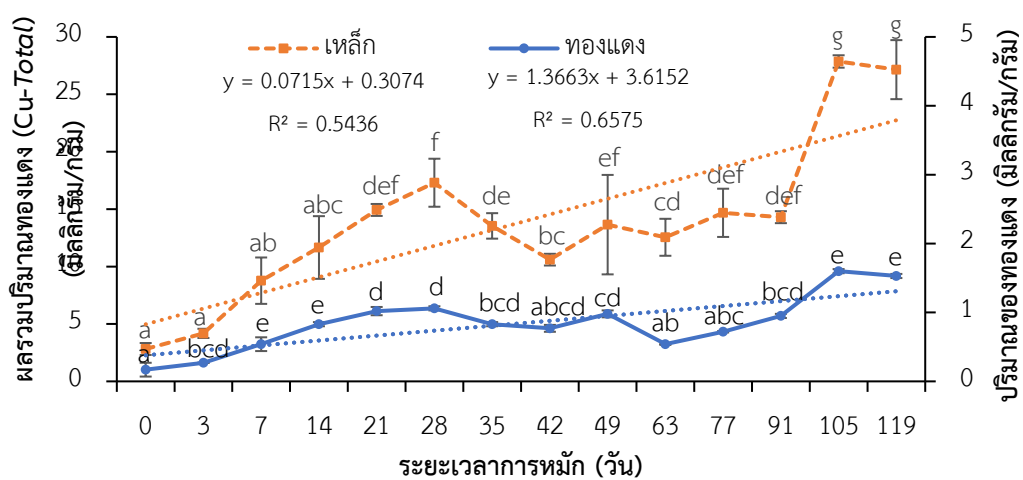


ภาพที่ 13 การย่อยสลายที่สมบูรณ์ด้วยปุ๋ยหมักของดัชนีการงอก (Germination Index; GI) ของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) หมายถึง อักษร a, b, c, d และ e หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.2 รูปแบบของทองแดงและเหล็กตลอดกระบวนการหมัก

การศึกษาค่าผลรวมเชิงปริมาณของทองแดงที่พบทั้งหมด (Cu-Total) อยู่ในช่วง 0.17–1.60 และเหล็ก (Fe-Total) อยู่ในช่วง 2.82–27.86 มิลลิกรัม/กรัม (ภาพที่ 14) โดยทองแดงมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในดินเพื่อการเกษตร (2564) จากประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติที่กำหนดไว้ไม่เกิน 35.04 มิลลิกรัม/กรัม ขณะที่ไม่ได้ระบุค่ามาตรฐานของเหล็กในดิน อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของทองแดงยังมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้ 0.5 มิลลิกรัม/กรัม ดังนั้นแม้ปุ๋ยนี้เมื่อประเมินความเหมาะสมเชิงปริมาณของธาตุอาหารทั้งสองแล้ว จะสามารถนำไปใช้ได้แต่ไม่สามารถขอขึ้นทะเบียนเพื่อจัดจำหน่ายได้จากปริมาณทองแดงที่มากเกินไป โดยธาตุอาหารทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกระบวนการหมักย่อยสลายอินทรีย์วัตถุปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาจนมีค่าสูงในวันที่ 28 ซึ่งเป็นวันแรกที่ปุ๋ยเข้าสู่ช่วงพัฒนาเต็มที่ มีปริมาณทองแดงและเหล็ก 1.06 และ 17.30 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากนั้นกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์กลุ่มอนุกรมวิธานกลางยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการนำธาตุอาหารไปใช้ ทำให้ปริมาณโลหะทั้งสองลดลงไปเล็กน้อย โดยในช่วงวันที่ 35-91 ทองแดงมีค่าอยู่ในช่วง 0.54-0.95 มิลลิกรัม/กรัม และเหล็กมีค่าอยู่ในช่วง 10.61-14.68

มิลลิกรัม/กรัม อย่างไรก็ตามในช่วงท้าย ๆ กระบวนการปลดปล่อยธาตุอาหารเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดวันที่ 105-119 อยู่ในช่วง 1.53-1.60 มิลลิกรัม/กรัม คิดเป็น 9.0-9.4 เท่า ของวันเริ่มผสม และเหล็กมีค่า 27.15-27.86 มิลลิกรัม/กรัม คิดเป็น 9.6-9.9 เท่า ของวันเริ่มผสม ส่งผลให้โดยรวมกระบวนการย่อยสลายมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยปริมาณธาตุอาหารทองแดงและเหล็กทั้งหมดเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นดังกล่าว ($r = 0.737$ และ $r = 0.803$ ตามลำดับ, $p < 0.01$)



ภาพที่ 14 ผลรวมปริมาณทองแดง (Cu-Total) และเหล็กทั้งหมด (Fe-Total) ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = 0.737$ และ $r = 0.803$ ตามลำดับ)

หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, e, f และ g หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.3 ปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ตลอดกระบวนการหมัก

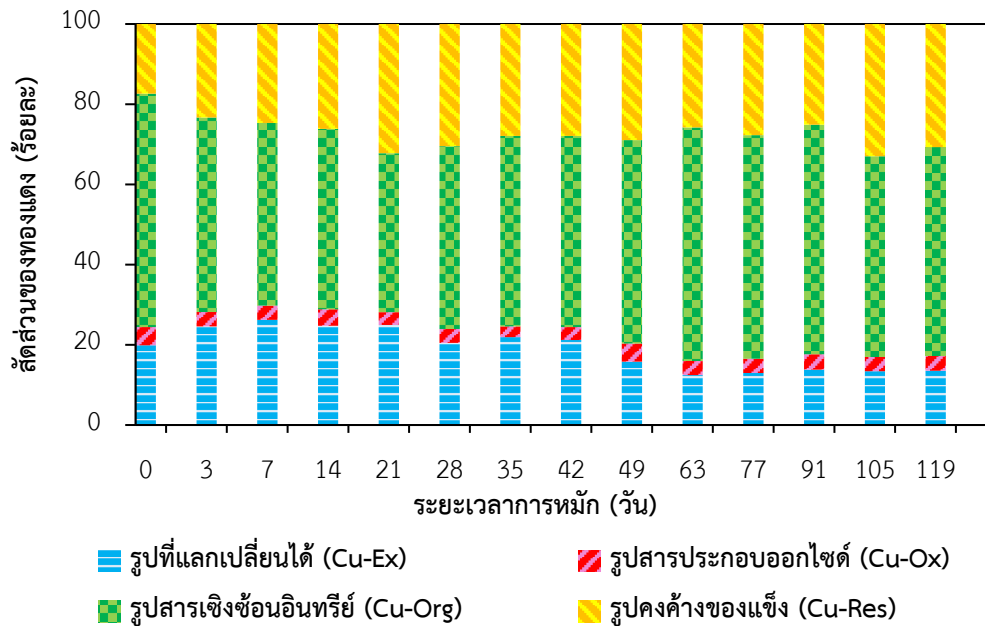
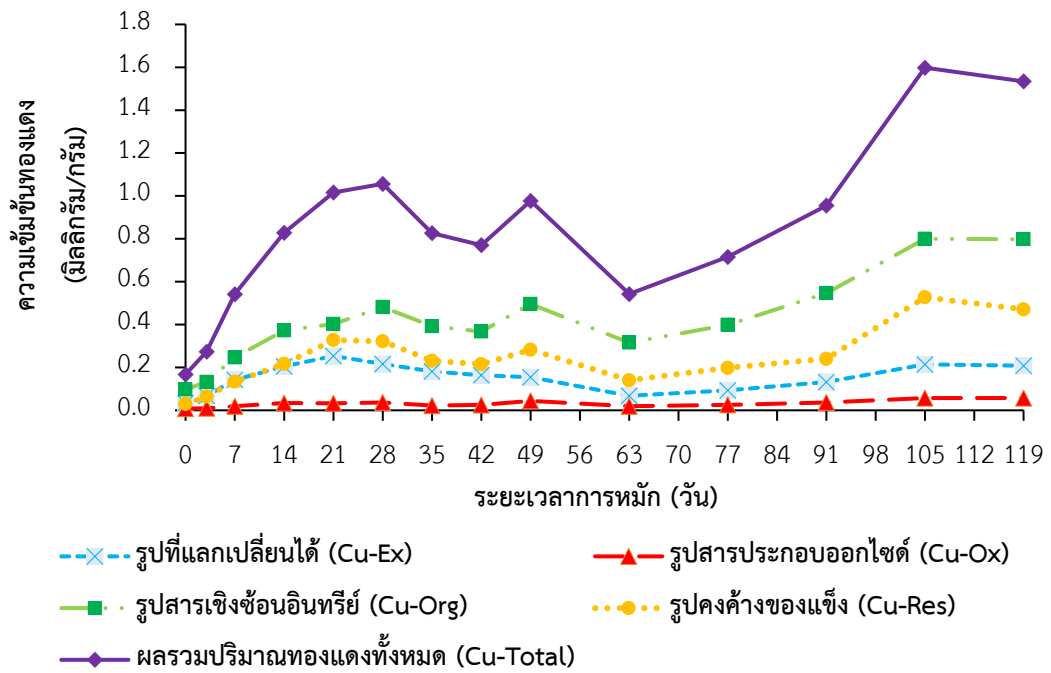
การศึกษาปริมาณและสัดส่วนของทองแดงและเหล็กทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction: -Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนสารอินทรีย์ (Organically bound fraction: -Org) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction: -Res) ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณทองแดงและเหล็กที่พบทั้งหมด มีผลรวมปริมาณทองแดงและเหล็กทุกรูปแบบอยู่ในช่วง 0.17–1.60 และ 2.82–27.86 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยกระบวนการหมักทำให้ผลรวมปริมาณทองแดงและเหล็กทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มผสมไปจนถึงสูงสุดในวันที่ 105 ถึง 9.4 และ 9.9 เท่า ตามลำดับ และมีทิศทางการเพิ่มสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.862$ และ 0.590 ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 ทองแดง

ทองแดงที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เฉลี่ยร้อยละ 50.1 รองลงมาได้แก่รูปค่างของแข็ง รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปสารประกอบออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 27.2, 19.0 และ 3.7 ตามลำดับ ดังภาพที่ 15 สอดคล้องกับคุณสมบัติของการเกิดกับสารประกอบตามทฤษฎีของ Hard and Soft Acid ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกสุดของทองแดงเป็น $4s^1$ ทำให้ทองแดงว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ปลดปล่อยรูปที่แลกเปลี่ยนได้ออกมาน้อย และในช่วงความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยหมักในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่มีค่าระหว่าง 6.82-8.25 ลิแกนด์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยไม่สามารถแย่งจับกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์ที่มีอยู่มากมายจากกระบวนการหมักได้ ทำให้พบรูปแบบทั้งสองมีค่าน้อย เรียงตามลำดับดังนี้

	Cu-Org > Cu-Res > Cu-Ex > Cu-Ox			
โดยมีปริมาณเฉลี่ย	0.42	> 0.24	> 0.15	> 0.03 มิลลิกรัม/กรัม
เฉลี่ยร้อยละ	50.11	> 27.24	> 18.99	> 3.65

สำหรับการเติมอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ เช่น ฟางข้าวหรือฟางข้าวโพดผสมในปุ๋ยมูลสุกร ในกรณีศึกษาของ Wu et al. (2017) จะช่วยลดรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลงและแย่งจับกับลิแกนด์ออกไซด์และสารอินทรีย์ ทำให้ทั้ง 2 รูปแบบพบได้น้อยมาก ขณะที่รูปค่างของแข็งยังคงเป็นรูปแบบที่เด่นมีปริมาณมากที่สุด ถึงร้อยละ 80.1-94.7 นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างยังเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดรูปแบบของทองแดงจากการศึกษาของ สาวิตรี ภาพักดี (2553) ที่พบว่าสภาวะเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย แนวโน้มของรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์จะมีปริมาณมากขึ้น และทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมัก ($p < 0.01$) เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ที่กระบวนการหมักทำให้เกิดการปลดปล่อยทองแดงทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 14 แม้กระนั้นก็ตามหากองค์ประกอบปุ๋ยหมักมีการปรับเปลี่ยนให้เอื้อต่อการเกิดรูปแบบอื่น ๆ มากขึ้นก็อาจทำให้สัดส่วนโลหะที่พบเปลี่ยนแปลงไปจากการศึกษาของ Lu et al. (2014) พบว่าการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในการหมักปุ๋ยมูลไก่ผสมฟางข้าว จะช่วยส่งเสริมให้จุลชีพเปลี่ยนรูปทองแดงไปอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ได้มากขึ้น หรือจากการศึกษาของ Singh & Kalamdhad (2016) ที่พบว่าการเติมต่าง (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) จะเปลี่ยนรูปอื่น ๆ ของเหล็กและทองแดงให้อยู่ในรูปค่างของแข็งซึ่งเป็นรูปที่ถูกตรึงมากขึ้นได้ ลดรูปแบบที่พืชนำไปใช้ได้ต่ำกว่าลง



ข)

ภาพที่ 15 ปริมาณทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
 ก) ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total)

ข) สัดส่วนของทองแดงรูปแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total)

รูปแบบ	ทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex)	ทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox)	ทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org)	ทองแดงรูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res)	ผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total)
ทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex)	1	0.677**	0.638**	0.777**	0.782**
ทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox)	0.677**	1	0.947**	0.920**	0.947**
ทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org)	0.638**	0.947**	1	0.948**	0.975**
ทองแดงรูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res)	0.777**	0.920**	0.948**	1	0.988**
ผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total)	0.782**	0.947**	0.975**	0.988**	1

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณและสัดส่วนของทองแดงรูปแบบต่าง ๆ มีช่วงที่พบตลอดกระบวนการหมักดังนี้

รูปแบบ	ทองแดง	
	(มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	ร้อยละ
รูปที่แลกเปลี่ยนได้	0.03-0.02	12.43 - 26.22
รูปสารประกอบออกไซด์	0.01-0.06	2.68 - 4.54
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	0.10-0.80	39.60 - 58.25
รูปคงค้างของแข็ง	0.03-0.53	17.38 - 32.99

4.3.2 เหล็ก

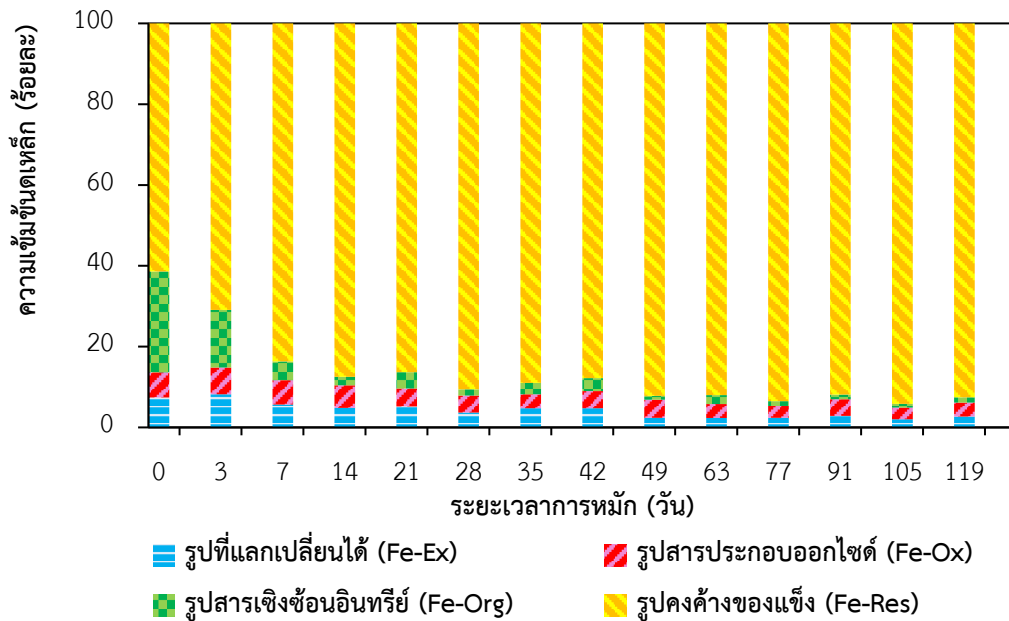
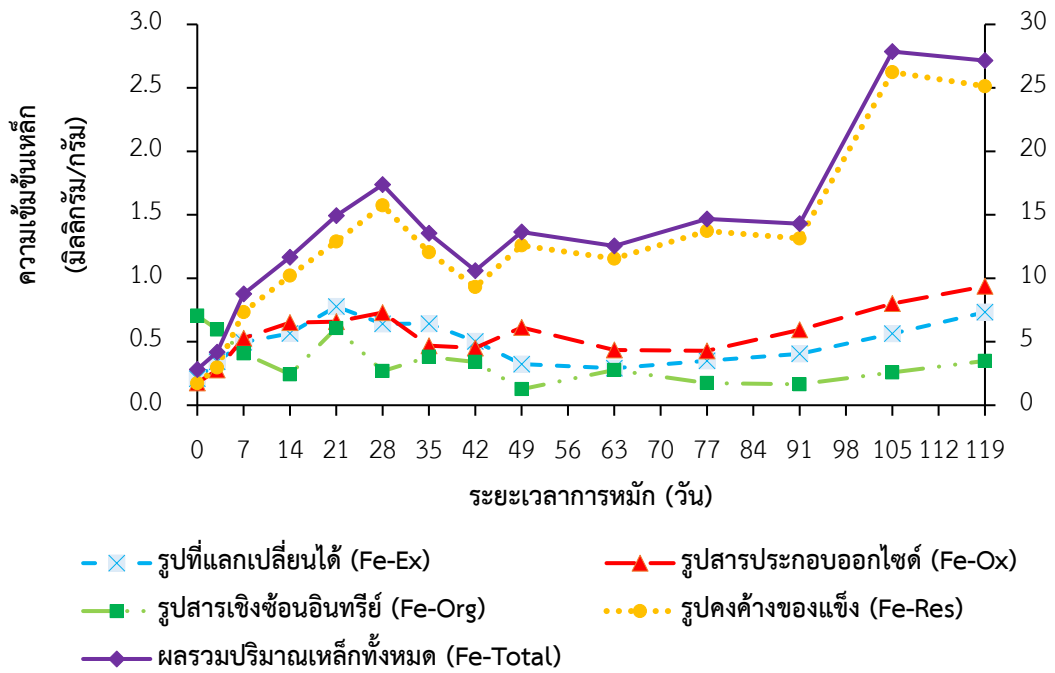
เหล็กที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปคงค้างของแข็งมากเฉลี่ยร้อยละ 86.67 รองลงมาได้แก่รูปสารประกอบออกไซด์ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่มีปริมาณเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คิดเป็นร้อยละ 4.44, 4.22 และ 4.66 ตามลำดับ ดังภาพที่ 16 เหล็กอยู่ในกลุ่ม Borderline เช่นเดียวกับทองแดงที่ชอบเกิดสารประกอบกับลิแกนด์ที่มีความคงตัว โดยการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกสุดของเหล็กขาดอิเล็กตรอน 6 ตัว จึงจะเต็มระดับพลังงาน จึงมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ที่น้อยกว่า (California State University, 2025) ทำให้การแย่งจับกับลิแกนด์อินทรีย์เป็นไปได้น้อยกว่าทองแดง โดยรูปที่แลกเปลี่ยนได้สัมพันธ์กับรูปสารประกอบออกไซด์ รูปคงค้างของแข็งและผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 15 ขณะที่รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับรูปคงค้างของแข็ง และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด ($p < 0.01$) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็กในช่วงเริ่มผสมที่มาจากวัตถุดิบตั้งต้นผ่านกระบวนการย่อยสลายไปเป็นรูปแบบที่ถูกตรึงมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ลดรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ลงเช่นกัน เรียงลำดับตามปริมาณดังนี้

	Fe-Res >>> Fe-Ox, Fe-Ex, Fe-Org		
โดยมีปริมาณเฉลี่ย	12.47	>>> 0.55, 0.49, 0.35	มิลลิกรัม/กรัม
เฉลี่ยร้อยละ	86.67	>>> 4.44, 4.22, 4.66	

นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 6.82-8.25 เหล็กจะอยู่ในรูปที่ แลกเปลี่ยนได้ค่อนข้างน้อย โดยมีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปสารประกอบที่คงตัวได้มากกว่าและทยอย ปลดปล่อยออกมา เมื่อถูกย่อยสลายต่อไปในดินด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมีและชีวภาพ เช่น การศึกษาของ Bostani (2018) ที่พบว่ากระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเพิ่มปริมาณรูปที่ แลกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ รูปสารประกอบออกไซด์ และรูปคงค้างของแข็งของ เหล็กเพิ่มมากขึ้น และช่วยลดการสูญเสียเหล็กในรูปไอออนลง อย่างไรก็ตามหากวัตถุดิบตั้งต้น เปลี่ยนแปลงไป แนวโน้มในการเกิดสารประกอบกับลิแกนด์อินทรีย์และการปลดปล่อยของเหล็กใน รูปแบบต่าง ๆ อาจเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น การศึกษาของ Singh & Kalamdhad (2016) ที่ศึกษา เปรียบเทียบปุ๋ยหมัก 3 สูตร ที่หมักเป็นเวลา 30 วัน ได้แก่ ปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อย ปุ๋ยหมักจากมูลโค และปุ๋ยหมักจากผักตบชวา พบว่ารูปคงค้างของแข็งเป็นรูปที่เด่นในปุ๋ยหมักจากขี้เลื่อยและปุ๋ยหมัก จากมูลโค แต่รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์กลับเป็นรูปที่เด่นของปุ๋ยหมักจากผักตบชวา และการศึกษาของ Faridullah et al (2014) และ Saffari et al (2020) ที่ใช้สลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำ เสียชุมชนทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ผสมกับใบไม้ เปลือกพิตาชิโอ หรือฟางข้าวสาลีอย่างใดอย่าง หนึ่ง ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 25 และ 45 ตามลำดับ หรือวัตถุดิบจากมูลสัตว์ เช่น มูลกระบือ มูลโค มูลแพะ หรือมูลจากสัตว์ปีก เป็นต้น พบว่าทุกสูตรมีปริมาณเหล็กอยู่ในรูปคงค้างของแข็งมากที่สุด (มากกว่าร้อยละ 50) ซึ่งมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ รองลงมา ได้แก่ รูปสารประกอบออกไซด์ สารประกอบ เชิงซ้อนอินทรีย์ และพบรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปที่ละลายได้ในรูปสารประกอบคาร์บอนน้อยกว่า ร้อยละ 3

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กรูปแบบต่าง ๆ มีช่วงที่พบตลอด กระบวนการหมักดังนี้

รูปแบบ	เหล็ก	
	(มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	ร้อยละ
รูปที่แลกเปลี่ยนได้	0.21-0.78	2.02-8.36
รูปสารประกอบออกไซด์	0.18-0.94	2.87-6.64
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	0.13-0.71	0.92-24.71
รูปคงค้างของแข็ง	1.73-26.24	60.77-94.17



ข)

ภาพที่ 16 ปริมาณเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
 ก) ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคงค้างของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)

ข) สัดส่วนของเหล็กรูปแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคางของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)

รูปแบบ	เหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex)	เหล็กสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox)	เหล็กสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org)	เหล็กคางของแข็ง (Fe-Res)	ผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)
เหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex)	1	0.622**	0.030	0.454**	0.492**
เหล็กสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox)	0.622**	1	-0.288	0.771**	0.729**
เหล็กสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org)	0.030	-0.288	1	-0.448**	-0.416**
เหล็กคางของแข็ง (Fe-Res)	0.454**	0.771**	-0.448**	1	0.999**
ผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)	0.492**	0.792**	-0.416**	0.999**	1

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01

สรุปได้ว่าระยะเวลาการหมักที่แตกต่างกันส่งผลต่อการปลดปล่อยรูปแบบของทองแดง และเหล็กแตกต่างกัน โดยคุณสมบัติของโลหะทั้งสองที่แม้จะอยู่ในกลุ่มทรานซิชันเหมือนกัน เมื่อจัดจำแนกความเป็นกรดแก่-อ่อน ด้วยทฤษฎีของ Peason (HSAB concept) ก็จัดอยู่ในกลุ่ม Borderline เช่นกัน แต่จำนวนอิเล็กตรอนที่ไม่เท่ากันทำให้แนวโน้มการเกิดสารประกอบและเสถียรภาพการเกิดสารประกอบแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามรูปแบบที่ค่อนข้างคงตัว เช่น รูปคางคังของแข็งและรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ยังคงเป็นรูปแบบที่เด่นของโลหะทั้งสองแม้จะอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไปก็ตาม

4.4 อิทธิพลของกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทองแดงและเหล็ก

อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($r = -0.589$ และ -0.674 ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยรูปแบบต่าง ๆ ของทองแดงและเหล็กอาจมีทิศทางที่เหมือนหรือแตกต่างกันออกไป โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction: -Ex)

รูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่ละลายน้ำ พิสูจน์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที จากการศึกษาพบว่ารูปที่แลกเปลี่ยนได้ของเหล็กมีปริมาณมากกว่าทองแดงอยู่ในช่วง 3.1-7.0 เท่า โดยอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะทั้งสอง สังเกตได้จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของรูปที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งทองแดงและเหล็ก ($r = 0.507$, $p < 0.01$ และ $r = -0.305$, $p < 0.05$ ตามลำดับ) ดังตารางที่ 16 โดยรูปที่แลกเปลี่ยนได้ได้รับอิทธิพลมาจากการปลดปล่อยของรูปแบบอื่น ๆ ที่อาจปลดปล่อยออกมาในสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป สำหรับทองแดงรูปแบบอื่น ๆ มีอิทธิพลไปในทิศทางเดียวกันกับรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ตารางที่ 14) ซึ่งหมายถึงกระบวนการหมักช่วยเพิ่มปริมาณรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงปลดปล่อยรูปที่แลกเปลี่ยนได้ออกมามากขึ้น แต่รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของเหล็กได้รับอิทธิพลจากรูปสารประกอบออกไซด์และรูปคางคังของแข็งที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปสารอินทรีย์ของเหล็กไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจน (ตารางที่ 15) จากคุณสมบัติของเหล็กที่แย่งจับสารอินทรีย์ได้น้อยกว่าทองแดงดังกล่าว

ตารางที่ 16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ (-Ex) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)
เวลา	1	-0.600**	-0.674**
ทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex)	0.213	-0.182	-0.507**
เหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex)	0.134	-0.160	-0.305*

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01

* ระดับนัยสำคัญ 0.05

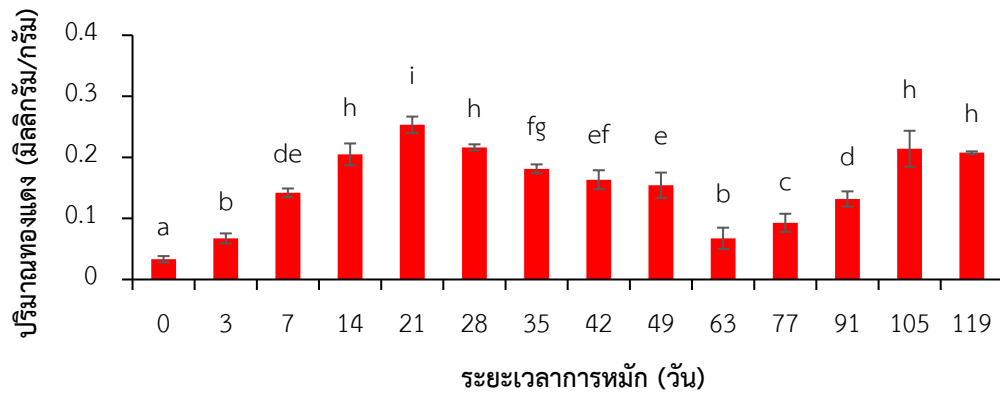
จัดลำดับเชิงปริมาณของทองแดงและเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ด้วยวิธี Duncan (ภาพที่ 16 และ 17) แบ่งออกได้เป็น 3 และ 4 กลุ่ม เรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้

ทองแดง

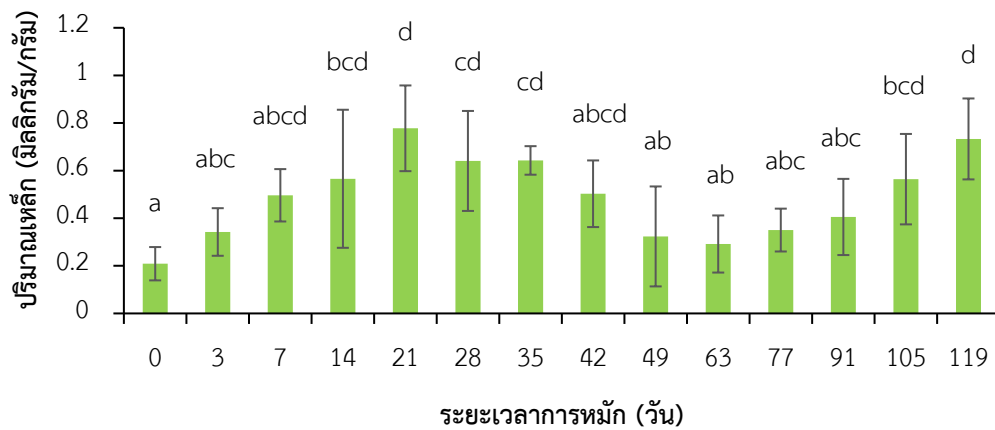
- กลุ่ม a วันที่ 0 วัน
- กลุ่ม b วันที่ 3, 63 วัน
- กลุ่ม c วันที่ 77 วัน
- กลุ่ม d วันที่ 7, 49, 91 วัน
- กลุ่ม e วันที่ 7, 42-49 วัน
- กลุ่ม f วันที่ 35-42 วัน
- กลุ่ม g วันที่ 14, 35 วัน
- กลุ่ม h วันที่ 14, 28, 105-119 วัน
- กลุ่ม i วันที่ 21 วัน

เหล็ก

- กลุ่ม a วันที่ 0-7, 42-91 วัน
- กลุ่ม b วันที่ 3-14, 42-105 วัน
- กลุ่ม c วันที่ 3-14, 28-42, 77-119 วัน
- กลุ่ม d วันที่ 7-42, 105-119 วัน

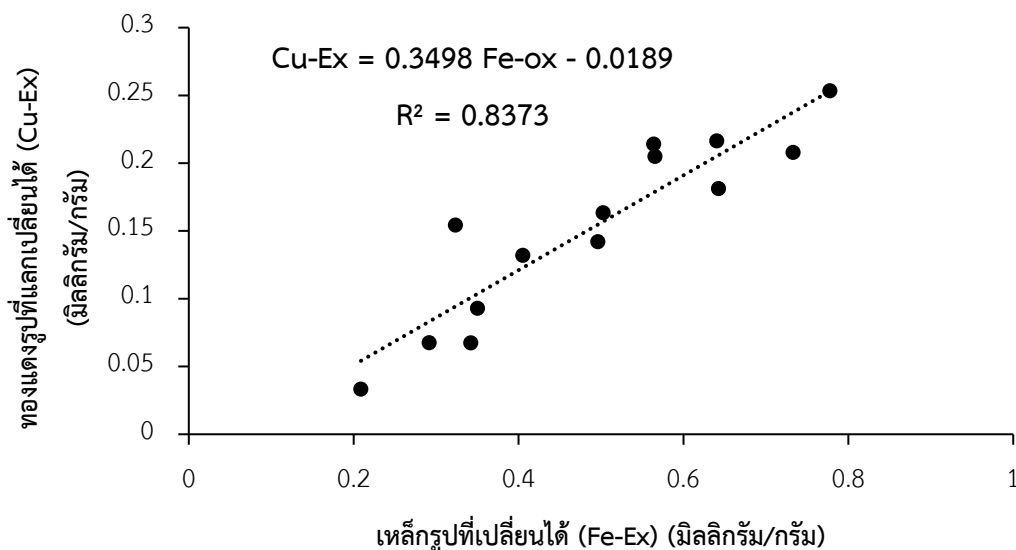


ภาพที่ 17 ปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, g, h และ i หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 18 ปริมาณเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c และ d หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

แม้กระนั้นก็ตามทิศทางการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโลหะทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.749$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 19 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบทั้งสองที่เหมือนกัน



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ (-Ex) ($r = 0.749$, $p < 0.01$)

โดยปริมาณรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของทองแดงและเหล็กมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.32 และ 0.21 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูงเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีการย่อยสลายยาก เช่น ลิกนิน และเซลลูโลส (Sarkar et al., 2016) ทำให้มีการปลดปล่อยปริมาณทองแดงและเหล็กเพิ่มขึ้นในช่วงระยะอุณหภูมิสูงจนมีปริมาณสูงที่สุดในวันที่ 21 ซึ่งเป็นช่วงที่พืชพัฒนาเต็มที่มีค่าอยู่ที่ 0.20 และ 0.78 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงจากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เสถียรอย่างต่อเนื่อง (Huang et al., 2008) จนมีปริมาณต่ำที่สุดอีกครั้งในวันที่ 63 มีค่าอยู่ที่ 0.07 และ 0.29 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ และเมื่อสารอินทรีย์ที่เสถียรถูกย่อยสลายจนมีปริมาณลดลง ศักยภาพการตรึงไอออนของธาตุอาหารจะลดลงด้วยทำให้รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มมากขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมัก

4.4.2 รูปสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction: -Ox)

รูปสารประกอบออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) เปลี่ยนรูปแบบของโลหะผ่านกระบวนการรีดักชัน (reduction) โดยการรับอิเล็กตรอนเกิดสารประกอบออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่ารูปสารประกอบออกไซด์ของเหล็กมีปริมาณมากกว่าทองแดงอยู่ในช่วง 15.7-18.0 เท่า โดยอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงและเหล็กที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้น

ของรูปสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสองเช่นกัน ได้แก่ ทองแดง ($r = -0.377$, $p < 0.05$ และ -0.656 , $p < 0.01$ ตามลำดับ) และเหล็ก ($r = -0.365$, $p < 0.05$ และ $r = -0.578$, $p < 0.01$ ตามลำดับ) ดังตารางที่ 17 และระยะเวลาการหมักสัมพันธ์กับปริมาณทองแดงและเหล็กออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.725$, และ -0.539 ตามลำดับ, $p < 0.01$)

ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ (-Ox) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)
เวลา	1	-0.600**	-0.674**
ทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox)	0.725**	-0.377*	-0.656**
เหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox)	0.539**	-0.365*	-0.578**

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01

* ระดับนัยสำคัญ 0.05

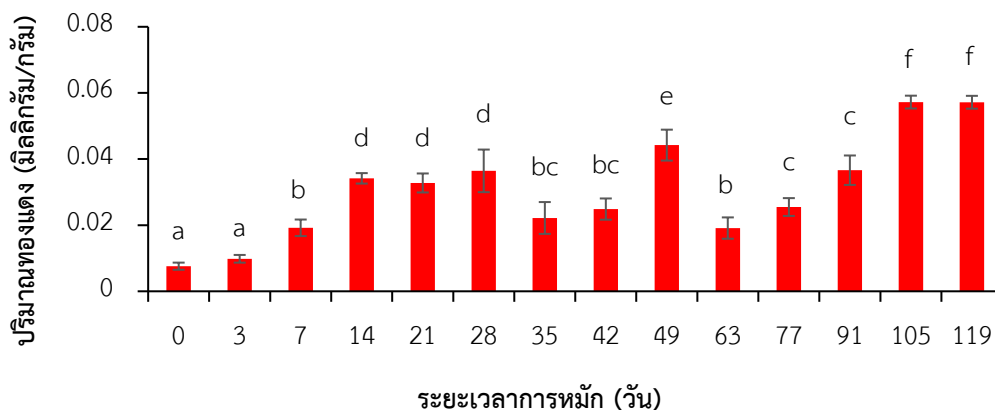
จัดลำดับเชิงปริมาณของทองแดงและเหล็กรูปแบบสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธี Duncan (ภาพที่ 20 และ 21) แบ่งออกเป็น 8 และ 7 กลุ่ม เรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้

ทองแดง

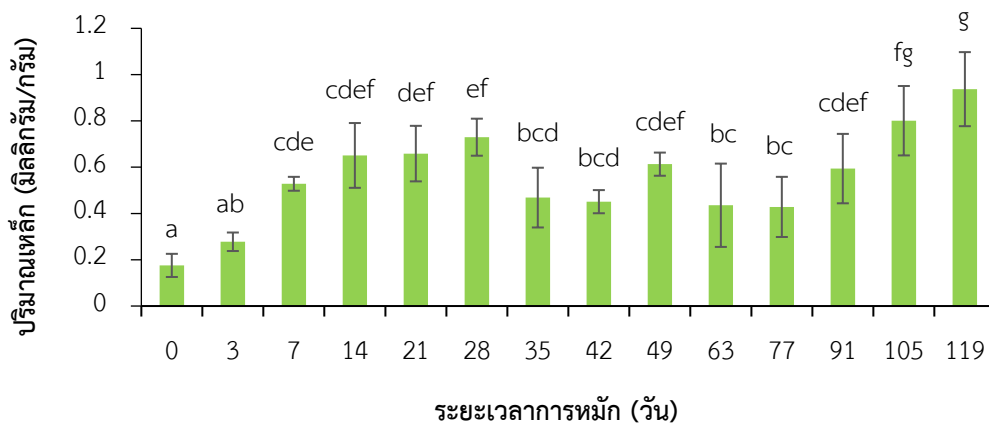
- กลุ่ม a วันที่ 0-3 วัน
- กลุ่ม b วันที่ 7, 35-42, 63 วัน
- กลุ่ม c วันที่ 35 - 42, 77 วัน
- กลุ่ม d วันที่ 14-28, 91 วัน
- กลุ่ม e วันที่ 49 วัน
- กลุ่ม f วันที่ 105-119 วัน

เหล็ก

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



ภาพที่ 20 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, e และ f หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

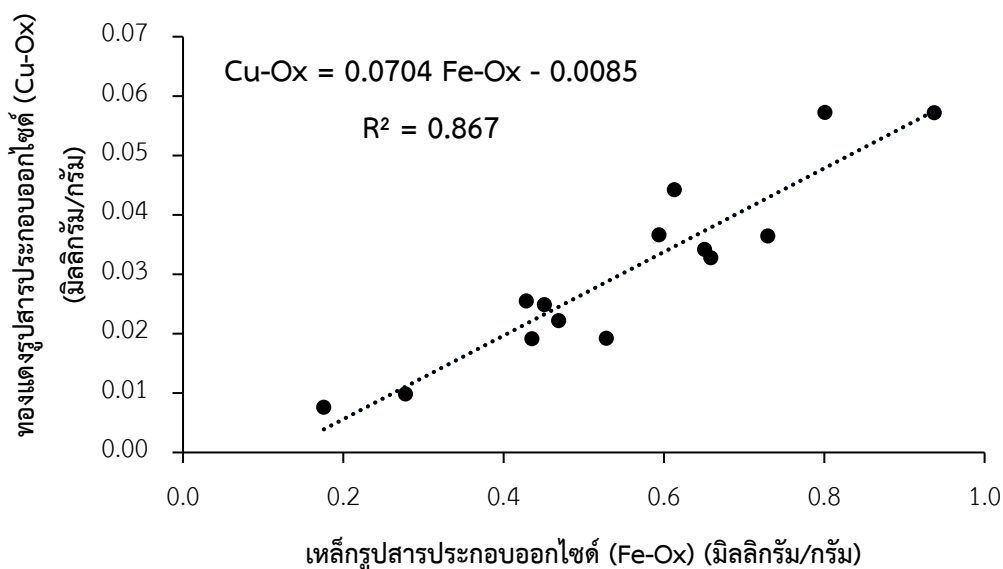


ภาพที่ 21 ปริมาณเหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, e, f และ g หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโลหะทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.864$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 22 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปสารประกอบออกไซด์ในทิศทางเดียวกัน

โดยปริมาณรูปสารประกอบออกไซด์ของทองแดงและเหล็กมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 0 มีค่าอยู่ที่ 0.01 และ 0.18 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งสภาวะอุณหภูมิสูงในช่วงแรกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ปริมาณสารประกอบออกไซด์ของโลหะทั้งสองที่ถูกปลดปล่อยออกมาลดจากรูปที่แตกเปลี่ยนได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกันและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 28 โดยมีค่าอยู่ที่ 0.04 และ 0.73 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากนั้นมีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำที่สุดในวันที่

63 โดยมีค่าอยู่ที่ 0.02 และ 0.44 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ แล้วจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีทิศทางคล้ายคลึงกับรูปที่ 18 แลก็เปลี่ยนได้



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กในรูปสารประกอบออกไซด์ (-Ox)
($r = 0.864$, $p < 0.01$)

4.4.3 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction: -Org)

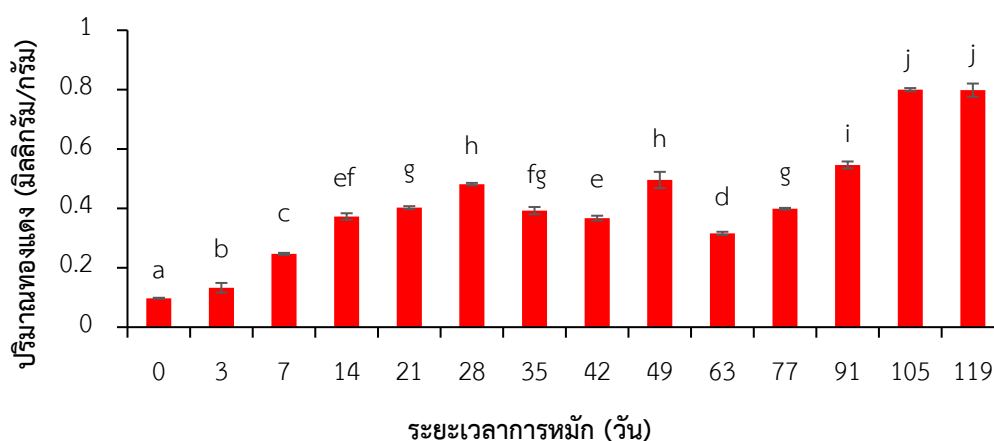
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เป็นรูปที่โลหะจับกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ และสามารถถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้หากอยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดซ์ (Nemati et al., 2009) จากการศึกษาพบว่ารูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงและเหล็กมีปริมาณใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.77–1.13 เท่า ซึ่งอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงและเหล็ก โดยกระบวนการย่อยสลายที่ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองดังนี้ ทองแดง ($r = -0.477$ และ -0.729 ตามลำดับ, $p < 0.01$) และเหล็ก ($r = 0.457$ และ 0.553 ตามลำดับ, $p < 0.01$) ดังตารางที่ 18 และรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะทั้งสองสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = 0.855$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 23 ขณะที่เหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์มีแนวโน้มลดลง ($r = -0.521$ ตามลำดับ, $p < 0.01$)

ดั่งภาพที่ 24 จากคุณสมบัติของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงที่มีเสถียรภาพมากกว่าเหล็กดังกล่าว โดยปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็กที่มีมากในช่วงแรกมาจากวัตถุดิบตั้งต้นเมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายจะค่อย ๆ ลดลง

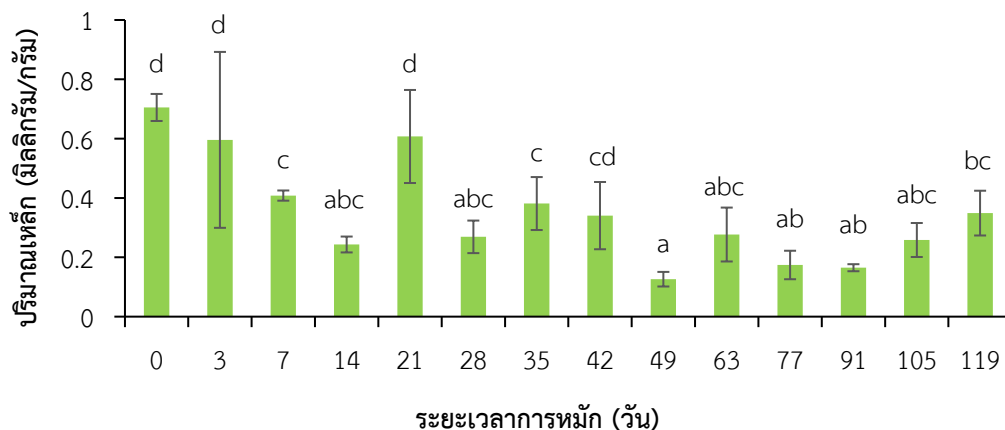
ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็ก รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (-Org) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)
เวลา	1	-0.600**	-0.674**
ทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org)	0.855**	-0.477**	-0.729**
เหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org)	-0.521**	0.457**	0.553**

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01



ภาพที่ 23 ปริมาณทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) ตลอดระยะเวลาการหมัก หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, e, f, g, h, i และ j หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 24 ปริมาณเหล็กในปัสสาวะประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c และ d หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จัดลำดับเชิงปริมาณของทองแดงและเหล็กในปัสสาวะประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ด้วยวิธี
Duncan แบ่งออกเป็น 10 และ 5 กลุ่ม เรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้

ทองแดง

กลุ่ม a วันที่ 0 วัน

กลุ่ม b วันที่ 3 วัน

กลุ่ม c วันที่ 7 วัน

กลุ่ม d วันที่ 63 วัน

กลุ่ม e วันที่ 14, 42, 77 วัน

กลุ่ม f วันที่ 14, 35 วัน

กลุ่ม g วันที่ 21, 35, วัน

กลุ่ม h วันที่ 28, 49 วัน

กลุ่ม i วันที่ 91 วัน

กลุ่ม j วันที่ 105-119 วัน

เหล็ก

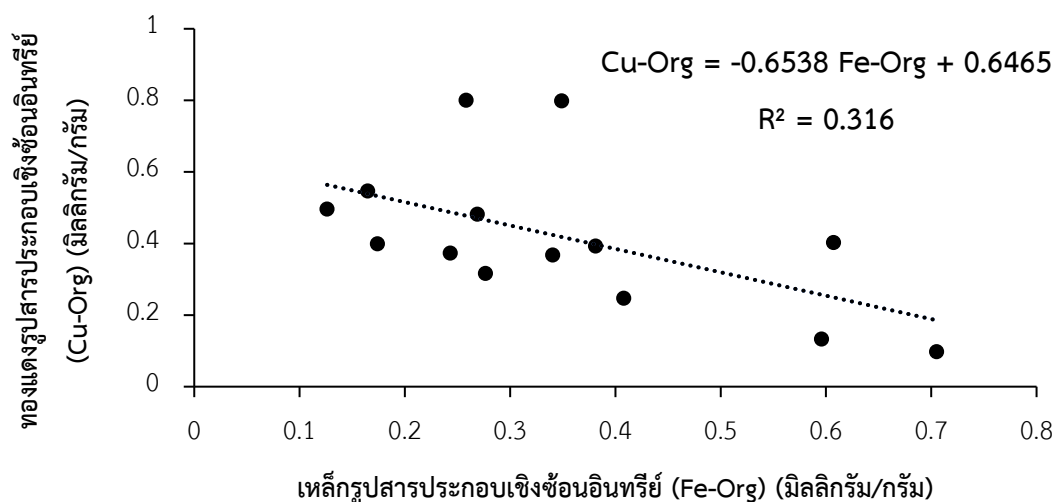
กลุ่ม a วันที่ 14, 28, 49, 63-105 วัน

กลุ่ม b วันที่ 14, 28, 42, 63-119 วัน

กลุ่ม c วันที่ 7-14, 28-42, 63, 105-119 วัน

กลุ่ม d วันที่ 0-3, 21 วัน

แม้กระนั้นก็ตามการเปลี่ยนแปลงของโลหะทั้งสองยังเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.494$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 25 โดยเฉพาะในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป ที่โลหะทั้งสองในรูปสารประกอบอินทรีย์มีทิศทางการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับรูปแบบอื่น ๆ ที่แสดงถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการปลดปล่อยโลหะทั้งสองรูปแบบต่าง ๆ เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (-Org) ($r = 0.494$, $p < 0.01$)

โดยปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 0 มีค่าอยู่ที่ 0.10 มิลลิกรัม/กรัม จากนั้นปริมาณค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเช่นกัน ขณะที่รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็กมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 0 โดยมีค่า 0.71 มิลลิกรัม/กรัม และกระบวนการย่อยสลายลดปริมาณเหล็กรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ลง จากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่วันที่ 21 มีค่า 0.61 มิลลิกรัม/กรัม และแปรปรวนในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ทั้งจากกระบวนการสร้างและสลายรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป จากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุด้วยจุลินทรีย์กลุ่มอูมโนมิปานกลางอย่างต่อเนื่องปลดปล่อยปริมาณโลหะทุกรูปแบบที่เพิ่มขึ้น

4.4.4 รูปค่างของแข็ง (Residual fraction: -Res)

รูปค่างของแข็งเป็นรูปที่ยากต่อการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบนี้ยังเป็นไปในทิศทางเดียวกับรูปแบบอื่น ๆ จากการศึกษาพบว่ารูปค่าง

ของแข็งของเหล็กมีปริมาณมากกว่าทองแดงอยู่ในช่วง 49.5-57.7 เท่า โดยอิทธิพลของกระบวนการหมักทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของรูปคงค้างของแข็งของโลหะทั้งสองดังนี้ ทองแดง ($r = -0.365$, $p < 0.05$ และ -0.660 , $p < 0.01$ ตามลำดับ) และเหล็ก ($r = -0.506$ และ -0.711 ตามลำดับ, $p < 0.01$) ดังตารางที่ 19 โดยปริมาณที่เพิ่มขึ้นของทองแดงและเหล็กสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.700$ และ 0.819 ตามลำดับ, $p < 0.01$)

ตารางที่ 19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการหมักกับทองแดงและเหล็กรูปคงค้างของแข็ง (-Res) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

พารามิเตอร์	เวลา	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)
เวลา	1	-0.600**	-0.674**
ทองแดงรูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res)	0.700**	-0.365*	-0.660**
เหล็กรูปคงค้างของแข็ง (Fe-Res)	0.819**	-0.506**	-0.711**

หมายเหตุ ** ระดับนัยสำคัญ 0.01

* ระดับนัยสำคัญ 0.05

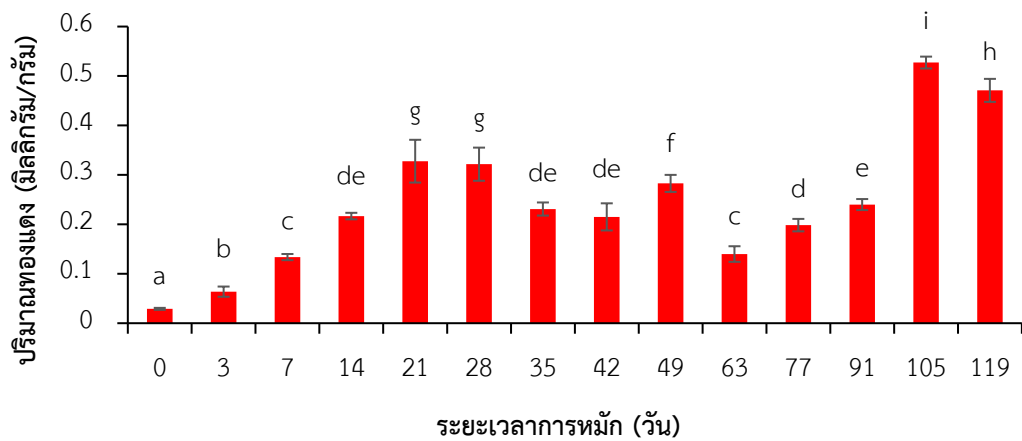
จัดลำดับเชิงปริมาณของทองแดงและเหล็กรูปคงค้างของแข็งด้วยวิธี Duncan (ภาพที่ 26 และ 27) แบ่งออกเป็น 9 และ 6 กลุ่ม เรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้

ทองแดง

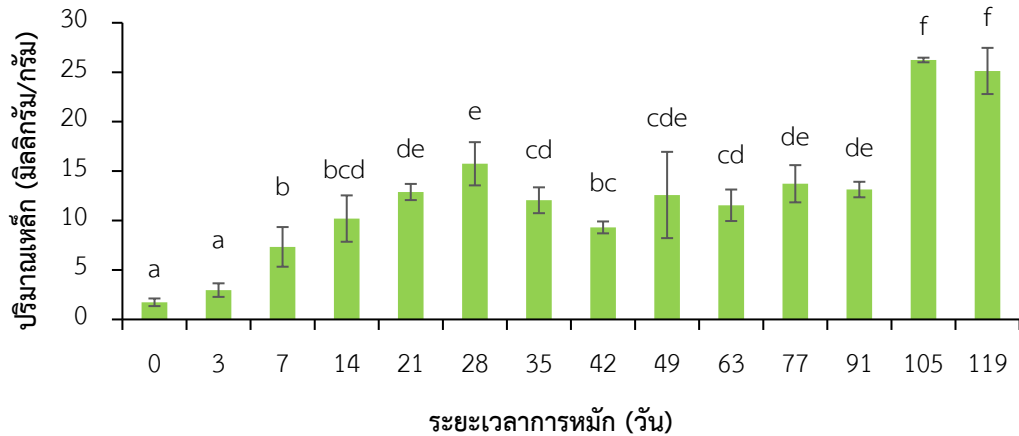
- กลุ่ม a วันที่ 0 วัน
 กลุ่ม b วันที่ 3 วัน
 กลุ่ม c วันที่ 7, 63 วัน
 กลุ่ม d วันที่ 14, 35-42, 77 วัน
 กลุ่ม e วันที่ 14, 35, 42, 91 วัน
 กลุ่ม f วันที่ 49 วัน
 กลุ่ม g วันที่ 21-28 วัน
 กลุ่ม h วันที่ 119 วัน
 กลุ่ม i วันที่ 105 วัน

เหล็ก

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

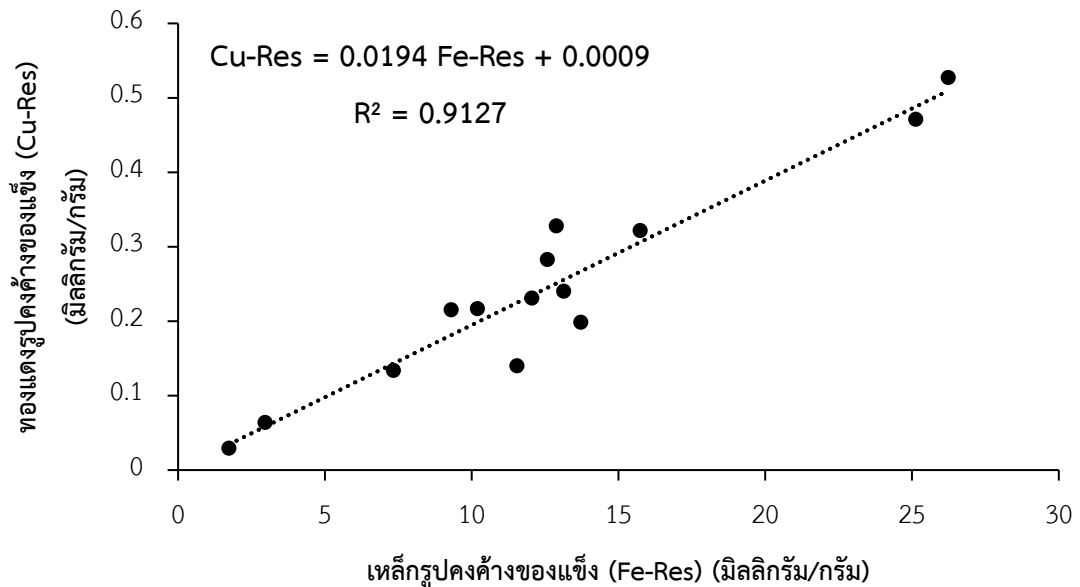


ภาพที่ 26 ปริมาณทองแดงรูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res) ตลอดระยะเวลาการหมัก
 หมายถึง อักษร a, b, c, d, e, f, g, h และ i หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



ภาพที่ 27 ปริมาณเหล็กรูปค่างของแข็ง (Fe-Res) ตลอดระยะเวลาการหมัก
หมายเหตุ อักษร a, b, c, d, e และ f หมายถึง แตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโลหะทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($r = 0.932$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปค่างของแข็งในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของทองแดงและเหล็กรูปค่างของแข็ง (-Res) ($r = 0.932$, $p < 0.01$)

โดยพบว่าปริมาณรูปคงค้างของแข็งของทองแดงและเหล็กมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.03 และ 1.73 มิลลิกรัม/กรัมตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 21 และ 28 จากนั้นมีแนวโน้มลดลงและค่อนข้างแปรปรวน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป

จึงสรุปได้ว่ากระบวนการย่อยสลายมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารทองแดงและเหล็กเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในระยะแรกที่ปุ๋ยเข้าสู่ช่วงพัฒนาเต็มที่วันที่ 21 และวันที่ 28 จากนั้นกระบวนการย่อยสลายยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและลดปริมาณอินทรีย์วัตถุลง จุลินทรีย์มีการนำโลหะทั้งสองไปใช้ทำให้ปริมาณของรูปแบบต่าง ๆ ค่อนข้างแปรปรวน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป โดยการเปลี่ยนแปลงของโลหะทั้งสองสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักที่มีค่าไม่เกินมาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 10 เดซิซีเมนต์/เมตร อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าที่เกิน 5 เดซิซีเมนต์/เมตร ในงานวิจัยนี้กลับส่งผลต่อความเป็นพิษแกพืช ทำให้ในช่วงดังกล่าวแม้จะมีปริมาณธาตุอาหารอุดมสมบูรณ์ แต่ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนรูปทองแดงและเหล็กของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร ด้วยการศึกษาคณสมบัติทางกายภาพและเคมีร่วมกับการศึกษารูปแบบของโลหะด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบ Community Bureau of Reference (BCR) ทำการหมักเป็นระยะเวลา 119 วัน เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมักตลอดกระบวนการหมัก ได้แก่ วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 39, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 แบ่งโลหะออกได้เป็น 4 รูปแบบ ดังนี้ รูปที่แตกเปลี่ยนได้ รูปสารประกอบออกไซด์ รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง วิเคราะห์ปริมาณและสัดส่วนที่สัมพันธ์กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก จากนั้นอภิปรายทิศทางการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่เหมือนกันของโลหะทั้งสองในเชิงเปรียบเทียบ

ปุ๋ยหมักแบ่งตามอุณหภูมิได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) วันที่ 0 ระยะนี้เป็นระยะที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล มีความชื้นสูง และมีกลิ่นค่อนข้างรุนแรง ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) วันที่ 1-13 ระยะนี้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะของปุ๋ยหมักเป็นสีน้ำตาลเข้มและกลิ่นของวัตถุดิบตั้งต้นลดลงแต่มีกลิ่นฉุนของแอมโมเนีย ระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (Mature phase) วันที่ 14 เป็นต้นไป เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักเริ่มเย็นตัวลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกซึ่งเป็นระยะที่จะนำไปใช้ได้ ลักษณะของปุ๋ยหมักในระยะนี้จะร่วนซุย มีสีดำไม่มีกลิ่นของแอมโมเนีย โดยตั้งแต่วันที่ 14-63 มีดัชนีความชื้นความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า อินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2555) อย่างไรก็ตามเมื่อกระบวนการหมักดำเนินไปอย่างต่อเนื่องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุออกมาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นและมีความเป็นพิษต่อพืชหากเกินกว่า 4 เดซิซีเมนต์/เมตร ตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของ California Compost Quality Council (CCQC, 2002) และ The British Standard Institution (BSI) (2005) ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าเมื่อค่าการนำไฟฟ้าเกินกว่า 5 เดซิซีเมนต์/เมตร จะมีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร (2555) ที่กำหนดไว้มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 แม้ค่ามาตรฐานการนำไฟฟ้าจะกำหนดไว้ที่ไม่ควรเกิน 10 เดซิซีเมนต์/เมตรก็ตาม ทำให้ปุ๋ยหมักหลังจากวันที่ 35 เป็นต้นไปไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ จึงทำให้ระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักสามารถนำไปขึ้นทะเบียนเพื่อการจำหน่ายได้อยู่ในช่วงวันที่ 14-35

ปุ๋ยหมักมีอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุร้อยละ 0.0385/วัน และสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.600, p < 0.01$) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงในอัตรา 0.0195/วัน และสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($r = -0.674, p < 0.01$) โดยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักมีค่า 12.29 ซึ่งในช่วงปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 10-15 ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดสารฮิวมิกที่มีคุณภาพสูง (Tan, 2003)

การศึกษาปริมาณและรูปแบบของทองแดงและเหล็กพบว่าผลรวมปริมาณทองแดงและเหล็กทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งสอง โดยทองแดงมีปริมาณเฉลี่ยน้อยกว่าเหล็ก 16.6-17.4 เท่า เรียงตามลำดับเชิงปริมาณและสัดส่วนของโลหะทั้งสองดังนี้

	$\text{Cu-Org} > \text{Cu-Res} > \text{Cu-Ex} > \text{Cu-Ox}$							
โดยมีปริมาณเฉลี่ย	0.42	>	0.24	>	0.15	>	0.03	มิลลิกรัม/กรัม
เฉลี่ยร้อยละ	50.11	>	27.24	>	18.99	>	3.65	
	$\text{Fe-Res} \gg \text{Fe-Ox, Fe-Ex, Fe-Org}$							
โดยมีปริมาณเฉลี่ย	12.47	>>>	0.55, 0.49, 0.35					มิลลิกรัม/กรัม
เฉลี่ยร้อยละ	86.67	>>>	4.44, 4.22, 4.66					

ซึ่งแม้ทองแดงและเหล็กจัดอยู่ในกลุ่มทรานซิชันตามทฤษฎีของ Peason (HSAB concept) โดยที่สภาวะเป็นกลางหรือค่อนข้างเป็นด่างโลหะทั้งสองจะมีแนวโน้มอยู่ในรูปสารประกอบ แต่เสถียรภาพในการเกิดสารประกอบมีความแตกต่างกัน โดยการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกสุดของทองแดงเป็น $4s^1$ ชาติอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว ทำให้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) สูง จึงว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เสถียรระหว่างกระบวนการหมัก เช่น สารฮิวมิกได้ดีกว่าเหล็ก ซึ่งเป็นรูปแบบที่เด่นพบได้ในปุ๋ยหมักทั่วไป (Ayari, Chairi & Kossai, 2008; Song & Greenway, 2003) มีสัดส่วนเชิงปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงมากที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 50.11 รองลงมาได้แก่ รูปคงค้างของแข็งร้อยละ 27.24 รูปที่แลกเปลี่ยนได้ร้อยละ 18.99 และรูปสารประกอบออกไซด์ 3.65 ตามลำดับ ขณะที่เหล็กมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกสุดชาติอิเล็กตรอน 6 ตัว จึงจะเต็มระดับพลังงาน ทำให้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีที่ต่ำกว่า (California

State University, 2025; Moore et al., 2025) การแย่งจับกับลิแกนด์อินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักจึงเป็นไปได้น้อยกว่าทองแดง จึงพบเหล็กในรูปที่คงตัวในรูปคั่งค้างของแข็งมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ ที่ในช่วงความเป็นกรดต่างที่เป็นกลางถึงเป็นด่างเล็กน้อย ถึงเฉลี่ยร้อยละ 86.67

เมื่อเปรียบเทียบทิศทางการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบโลหะทั้งสอง ล้วนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($p < 0.01$) โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น (ตารางที่ 16, 17, 18 และ 19) ยกเว้นรูปสารเชิงซ้อนอินทรีย์ของเหล็กที่มีทิศทางผกผันกับทองแดงจากความสามารถในการแย่งจับกับสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักของทองแดงที่มากกว่าเหล็กดังกล่าว แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณทองแดงและเหล็กแต่ละรูปแบบดังนี้

$$\text{Cu-Ex} = 0.3498 \text{ Fe-Ex} - 0.0189 \quad R^2 = 0.8373 \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

$$\text{Cu-Ox} = 0.0704 \text{ Fe-Ox} - 0.0085 \quad R^2 = 0.867 \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

$$\text{Cu-Org} = -0.6538 \text{ Fe-Org} + 0.6465 \quad R^2 = 0.316 \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

$$\text{Cu-Res} = 0.0194 \text{ Fe-Res} + 0.0009 \quad R^2 = 0.9127 \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

สำหรับทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายกว่าเหล็ก ขณะที่เหล็กขบอบอยู่ในรูปคั่งค้างของแข็งมากกว่าทำให้รูปแบบที่ปลดปล่อยออกมาได้ง่ายมีปริมาณน้อย และมักเป็นข้อจำกัดของเหล็กที่พบได้ทั่วไปในการปลูกพืช อย่างไรก็ตามกระบวนการหมักช่วยเพิ่มปริมาณโลหะทุกรูปแบบและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 21-28 จึงเป็นช่วงเวลาเหมาะต่อการนำไปใช้ ทั้งในเชิงธาตุอาหารทั้งสองและเกณฑ์คุณภาพของการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร (2555) ซึ่งหากทั้งระยะปุ๋ยหมักนานเกินไปปริมาณธาตุอาหารจะลดลงเช่นเดียวกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลง ปลดปล่อยไอออนของธาตุอาหารที่มีประจุมากขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการงอกของเมล็ดลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ปริมาณทองแดงยังมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานการขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร (2555) ทำให้ไม่สามารถขึ้นทะเบียนเพื่อจำหน่ายได้ อย่างไรก็ตามปริมาณทองแดงทั้งหมดยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานทองแดงในดินเพื่อการเกษตร (2564) มาก โดยน้อยกว่าถึง 21.9-206.1 เท่า จึงยังนำไปใช้ได้ แต่การนำไปใช้ต้องพิจารณาปริมาณที่เหมาะสมกับดินในแต่ละท้องที่ เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนทองแดงในดินที่มากเกินไปจนส่งผลต่อความเป็นพิษของพืชได้

ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุอาหารร่วมกับดัชนีเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2555) ทำให้เห็นทิศ

ทางการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารเชิงปริมาณ อันนำไปสู่การเลือกอายุปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วยมูลสัตว์เป็นหลัก ตลอดจนการจัดการปุ๋ยหมักในการนำไปใช้ และเป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการจัดการเชิงคุณภาพในการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่ยังคงคุณภาพจากกระบวนการย่อยสลายที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารที่แตกต่างกันอย่างต่อเนื่อง อันจะเป็นประโยชน์เกษตรกรในอนาคตต่อไป



รายการอ้างอิง

- Baudo, R. (1982). *The role of the speciation in the transfer of heavy metals along the aquatic food wab*. Unpubilshed manuscript.
- Ben-Dor, E., & Banin, A. (1989). Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple “loss-on-ignition” method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20(15-16), 1675-1695. <https://doi.org/10.1080/00103628909368175>
- Biyada, S., Merzouki, M., Demcenko, T., Vasiliauskiene, D., Goranina, R., Urbonavicius, J., Marciulaitiene, E., Vasarevicius, S., & Benlemlih, M. . (2021). Microbial community dynamics in the mesophilic and thermophilic phases of textile waste composting identified through next-generation sequencing. *National Library of medicine*.
- Bostani, A. (2018). How amending calcareous soils with municipal solid waste compost affects Fe fractionation and availability to plant. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 47, 149-155.
- Brewer, L. J., & Sullivan, D. M. (2013). Maturity and Stability Evaluation of Composted Yard Trimmings. *Compost Science & Utilization*, 11(2).
- The British Standards Institution (BSI). (2005). Specification for composted Materials: PAS-100. In. London: The British Standards Institution.
- California Compost Quality Council (CCQC). (2002). California Compost Quality Council Compost Maturity Index. *Technical Report*. <https://ccqc.org/>
- California State University. (2025). General Trends among the Transition Metals. . [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_\(Inorganic_Chemistry\)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/3_dBlock/Elements/1b_Properties_of_Transition_Metals/General_Trends_among_the_Transition_Metals](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_(Inorganic_Chemistry)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/3_dBlock/Elements/1b_Properties_of_Transition_Metals/General_Trends_among_the_Transition_Metals)

- 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.
- Hiraoka., H. (2003). Biofertilizer production plant, Myanmar (FAO/UNDP Project). In. Bangkok: FAO-RAP.
- Huang, H., Zeng, G., Tang, L., Yu, H., Xi, X., Chen, Z., & Huang, G. (2008). Effect of biodelignification of rice straw on humification and humus quality by *Phanerochaete chrysosporium* and *Streptomyces badius*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61(4), 331-336.
- National Center for Biotechnology Information. (2025a). *PubChem Element Summary for AtomicNumber 26, Iron*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Iron>.
- National Center for Biotechnology Information. (2025b). *PubChem Element Summary for AtomicNumber 29, Copper* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Copper>.
- InternationalFertilizerAssociation. (2009). Organic and Mineral Fertilizer: Differences and Similarities. . <https://www.fertilizer.org/about-fertilizers/organic-and-mineral-fertilizers/>
- Kaiser, K., & Rosen, C. (2023). Kaiser, K., & Rosen, C. <https://extension.umn.edu/micro-and-secondary-macronutrients/copper-crop-production>
- Lestari, L., Fitri, B., & Dwi, H. (2018). Speciation of heavy metals Cu, Ni and Zn by modified BCR sequential extraction procedure in sediments from Banten Bay, Banten Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*, 118, 1-7.
- 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.

- Marzorati, F., Midali, A., Morandini, P., & Murgia, I. (2022). Good or Bad? The Double Face of Iron in Plants. <https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/>
- Mokgehle, S. N., Araya, H. T., Araya, N. A., Bairu, M. W., Makgato, M. J., Mofokeng, M. M., Maphothoma, P., du Plooy, C. P., & Amoo, S. O. (2021). Chapter 11 - Biostimulant applications in low-input cultivation systems to enhance nutrition efficiency of crops. In S. Gupta & J. Van Staden (Eds.), *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development* (pp. 237-262). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823048-0.00001-0>
- Morrissey, J., & Guerinot, M. L. (2009). Iron uptake and transport in plants: The good, the bad, and the ionome. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2764373/>
- Mossop, K. F., & Davidson, C. M. (2003). Comparison of original and modified BCR sequential extraction procedures for the fractionation of copper, iron, lead, manganese and zinc in soils and sediments. *Analytica Chimica Acta*, 478(1), 111-118. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)01485-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)01485-X)
- Nemati, K., Bakar, N. K. A., Sobhanzadeh, E., & Abas, M. R. (2009). A modification of the BCR sequential extraction procedure to investigate the potential mobility of copper and zinc in shrimp aquaculture sludge. *Microchemical Journal*, 92(2), 165-169.
- Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants [Review]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 14 - 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
- Rodríguez-Rodríguez, A., Garda, Z., Ruscsák, E., Esteban-Gómez, D., de Blas, A., Rodríguez-Blas, T., Lima, L. M. P., Beyler, M., Tripier, R., Tircsó, G., & Platas-Iglesias, C. (2015). Stable Mn²⁺, Cu²⁺ and Ln³⁺ complexes with cyclen-based ligands functionalized with picolinate pendant arms [10.1039/C4DT02985B]. *Dalton Transactions*, 44(11), 5017-5031. <https://doi.org/10.1039/C4DT02985B>

- Saffari, M., Saffari, V. R., Khabazzadeh, H., & Naghavi, H. (2020). Effect of Composting Process on Some Chemical-Biological Properties and Heavy Metals Behavior of Municipal Sewage Sludge as Affected by Various Bulking Agents *Pollution*, 6(3).
- Sanmanee, N., & Nubdee, S. (2020). Effect of Composting on the Cu Speciation in Cow-Based Compost Using BCR Sequential Extraction. *International Journal of Environmental Science and Development*, 11(7).
- Sarkar, S., Pal, S., & Chanda, S. (2016). Optimization of a Vegetable Waste Composting Process with a Significant Thermophilic Phase. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 435-440.
- Şevik, F., Tosun, İ., & Ekinci, K. (2018). The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks. *Waste Management*, 80, 450-456.
- Shabbir, Z., Sardar, A., Shabbir, A., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Natasha, Murtaza, G., Dumat, C., & Shahid, M. (2020). Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere*, 259.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436)
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2016). Effect of lime on speciation of heavy metals during composting of water hyacinth. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(1), 93-102.
- Song, Q. J., & Greenway, G. M. (2003). A study of the elemental leachability and retention capability of compost. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(1), 31-37.
- Stumm, W., & Morgan, J. (1995). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd Edition ed.).
- Tan, K. H. (2003). *Humic Matter in Soil and the Environment* (1st Edition ed.).
- Tessier A, Campbell P. G. C., & Bisson M. (1979). Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 51(7).

United States Environmental Protection Agency. (1996). METHOD 3050B ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS *United states Environmental Protection Agency*.

Wander, M. (2009). Managing Manure Fertilizers in Organic Systems. *eorganic*

Wang, Q., Wang, Z., Awasthi, M. K., Jiang, Y., Li, R., Ren, X., Zhao, J., Shen, F., Wang, M., & Zhang, Z. (2016). Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting. *Bioresource Technology*, *220*, 297-304.

Wang, Z., Wu, D., Lin, Y., & Wang, X. (2022). Role of Temperature in Sludge Composting and Hyperthermophilic Systems: a Review. *BioEnergy Research*, *15*, 962-976.

White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Ann Bot*, *105*(7), 1073-1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>

Wu, S., Shen, Z., Yang, Z., Li, X., Zeng, G., Ai, S., & He, H. (2017). Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting *International Biodeterioration & Biodegradation*, *119*.

Zhou, J. (2016). The Effect of Different C/N Ratios on the Composting of pig Manure and Edible Fungus Residue with Rice Bran. *Compost Science & Utilization*, *25*(2).

กรมพัฒนาที่ดิน. (2551). คู่มือการจัดการอินทรีย์วัตถุเพื่อปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. (2548). ปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. (2555). การขอขึ้นทะเบียน การออกไปสำคัญการขึ้นทะเบียน การขอแก้ไขรายการทะเบียนและการแก้ไขรายการทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์. https://www.moac.go.th/law_agri_files-422891791816

กรมวิชาการเกษตร. (2564). ปุ๋ยอินทรีย์. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2548). มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (ปุ๋ยหมัก) มกอช.9503-2548. ราชกิจจานุเบกษาฉบับทั่วไป เล่มที่ 22 ตอนที่ 1443.

สาวิตรี กาฬภักดี. (2553). การศึกษารูปแบบของเหล็กและทองแดงในปุ๋ยหมักด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น มหาวิทยาลัยศิลปากร]. นครปฐม.

แก่งกาจ จันทร์ภักดี, และธัญญา รัชชีสุริยะชัย. (2563). เรื่อง การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารข้างร่วมกับมูลช้างและการมูลหมัก ด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี.

คุณวัฒน์ ชีรนิจวัฒน์. (2567). เคล็ดลับการควบคุมอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมัก: ทำอย่างไรให้จุลินทรีย์ทำงานได้เต็มที่. <https://www.ifarm.co.th/compost-temperature/>

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม. (2564). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. <https://www.pcd.go.th/laws/25162/>

สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดอำนาจเจริญ. (2564). 'ปุ๋ยเคมี' ทำให้ดินเสีย...ดินเป็นกรด จริงหรือไม่?! https://www.opsmoac.go.th/amnatcharoen-article_prov-preview-431591791886#:~:text=%25E0%25B8%259B%25E0%25B8%25B8

จำเป็น อ่อนทอง. (2568). อาการขาดธาตุเหล็ก <https://ppsf.doae.go.th/%e0%b8%ad%e0%b8%b2%e0%b8%81%e0%b8%b2%e0%b8%a3%e0%b8%82%e0%b8%b2%e0%b8%94%e0%b8%98%e0%b8%b2%e0%b8%95%e0%b8%b8%e0%b9%80%e0%b8%ab%e0%b8%a5%e0%b9%87%e0%b8%81/>

เจตรินทร์ ทำสะอาด. (2559). การศึกษารูปแบบเหล็กและสังกะสีระหว่างการหมักปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้นแบบ *Community Burea of Reference (BCR)* มหาวิทยาลัยศิลปากร].

ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวโรจน์. (2557). การใช้ประโยชน์จุลินทรีย์ดินในภาคการเกษตรของประเทศไทย. อนุรักษ์ดินและน้ำ, 30(1).

ธัญญา รัชชีสุริยะชัย, และกุลยา สาริชีวิน. (2017). การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์วัตถุด้วยการเติมอากาศ

ร่วมกับการใช้ครูดิเมอไซม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี.

จงชัย มาลา. (2546). ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. .

นัทธีรา สรรมณี. (2555). โลหะในแหล่งน้ำ (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). บริษัทจรัสสินทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.

บัญชา รัตน์ทุ. (2552). ปุ๋ยอินทรีย์พื้นฟูสภาพดิน. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 1(2).

ยงยุทธ โอสภสภ, อรรถดิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, และชวลิต ฮงประยูร. (2551). ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.).
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ มณีพงษ์. (2568). อาการขาดธาตุทองแดงในมังคุด
<https://ppsf.doae.go.th/%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%82%E0%B8%B2%E0%B8%94%E0%B8%98%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B1/>

สังวรณ์ เสนะโลหิต. (2557). ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตโดยโรงงานที่ได้รับอนุญาตจากกรม
วิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช]. นนทบุรี.

สำนักงานเกษตรและสกรณ์จังหวัดปัตตานี. (2567). “ปุ๋ยคอก” ในมูลสัตว์ มีประโยชน์กับพืชผักสวนครัว.
https://www.opsmoac.go.th/pattani-local_wisdom-preview-461991791854

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2567). อาการขาดธาตุอาหารของพืช.
<https://warning.acfs.go.th/th/articles-and-research/view/?page=144>

โสฬส แซ่ลิ่ม. (2559). ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. กลุ่มวิจัยและพัฒนาการจัดการอินทรีย์วัตถุกอง
เทคโนโลยีชีวภาพทางดินกรมพัฒนาที่ดิน





ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ดัชนีการงอกของเมล็ด

ตารางที่ ก.1 ร้อยละดัชนีการงอก (Germination Index; GI) ของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) เทียบกับชุดควบคุม

ตัวอย่าง	การซ้ำ	จำนวนเมล็ดที่งอก (ร้อยละ)	ความยาวราก (เซนติเมตร)	GI (ร้อยละ)	เฉลี่ย GI (ร้อยละ)
ชุดควบคุม	1	100	2.48	100	100
	2	100	2.50	100	
	3	100	1.60	100	
วันที่ 0	1	100	2.52	115.07	99.09
	2	100	2.09	95.43	
	3	100	1.90	86.76	
วันที่ 3	1	100	1.77	80.82	85.95
	2	90	2.33	95.75	
	3	100	1.78	81.28	
วันที่ 7	1	100	1.92	87.67	83.38
	2	100	1.83	83.56	
	3	90	1.92	78.90	
วันที่ 14	1	100	2.81	128.31	113.39
	2	100	2.13	97.26	
	3	100	2.51	114.61	
วันที่ 21	1	100	2.00	91.32	90.87
	2	100	2.04	93.15	
	3	100	1.93	88.13	
วันที่ 28	1	100	1.83	83.56	105.42
	2	90	2.34	96.16	
	3	100	2.99	136.53	
วันที่ 35	1	100	1.94	89.95	88.74
	2	100	2.04	93.15	
	3	100	1.82	83.11	

ตารางที่ ก.2 ร้อยละดัชนีการงอก (Germination Index; GI) ของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.)

R. Wilczek) เทียบกับชุดควบคุม (ต่อ)

ตัวอย่าง	การซ้ำ	จำนวนเมล็ดที่งอก (ร้อยละ)	ความยาวราก (เซนติเมตร)	GI (ร้อยละ)	เฉลี่ย GI (ร้อยละ)
วันที่ 42	1	100	1.76	80.37	78.69
	2	100	1.65	75.34	
	3	100	1.76	80.37	
วันที่ 49	1	90	1.64	67.40	72.85
	2	100	1.75	79.91	
	3	100	1.56	71.23	
วันที่ 63	1	90	1.99	81.78	77.95
	2	100	1.93	88.13	
	3	100	1.40	63.93	
วันที่ 77	1	90	1.44	65.75	58.49
	2	90	1.20	49.32	
	3	100	1.47	60.41	
วันที่ 91	1	100	1.83	83.56	86.00
	2	100	1.92	87.67	
	3	100	1.90	86.76	
วันที่ 105	1	100	1.77	80.82	69.57
	2	90	1.49	61.23	
	3	100	1.46	66.67	
วันที่ 119	1	100	1.77	80.82	69.82
	2	90	1.64	67.40	
	3	90	1.49	61.23	



ตารางที่ ข.1 ปริมาณทองแดง (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น ได้แก่ ปริมาณทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total)

ระยะเวลา (วัน)	Cu-Ex	Cu-Ox	Cu-Org	Cu-Res	Cu-Total
	มิลลิกรัม/กรัม (Mean ± SD)				
0	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.10 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.33 ± 0.01
3	0.07 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.13 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.34 ± 0.06
7	0.14 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.25 ± 0.00	0.13 ± 0.01	0.48 ± 0.03
14	0.20 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.37 ± 0.01	0.22 ± 0.01	1.03 ± 0.01
21	0.25 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.40 ± 0.01	0.33 ± 0.04	1.14 ± 0.36
28	0.22 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.48 ± 0.00	0.32 ± 0.03	0.95 ± 0.03
35	0.18 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.39 ± 0.01	0.23 ± 0.01	1.40 ± 0.05
42	0.16 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.37 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.96 ± 0.03
49	0.15 ± 0.02	0.04 ± 0.00	0.50 ± 0.03	0.28 ± 0.02	1.55 ± 0.02
63	0.07 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.32 ± 0.01	0.14 ± 0.02	0.89 ± 0.06
77	0.09 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.40 ± 0.00	0.20 ± 0.01	1.89 ± 0.06
91	0.13 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.55 ± 0.01	0.24 ± 0.01	2.47 ± 0.08
105	0.21 ± 0.03	1.30 ± 0.20	0.80 ± 0.01	0.53 ± 0.01	2.36 ± 0.04
119	0.21 ± 0.00	1.20 ± 0.06	0.80 ± 0.02	0.47 ± 0.02	1.83 ± 0.02



ตารางที่ ข.2 ร้อยละของทองแดงในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น ได้แก่ ทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) และรูปคงค้างของแข็ง (Cu-Res)

ระยะเวลา (วัน)	Cu-Ex	Cu-Ox	Cu-Org	Cu-Res
	ร้อยละ			
0	19.89	4.54	58.19	17.38
3	24.59	3.59	48.49	23.32
7	26.22	3.54	45.55	24.69
14	24.74	4.12	44.98	26.16
21	24.93	3.22	39.60	32.25
28	20.49	3.45	45.61	30.46
35	21.92	2.68	47.46	27.93
42	21.20	3.23	47.66	27.91
49	15.79	4.53	50.74	28.94
63	12.43	3.53	58.25	25.79
77	12.98	3.56	55.74	27.72
91	13.82	3.84	57.22	25.13
105	13.39	3.58	50.04	32.99
119	13.55	3.73	52.03	30.70

ตารางที่ ข.3 ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อกรัม) ในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับชั้น ได้แก่ ปริมาณเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคงค้างของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)

ระยะเวลา (วัน)	Fe-Ex	Fe-Ox	Fe-Org	Fe-Res	Fe-Total
	มิลลิกรัม/กรัม (Mean ± SD)				
0	0.21 ± 0.07	0.18 ± 0.05	0.71 ± 0.05	1.73 ± 0.39	1.87 ± 0.34
3	0.34 ± 0.10	0.28 ± 0.04	0.60 ± 0.30	2.96 ± 0.69	2.17 ± 0.59
7	0.50 ± 0.11	0.53 ± 0.03	0.41 ± 0.02	7.34 ± 2.01	2.43 ± 1.21
14	0.57 ± 0.29	0.65 ± 0.14	0.24 ± 0.03	10.20 ± 2.34	9.78 ± 2.72
21	0.78 ± 0.18	0.66 ± 0.14	0.61 ± 0.16	12.89 ± 0.82	8.58 ± 4.05
28	0.64 ± 0.21	0.73 ± 0.08	0.27 ± 0.05	15.74 ± 2.18	8.06 ± 1.84
35	0.64 ± 0.06	0.47 ± 0.13	0.38 ± 0.09	12.05 ± 1.31	13.71 ± 2.55
42	0.50 ± 0.14	0.45 ± 0.05	0.34 ± 0.11	9.31 ± 0.60	7.26 ± 1.58
49	0.32 ± 0.21	0.61 ± 0.05	0.13 ± 0.02	12.58 ± 4.36	7.02 ± 1.69
63	0.29 ± 0.12	0.44 ± 0.18	0.28 ± 0.09	11.55 ± 1.59	6.20 ± 2.34
77	0.35 ± 0.09	0.43 ± 0.13	0.17 ± 0.05	13.72 ± 1.88	14.32 ± 1.99
91	0.41 ± 0.16	0.59 ± 0.15	0.16 ± 0.01	13.14 ± 0.78	18.20 ± 7.88
105	0.56 ± 0.19	0.80 ± 0.15	0.26 ± 0.06	26.24 ± 0.23	12.14 ± 2.74
119	0.73 ± 0.17	0.94 ± 0.16	0.35 ± 0.08	25.13 ± 2.33	9.92 ± 0.33



ตารางที่ ข.4 ร้อยละของเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรที่สกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับขั้น ได้แก่ เหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) และรูปคงค้างของแข็ง (Fe-Res)

ระยะเวลา (วัน)	Fe-Ex	Fe-Ox	Fe-Org	Fe-Res
	ร้อยละ			
0	7.40	6.22	24.97	61.41
3	8.18	6.64	14.25	70.92
7	5.66	6.02	4.65	83.66
14	4.85	5.58	2.09	87.48
21	5.21	4.41	4.07	86.31
28	3.69	4.20	1.55	90.57
35	4.75	3.46	2.81	88.98
42	4.74	4.25	3.21	87.79
49	2.37	4.49	0.92	92.21
63	2.32	3.47	2.21	92.00
77	2.39	2.92	1.19	93.51
91	2.83	4.15	1.15	91.86
105	2.02	2.87	0.93	94.17
119	2.70	3.45	1.29	92.56



ภาคผนวก ค
ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Soil organic matter; OM) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination Index; GI)

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	pH	EC	ความชื้น	OM	C/N	GI
ระยะเวลา	1	-.646**	-.289	.884**	-.730**	-.589**	-.674**	-.558**
อุณหภูมิ		1	.535**	-.763**	.687**	.435**	.796**	.174
pH			1	-.352*	.284	.515**	.474	.297
EC				1	-.916**	-.642**	-.815**	-.482**
ความชื้น					1	.619**	.771**	.330*
OM						1	.701**	.331*
C/N							1	.329*
GI								1

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ค.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานกับปริมาณของแตรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร ได้แก่ ระยะเวลา
 อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Soil organic matter; OM) อัตราส่วน
 คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination Index; GI) ปริมาณของแตรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox)
 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Cu-Res) และผลรวมปริมาณของแตรูปทั้งหมด (Cu-Total)

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	pH	EC	ความชื้น	OM	C/N	GI
Cu-Ex	.213	-.375*	.103	.406**	-.515**	-.182	-.507**	.154
Cu-Ox	.725**	-.596**	-.186	.708**	-.687**	-.377*	-.656**	.638**
Cu-Org	.855**	-.662**	-.176	.812**	-.748**	-.477**	-.729**	-.331*
Cu-Res	.700**	-.592**	-.115	.706**	-.673**	-.365*	-.660**	-.243
Cu-Total	.737**	-.624**	-.119	.748**	-.722**	-.411**	-.705**	-.235

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ค.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานกับปริมาณของแตรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร ได้แก่ ระยะเวลา
อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Soil organic matter; OM) อัตราส่วน
คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination Index; GI) ปริมาณเหล็กที่ละลายได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox)
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปคั่งค้างของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	pH	EC	ความชื้น	OM	C/N	GI
Fe-Ex	.134	-.168	.240	.237	-.293	-.160	-.305*	.205
Fe-Ox	.539**	-.451**	.000	.563**	-.593**	-.365*	-.578**	-.045
Fe-Org	-.521**	.531**	.295	-.625**	.698**	.457**	.553**	.261
Fe-Res	.819**	-.639**	-.137	.787**	-.725**	-.506**	-.711**	-.321*
Fe-Total	.803**	-.626**	-.118	.774**	-.714**	-.496**	-.704**	-.301

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ๓.๔ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณของแดงรูปแบบต่าง ๆ กับปริมาณเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร ได้แก่ ปริมาณของแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) รูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) รูปค้ำของแข็ง (Cu-Res) ผลรวม ปริมาณของแดงทั้งหมด (Cu-Total) ปริมาณเหล็กรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) รูปสารประกอบ ออกไซด์ (Fe-Ox) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) รูปค้ำของแข็ง (Fe-Res) และผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total)

พารามิเตอร์	Fe-Ex	Fe-Ox	Fe-Org	Fe-Res	Fe-Total
Cu-Ex	.749**	.745**	-.183	.613**	.638**
Cu-Ox	.373*	.864**	-.461**	.874**	.877**
Cu-Org	.427**	.807**	-.494**	.950**	.949**
Cu-Res	.535**	.791**	-.383*	.932**	.937**
Cu-Total	.539**	.838**	-.430**	.937**	.943**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

* มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ๑๕.5 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของร้อยละดัชนีการออก (GI) ของเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek)

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
77	3	58.49315				
105	3	69.57382	69.57382			
119	3	69.81735	69.81735			
49	3	72.84627	72.84627			
63	3	77.94521	77.94521	77.94521		
42	3	78.69102	78.69102	78.69102		
7	3	83.379	83.379	83.379		
3	3	85.95129	85.95129	85.95129	85.95129	
91	3	85.99696	85.99696	85.99696	85.99696	
35	3	88.73668	88.73668	88.73668	88.73668	
21	3	90.86758	90.86758	90.86758	90.86758	
0	3			99.08676	99.08676	99.08676
28	3				105.4186	105.4186
14	3					113.3942
Sig.		0.065	0.06	0.059	0.075	0.158
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000						

ตารางที่ ๑๑.๖ การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของผลรวมปริมาณทองแดงทั้งหมด (Cu-Total) ในปุยหมักมูลโคผสมมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11										
0	3	.167105																				
3	3		.273640																			
7	3			.541652																		
63	3			.542272																		
77	3				.715602																	
42	3					.770456																
35	3						.826649															
14	3							.828423														
91	3								.954885													
49	3									.976961												
21	3										1.016251											
28	3											1.016251										
119	3												1.055971									
105	3																					1.534099
Sig.		1.000	1.000	.981	1.000	1.000	.945	.397	.137	.133	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.598252

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

ตารางที่ ๑๗.๗ การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของผลรวมปริมาณเหล็กทั้งหมด (Fe-Total) ในผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันผิดปกติ

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	2.823526					
3	3	4.180540					
7	3		8.768680				
42	3		10.600402				
14	3		11.660514	11.660514			
63	3		12.549054	12.549054			
35	3		13.544696	13.544696			
49	3		13.647286	13.647286			
91	3		14.300698	14.300698	14.300698		
77	3		14.675540	14.675540	14.675540		
21	3		14.930242	14.930242	14.930242		
28	3				17.380927		
119	3					27.148692	
105	3					27.861059	
Sig.		.391	.089	.089	.077	.080	.651

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

ตารางที่ ค.8 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของทองแดงรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Cu-Ex) ในปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	.033230								
3	3		.067298							
63	3		.067419							
77	3			.092864						
91	3				.131933					
7	3				.141999	.141999				
49	3				.154278	.154278				
42	3					.163336	.163336			
35	3						.181192	.181192		
14	3							.204912	.204912	
119	3								.207798	
105	3									.214010
28	3									.216324
21	3									.253303
Sig.		1.000	.992	1.000	.084	.099	.143	.055	.388	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000										

ตารางที่ ๑.๙ จัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของเหล็กกล้าที่แลกเปลี่ยนได้ (Fe-Ex) ในปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	.208844			
63	3	.291683	.291683		
49	3	.323497	.323497		
3	3	.342142	.342142	.342142	
77	3	.350275	.350275	.350275	
91	3	.405253	.405253	.405253	
7	3	.496310	.496310	.496310	.496310
42	3	.502723	.502723	.502723	.502723
105	3	.564073	.564073	.564073	.564073
14	3	.565648	.565648	.565648	.565648
28	3	.640604	.640604	.640604	.640604
35	3	.642752	.642752	.642752	.642752
119	3				.733086
21	3				.777730
Sig.		.066	.088	.062	.078
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000					

ตารางที่ ๓.10 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของทองแดงรูปสารประกอบออกไซด์ (Cu-Ox) ในปุ๋ยหมักมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.007589					
3	3	.009830					
63	3		.019124				
7	3		.019201				
35	3		.022175	.022175			
42	3		.024867	.024867			
77	3		.025486	.025486			
21	3				.032765		
14	3				.034159		
28	3				.036424		
91	3				.036623		
49	3					.044210	
119	3						.057176
105	3						.057229
Sig.		.426	.067	.270	.214	1.000	.985
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000							

ตารางที่ ค.11 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของเหล็กรูปสารประกอบออกไซด์ (Fe-Ox) ในปุ๋ยหมักมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	.175618						
3	3	.277706	.277706					
77	3		.428337	.428337				
63	3		.435478	.435478				
42	3		.450996	.450996	.450996			
35	3		.468662	.468662	.468662			
7	3		.528285	.528285	.528285	.528285		
91	3		.593949	.593949	.593949	.593949	.593949	
49	3		.613080	.613080	.613080	.613080	.613080	
14	3		.650826	.650826	.650826	.650826	.650826	
21	3		.658679	.658679	.658679	.658679	.658679	
28	3				.729639	.729639	.729639	
105	3						.800878	
119	3							.937235
Sig.		.290	.080	.050	.065	.070	.063	.161
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000								

ตารางที่ ค.12 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของทองแดงรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Cu-Org) ในผู้ป่วยที่มีภูมิคุ้มกันโคผสมภูมิตก

Day	N	Subset for alpha = 0.05														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
0	3	.097242														
3	3		.132692													
7	3			.246727												
63	3				.315861											
42	3					.367185										
14	3						.372662									
35	3							.392358								
77	3								.398857							
21	3									.402476						
28	3										.481611					
49	3											.495724				
91	3												.546342			
119	3													.798222		
105	3														.799818	
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	.589	.059	.349	.170	1.000	1.000	.875				
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000																

ตารางที่ ค.13 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของเหล็กกล้ารูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Fe-Org) ในปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
49	3	.126190			
91	3	.164889	.164889		
77	3	.174072	.174072		
14	3	.243205	.243205	.243205	
105	3	.258342	.258342	.258342	
28	3	.268993	.268993	.268993	
63	3	.276780	.276780	.276780	
42	3	.340525	.340525	.340525	
119	3	.348990	.348990	.348990	
35	3	.381228	.381228	.381228	
7	3	.408082	.408082	.408082	
3	3				.595855
21	3				.607295
0	3				.705148
Sig.		.143	.078	.113	.247
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000					

ตารางที่ ค.14 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของทองแดงรูปค่างของแข็ง (Cu-Res) ในปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกร

Day	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	.029044								
3	3		.063820							
7	3			.133726						
63	3			.139868						
77	3			.198395						
42	3			.215068	.215068					
14	3			.216691	.216691					
35	3			.230924	.230924					
91	3			.239987	.239987					
49	3					.282749				
28	3						.321612			
21	3						.327707			
119	3							.470903		
105	3								.527196	
Sig.		1.000	1.000	.710	.078	.175	1.000	.713	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000										

ตารางที่ ค.15 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของเหล็กรูปคางของแข็ง (Fe-Res) ในผู้ป่วยกลุ่มโรคพัฒนาสมอง

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
0	3	1.733916					
3	3	2.964837					
7	3		7.336004				
42	3		9.306159				
14	3		10.200836	10.200836			
63	3		11.545112	11.545112			
35	3		12.052053	12.052053			
49	3		12.584519	12.584519	12.584519		
21	3			12.886537	12.886537	12.886537	
91	3			13.136606	13.136606	13.136606	
77	3			13.722856	13.722856	13.722856	
28	3				15.741692		
119	3						25.129381
105	3						26.237765
Sig.		.427	.086	.063	.052	.073	.474
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000							

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธีรภัทร มีประมุล
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2566 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	ธีรภัทร มีประมุล, กมลชนก พานิชการ, นันทนิตย์ วานิชชาชีวะ และ นัทธีรา สรรมณี. (อยู่ระหว่างตีพิมพ์). การศึกษากระบวนการหมักต่อพลวัตของ ทองแดงและเหล็กด้วยเทคนิค Community Bureau of Reference; BCR. PSRU Journal of Science and Technology.

