การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก : การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

โดย
นางสาวปัญจาภา ส่งเสริม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก : การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

โดย
นางสาวปัญจาภา ส่งเสริม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

POTASSIUM TRANSFORMATION STUDY DURING COMPOSTING PERIOD : A COMPARISON BETWEEN SWINE AND CHICKAN COMPOST

By

Miss Panjapa Songserm

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

Master of Science Program in Environmental Science

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก : การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่” เสนอโดยนางสาวปัญจาภา ส่งเสริม เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลนาถ อบสุวรรณ)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี)
...../...../.....

55311309: สาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดลอม

คำสำคัญ: โพแทสเซียม, เทคนิคการสกัดด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR), ปุ๋ยหมักมูลหมู, ปุ๋ยหมักมูลไก่

ปัญจาภา ส่งเสริม: การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก : การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่. อาจารยที่ปรึกษาวิทยานิพนธ: รศ.ดร. นัทธีรา สรรมณี. 75 หนา.

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมตลอดระยะเวลาการหมักระหว่างปุ๋ยหมักสองสูตร ได้แก่ ปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ ปุ๋ยหมักถูกสกัดออกเป็น 4 รูปแบบโพแทสเซียม ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์และรูปคงค้างของแข็ง โดยใช้เทคนิคการสกัด Community Bureau of Reference (BCR) เก็บตัวอย่างวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 โดยแบ่งตามอุณหภูมิเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0), ระยะอุณหภูมิสูง (ปุ๋ยหมักมูลหมูวันที่ 1-35 และปุ๋ยหมักมูลไก่ วันที่ 1-42) และระยะเจริญเต็มที่ (ปุ๋ยหมักมูลหมูหลังวันที่ 35 เป็นต้นไปและปุ๋ยหมักมูลไก่หลังวันที่ 42 เป็นต้นไป) รูปแบบที่โดดเด่นของโพแทสเซียมที่พบในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ คือรูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้มีถึงร้อยละ 94.6 และ 99.5 ตามลำดับ คิดเป็น 43.4 และ 249.3 กรัม/กิโลกรัม รูปแบบส่วนใหญ่ของโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการหมัก ($p<0.01$) บ่งบอกถึงกระบวนการ condensation of metals แม้ปริมาณของผลรวมโพแทสเซียมทุกรูปแบบของปุ๋ยหมักมูลไก่จะมีมากกว่า แต่ปริมาณเฉลี่ยของรูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลหมูมีมากกว่าของปุ๋ยหมักมูลไก่ถึง 1.6 เท่า อาจเป็นเพราะคุณภาพของอินทรียวัตถุที่ดีกว่ารวมทั้งอัตราการย่อยสลายอินทรียวัตถุที่ช้ากว่าช่วยตรึงโพแทสเซียมในรูปแบบนี้และเพิ่มศักยภาพในการจัดเก็บที่ดีกว่า ดังนั้นไม่เพียงแต่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโพแทสเซียมจะช่วยให้เข้าใจถึงความแตกต่างของชนิดของปุ๋ยหมักที่จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมแต่ยังเข้าใจถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของปุ๋ยหมักแต่ละชนิด ซึ่งเกษตรกรจะสามารถวางแผนในการเลือกใช้ปุ๋ยหมักที่เป็นประโยชน์ในการให้โพแทสเซียมรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

55311309: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORD: POTASSIUM, BCR TECHNIQUE, SWINE MANURE, CHICKEN MANURE
PANJAPA SONGSERM: POTASSIUM TRANSFORMATION STUDY DURUNG COMPOSTING PERIOD : A COMPARISON BETWEEN SWINE AND CHICKEN COMPOST. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. NATDHERA SANMANEE, Ph.D. 75 pp.

The objective of this comparative study was to investigate potassium transformation during fermenting period between two composts: swine and chicken composts. Composts were extracted into four potassium fractions which were exchangeable fraction, oxide fraction, organically bound fraction and residual fraction using Community Bureau of Reference (BCR) Technique. The samples were collected at day 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 and 119. The composts were divided after temperature into 3 stages: initial stage (day 0), thermophilic stage (day 1-35 for swine compost and day 1-42 for chicken compost) and mature stage (after day 35 for swine compost and after day 42 for chicken compost). The distinct form of potassium found in swine and chicken composts, 94.6% and 99.5%, respectively was exchangeable accounted for 43.4 and 249.3 g/Kg, respectively. Most of potassium fractions increased correspondingly with time ($p<0.01$) indicating condensation of metals. Regardless of the higher total amounts of potassium in the chicken compost, the average amount of organically bound fractions of swine compost was greater about 1.6 times than that of the chicken compost. This might be because of the better quality of organic matters including the slower degradation rate help fixing potassium yielding higher potential storage. Therefore, not only study the potassium transformation would help in understanding how the different types of compost would affect the change of potassium but also the factors influencing the fixing and releasing that inherited in them. As a result, farmers would be able to design whether which compost would be benefit in giving available potassium to their plants.

Department of Environmental Science Graduate School, Silpakorn University

Student's signature ..... Academic Year 2016

Thesis Advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือให้ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลนาถ อบสุวรรณ เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนพระคุณแด่บิดา มารดา คุณพ่อประเยียน ส่งเสริม คุณแม่จิระพันธ์ ส่งเสริม ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอดถือว่าเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บูรพาคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฏ
บทที่
1 บทนำ..... 1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2
สมมติฐานของการศึกษา..... 2
ขอบเขตการศึกษา..... 2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
ปุ๋ยหมัก..... 4
นิยาม คำสำคัญ และความหมาย..... 4
ปุ๋ยหมัก..... 4
ปุ๋ยคอก..... 4
การเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก..... 5
กระบวนการหมักและปัจจัยที่มีอิทธิพล..... 5
กระบวนการหมัก..... 5
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก..... 6
ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก..... 7
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ ของดิน..... 7
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน..... 8
รูปแบบของโพแทสเซียมในดิน..... 8
รูปในทางเคมี..... 8
รูปที่ละลายน้ำได้..... 8
รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้..... 8
รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้..... 8
รูปตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช..... 9
โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที..... 9
โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้าๆ..... 10
โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที..... 10

บทที่ หน้า
ศักย์ไอออนิกโพแทสเซียม..... 12
บทบาทของโพแทสเซียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช..... 12
กระบวนการสร้างน้ำตาลและแป้ง..... 12
การเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาล..... 12
กระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจ..... 13
ความจำเป็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์..... 13
ความต้านทานโรค..... 13
ความต้านทานอุณหภูมิต่ำ..... 13
คุณภาพของผักและผลไม้..... 13
เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น..... 13
รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้..... 14
รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์..... 14
รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์..... 14
รูปคงค้างของแข็ง..... 14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 14
3 วิธีการทดลอง..... 17
สารเคมีและรีเอเจนท์..... 19
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 19
ขั้นตอนการดำเนินการ..... 20
การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก..... 20
ขั้นตอนการหมักปุ๋ย..... 21
ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก..... 22
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักวิเคราะห์..... 22
การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ..... 22
การวิเคราะห์ความชื้น..... 23
การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่าง..... 23
การวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุ..... 23
การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน..... 23
การวิเคราะห์รูปแบบของโพแทสเซียมด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น.. 24
การวิเคราะห์ทางสถิติ..... 26
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 27
การแบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามอุณหภูมิและการเปรียบเทียบคุณลักษณะตาม
มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร..... 27
การแบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามอุณหภูมิ..... 27

บทที่ หน้า
ระยะเริ่มผสม..... 27
ระยะอุณหภูมิสูง..... 27
ระยะเจริญเต็มที่..... 28
การเปรียบเทียบคุณลักษณะตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร..... 28
ปริมาณหินและกรวด..... 30
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้..... 30
ค่าความเป็นกรดด่าง..... 30
ค่าการนำไฟฟ้า..... 31
ปริมาณอินทรียวัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน..... 34
ปริมาณธาตุอาหารหลัก..... 36
การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย..... 36
การจัดกลุ่มเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบเชิงเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่..... 38
โพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้..... 38
โพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์..... 40
โพแทสเซียมรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์..... 42
โพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็ง..... 44
5 สรุปผลการทดลอง..... 47
รายการอ้างอิง..... 49
ภาคผนวก..... 54
ภาคผนวก ก..... 55
ภาคผนวก ข..... 60
ประวัติผู้วิจัย..... 75

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณเฉลี่ยธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อพืชของมูลสัตว์ชนิดต่างๆ.....	5
2	วิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต.....	19
4	ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก.....	21
5	เปรียบเทียบคุณลักษณะพื้นฐานปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	29
6	เปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่กับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการ พ.ศ. 2548.....	32
7	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างรูปแบบโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลหมู.....	38
8	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างรูปแบบโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลไก่.....	38
9	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่.....	40
10	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่.....	42
11	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่.....	43
12	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็ง กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่.....	44
13	ร้อยละของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น.....	56
14	ร้อยละของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น.....	57
15	ปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น.....	58

ตารางที่ หน้า

16 ปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น..... 59
17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมู..... 61
18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลไก่..... 63
19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ของของปุ๋ยหมักมูลหมู (P) กับปุ๋ยหมักมูลไก่ (C)..... 65
20 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลหมู..... 67
21 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลไก่..... 68
22 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลหมู..... 69
23 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลไก่..... 70
24 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลหมู..... 71
25 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลไก่..... 72
26 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลหมู..... 73
27 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลไก่..... 74

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โพแทสเซียมที่อยู่ในสภาพของไอออน (K^+) ที่ดูดยึดเอาไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดิน...	9
2	โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยเกาะอยู่บนพื้นผิวของแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ.....	10
3	รูปและความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน.....	11
4	ศักย์ไอออนิกของไอออน.....	12
5	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการเพาะปลูกข้าวโพดและหลังจากปลูกข้าวโพดและเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	15
6	เปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ของดินก่อนการเพาะปลูกข้าวโพดและหลังจากปลูกข้าวโพดและเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	15
7	ผลรวมความเข้มข้นของทองแดง แมงกานีส และสังกะสีในปุ๋ยหมักมูลหมูตลอดกระบวนการการหมัก.....	16
8	แผนผังการทดลองโดยรวมของการศึกษา.....	18
9	ปุ๋ยหมัก (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู และ (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่.....	20
10	การผสมปุ๋ยหมัก.....	22
11	แผนภูมิการสกัดลำดับขั้นด้วยวิธี BCR โดยเปลี่ยนแปลงขั้นตอนที่ 5 รูปคงข้างของแข็งตามวิธีของ Wada and Wada (1999).....	25
12	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	28
13	การเปลี่ยนแปลงร้อยละความชื้นของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	31
14	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	31
15	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	34
16	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรียวัตถุของปุ๋ยสูตรมูลหมูและมูลไก่กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.585$, $p<0.05$ และ $r = -0.728$, $p<0.01$ ตามลำดับ).....	35
17	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยสูตรมูลหมูและมูลไก่กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.544$, $p<0.05$ และ $r = -0.646$, $p<0.05$ ตามลำดับ).....	35
18	ปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบของปุ๋ยหมักมูลหมูที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	37

ภาพที่		หน้า
19	ปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบของปุ๋ยหมักมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก.....	37
20	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่.....	39
21	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่.....	41
22	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่.....	43
23	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่.....	45

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารที่ปลดปล่อยออกมาให้แก่พืชอย่างช้าๆ สม่ำเสมอ โดยทั่วไปแล้วปุ๋ยหมักจะมีแร่ธาตุอาหารพืชที่สำคัญครบถ้วน กล่าวคือมีไนโตรเจนทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.4-2.5 ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชประมาณร้อยละ 0.2-2.5 และโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 0.5-1.8 ปริมาณแร่ธาตุอาหารดังกล่าวจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเศษพืชที่นำมาหมักและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ใส่ลงไปในกองปุ๋ย นอกจากจะเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชแล้ว ปุ๋ยหมักยังมีคุณค่าในแง่การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินอีกหลายประการ เช่น ช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชในดินแปรสภาพไปอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่าย ช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกน้ำฝนหรือน้ำชลประทานชะล้างสูญหายไปได้ง่าย เป็นการช่วยถนอมแร่ธาตุอาหารหรือความสมบูรณ์ของดินอีกทางหนึ่ง (ธงชัย, 2546) นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังช่วยเพิ่มค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity; CEC) ของดิน ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดธาตุอาหารประจุบวก เช่น โพแทสเซียมไว้ไม่ให้สูญเสียหรือชะล้างไปได้ง่ายและพืชก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2552)

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมากเป็นธาตุอาหารที่มีประจุบวก (แคทไอออน) ที่พืชดูดใช้เป็นปริมาณมากที่สุดในบรรดาแคทไอออนต่าง ๆ โพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในพืช นับตั้งแต่การสังเคราะห์แสง การหายใจ การลำเลียงสารประกอบที่ได้จากการสังเคราะห์แสง การสร้างโปรตีนและน้ำมันในพืช และมีบทบาทในการเป็นคะตาลิสของเอนไซม์ต่าง ๆ ดังนั้นหากพืชขาดโพแทสเซียมจะทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตลดลง (ปัทมา, 2547) โพแทสเซียมในดินมีหลายรูปแบบตามการแบ่งด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้นจากรูปที่ออกมาได้ง่ายไปจนถึงยากที่สุดตามวิธีของ Tessier et al. (1979) ที่ปรับปรุงโดย Wada and Wada (1999) แบ่งออกเป็น 4 รูป ดังนี้ 1. รูปที่แลกเปลี่ยน 2. รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ เช่น โพแทสเซียมที่จับกับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส 3. รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ เช่น สารฮิวมิก และ 4. รูปคงค้างของแข็งซึ่งอยู่กับของแข็งในดินในสภาวะสมดุลกัน เช่น รูปที่ถูกตรึงอยู่ในแร่ธาตุ เมื่อโพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลงจากการดูดกินของรากพืช หรือถูกชะละลายและไม่มีการใส่ปุ๋ยชดเชยส่วนที่สูญเสียไป จะทำให้มีการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากรูปอื่นๆ ออกมาในสารละลายดิน เช่น โพแทสเซียมที่ถูกตรึง หรือโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่เพื่อรักษาสมดุล การปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Havlin et al., 2005 ; Brady and Weil, 2008) การปลูกพืชติดต่อกันนานๆ ส่งผลให้โพแทสเซียมรูปต่างๆ ในดินลดลง เช่น โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Cheng et al., 2007) โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (Samadi et al., 2008 ; Darunsontaya et al., 2012) และโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Karthikakuttyamma et al., 1998 ; Ulaganathan et al., 2012)

ดังนั้นการศึกษารูปแบบของโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมักและการเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่จึงมีความสำคัญในการบ่งบอกว่าโพแทสเซียมที่อยู่ในปุ๋ยหมักมีศักยภาพในการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ณ ระยะเวลาของกระบวนการหมักที่แตกต่างกัน การเลือกระยะเวลา ชนิดของปุ๋ยหมักที่เหมาะสม เพื่อให้ได้รูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากที่สุดจึงมีความสำคัญ อันนำไปสู่การนำไปใช้จริงของเกษตรกรได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยมูลหมูและมูลไก่ที่ปลดปล่อยโพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ตลอดจนศักยภาพในการปลดปล่อยโพแทสเซียม ณ เวลาการหมักต่างๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ด้วยการสกัดแบบลำดับขั้นตลอดระยะเวลาการหมัก

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของปุ๋ยหมักทางกายภาพและเคมีที่อาจมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโพแทสเซียม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ปุ๋ยหมักต่างชนิดกันส่งผลให้ปริมาณและรูปแบบของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักต่างกัน

1.3.2 ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยต่างกันส่งผลให้ปริมาณของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษามีสองสูตร คือ ปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ ทำการหมักเป็นระยะเวลา 119 วัน เก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน วิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ได้แก่ ปริมาณหินและกรวด ความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้ ค่าความเป็นกรดด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรียวัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณธาตุอาหารหลัก ตลอดจนศึกษารูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียม 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) โดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR) (Fernández et al., 2004; Zimmerman and Weindort, 2010) นำมาวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมโดยใช้เครื่องเฟลมอะตอมมิกแอปซอฟชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer, FAAS) เปรียบเทียบปริมาณของรูปแบบที่เกิดขึ้น ณ ระยะเวลาการหมักต่างๆ และหาความสัมพันธ์ทางสถิติของแต่ละรูปแบบกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่อาจมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและปริมาณโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักแต่ละชนิด โดยใช้สหสัมพันธ์ของเพียร์สันและใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการเปรียบเทียบเชิงพหุด้วยวิธีของดันแคนด้วยโปรแกรม SPSS V. 18

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยมูลหมูและมูลไก่ที่ปลดปล่อยโพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ตลอดจนศักยภาพในการปลดปล่อยโพแทสเซียม ณ เวลาการหมักต่างๆ

1.5.2 ทราบถึงปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ตลอดระยะเวลาการหมัก

1.5.3 ทราบถึงคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโพแทสเซียม

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปุ๋ยหมัก

2.1.1 นิยาม คำสำคัญ และความหมาย

ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 ได้ให้คำจำกัดความของปุ๋ยไว้ว่า “ปุ๋ย” หมายถึง สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ สำหรับใช้เป็นธาตุอาหารแก่พืชได้ไม่ว่าโดยวิธีใด หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเคมีในดิน เพื่อบำรุงความเติบโตแก่พืช (นรีลักษณ์, 2548)

2.1.1.1 ปุ๋ยหมัก (Compost)

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยเซลลูโลส (cellulose decomposer) ซึ่งประกอบไปด้วย แบคทีเรีย แอคทิโนมัยซิส และเชื้อรา ความเร็วในการย่อยสลายนอกจากขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพและขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำปุ๋ยหมักได้แก่ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟาง ข้าว แกลบ กากอ้อย เศษตอซังพืช และมูลสัตว์ทางการเกษตรจากชุมชนมาผลิตด้วยวิธีการทำให้ชื้น สับ บด ร่อน และผ่านการหมักอย่างสมบูรณ์ จนแปรสภาพไปจากเดิม ซึ่งกระบวนการหมักเป็นการย่อยสลายทางชีววิทยา โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (กรมวิชาการเกษตร, 2548) เพื่อให้สารอินทรีย์สลายตัวผุพังจนมีลักษณะเป็นสารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่น สีน้ำตาลปนดำ มีอัตราส่วนประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แทนปุ๋ยเคมีได้ เช่น มูลสัตว์ เศษซากพืชตระกูลถั่ว เมื่อกระบวนการย่อยสลายเศษพืชและวัสดุเสร็จสมบูรณ์ก็จะได้ปุ๋ยอินทรีย์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ทำให้ดินโปร่งเพิ่มความพรุนให้แก่ดิน เกิดการระบายน้ำและอากาศในดินดีขึ้น ช่วยให้ดินอุ้มน้ำและดูดซับธาตุอาหารพืชดีขึ้น เพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีพของพืช ทำให้พืชและจุลินทรีย์เจริญเติบโตและส่งเสริมกิจกรรมต่างๆ ได้ดีขึ้น (ทิพวรรณ, 2547)

2.1.1.2 ปุ๋ยคอก (Animal manure)

ปุ๋ยคอกเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากมูลสัตว์ต่างๆ เช่น มูลหมู มูลไก่ มูลเป็ด มูลวัว มูลค้างคาวเป็นต้น เป็นผลพลอยได้จากการเลี้ยงสัตว์ที่มีการนำมาใช้ทางการเกษตรเป็นเวลานานมาแล้ว มูลสัตว์นี้เป็นส่วนของซากพืชซากสัตว์จากอาหารสัตว์ที่ผ่านกระบวนการการย่อยสลายจากระบบย่อยอาหารของสัตว์มาแล้วจึงเป็นธาตุอาหารพืช ไม่เพียงแต่จะให้อินทรียวัตถุอาหารพืชแก่ดิน แต่ยังช่วยป้องกันและรักษาดินตลอดจนช่วยปรับปรุงดินให้เหมาะสมต่อการปลูกพืช (นรีลักษณ์, 2548) ซึ่งมูลสัตว์แต่ละชนิดจะมีธาตุอาหารชนิดใดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่สัตว์นั้นกินเข้าไปเป็นปัจจัยสำคัญ รวมทั้งปัจจัยอื่นๆได้แก่ ระบบการย่อยอาหารของสัตว์ วิธีการให้อาหาร รวมทั้งการจัดการรวบรวมมูลและการเก็บรักษา (วีระ, 2536) ค่าของธาตุอาหารในมูลสัตว์จึงแตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณเฉลี่ยธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อพืชของมูลสัตว์ชนิดต่างๆ

สารอาหารหลัก (%)			
ชนิดของมูลสัตว์	Nitrogen (N)	Phosphorus(P)	Potassium (K)
มูลวัว*	1.95	1.76	0.48
มูลไก่*	2.28	5.91	0.32
มูลหมู**	2.69	3.24	1.12

ที่มา : * รสสุคนธ์ (2549); **ดวงใจ (2553)

2.1.1.3 การเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก (Maturity)

การเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก หมายถึง สภาพของปุ๋ยซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้ปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่นั้น (Mature compost) ปุ๋ยจะมีลักษณะนุ่มยุ่ยขาดออกจากกันได้ง่าย มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิภายนอก มีสารที่เป็นพิษต่อพืชน้อย (Phytotoxic compounds) เช่น แอมโมเนียม และกรดอินทรีย์โซ่สั้น (Short-chain organism acids) การประเมินการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบว่ากระบวนการหมักสิ้นสุดแล้วพร้อมที่จะนำไปใส่ลงดินได้อย่างปลอดภัย ไม่เป็นอันตรายต่อพืช และเนื่องจากในปัจจุบันผู้ใช้ปุ๋ยหมักสนใจคุณภาพของปุ๋ยหมักมากขึ้น ปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่จึงเป็นที่ต้องการของตลาด (ธงชัย, 2546)

2.1.2 กระบวนการหมักและปัจจัยที่มีอิทธิพล

กระบวนการทำปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ ในการย่อยสลายอินทรียวัตถุ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในด้านความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน รวมทั้งอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ให้ได้ผลผลิตที่เป็นอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายแล้ว ซึ่งมีคุณค่าในการปรับปรุงคุณภาพดิน (สุธรรม, 2545)

2.1.2.1 กระบวนการหมัก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1. การหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Decomposition)

การหมักแบบใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการย่อยสลายอินทรียวัตถุของจุลินทรีย์ในบรรยากาศที่ใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส ลิกนิน ฯลฯ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นอินทรียวัตถุที่มีความคงตัว น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และพลังงานความร้อน ดังปฏิกิริยาที่ 1

$$\text{Organic Matter (CHONS)} + \text{Nutrients} + O_2 \xrightarrow{\text{Aerobic bacteria}} \text{Resistant Organic Matter} + H_2O + CO_2 + NH_3 + SO_2 + \text{New Cell} + \text{Heat} \quad (1)$$

2. การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Decomposition)

การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในอากาศ 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์สร้างกรด (acid Forming anaerobic bacteria) และจุลินทรีย์สร้างมีเทน (methanogenic anaerobic bacteria) ซึ่งของเสียที่นำมาใช้ในการหมักจะอยู่ในลักษณะกึ่งของเหลว (slurry) การย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้นอุณหภูมิจะต่ำและมีกลิ่นเหม็นเกิดขึ้น โดยมีอัตราการสลายตัวอย่างช้าๆ และใช้เวลานาน แต่มีข้อดี คือ ไม่ต้องดูแลมาก ดังปฏิกิริยาที่ 2

$$\text{Organic Matter (CHONS)} + \text{Nutrients} + H_2C \xrightarrow{\text{Anaerobic bacteria}} \text{Resistant Organic Matter} + CO_2 + CH_4 + NH_3 + H_2S + \text{New Cell} + \text{Heat} \quad (2)$$

2.1.2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก

กระบวนการย่อยภายในกองปุ๋ยหมักนั้นเกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพแวดล้อมในกองปุ๋ยหมักหลายประการ ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายนั้นอาจจะส่งเสริมหรือลดอัตราการย่อยสลายของวัสดุได้ ดังนั้นสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ภายในกองปุ๋ยหมักจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์และมีผลถึงอัตราการย่อยสลายด้วย สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก แบ่งออกได้ดังนี้ คือ

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวชี้วัดว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงในกองปุ๋ยหมักจะเกิดช้าหรือเร็ว เป็นตัวบอกกิจกรรมการย่อยสลายเศษพืชของจุลินทรีย์ อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะอยู่ในช่วง 45-70 องศาเซลเซียส (Zeng et al., 2009; Fourti et al., 2010) ถ้าเกิน 70 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์ตายหรือชะงักการเจริญเติบโตได้ ซึ่งจะต้องมีการกลับกองเพื่อลดอุณหภูมิ จนกระบวนการย่อยเสร็จสมบูรณ์ คืออุณหภูมิในกองเท่ากับอุณหภูมิภายนอก (ทิพวรรณ, 2542; Miaomiao et al., 2009)

2. ความชื้น

ความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการหมักปุ๋ยจะอยู่ประมาณร้อยละ 40-65 (Michael et al., 1995) ซึ่งความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักจะแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบตั้งต้นของปุ๋ยหมักนั้น โดยทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 ถ้าความชื้นของปุ๋ยหมักมากเกินไปจะทำให้อัตราการไหลผ่านของอากาศเป็นไปได้ยากอาจทำให้เกิดการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Bernal, 2009) แต่ถ้าหากความชื้นต่ำเกินไปก็ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง (ประกาศิต, 2549) จากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงจากการระเหยของน้ำและการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ โดยปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่ควรมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 35 ตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ของกรมวิชาการเกษตร (2548)

3. ลักษณะของวัสดุหมัก

วัสดุหมักเป็นส่วนประกอบของวัสดุอินทรีย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมักปุ๋ย วัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาหมักปุ๋ยนั้นมีความแตกต่างกันไป เช่น วัสดุ

เหลือในการเกษตรหรือครัวเรือน เช่น ฟางข้าว ผักตบชวา หญ้า ส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลัง เมื่อเป็นปุ๋ยหมักจะให้ธาตุอาหารหลักแก่พืชในปริมาณที่สูง หรืออาจเป็นวัสดุที่ย่อยยาก เช่น แกลบ ขี้เลื่อย กากอ้อย ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานกว่าในการย่อยสลาย อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งหลายนี้มีส่วนผสมของน้ำตาล โปรตีน ไขมัน เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกัน (สุธรรม, 2545)

4. ค่าความเป็นกรดด่าง

ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยทั่วไปค่าที่เป็นกลาง (pH 7) จะเกิดการสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าค่าความเป็นกรดด่างที่สูง ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างที่ต่ำกว่า 4.5 หรือสูงกว่า 9.0 มักมีผลยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.5-8.0 และค่าที่สนับสนุนกิจกรรมของจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมักอยู่ในช่วง 6.7-9.0 (Bernal et al., 2009) ค่าความเป็นกรดด่างส่วนใหญ่ปุ๋ยหมักมูลไก่จะสูงเนื่องจากกรดยูริกซึ่งมีมากในมูลไก่ถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมากในระยะแรกของกระบวนการหมักที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิสูง (ภัทราพร, 2555; McCall, 1980; Charest and Beauchamp, 2001) การที่ค่าความเป็นกรดด่างของกองปุ๋ยหมักอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางแสดงว่าปุ๋ยหมักนั้นเจริญเต็มที่ (Charest and Beauchamp, 2001; Aparna et al., 2007) เนื่องจากเมื่ออินทรียวัตถุถูกย่อยสลายจะมีลักษณะเป็นสารที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับค่าความเป็นกรดด่างที่ดีและมีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกได้มากขึ้นเป็นผลดีต่อต่อการนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน (มุกดา, 2548) โดยกรมวิชาการเกษตร (2548) ได้กำหนดค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง 5.5-8.5

5. ปริมาณอินทรียวัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของอินทรียวัตถุในวัสดุหมักเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงการย่อยสลายสารอินทรียวัตถุเหล่านั้นว่าจะมีไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์หรือไม่ และทำให้การย่อยสลายอินทรียวัตถุดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ (ยงยุทธและคณะ, 2541) ซึ่งอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่จัดว่าเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 20-30 (มุกดา, 2548) และเมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายแล้วอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนควรมีค่าไม่เกิน 20 ตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ของกรมวิชาการเกษตร (2548) และปริมาณอินทรียวัตถุที่เหลืออยู่ต้องมีเพียงพอในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยต้องมีไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 ของน้ำหนัก

2.1.3 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ได้ดังนี้ คือ

2.1.3.1 ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ ของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ถ้าเป็นดินเนื้อละเอียดอัดตัวกันแน่น เช่น ดินเหนียว ปุ๋ยหมักก็จะช่วยให้ดินนั้นมีสภาพร่วนซุยมากขึ้นไม่อัดตัวกันแน่นทึบ ทำให้การระบายน้ำและอากาศดีขึ้น ช่วยให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำหรือดูดซับน้ำที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชไว้ได้มากขึ้น ทำให้รากพืชเจริญเติบโตได้รวดเร็ว แข็งแรง และแตกแขนงได้มากขึ้นทำให้มีระบบรากที่สมบูรณ์

2.1.3.2 ประโยชน์ด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารที่จะปลดปล่อยออกให้แก่พืชอย่างช้าๆ สม่ำเสมอ โดยทั่วไปแล้วปุ๋ยหมักจะมีแร่ธาตุอาหารหลักพืชครบ กล่าวคือ มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังมีธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ อีกเช่น แคลเซียม กำมะถัน แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง โบรอน โมลิบดีนัม คลอรีน และธาตุอื่นๆ ซึ่งปกติแล้วปุ๋ยเคมีจะไม่มีหรือมีเพียงบางธาตุเท่านั้น ธาตุเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่น้อยกว่าธาตุอาหารหลักเพียงแต่พืชต้องการในปริมาณน้อย นอกจากจะเป็นการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในพืชแล้ว ปุ๋ยหมักยังมีคุณค่าในแง่การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินอีก เช่น ช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชในดินแปรสภาพไปอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่ายเป็นการช่วยถนอมแร่ธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกน้ำฝนหรือน้ำชลประทานชะล้างสูญหายไปได้ง่าย (ธงชัย, 2546) จะเห็นได้ว่าแม้ปุ๋ยหมักจะมีปริมาณแร่ธาตุอาหารไม่เข้มข้นเหมือนปุ๋ยเคมีแต่ก็มีลักษณะดีอื่นๆ ที่ช่วยรักษาและปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินได้เป็นอย่างดี

2.2 รูปแบบของโพแทสเซียมในดิน

รูปของโพแทสเซียมในดิน สามารถจำแนกออกเป็นรูปของโพแทสเซียมในด้านทางเคมีและรูปของโพแทสเซียมตามความเป็นประโยชน์ของพืช มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 รูปในทางเคมี (Chemical form)

โพแทสเซียมในดินที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในแง่ที่เกี่ยวข้องกับการเป็นธาตุอาหารพืชนั้น ปริมาณเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 รูปใหญ่ๆ ดังนี้

2.2.1.1 รูปที่ละลายน้ำได้ (Water soluble form)

รูปที่ละลายน้ำได้โพแทสเซียมที่อยู่ในสภาพของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวกละลายอยู่ในดินซึ่งพืชจะใช้ประโยชน์ได้ทันทีโดยดูดกินไปใช้ทางราก เป็นรูปที่มีอยู่ในดินเป็นปริมาณน้อยที่สุด (ยงยุทธ, 2543)

2.2.1.2 รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable form)

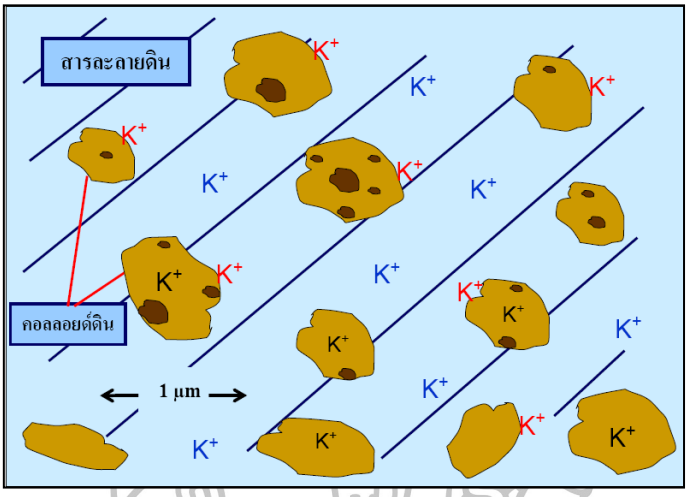
รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในสภาพของไอออน (K^+) ที่ดูดยึดเอาไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดินโดยเฉพาะแร่ดินเหนียว ปริมาณของโพแทสเซียมรูปดังกล่าวนี้ในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้แล้วจะมีอยู่เป็นปริมาณที่น้อยกว่ามาก แต่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่ายกว่าเพราะบางส่วนจะถูกปลดปล่อยให้ออกมาอยู่ในสภาพของไอออนละลายอยู่ในสารละลายดินได้ไม่ยากนัก ดังภาพที่ 1 (ยงยุทธ, 2543)

2.2.1.3 รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Nonexchangeable form)

รูปไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ รูปของโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในดินจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ยากมาก แบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อย คือ

1. โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ชนิดต่างๆ ในดิน
2. โพแทสเซียมที่ถูกตรึงเอาไว้โดยอนุภาคดินเหนียว

โพแทสเซียมส่วนนี้จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่ายกว่าโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ในสภาพตามธรรมชาติ ปริมาณของโพแทสเซียมในรูปทางเคมีทั้งสามนั้นจะอยู่ในสภาวะที่สมดุลตลอดเวลา ซึ่งเขียนเป็นแผนผังได้ดังนี้



ภาพที่ 1 โพแทสเซียมที่อยู่ในสภาพของไอออน (K^+) ที่ดูดยึดเอาไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดิน
ที่มา : ปัทมา (2547)

K แลกเปลี่ยนไม่ได้ถูกตรึง ⇌ K แลกเปลี่ยนได้ ⇌ K^+ ในสารละลายดิน
(Nonexchangeable K) (Exchangeable K) (soil soluble K)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมในสารละลายดินก็จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ติดตามกันไปเป็นลูกโซ่ ตัวอย่างเช่น พืชดูดโพแทสเซียมในสารละลายดินไปใช้การเปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาสมดุลของปริมาณของโพแทสเซียมในดินก็จะเกิดขึ้น คือ โพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้บางส่วนก็จะถูกเปลี่ยนมาเป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

2.2.2 รูปตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (Availability from)

2.2.2.1 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที (Relative unavailable form)

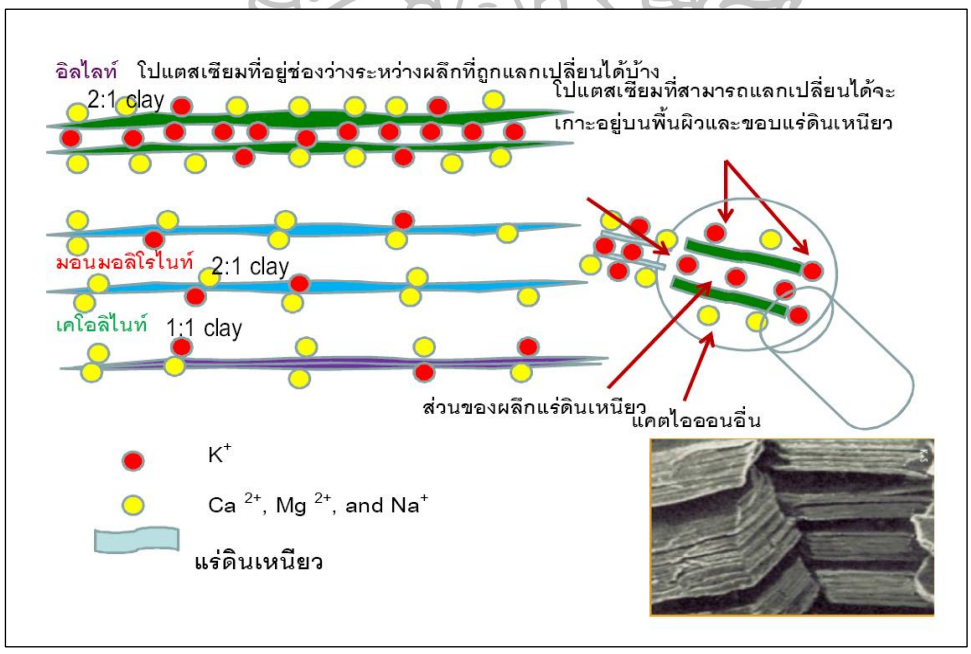
โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแร่เฟลด์สปาร์และไมกา เป็นต้น มีอยู่ในดินเป็นปริมาณมากคือประมาณ 90-98% ของโพแทสเซียมที่มีอยู่ในดินทั้งหมด แร่เหล่านี้จะสลายตัวได้อย่างช้าๆ และจะปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังสมการที่ 1 (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

$2KAlSi_3O_8 + H_2CO_3 + H_2O \longrightarrow H_4Al_2Si_2O_9 + K_2CO_3 + 4SiO_2$ (1)

Microcline feldspar — Hydrated silicate Soluble carbonate

2.2.2.2 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้าๆ (Slowly available form)

โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้าๆ ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของโพแทสเซียมที่ถูกตรึง (Fixed) อยู่ระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียว เช่น Vermiculite, Montmorillonite และ illite เป็นต้น โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปนี้เรียกว่า Nonexchangeable potassium และพืชไม่สามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกเสียจากโพแทสเซียมที่ถูกตรึงนี้จะถูกปลดปล่อยออกมาเสียก่อน การที่มันจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ช้าเร็วแค่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับความสมดุลที่มีกับโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable K) และที่อยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย (Soil- solution K) (ปัทมา, 2547) ดังภาพที่ 2



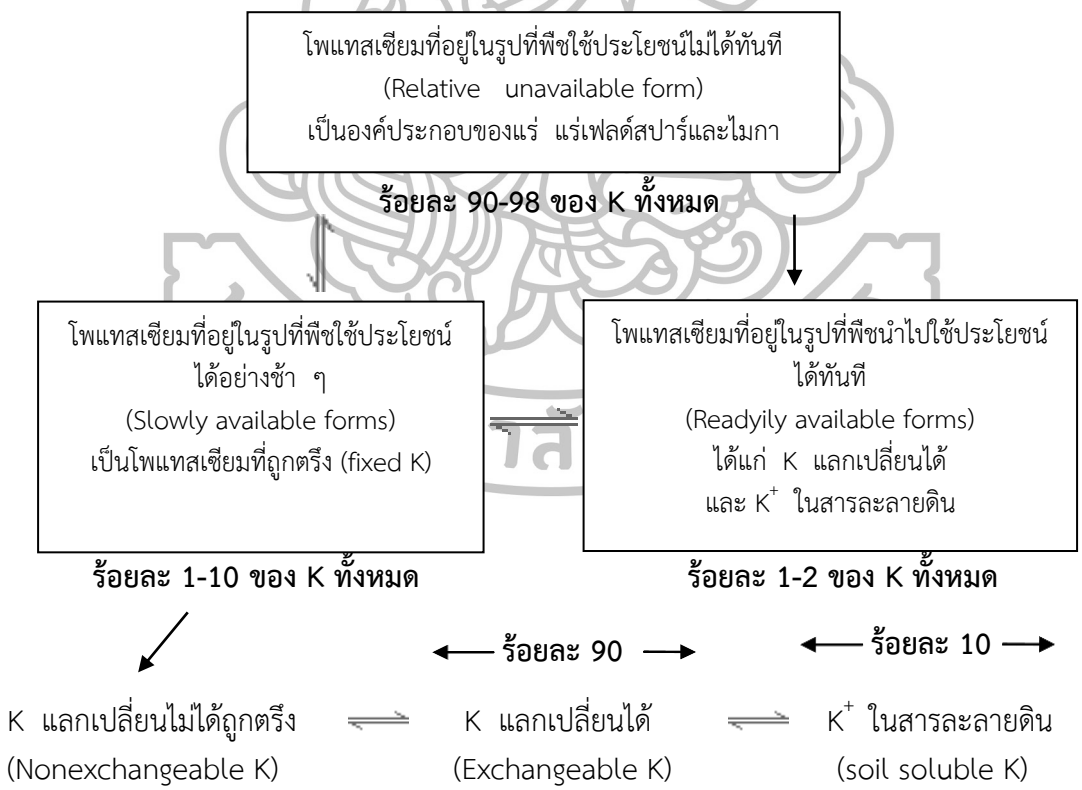
ภาพที่ 2 โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยเกาะอยู่บนพื้นผิวของแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Rich (1968)

2.2.2.3 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Readily available form)

โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในโพแทสเซียมไอออน (K^+) ในสารละลายดินและโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของสารคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในรูปของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของโพแทสเซียมไอออนในสารละลายดินนั้นพืชจะไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายกว่า แต่ขณะเดียวกันก็จะถูกชะล้างให้สูญหายไปได้ง่าย

กว่าโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แต่โพแทสเซียมทั้งสองรูปนี้จะอยู่ในสภาพที่สมดุลซึ่งกันและกันตลอดเวลา กล่าวคือเมื่อพืชดูดเอาโพแทสเซียมในสารละลายดินไปใช้ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียสมดุล โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ก็จะถูกปลดปล่อยให้ออกมาอยู่ในรูปของโพแทสเซียมไอออนในสารละลายดิน เพื่อรักษาสภาพที่สมดุลไว้แต่ถ้ามีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปในดินสมการก็จะเปลี่ยนไปในทิศทางตรงกันข้าม (ปัทมา, 2547)

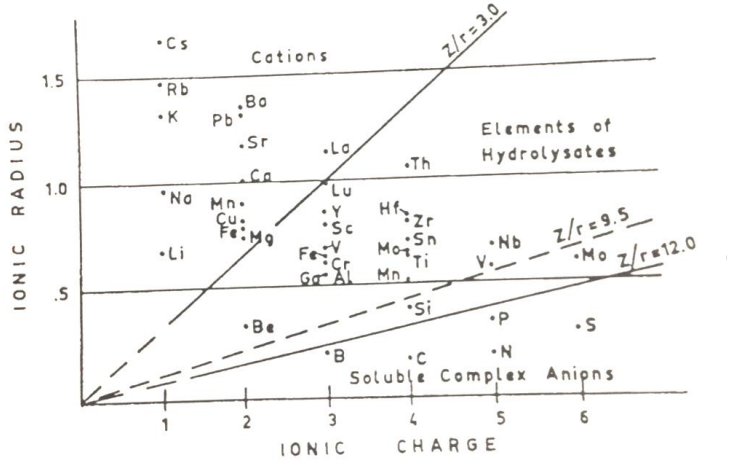
จะเห็นได้ว่าโพแทสเซียมทั้งสามรูป อยู่ในสมดุลกันแบบเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (dynamic equilibrium) ถ้าพืชดูดโพแทสเซียมในสารละลายดินและโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ไปมากจะทำให้เกิดการเสียดุลมาก โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Nonexchangeable K) ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้และโพแทสเซียมในสารละลายดินมาก เพื่อที่จะรักษาสมดุลไว้ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหากมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปในดินระดับของโพแทสเซียมไอออนในสารละลายในดิน และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จะสูงขึ้นกว่าปกติซึ่งจะทำให้เสียความสมดุล ดังนั้นบางส่วนของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จะถูกเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ปริมาณของโพแทสเซียมที่ถูกตรึงก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสมดุลใหม่ระหว่างโพแทสเซียมทั้งสามรูป (ยงยุทธ และคณะ, 2541) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 รูปและความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน
ที่มา: ดัดแปลงจากยงยุทธ และคณะ (2541)

2.3 ศักย์ไอออนิกโพแทสเซียม (Ionic Potential)

เนื่องจากโพแทสเซียมไอออน (K^+) เป็นแคทไอออนที่มีศักย์ไอโอนิกต่ำ (Z/r < 3.0) (ไพบูลย์, 2546) ดังภาพที่ 4 โพแทสเซียมอยู่ในหมู่ IA (alkali) ซึ่งมีประจุน้อยแต่มีขนาดใหญ่จึงละลายน้ำได้ดีมาก รูปแบบที่พบส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปไอออนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวต่างๆ (Bernardi et al., 2013) นอกจากนี้โพแทสเซียมไอออนจะถูกไล่ที่ด้วยแคทไอออนที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนสูงกว่า ตัวอย่างเช่น $K^+ < Ca^{2+} < Al^{3+}$ ทำให้การเคลื่อนย้ายและถูกชะล้างจึงเป็นไปในอัตราสูง (นัทธีรา, 2555)



ภาพที่ 4 ศักย์ไอออนิกของไอออน
ที่มา: Loughnan (1969)

2.4 บทบาทของโพแทสเซียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อพืชธาตุหนึ่งในจำนวน 16 ธาตุ โพแทสเซียมเมื่อเข้าไปอยู่ในพืชแล้วไม่ได้เปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์เหมือนกับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียม แต่จะอยู่ในรูปเกลืออินทรีย์หรืออนินทรีย์ซึ่งละลายได้ โพแทสเซียมจำเป็นต่อกิจกรรมหรือกระบวนการสร้างสมต่างๆ ในเซลล์สิ่งมีชีวิต ซึ่งมีอิทธิพลต่อพืชดังนี้ (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

2.4.1 กระบวนการสร้างน้ำตาลและแป้ง

ในพืชที่ขาดโพแทสเซียมจะมีปริมาณแป้งต่ำกว่าปกติ เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของ reducing sugar ต่อปริมาณแห้งทั้งหมดในพืชบางชนิดจะพบว่ามี reducing sugar และ nonreducing sugar ลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรากเมื่อดินมีโพแทสเซียมต่ำลง

2.4.2 การเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาล

จากการศึกษาของยงยุทธ และคณะ (2541) พบว่าการเคลื่อนย้ายของน้ำตาลในอ้อยหยุดชะงักเนื่องจากพืชขาดโพแทสเซียม ในอ้อยซึ่งมีโพแทสเซียมพอเพียงมีอัตราการเคลื่อนย้ายน้ำตาลเท่ากับ 2.5 เซนติเมตรต่อนาที แต่ในอ้อยที่ขาดโพแทสเซียมอัตราการเคลื่อนย้ายลดลงไปมาก ประมาณว่าน้อยกว่า 1.25 เซนติเมตรต่อนาที

2.4.3 กระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจ

ในพืชที่ขาดโพแทสเซียมจะมีอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง ในขณะที่อัตราการหายใจกลับเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสร้างเกิดขึ้นน้อยกว่าอัตราการทำลาย ส่งผลให้การสะสมแป้ง น้ำตาล การสร้างโปรตีนและการเพิ่มจำนวนเซลล์ในการเจริญเติบโตของพืชอยู่ในสภาวะผิดปกติ พืชจะมีการเจริญเติบโตน้อยลง การสะสมน้ำหนักแห้งลดลง (สุรเดช, 2530)

2.4.4 ความจำเป็นต่อกิจกรรมของเอนไซม์

โพแทสเซียมจะทำหน้าที่เป็น activator ของเอนไซม์หลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ photophosphorylation, glycolysis, oxidative phosphorylation, respiration, protein synthesis และ carbohydrate synthesis เป็นต้น โดยเอนไซม์ดังกล่าวเหล่านี้จะต้องมีไอออนบวกที่มีประจุ +1 ร่วมอยู่ด้วย กิจกรรมจึงจะสูงที่สุดและพบว่า K^+ จะไปทำหน้าที่ดังกล่าวและถึงแม้จะมีไอออนบวกที่มีประจุ +1 ชนิดอื่นเข้าไปทำหน้าที่แทนได้แต่ก็ไม่ได้ดีเท่ากับโพแทสเซียม (สุรเดช, 2530)

2.4.5 ความต้านทานโรค

อิทธิพลของโพแทสเซียมต่อการเป็นโรคของพืชที่พบบ่อยที่สุดคือ พืชที่ขาดโพแทสเซียมจะเป็นโรคมากกว่าพืชที่ได้รับโพแทสเซียมอย่างเพียงพอ โรคต่างๆ ที่เกิดกับพืชหลายชนิดจะลดลงถ้าดินมีโพแทสเซียมเพียงพอหรือใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมให้แก่ดินที่ขาดโพแทสเซียม ทั้งนี้เพราะว่าโพแทสเซียมจะทำให้ผนังเซลล์ของพืชหนาและมั่นคงยากต่อการเข้าทำลายของโรค นอกจากนี้โพแทสเซียมยังเป็นตัวเร่งให้เซลล์ทำงานได้ดีขึ้น (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

2.4.6 ความต้านทานอุณหภูมิต่ำ

พืชที่ขาดโพแทสเซียมมีโอกาสที่จะได้รับความเสียหายจากการสัมผัสสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำมากกว่าพืชที่ได้รับโพแทสเซียมอย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามประเทศไทยนั้นมีลักษณะภูมิอากาศค่อนข้างร้อนชื้น ดังนั้นโอกาสที่พืชจะได้สัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำถึงขั้นที่จะเป็นอันตรายมีน้อยมาก (อำนาจ, 2525)

2.4.7 คุณภาพของผักและผลไม้

การขาดโพแทสเซียมจะทำให้คุณภาพและปริมาณของผลผลิตของพืชต่ำลง เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลไม้ เช่น สี ขนาด และความหวาน และยังทำให้คุณภาพในการเก็บรักษาลดลงด้วย (ยงยุทธ และคณะ, 2541)

2.5 เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction techniques)

การสกัดแบบลำดับขั้น เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็ง และตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลว เนื่องจากเทคนิคการสกัดดังกล่าวมีวิธีการที่ไม่ยุ่งยากนักในการปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธี Community Bureau of Reference หรือเรียกสั้นๆ ว่าวิธี BCR นี้เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีของ Tessier et al. (1979) โดยกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวยุโรปได้ร่วมกันปรับปรุงวิธีการนี้เพื่อให้เกิดวิธีการที่ยอมรับได้ ที่ได้ค่าที่เหมือนเดิมเมื่อทำซ้ำในครั้งต่อๆ ไป (reproducible method) (นัทธีรา, 2555 อ้างจาก Farnán et al., 2004; Zimmerman and Weindort, 2010) แบ่งรูปแบบ

ของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable fraction) รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (oxide bound fraction) รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (organically bound fraction) และรูปคงค้างอยู่กับของแข็ง (residual fraction) โดยวิธีการของสารสกัดแบบลำดับขั้น จะเลือกใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยปรับปรุงขั้นตอนสุดท้ายให้ความรุนแรงของกรดลดลงตามวิธีของ Wada and Wada (1999) พิจารณารูปแบบต่างๆ ของโลหะได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 รูปแบบที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

โลหะที่อยู่ในรูปแบบแลกเปลี่ยนได้จะอยู่ในรูปไอออน สามารถหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมไปได้ง่าย เป็นรูปแบบที่พืชสามารถนาไปใช้ได้ทันที สารสกัดที่ใช้สกัดในรูปแบบนี้จะมีความรุนแรงน้อยที่สุด มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7

2.5.2 รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction)

โลหะในรูปแบบนี้จะอยู่ในรูปแบบของโลหะที่สามารถเกิดสารประกอบกับสารประกอบออกไซด์ได้ โดยถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยากกว่ารูปแบบแลกเปลี่ยนได้

2.5.3 รูปที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

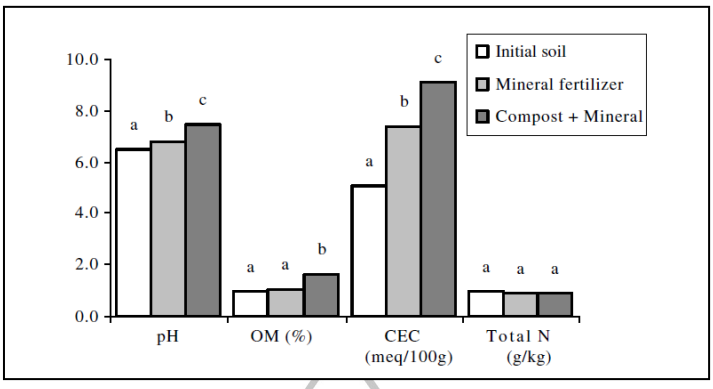
โลหะที่อยู่ในรูปแบบที่เกิดสารประกอบกับสารอินทรีย์นั้นจะถูกสารอินทรีย์ดูดซับโลหะไว้และค่อยๆ ปลดปล่อยโลหะออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การเกิดฝนกรดที่มีค่าความเป็นกรดด่างที่มากกว่า 4

2.5.4 รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)

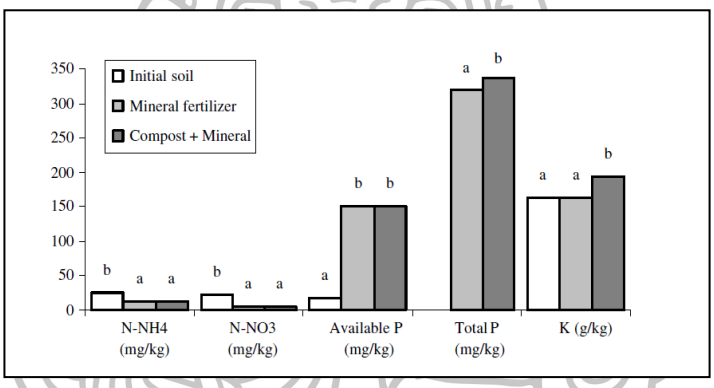
โลหะที่อยู่ในรูปคงค้างอยู่กับของแข็งพบว่าโลหะรูปแบบดังกล่าว จะมีโอกาสหลุดออกมาได้ยาก ยกเว้นเสียว่าเจอกับการชะล้างที่รุนแรง ตัวอย่างเช่น ฝนกรดที่มีค่าความเป็นกรดด่างที่น้อยกว่า 4 ซึ่งจัดเป็นฝนกรดที่มีระดับความรุนแรง เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gil et al. (2008) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปุ๋ยหมักจากมูลวัวเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในการปลูกข้าวโพด โดยนำปุ๋ยหมักมูลวัวที่ได้ที่แล้วนำมาใส่ดินบริเวณ Quintana de Rueda ที่ 42° 32’ 51’’ เหนือ และ 5°15’24” ตะวันตก เพื่อทดลองปลูกข้าวโพด แบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นปุ๋ยหมักผสมกับปุ๋ยเคมี ชุดที่ 2 เป็นปุ๋ยเคมีอย่างเดียวซึ่งเป็นชุดควบคุม ทำการทดลองบนพื้นที่ทดลอง 5,200 ตารางเมตร และเก็บดินด้านบน (15-20 เซนติเมตร) ก่อนการเพาะปลูกเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2546 เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ตลอดจนปริมาณสารอินทรีย์ หลังจากปลูกข้าวโพดและเก็บเกี่ยวผลผลิตเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2547 ทำการเก็บตัวอย่างดินอีกครั้ง พบว่าการเติมปุ๋ยหมักผสมกับปุ๋ยเคมีทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในดินเพิ่มขึ้น และความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 5 ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังภาพที่ 6 มากกว่าการเติมปุ๋ยเคมีแต่เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการเพาะปลูกข้าวโพดและหลังจากปลูกข้าวโพดและเก็บเกี่ยวผลผลิต
ที่มา Gil et al. (2008)



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ของดินก่อนการเพาะปลูกข้าวโพดและหลังจากปลูกข้าวโพดและเก็บเกี่ยวผลผลิต
ที่มา Gi et al. (2008)

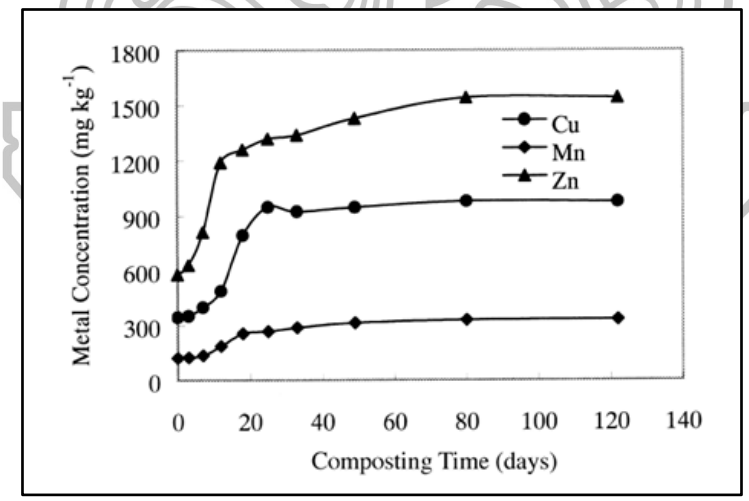
Jenn และ Shang (2001) ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ยหมักที่มีต่อลักษณะและการชะของทองแดง แมงกานีส และสังกะสีจากปุ๋ยหมักมูลหมู โดยนำมูลหมูส่วนที่เป็นของแข็งที่ได้จากการแยกสารละลายในฟาร์มสุกรที่เลี้ยงด้วยข้าวโพดและถั่วเหลือง แบ่งปุ๋ยหมักออกเป็น 2 กอง หมักเป็นระยะเวลา 122 วัน ทำการกลับ ผสม และเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 12, 18, 25, 33, 49, 80 และ 122 วัน เติมน้ำหลังการหมักให้ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 (w/w) เก็บตัวอย่างในถุงโพลีเอทิลีน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ร่อนอบแห้ง ทำการวิเคราะห์ ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ดังตารางที่ 2 ผลรวมความเข้มข้นของทองแดง แมงกานีส และสังกะสีเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับอินทรียวัตถุที่ลดลง ดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าชนิดของปุ๋ยหมักและวัตถุดิบหลักมีความสำคัญต่อกระบวนการ condensation of metals ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะปรากฏชัดในวันที่ 25 ของกระบวนการหมักเพิ่มขึ้นสวนทางกับการสลายตัวของอินทรียวัตถุ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูที่ระยะเวลาต่างๆ ของกระบวนการการหมัก

ระยะเวลา (วัน)	เถ้า (ก./กก.)	คาร์บอน (ก./กก.)	ไนโตรเจน (ก./กก.)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ค่าความเป็นกรดด่าง[a]
0	220	444	20.9	21.2	7.85
3	252	436	21.3	20.5	7.59
7	260	428	22.1	19.4	7.62
12	274	416	23.1	18.0	7.83
18	365	374	38.4	9.7	7.35
25	379	358	41.2	8.7	7.98
33	438	331	40.5	8.2	7.63
49	470	309	41.6	7.4	7.38
80	485	299	41.3	7.2	7.49
122	502	294	43.2	6.8	7.72

a วัดจากสารสกัดจากน้ำหมักของปุ๋ยหมัก

ที่มา Jenn and Shang (2001)



ภาพที่ 7 ผลรวมความเข้มข้นของทองแดง แมงกานีส และสังกะสีในปุ๋ยหมักมูลหมูตลอดกระบวนการการหมัก

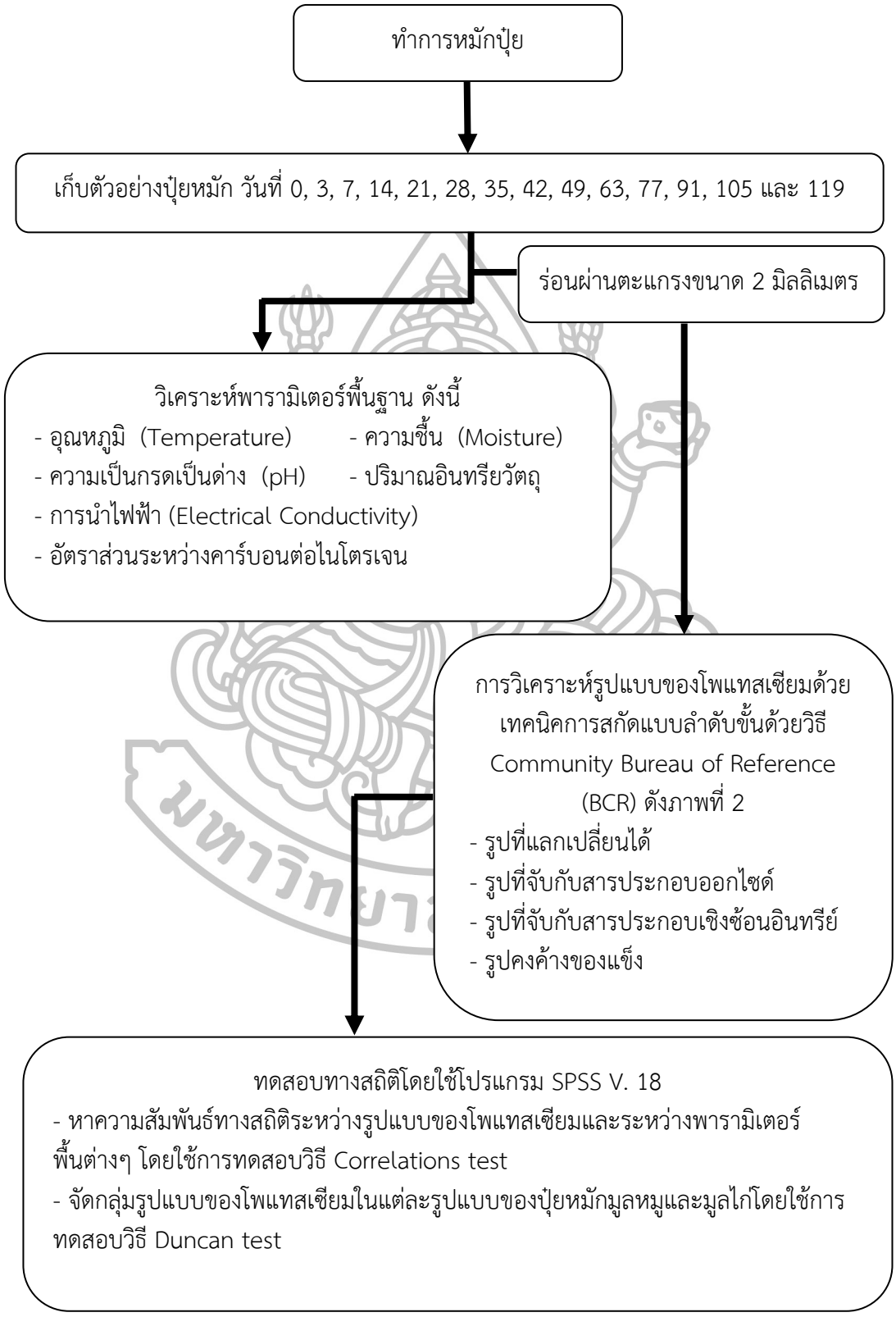
ที่มา Jenn and Shang (2001)

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งกระบวนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ กระบวนการหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานกับการเปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 และการหาปริมาณและรูปแบบของโพแทสเซียมและการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS version 18.0 แผนผังการทดลองโดยรวมดังภาพที่ 8 และตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ วิธีการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 วิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

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



ภาพที่ 8 แผนผังการทดลองโดยรวมของการศึกษา

3.1 สารเคมีและรีเอเจนท์ (chemical and regents)

สารเคมีและรีเอเจนท์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 โดยได้มีการระบุถึง Chemical Abstracets Service (CAS) number ของสารเคมีและบริษัทผู้ผลิตสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS number	บริษัท
Suprapur Nitric acid 65%	7697-37-2	Merck
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

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Instrumentation)

3.2.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204 ของบริษัท Mettler Toledo

3.2.2 เครื่องเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)

เครื่องเซนตริฟิวจ์สามารถปรับความเร็วในการเหวี่ยงสูงสุด 10,000 RPM และตั้งเวลาได้ ของบริษัท THAI VICTORY CO., LTD

3.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิ (Refrigerated incubator shaker)

เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิ สามารถปรับความเร็วและสามารถปรับเวลาการทำงานได้ หรือเลือกการทำงานแบบต่อเนื่อง สามารถทำอุณหภูมิได้ในช่วง -20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ของบริษัท Gallenkamp

3.2.4 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

อ่างควบคุมอุณหภูมิ ของบริษัท BLUPARD HWS

3.2.5 โถดูดความชื้น (Desiccator)

โถดูดความชื้นของบริษัท Bang Trading 1992 Co., Ltd

3.2.6 ตู้ดูดควัน (Fume Hood)

ตู้ดูดควันของบริษัท MM Medcenter Einrichtungen GmbH

3.2.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter)

เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง รุ่น 713 ปรับเทียบโดยใช้ buffer pH 4.0 และ buffer pH 7.0 ของบริษัท Metrohm

3.2.8 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer)

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมของบริษัท Perkin Elmer

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ในการศึกษานี้กำหนดประเภทของปุ๋ยหมักที่ต้องการศึกษาออกเป็น 2 สูตรด้วยกัน คือ ปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ ดังภาพที่ 9 ซึ่งในการผลิตปุ๋ยหมักนี้วัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมนำมาจากวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ซึ่งจะแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมักประกอบด้วย

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

ชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้งประกอบด้วย

รำละเอียด	ร้อยละ 0.90
กระดูกวัวป่น	ร้อยละ 1.50
มูลค้างคาว	ร้อยละ 0.60
ธาตุอาหารรอง	ร้อยละ 0.60 (ยี่ห้อบิกโฟล)
โดโลไมท์	ร้อยละ 0.30

(ก) (ข)

ภาพที่ 9 ปุ๋ยหมัก (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู และ (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

โดยในการทำปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรจะใช้ส่วนผสมทั้งสองชุดปริมาณดังตารางที่ 4 แต่ต่างกันตรงปุ๋ยหมักสูตรมูลหมูจะมีวัตถุดิบหลักเป็นมูลหมู ร้อยละ 76.63 (13 กระสอบ) ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่จะมีวัตถุดิบหลักเป็นมูลไก่ ร้อยละ 76.63 (13 กระสอบ) นอกจากนี้ยังมีการเติมขี้แดดนาเกลือเพิ่มเข้าไปในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรร้อยละ 5.69

ตารางที่ 4 ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม		ร้อยละ	แหล่งที่มา	อายุ
น้ำหมัก	ปลา	8.98	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	กากน้ำตาล	2.99		
	สับปะรด	0.30		
	สารเร่ง พด.2	0.01		
	รำละเอียด	1.50		
ของแห้ง	กระดูกวัวป่น	1.50	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	รำละเอียด	0.90		
	มูลค้างคาว	0.60		
	ธาตุอาหารรอง (Mg, Ca และ Fe)	0.60		
	โดโลไมท์	0.30		
มูลหมู		76.63	อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี	1 เดือน
มูลไก่		76.63	วัดไร่ขิง ตำบลไร่ขิง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม	2 เดือน
ขี้แดดนาเกลือ		5.69	นาเกลือ จังหวัดสมุทรสาคร	2 เดือน

3.3.1.1 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

การทำปุ๋ยหมักผู้ศึกษาได้ใช้ปุ๋ยหมักจากโครงงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี และคณะ (2558) โดยใช้พื้นที่ในตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นศูนย์การเรียนรู้ชุมชนตำบลบางช้าง และเป็นพื้นที่ที่ไกลจากแหล่งชุมชนง่ายต่อการป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนในการหมักปุ๋ยนั้น ในกรณีที่ทำปุ๋ยหมักมูลหมูจะเริ่มจากการนำเอามูลหมูที่เตรียมไว้มาใส่ในเครื่องบดผสม โดยการเติมน้ำเพื่อให้มูลหมูแยกออกจากกันและผสมให้เข้ากัน ให้มีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 จากนั้นก็ใส่ขี้แดดนาเกลือ ใส่ส่วนผสมน้ำหมักชุดที่ 1 ประมาณ 10 ลิตร และส่วนผสมของแห้งชุดที่ 2 ตามปริมาณข้างต้น ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพที่ 10 จากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปบรรจุใส่กระสอบปุ๋ยประมาณ 10 กระสอบ ปริมาณกระสอบละ 15 กิโลกรัม ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบไม่ต้องแน่นมาก แล้วนำกลับมาหมักต่อที่เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับขั้นตอนการหมักมูลไก่จะมีวิธีการเดียวกันกับการหมักปุ๋ยมูลหมู ดังที่กล่าวไปแล้ว

ภาพที่ 10 การผสมปุ๋ยหมัก
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

3.3.1.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักจากกองปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร โดยก่อนเก็บตัวอย่างจะทำการพลิกกลับกระสอบปุ๋ยเพื่อให้ปุ๋ยในกระสอบผสมกัน จากนั้นทำการเปิดกระสอบวัดอุณหภูมิและบันทึกลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมัก เช่น สี กลิ่น และลักษณะของวัสดุหมัก เป็นต้น โดยเก็บตัวอย่างปุ๋ย เมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ โดยจะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยทุกกระสอบ ทั้งหมดจำนวน 10 กระสอบ เก็บบริเวณตรงกลางของกระสอบปุ๋ยเพื่อเป็นตัวแทนของกองปุ๋ยในแต่ละสูตร เก็บตัวอย่างแต่ละสูตรให้ได้ประมาณ 2 กิโลกรัม เขียนฉลากติดข้างถุงเขียนอายุปุ๋ยหมักที่เก็บ เมื่อถึงวันที่ปุ๋ยหมักมีอายุการหมักครบจำนวนวันที่ต้องเก็บก็ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยจะเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักซ้ำกระสอบเดิม ทั้งหมดจำนวน 10 กระสอบเหมือนกัน ทำการเก็บตัวอย่างแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนครบอายุการหมักที่ 119 วัน

3.3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักวิเคราะห์

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยได้แล้วนำตัวอย่างปุ๋ยหมักมาผึ่งแห้งโดยวิธีทำให้แห้ง (Air dry) ในตู้ปลอดเชื้อที่อยู่ในห้องปลอดเชื้อหรือห้องสะอาด จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ได้แก่ การคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆออก และคัดแยกขนาดอนุภาคของปุ๋ยโดยใช้ตะแกรง (sieve) ขนาด 2 มิลลิเมตร ปุ๋ยหมักที่ได้ส่วนหนึ่งนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร และอีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของโพแทสเซียม พารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีจะนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียล แต่เมื่อต้องการนำมาวิเคราะห์ต้องนำตัวอย่างมาผึ่งให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนการวิเคราะห์ 24 ชั่วโมง

3.3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย การหาค่าความชื้น ค่าความเป็นกรดด่าง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณอินทรียวัตถุ การวิเคราะห์รูปแบบของโพแทสเซียมด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.2.1 การวิเคราะห์ความชื้น

การวัดความชื้นใช้หลักการหาความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์โดยทำการชั่งตัวอย่าง 0.2 กรัม ใส่ลงถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปวิเคราะห์ความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียล ด้วยตู้อบลมร้อน ทำการอบตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำออกมาผึ่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังอบ หลังจากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักคงที่ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความชื้น ดังสมการที่ 2

$$\text{ความชื้น}(\%) = \frac{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ - น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}} \times 100 \qquad (2)$$

3.3.2.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)

การวัดค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายด้วยหลักการของโพเทนชิออเมตรี (potentiometry) โดยการใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด จุ่มลงไปในสารละลายที่ต้องการทดสอบทำการวัดที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ และวัดค่าความเข้มข้นของ H^+ จากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิด ทำการวิเคราะห์โดยทำการชั่งตัวอย่างปุ๋ยที่ต้องการวิเคราะห์ 2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำปราศจากไอออน (น้ำ DI) 10 มิลลิลิตร นำมากวนเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที เพื่อให้สารแขวนลอยเกิดการเซ็ตตัว ทำการวัดค่าความเป็นกรดด่าง ในส่วนของสารแขวนลอยด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดด่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที ทำการวัดค่าความเป็นกรดด่างในส่วนของของเหลวเหนือตะกอน

3.3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter)

คาร์บอนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบของอินทรียวัตถุ ดังนั้นการหาปริมาณอินทรียวัตถุจึงสามารถหาได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยนำมาคำนวณปริมาณอินทรียวัตถุโดยประมาณ จากการคูณกับ “Van Bemmelen factor” ซึ่งเท่ากับ 1.724 จากหลักการที่ว่า อินทรียวัตถุมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ร้อยละ 58 (Allison et al., 1965) ใช้เป็นตัวคูณ (factor) ดังสมการที่ 2

ร้อยละปริมาณอินทรียวัตถุ = ร้อยละของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ x 1.724 (3)

3.3.2.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

สามารถวัดค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของตัวอย่างได้โดยการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon) หารด้วยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen) ดังสมการที่ 4 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมดจะใช้เทคนิคเผาไหม้แห้ง (Dry combustion) โดยวิธี Medium-Temperature Resistance Furnace Method ด้วยเครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC analyzer) และการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะใช้วิธี Kjeldahl Method ของ AOAO Official Method 955.04 (William, 2000)

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน} = \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (mg/g)}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/g)}} \quad (4)$$

3.3.2.5 การวิเคราะห์รูปแบบของโพแทสเซียมด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น

การวิเคราะห์รูปแบบของโพแทสเซียมด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้นนั้นมีหลักการในการวิเคราะห์ คือการใช้ตัวสกัดที่มีความรุนแรงน้อยค่อยๆ เพิ่มระดับความรุนแรงของตัวสกัดให้เพิ่มระดับมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น (BCR) ถูกพัฒนามาจากแนวคิดของ Tessier et al. (1979) โดยจำแนกรูปแบบของโลหะออกเป็น 4 รูปแบบดังนี้ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็ง ซึ่งวิธีการสกัดโลหะในรูปแบบต่างๆ จะมีวิธีการสกัดที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 11

1. รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction)

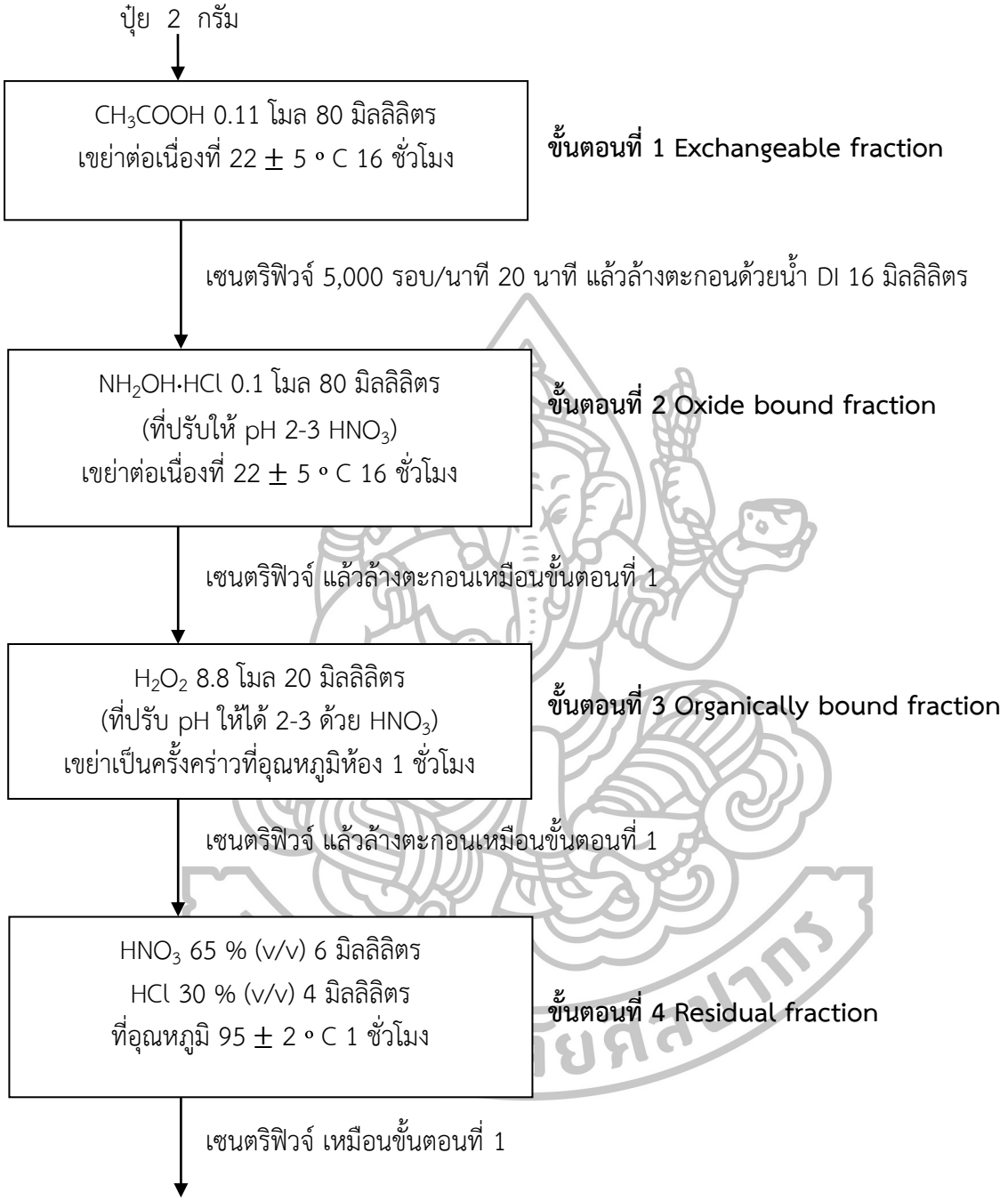
รูปที่แลกเปลี่ยนได้ขั้นตอนการสกัดโดย นำปุ๋ย 2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 0.11 M CH_3COOH 40 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่า ที่อุณหภูมิ 22±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง (High speed centrifuge) 5,000 รอบต่อนาที นาน 30 นาที จากนั้นนำสารละลายด้านบนตะกอนไปวิเคราะห์รูปที่แลกเปลี่ยนได้ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้ำ DI ประมาณ 20 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ต่อไป

2. รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction))

รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์วิเคราะห์จากการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 1 ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 0.1 M $NH_2OH{\cdot}HCl$ 40 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่า ที่อุณหภูมิ 22±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง (High speed centrifuge) และวิเคราะห์รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้า DI ประมาณ 20 มิลลิลิตร เพื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ต่อไป

3. รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction)

รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์วิเคราะห์โดยการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 2 ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 8.8 M H_2O_2 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยมือครั้งคราว 1 ชั่วโมง จนปริมาตรลดลงน้อยกว่า 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยการกลั่นแบบไหลย้อนกลับที่อุณหภูมิ 85± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เติม 1 M NH_4OAc 50 มิลลิลิตร เขย่าต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 22±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง (High speed centrifuge) และวิเคราะห์รูปประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ส่วนตะกอนที่เหลือล้างด้วยน้า DI ประมาณ 20 มิลลิลิตร เพื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์รูปคงค้างของแข็งต่อไป



สารละลายใสที่สกัดได้จากทุกขั้นตอนต้องมี pH < 2 มิฉะนั้นให้ปรับด้วยกรด HNO_3 จากนั้นนำไปหาความเข้มข้นโพแทสเซียมด้วย Flame Atomic Absorption Spectrophotometer

ภาพที่ 11 แผนภูมิการสกัดลำดับขั้นด้วยวิธี BCR โดยเปลี่ยนแปลงขั้นตอนที่ 5 รูปคงข้างของแข็งตามวิธีของ Wada and Wada (1999) (นัทธีรา, 2555)

4. รูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction)

รูปคงค้างของแข็งวิเคราะห์โดยการนำตะกอนจากขั้นตอนที่ 3 ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม HNO_3 65% (v/v) 3 มิลิลิตร และ HCl 30% (v/v) 2 มิลลิลิตร ให้ความร้อนบน Water bath อุณหภูมิ 95 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เขย่าเป็นครั้งคราว ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยง (High speed centrifuge) และวิเคราะห์รูปคงค้างของแข็งเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1

3.3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรม SPSS version 18.0 ทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับรูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียม ระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่โดยใช้ความสัมพันธ์ของเพียรสัน (Pearson correlation)

2. ทดสอบความแตกต่างในเชิงปริมาณโดยการจัดกลุ่มด้วยวิธี Duncan test ของปริมาณโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมัก ปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ ที่ทำการหมักเป็นระยะเวลา 119 วัน โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตลอดจนปริมาณและรูปแบบต่างๆ ของโพแทสเซียม 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable fraction) รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ (Oxide bound fraction) รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organically bound fraction) และรูปคงค้างของแข็ง (Residual fraction) เปรียบเทียบปริมาณของรูปแบบที่เกิดขึ้น ณ ระยะเวลาการหมักต่างๆ และหาความสัมพันธ์ของแต่ละรูปแบบกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่อาจมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและปริมาณโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักแต่ละชนิด

4.1 การแบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามอุณหภูมิ และการเปรียบเทียบคุณลักษณะตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร

กระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์มีบทบาทต่อกระบวนการหมักซึ่งตรวจติดตามด้วยการวัดอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจากนั้นนำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้มาใช้พิจารณาการแบ่งระยะของปุ๋ยหมัก และคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีที่เกิดขึ้นถูกนำมาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะพื้นฐานของกรมวิชาการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์ในการจำหน่ายมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การแบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามอุณหภูมิ

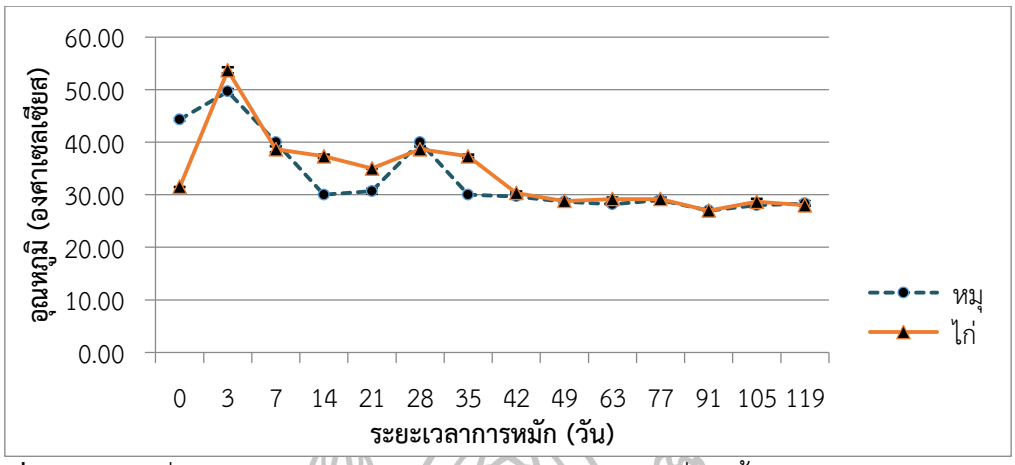
การย่อยสลายปุ๋ยหมักด้วยกระบวนการจากจุลินทรีย์สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมัก (Bernal et al., 1997; Zeng et al., 2009; Fourti et al., 2010) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) และระยะเจริญเต็มที่ (Mature phase) ดังภาพที่ 12 และตารางที่ 5

4.1.1.1 ระยะเริ่มผสม (Initial Phase)

ระยะเริ่มผสม วันที่ 0 เป็นวันที่นำส่วนผสมต่างๆ ของวัสดุหมักมาคลุกเคล้ากันมีการพรมน้ำที่มีส่วนผสมของน้ำหมักจุลินทรีย์ทำให้มีกลิ่นของส่วนผสมต่างๆ อย่างชัดเจน สีของปุ๋ยทั้งสองสูตรจะมีสีน้ำตาลของน้ำหมักซึ่งเป็นสีน้ำตาล สำหรับปุ๋ยหมักมูลไก่จะสังเกตเห็นแกลบที่มักใช้รองพื้นกรงไก่ปะปนมาด้วยพร้อมมูลไก่ ในวันนี้ปุ๋ยหมักมูลหมูมีอุณหภูมิ 44.33 องศาเซลเซียสและปุ๋ยหมักมูลไก่มีอุณหภูมิ 31.50 องศาเซลเซียส

4.1.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic Phase)

ระยะอุณหภูมิสูงนี้เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงที่ย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น จากนั้นปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา (เจนวิทย์, 2544 ; Tiquia et al., 1998) มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงในกองปุ๋ยหมักเกิดขึ้นอย่างมาก อุณหภูมิในกองปุ๋ยจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 3



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

ระยะนี้ปุ๋ยหมักมูลหมูอยู่ระหว่างวันที่ 1-35 ของการหมัก มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30.0-49.7 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักมูลไก่จะมีระยะนี้นานกว่าปุ๋ยหมักมูลหมูโดยมีค่าอยู่ในช่วงวันที่ 1-42 ของการหมัก อุณหภูมิอยู่ในช่วง 35.0-53.7 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีมีสีน้ำตาลโดยปุ๋ยหมักมูลไก่มีกลิ่นฉุนคล้ายแอมโมเนียรุนแรงกว่าปุ๋ยหมักมูลหมู เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงยูริกเป็นยูเรียและสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนียที่มีกลิ่นรุนแรง (McCall, 1980)

4.1.1.3 ระยะเจริญเต็มที่ (Mature phase)

ระยะเจริญเต็มที่เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกจากการที่จุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงลดบทบาทการทำงานลง แต่ยังมีจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic microbes) ที่ยังคงย่อยสลายอินทรียวัตถุอยู่ (Tiquia et al., 1998) โดยปุ๋ยหมักมูลหมูเริ่มตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป มีอุณหภูมิ 27.0-30.0 องศาเซลเซียส ส่วนปุ๋ยหมักมูลไก่เริ่มตั้งแต่วันที่ 42 ของการหมักปุ๋ย มีอุณหภูมิ 27.0-30.3 องศาเซลเซียส ซึ่งลักษณะของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรเริ่มแห้งและเกาะเป็นก้อนขนาดเล็กไม่สามารถเห็นส่วนผสมตั้งต้นได้ แต่ปุ๋ยหมักมูลไก่ยังมีแกลบเหลือปนให้เห็นอยู่ กลิ่นของปุ๋ยหมักมูลหมูมีกลิ่นฉุนคล้ายแอมโมเนียเล็กน้อยจนถึงไม่มีกลิ่นและมีสีน้ำตาลเทา และปุ๋ยหมักมูลไก่มีกลิ่นฉุนที่คล้ายแอมโมเนียรุนแรงถึงเล็กน้อยและมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งลักษณะปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรที่ร่วนซุยมีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้ม สอดคล้องกับลักษณะของปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่พร้อมที่จะนำไปใช้ (ทิพวรรณ, 2542)

4.1.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร

คุณลักษณะของปุ๋ยหมักทางกายภาพและเคมีเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรของปุ๋ยหมักเพื่อการจำหน่าย ที่ต้องประกอบไปด้วยปริมาณหินและกรวด ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ปริมาณอินทรียวัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม รวมทั้งต้องไม่มีปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท

(Mercury) พบว่าในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเป็นไปตาม ตารางที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณลักษณะพื้นฐานปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ ที่แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ย	คุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมัก	สูตรปุ๋ยหมัก	
		ปุ๋ยหมักสูตรมูลหมู	ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่
ระยะเริ่มผสม	ช่วงระยะเวลาการหมัก (วันที่)	0	0
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	32.7	32.7
	สี	สีน้ำตาล	สีน้ำตาล
	กลิ่น	กลิ่นของวัสดุหมักชนิดต่างๆชัดเจน	กลิ่นของวัสดุหมักชนิดต่างๆชัดเจน
	ลักษณะของวัสดุหมัก	เห็นส่วนผสมของวัสดุหมักต่างๆชัดเจนและมีความชื้น	เห็นส่วนผสมของวัสดุหมักต่างๆชัดเจนและมีความชื้น
ระยะอุณหภูมิสูง	ช่วงระยะเวลาการหมัก (วันที่)	1-34	1-41
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30.0-49.7	35.0-53.7
	สี	สีน้ำตาล	สีน้ำตาล - สีน้ำตาลเข้ม
	กลิ่น	กลิ่นคล้ายแอมโมเนียรุนแรงถึงปานกลาง	กลิ่นคล้ายแอมโมเนียรุนแรงถึงปานกลาง
	ลักษณะของวัสดุหมัก	ปุ๋ยหมักเริ่มแห้งเกาะเป็นก้อน	ปุ๋ยหมักเริ่มแห้งเกาะเป็นก้อน
ระยะอุณหภูมิคงที่	ช่วงระยะเวลาการหมัก (วันที่)	36-119	43-119
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27.0-30.0	27.0-30.3
	สี	สีน้ำตาลเทา	สีน้ำตาลเข้ม

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบคุณลักษณะพื้นฐานปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ ที่แบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ย	คุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมัก	สูตรปุ๋ยหมัก	
		ปุ๋ยหมักสูตรมูลหมู	ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่
ระยะอุณหภูมิคงที่	กลิ่น	กลิ่นแอมโมเนียเล็กน้อยจนไม่มีกลิ่นแอมโมเนีย	กลิ่นแอมโมเนียปานกลางถึงเล็กน้อย
	ลักษณะของวัสดุหมัก	ปุ๋ยหมักแห้งเกาะก้อนขนาดเล็ก และไม่เห็นส่วนผสมชัดเจน	ปุ๋ยหมักแห้งเกาะก้อนขนาดเล็ก และมองเห็นแกลบอยู่แต่ไม่เห็นส่วนผสมอื่นๆ

4.1.2.1 ปริมาณหินและกรวด

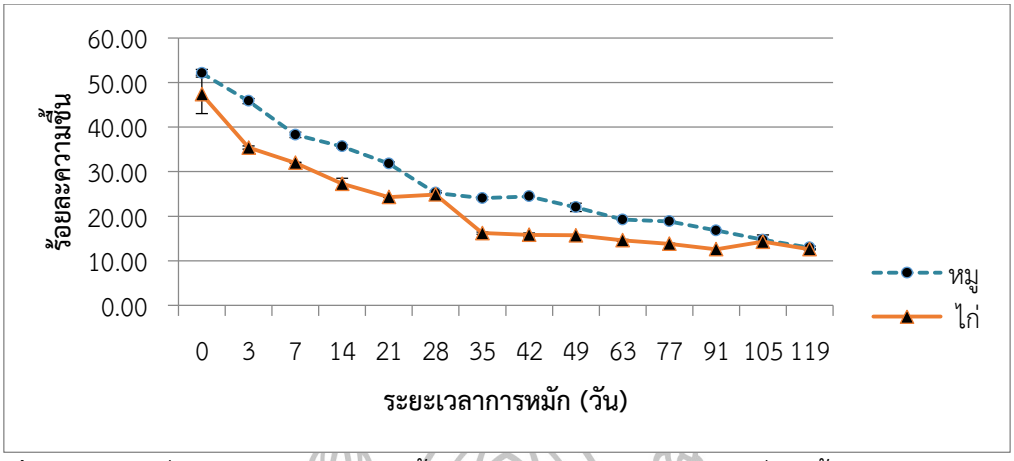
ปริมาณหินและกรวดตามเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) ขนาด 5 มิลลิเมตรต้องมีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) โดยปุ๋ยทั้งสองชนิดมีปริมาณหินและกรวดร้อยละ 2.0–5.0 และ 1.0–2.0 ตามลำดับ

4.1.2.2 ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้

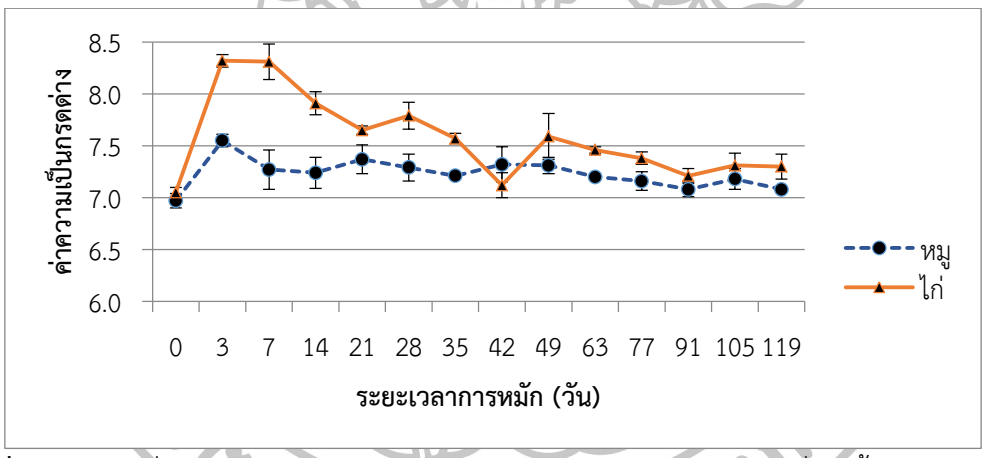
ความชื้นมีความสำคัญต่อกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ โดยในระยะเริ่มผสมปุ๋ยหมักต้องมีความชื้นที่พอเหมาะในช่วงร้อยละ 40-65 (Michael et al., 1995) ซึ่งพบว่าเมื่อเริ่มผสมปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีความชื้นร้อยละ 52.1 และ 47.4 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 และภาพที่ 13 จากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงจากการระเหยของน้ำและการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ โดยเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) เพื่อการจำหน่ายกำหนดความชื้นให้ต่ำกว่าร้อยละ 35 ซึ่งปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีความชื้นในระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่พร้อมการจำหน่ายอยู่ในช่วง 13.0-24.0 และ13.0-15.8 ตามลำดับ

4.1.2.3 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดด่างของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่อยู่ในช่วง 7.0-7.6 และ 7.0-8.3 ตามลำดับ โดยปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีค่าความเป็นกรดด่างสูงสุดวันที่ 3 ของการหมัก ดังภาพที่ 14 ค่าความเป็นกรดด่างส่วนใหญ่ปุ๋ยหมักมูลไก่จะสูงกว่ามูลหมูเนื่องจากกรดยูริกซึ่งมีมากในมูลไก่ถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมากในระยะแรกของกระบวนการหมักที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิสูง (ภัทราพร, 2555; McCall, 1980; Charest and Beauchamp, 2001) โดยค่าความเป็นกรดด่างของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีค่าระหว่าง 6.7-9.0 (Bernal et al., 2009) และเมื่อปุ๋ยเจริญเต็มที่ค่าความเป็นกรดด่างของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีแนวโน้มลดลงจากการเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ (Charest and Beauchamp, 2002) แต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) เพื่อการจำหน่ายที่กำหนดค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 5.5 – 8.5



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงร้อยละความชื้นของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

4.1.2.4 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

ปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วงสัปดาห์แรกของการหมักปุ๋ย เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ (Wong et al., 1995) โดยปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 6.9-11.6 และ 12.3-18.5 ดังภาพที่ 15 ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักมูลไก่ที่สูงกว่ามูลหมูอาจเนื่องมาจากปริมาณของธาตุอาหาร เช่น ธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลไก่มีค่าสูงกว่า (ดังตารางที่ 2) อย่างไรก็ดี ปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีค่าการนำไฟฟ้าเกินเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ที่กำหนดเกณฑ์ค่าการนำไฟฟ้าไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต่อเมตร ที่เป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ที่นำไฟฟ้าได้ในปุ๋ยหมัก และการเติมขี้แดดนาเกลือที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไอออนที่ค่อนข้างสูงลงในส่วนผสม (สรณพงษ์, 2544) จึงต้องใช้อย่างระมัดระวังเพราะจะทำให้ดินเค็ม

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่กับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการ พ.ศ. 2548

คุณลักษณะ	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
	0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ปริมาณหินและกรวด เกณฑ์ที่กำหนด ขนาด 5 มม. ≤ 5 %โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	3.5	2.5	3.0	3.5	5.0	3.0	4.5
ปุ๋ยหมักมูลไก่	1.0	1.0	1.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.5	2.0
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้ เกณฑ์ที่กำหนด ≤ 35 %โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	52.1	45.8	38.3	35.7	31.8	25.3	24.1	24.5	22.0	19.3	18.9	16.8	14.7	13.0
ปุ๋ยหมักมูลไก่	47.4	35.4	32.0	27.3	24.3	24.9	16.2	15.8	15.7	14.6	13.8	12.6	14.3	12.6
pH เกณฑ์ที่กำหนด 5.5 – 8.5														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	7.0	7.6	7.3	7.2	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.2	7.1
ปุ๋ยหมักมูลไก่	7.1	8.3	8.3	7.9	7.7	7.8	7.6	7.1	7.6	7.5	7.4	7.2	7.3	7.3
ค่าการนำไฟฟ้า (EC : Electrical Conductivity) เกณฑ์ที่กำหนด ≤ 6 dS/m														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	8.8	9.9	10.2	6.9	8.5	8.7	10.9	10.8	10.6	10.2	11.6	10.1	8.8	7.2
ปุ๋ยหมักมูลไก่	13.4	18.5	17.8	12.3	14.7	14.3	17.3	17.7	17.2	16.9	17.3	16.6	15.4	15.6
ปริมาณอินทรียวัตถุ เกณฑ์ที่กำหนด ≥ 30 %โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	50.1	49.3	45.0	46.4	45.8	44.6	47.8	45.4	46.1	55.4	41.3	40.6	39.4	41.0
ปุ๋ยหมักมูลไก่	68.5	57.4	54.2	47.1	53.6	49.9	51.7	49.6	48.4	49.2	48.1	44.5	43.7	46.2
C/N ratio เกณฑ์ที่กำหนด ≤ 20:1														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	15.1	23.2	11.0	11.1	11.3	10.8	11.2	11.1	11.4	13.5	9.6	9.1	9.6	9.8
ปุ๋ยหมักมูลไก่	13.4	12.2	10.8	10.3	10.2	9.0	9.6	9.1	10.3	9.3	10.1	9.1	9.4	9.1

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่กับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการ พ.ศ. 2548 (ต่อ)

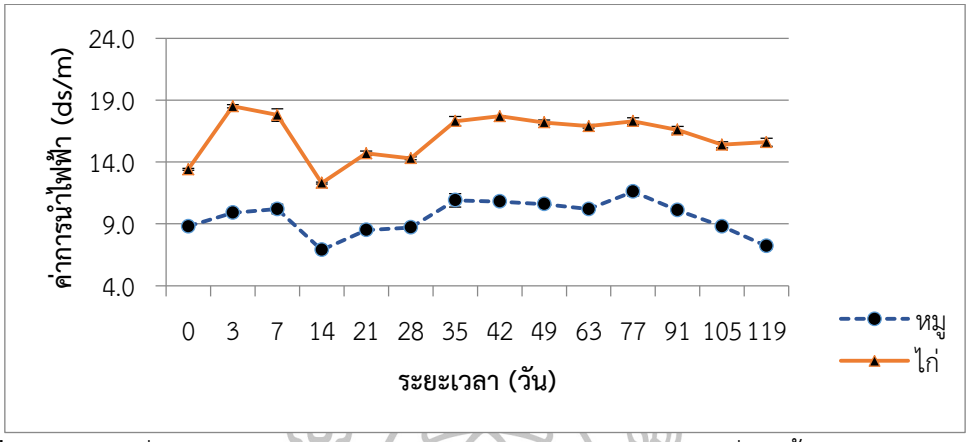
คุณลักษณะ	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
	0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ปริมาณธาตุอาหารหลัก														
ไนโตรเจน (Total Nitrogen) เกณฑ์ที่กำหนด ≥ 1.0 % โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	2.4	1.3	2.5	2.5	2.4	2.5	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.4	2.5
ปุ๋ยหมักมูลไก่	3.3	2.9	3.1	2.8	3.1	3.3	3.2	3.2	2.8	3.1	2.8	2.9	2.8	3.0
ฟอสฟอรัส (P_2O_5) เกณฑ์ที่กำหนด ≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	1.6	1.6	2.6	2.1	2.1	1.8	2.1	2.2	1.9	2.5	1.4	1.8	1.5	1.9
ปุ๋ยหมักมูลไก่	1.1	0.8	1.2	1.1	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	0.7	0.6	1.0	0.7	1.0
โพแทสเซียม (K_2O) เกณฑ์ที่กำหนด ≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก														
ปุ๋ยหมักมูลหมู	2.5	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.9	2.8	2.7	2.8	2.8	2.7	2.9	2.7
ปุ๋ยหมักมูลไก่	8.5	8.5	9.7	9.1	9.9	8.0	8.5	8.3	7.6	8.7	8.8	7.8	7.3	7.9

หมายเหตุ: โดย ☐ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และ ☐ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

* ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท (Mercury) พบว่ามีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

** ไม่พบ พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ ในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร

ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

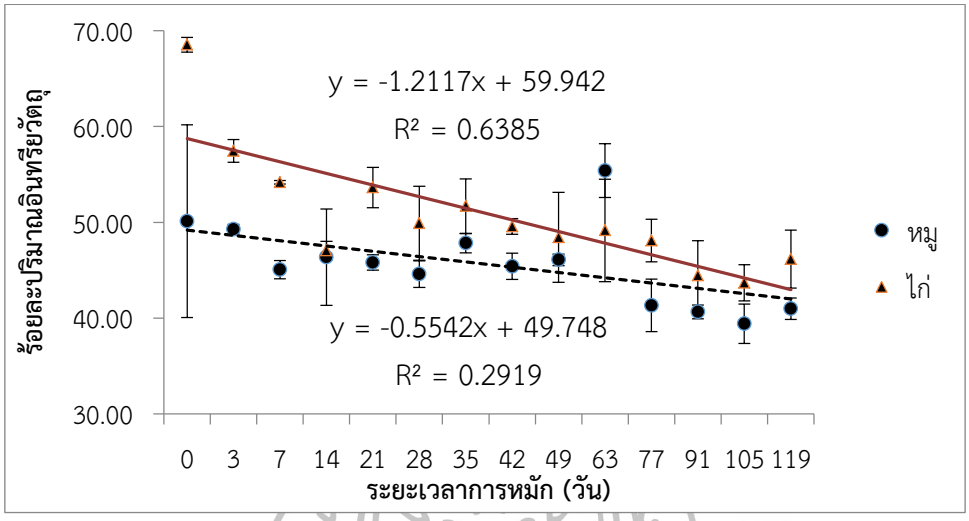
4.1.2.5 ปริมาณอินทรียวัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ระยะเริ่มผสมปริมาณอินทรียวัตถุที่ยังไม่ถูกย่อยสลายจะมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูงตามไปด้วย โดยปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยร้อยละ 46.3 และ 66.1 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ย 15.1 และ13.4 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) จากนั้นทั้งปริมาณอินทรียวัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะค่อยๆ ลดลง ดังภาพที่ 16 และภาพที่ 17 เช่นเดียวกับการย่อยสลายปุ๋ยหมักที่ทำจากมูลสัตว์ต่างๆ (Charest and Beauchamp, 2002; Huang et al., 2004 ;Bustamante et al., 2008; Bernal et al., 2009) โดยสารอินทรีย์ถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Tiquia and Tam, 2000) สัมพันธ์กับเวลาการหมักปุ๋ยที่เพิ่มขึ้น มีสมการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรียวัตถุกับระยะเวลาการหมักดังนี้

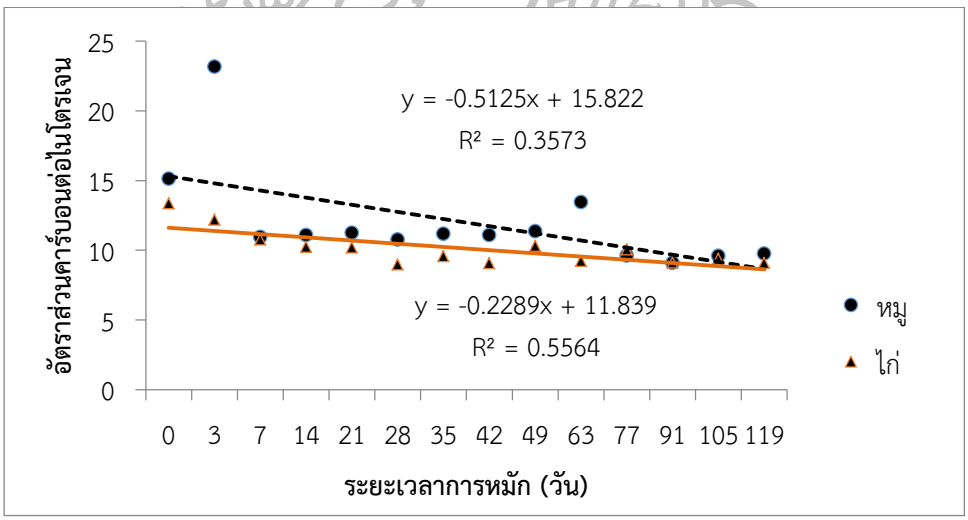
ปุ๋ยหมักมูลหมู OM (%) = -0.5542t + 49.748 R^2 = 0.2919
ปุ๋ยหมักมูลไก่ OM (%) = -1.2117t + 59.942 R^2 = 0.6385

โดย OM หมายถึง ปริมาณอินทรียวัตถุ; t หมายถึง ระยะเวลาการหมัก

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปุ๋ยหมักมูลหมูมีอัตราการสูญเสียอินทรียวัตถุน้อยกว่าจากความชันของกราฟที่น้อยกว่าถึง 2.4 เท่า และเมื่อคำนวณค่าการสูญเสียอินทรียวัตถุในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่เมื่อสิ้นสุดการศึกษา (วันที่ 119) เทียบกับวันที่เริ่มผสม (วันที่ 0) ปุ๋ยหมักมูลหมูจะมีการสูญเสียอินทรียวัตถุคิดเป็นร้อยละ 18.2 และปุ๋ยหมักมูลไก่การสูญเสียอินทรียวัตถุคิดเป็นร้อยละ 32.6 ที่มากกว่าปุ๋ยหมักมูลหมู แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของสารอินทรีย์ในปุ๋ยหมักมูลหมูที่มากกว่ามูลไก่ ที่ปริมาณไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณลิกนิน และโพลีฟีนอล เป็นองค์ประกอบคุณภาพของสารอินทรีย์ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูงจะย่อยสลายอย่างรวดเร็วทำให้มีการเพิ่มขึ้นในอินทรียวัตถุ ตรงกันข้ามกับสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบที่ต้านทานการสลายตัวสูง เช่น ลิกนิน และ



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรียวัตถุของปุ๋ยสูตรมูลหมูและมูลไก่กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.585$, $p<0.05$ และ $r = -0.728$, $p<0.01$ ตามลำดับ)
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยสูตรมูลหมูและมูลไก่กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.544$, $p<0.05$ และ $r = -0.646$, $p<0.05$ ตามลำดับ)
ที่มา นัทธีรา และคณะ (2558)

โพลีฟีนอล ย่อยสลายได้ยาก การสลายตัวจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นในอินทรียวัตถุในส่วนต่าง ๆ มีปริมาณน้อย (สุนทรี มีเพ็ชร์, 2543) ซึ่งอาจเนื่องมาจากปุ๋ยหมักมูลไก่ที่ประกอบไปด้วยฟางข้าวจะถูกเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการย่อยสลายในกระบวนการหมักง่ายกว่าทำให้อัตราการย่อยสลายอินทรียวัตถุเป็นไปได้เร็วและมากกว่า

และสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมักดังนี้

ปุ๋ยหมักมูลหมู C/N = -0.5125t + 15.822 R^2 = 0.3573

ปุ๋ยหมักมูลไก่ C/N = -0.2289t + 11.839 R^2 = 0.5564

โดย C/N หมายถึง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน; t หมายถึง ระยะเวลาการหมัก

ซึ่งจากภาพที่ 16 ถึงแม้ว่าปริมาณอินทรียวัตถุในปุ๋ยหมักมูลไก่จะมีมากกว่าปุ๋ยหมักมูลหมูแต่คุณลักษณะอินทรียวัตถุที่แตกต่างกันตลอดจนปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักมูลไก่มีมากทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในปุ๋ยหมักมูลไก่ ภาพที่ 17 มีค่าต่ำกว่าปุ๋ยหมักมูลหมู อย่างไรก็ดีพบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 35 และ 42 เป็นต้นไปตามลำดับ) มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) ที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 39.4-47.8 และ 43.7-49.6 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่กำหนดไว้ให้มีค่าน้อยกว่า 20 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9.1-13.5 และ 9.1-10.3 ตามลำดับ ดังนั้นการพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมักและกระบวนการย่อยสลายไม่เพียงแต่จะพิจารณาเพียงค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนยังต้องพิจารณาถึงปริมาณและคุณภาพของคาร์บอนและไนโตรเจนเพื่อประกอบการพิจารณาเลือกใช้ปุ๋ยหมักด้วย

4.1.2.6 ปริมาณธาตุอาหารหลัก

ปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่ พบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูมีค่าปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 1.3-2.6 โดยน้ำหนักปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 1.4-2.6 โดยน้ำหนัก ปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 2.5-3.0 โดยน้ำหนัก และปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่มีค่าปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 2.8-3.3 โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 6.3-12.0 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 7.3-9.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณธาตุอาหารหลักของปุ๋ยหมักทั้งสองผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ที่กำหนดไว้ให้ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมให้มีมากกว่าร้อยละ 1.0, 0.5 และ 0.5 โดยน้ำหนัก

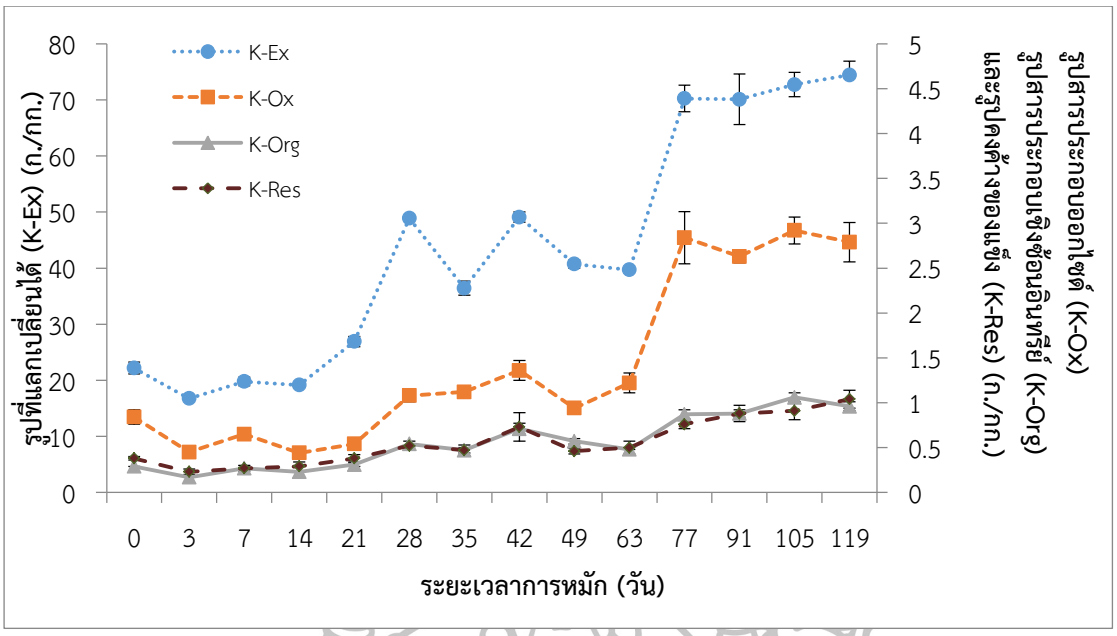
4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดระหว่างกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักมูลหมู ภาพที่ 18 และปุ๋ยหมักมูลไก่ ภาพที่ 19 พบว่าปริมาณโพแทสเซียมทุกรูปแบบของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.01$) ทำให้โพแทสเซียมทุกรูปแบบของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ที่พบมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังตารางที่ 7 และ 8 เมื่อจัดลำดับเชิงปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ที่พบในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรสามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้

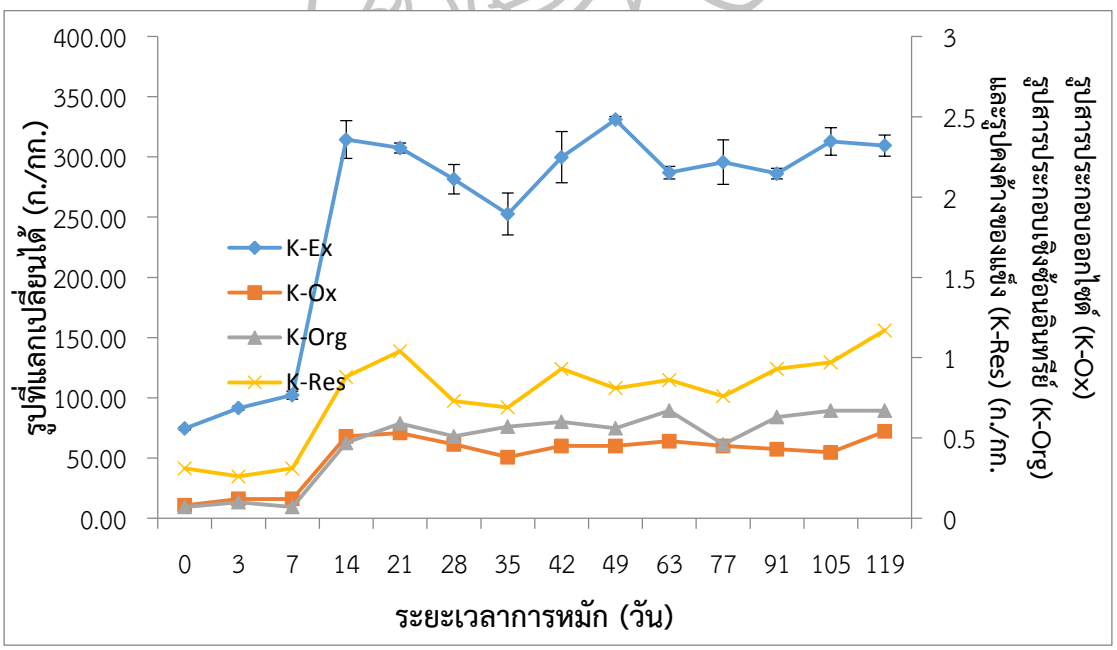
ปุ๋ยหมักมูลหมู ดังภาพที่ 18

K-Ex >>> K-Ox > K-Org, K-Res

โดยมีปริมาณเฉลี่ย 43.4 >>> 1.4 > 0.6, 0.6 กรัม/กิโลกรัม



ภาพที่ 18 ปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบของปุ๋ยหมักมูลหมูที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก



ภาพที่ 19 ปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบของปุ๋ยหมักมูลไก่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก

ปุ๋ยหมักมูลไก่ ดังภาพที่ 19

K-Ex >>> K-Res > K-Ox, K-Org

โดยมีปริมาณเฉลี่ย 253.3 >>> 0.8 > 0.4, 0.4 กรัม/กิโลกรัม

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างรูปแบบโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลหมู

พารามิเตอร์	K-Ex	K-Ox	K-Org	K-Res
K-Ex	1	0.960**	0.984**	0.966**
K-Ox		1	0.954**	0.966**
K-Org			1	0.970**
K-Res				1

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างรูปแบบโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลไก่

พารามิเตอร์	K-Ex	K-Ox	K-Org	K-Res
K-Ex	1	0.969**	0.933**	0.921**
K-Ox		1	0.916**	0.937**
K-Org			1	0.934**
K-Res				1

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

จะเห็นได้ว่าปริมาณโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลไก่โดยเฉพาะรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีมากกว่าปุ๋ยหมักมูลหมูเฉลี่ยถึง 5.8 เท่า ซึ่งรูปแบบนี้ในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรเป็นรูปแบบที่เด่นคิดเป็นร้อยละ 94.6 และ 99.4ของรูปแบบทั้งหมดในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ตามลำดับ นอกจากนี้รูปแบบนี้ยังเป็นรูปแบบที่พร้อมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช อันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดินที่มักพบว่าในดินแม้จะมีปริมาณโพแทสเซียมมากแต่ร้อยละ 99 มักอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้น้อย (Troeh and Thompson, 2005) ซึ่งแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในเชิงปริมาณของรูปแบบโพแทสเซียมส่วนใหญ่บ่งบอกถึงการย่อยสลายและการเอื้อประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ อันเป็นการเพิ่มคุณภาพปุ๋ยหมักที่มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) เพื่อการจำหน่ายที่กำหนดไว้ว่าต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 5

4.3 การจัดกลุ่มเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบเชิงเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

โพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณตลอดระยะเวลาการหมักซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ สามารถแบ่งกลุ่มเชิงปริมาณได้ดังต่อไปนี้

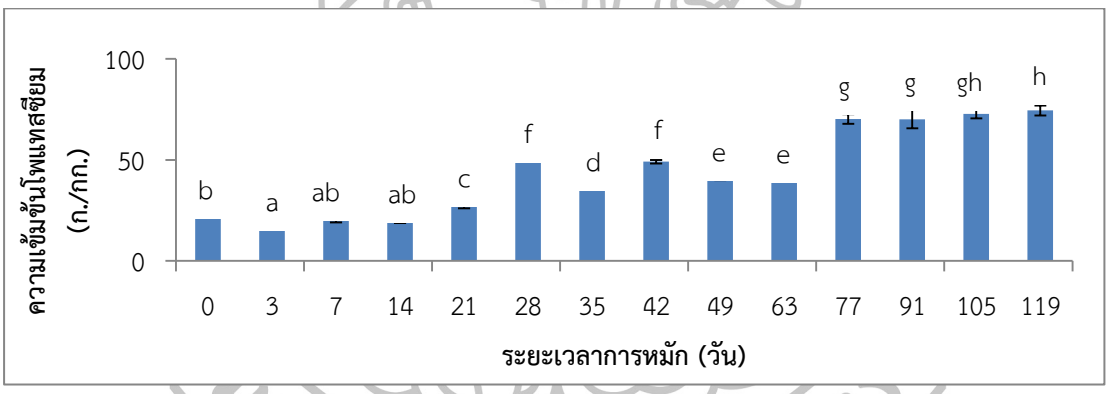
4.3.1 โพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้

โพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร เนื่องจากเป็นรูปที่ถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายด้วยโลหะที่มีเวเลนซีที่สูงกว่า (M^{2+} และ M^{3+}) (Barber, 1995; Li et al., 2013) โดยในปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีปริมาณที่พบแตกต่างกันอย่างมาก ปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 16.7-74.5 และ 74.5-314.4 กรัม/กิโลกรัม

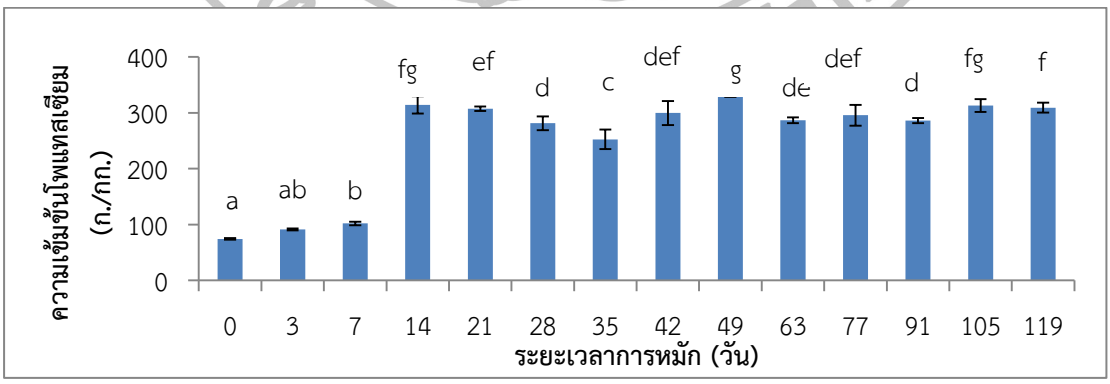
ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 93.6-95.8 และ 99.4-99.5 ตามลำดับ ซึ่งแม้สัดส่วนของรูปแบบนี้ที่พบจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณที่พบในปุ๋ยหมักมูลไก่มีมากกว่าถึง 4.2-4.5 เท่า

เมื่อจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของความเข้มข้นโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูได้กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน 8 กลุ่ม มูลไก่ 7 กลุ่ม แสดงในภาพที่ 20 (ก) และ (ข) ได้ดังนี้

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



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้นสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ($r = 0.936$, $p<0.01$ และ $r = 0.615$, $p<0.05$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 9) โดยเฉพาะตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป แสดงถึงการได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักอย่างชัดเจนจากความสัมพันธ์เชิงปริมาณกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแบบผกผัน โดยเมื่อปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีอุณหภูมิเย็นลงพร้อมที่จะนำไปใช้จะมีปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ($r = -0.610$ และ $r = -0.580$ $p<0.05$ ตามลำดับ) เช่นเดียวกับปริมาณอินทรียวัตถุในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ ($r = -0.698$ และ $r = -0.882$, $p<0.01$ ตามลำดับ) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายอินทรียวัตถุและปลดปล่อยปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.596$, $p<0.05$ และ $r = -0.816$, $p<0.01$ ตามลำดับ)

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรียวัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลหมู	0.936**	-0.610*	-0.698**	-0.596*
รูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลไก่	0.615*	-0.580*	-0.882**	-0.816**

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

4.3.2 โพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์

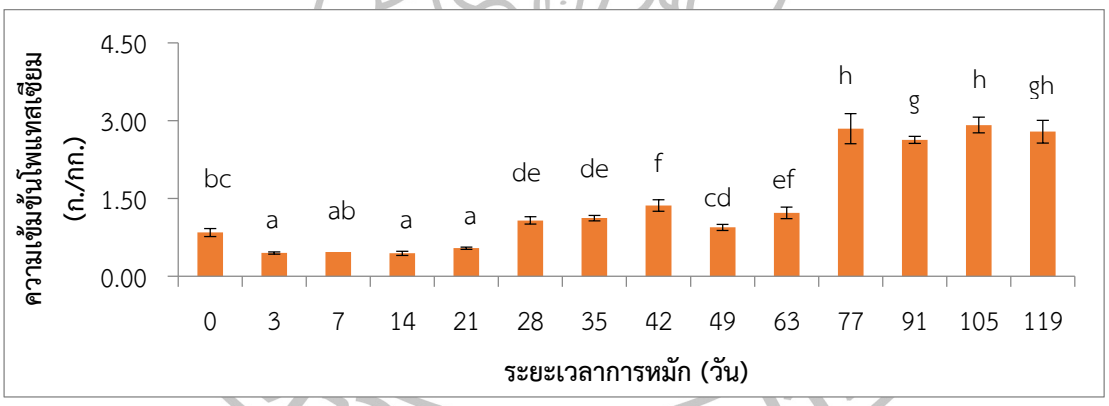
โพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีปริมาณที่แตกต่างกัน ปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.44-2.92 และ 0.08-0.54 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 1.9-3.8 และ 0.1-0.2 ตามลำดับ โดยปริมาณที่พบในปุ๋ยหมักมูลหมูมากกว่ามูลไก่ 19 เท่า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเก็บกักโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักมูลหมูที่มีมากกว่าปุ๋ยหมักมูลไก่ ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีก่อนจึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้

โดยเมื่อจัดแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของความเข้มข้นโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลหมูได้กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน 8 กลุ่ม มูลไก่ 4 กลุ่มแสดงในภาพที่ 21 (ก) และ (ข) ดังนี้

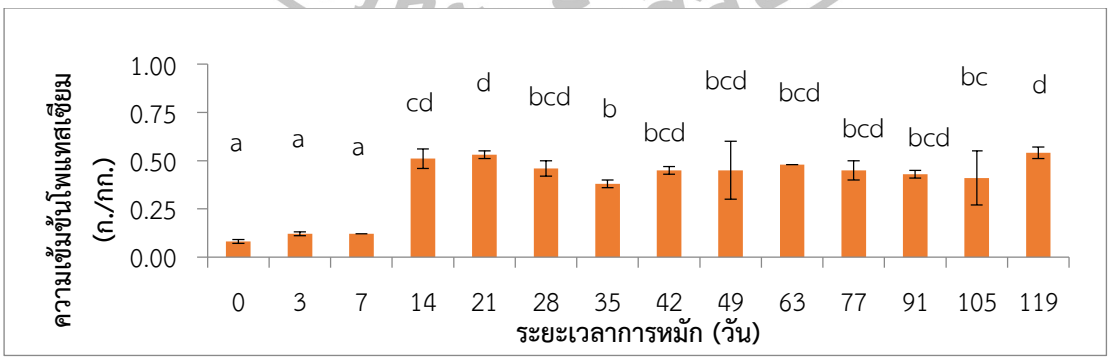
กลุ่ม	ปุ๋ยหมักมูลหมู	ปุ๋ยหมักมูลไก่
a	วันที่ 3, 7, 14 และ 21	วันที่ 0, 3 และ 7
b	วันที่ 0 และ 7	วันที่ 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91 และ 105
c	วันที่ 0 และ 49	วันที่ 14, 28, 42, 49, 63, 77, 91 และ 105
d	วันที่ 28, 35 และ 49	วันที่ 14, 21, 28, 42, 49, 63, 77, 91และ 119

กลุ่ม	ปุ๋ยหมักมูลหมู (ต่อ)
e	วันที่ 28, 35 และ 63
f	วันที่ 42 และ 63
g	วันที่ 91 และ 119
h	วันที่ 77, 105 และ 119

จากการจัดกลุ่มพบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูมีปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์สูงตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปมีค่าระหว่าง 2.6-2.9 กรัม/กิโลกรัม ขณะที่ปุ๋ยหมักมูลไก่มีปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ใกล้เคียงกันในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป โดยมีค่าระหว่าง 0.4-0.5 กรัม/กิโลกรัม โดยการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ต่างได้รับอิทธิพลจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = 0.925$, $p<0.01$ และ $r = 0.566$, $p<0.05$ ดังตารางที่ 10 และสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุที่ลดลงตามระยะเวลาการหมักเช่นกัน ($r = -0.697$ และ $r = -0.764$, $p<0.01$) โดยมีเพียงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในปุ๋ยหมักมูลไก่ที่สัมพันธ์เชิงผกผันกับโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์เท่านั้น ($r = -0.812$, $p<0.01$) แสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 21 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่

รูปสารประกอบออกไซด์ในปุ๋ยหมักมูลหมู แม้จะไม่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแต่ต่างก็ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักโดยสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นและในหัวข้อที่ 4.1.2 ภาพที่ 17

4.3.3 โพแทสเซียมรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์

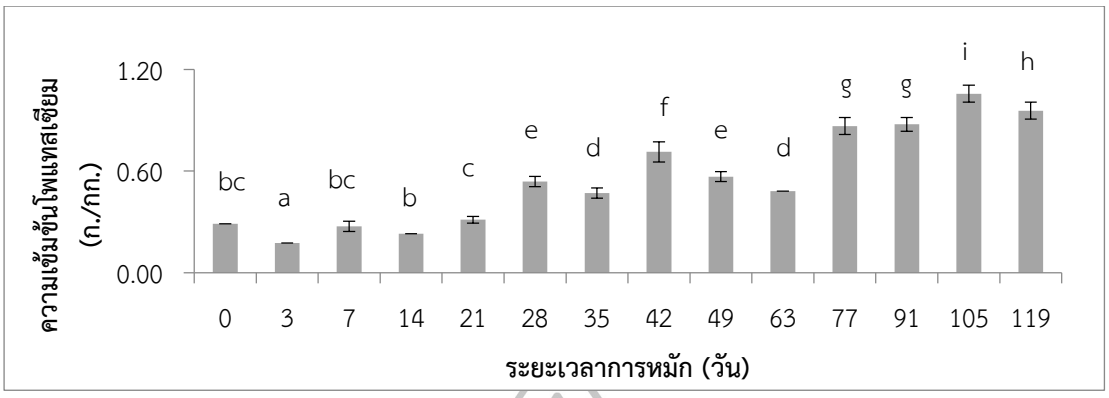
โพแทสเซียมรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีปริมาณที่แตกต่างกันมาก โดยปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.17-1.06 และ 0.07-0.67 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 0.99-1.37 และ 0.07-0.23 ตามลำดับ โดยปริมาณที่พบในปุ๋ยหมักมูลหมูมากกว่ามูลไก่ 7 เท่า แม้ปุ๋ยหมักมูลไก่จะมีปริมาณอินทรียวัตถุมากกว่าถึง 1.7 เท่าก็ตาม แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของอินทรียวัตถุในมูลหมูมีความสามารถในการดูดซับและตรึงโพแทสเซียมได้ดีกว่ามูลไก่ โดยเฉพาะในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปที่พบปริมาณรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ในปุ๋ยหมักมูลหมูค่อนข้างสูง (ภาพที่ 22 ก) จะเห็นได้ว่า ถึงแม้รูปแบบนี้ทั้งปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ต่างได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักที่คล้ายคลึงกัน โดยมีปริมาณมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r=0.937$ และ 0.719 ตามลำดับ, $p<0.01$ ดังตารางที่ 11) มีความสัมพันธ์กับอินทรียวัตถุที่ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ($r=-0.709$ และ $r = -0.787$ ตามลำดับ, $p<0.01$) และมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงก็ตาม ($r=-0.607$, $p<0.05$ และ -0.863, $p<0.01$ ตามลำดับ) แต่คุณลักษณะของวัตถุดิบที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการดูดซับและตรึงโพแทสเซียมในรูปแบบนี้แตกต่างกัน อันสะท้อนถึงความยากง่ายต่อการปลดปล่อยโพแทสเซียมให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์และพืชสามารถนำไปใช้ได้ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูจะมีคุณภาพของสารอินทรีย์ที่ดีกว่ามูลไก่ สอดคล้องกับผลการทดลองของจุฑาวรรณ (2557) ที่ทำการศึกษาคุณภาพของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นพิจารณาจากปริมาณและคุณภาพของสารฮิวมิก พบว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลหมูมีคุณลักษณะในทางพารามิเตอร์เชิงแสงดีกว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

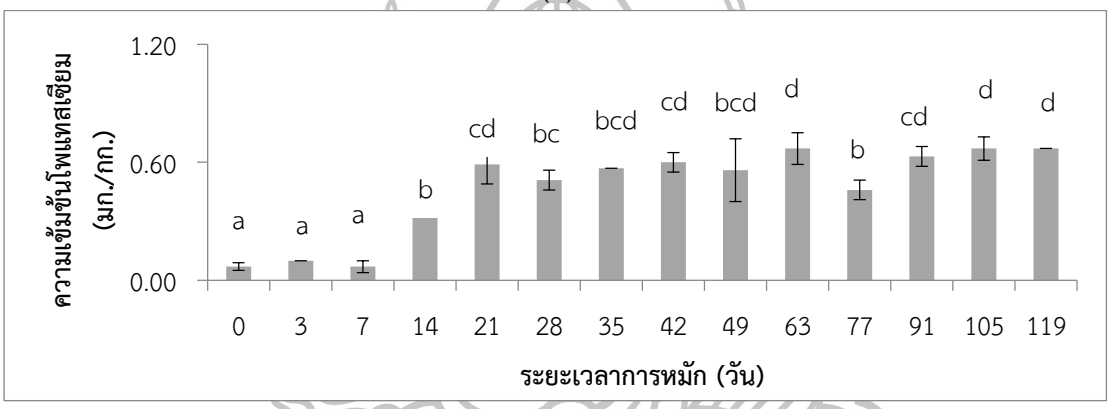
พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรียวัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
รูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลหมู	0.925**	-0.541*	-0.697**	-0.523
รูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลไก่	0.566*	-0.514	-0.764**	-0.812**

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่

ตารางที่ 11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรียวัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลหมู	0.937**	-0.635*	-0.709**	-0.607*
รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลไก่	0.719**	-0.614*	-0.787**	-0.863**

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

เมื่อจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของความเข้มข้นโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักได้กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน 9 กลุ่ม มูลไก่ 4 กลุ่ม แสดงในภาพที่ 22 (ก) และ (ข) ได้ดังนี้

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

4.3.4 โพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็ง

โพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.23-1.04 และ 0.26-1.17 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 1.0-1.6 และ 0.2-0.4 ตามลำดับ โดยปริมาณที่พบในปุ๋ยหมักมูลหมูมากกว่ามูลไก่เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบนี้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมของรูปแบบนี้ในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่สัมพันธ์กับระยะเวลาเช่นกัน ($r=0.935$ และ 0.710 ตามลำดับ, $p<0.01$ ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 23 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นถึงการได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักที่สัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.674$ และ -0.787 ตามลำดับ $p<0.01$) เช่นเดียวกับกับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($r=-0.573$, $p<0.05$ และ -0.863, $p<0.01$ ตามลำดับ)

ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปคงค้างของแข็ง กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

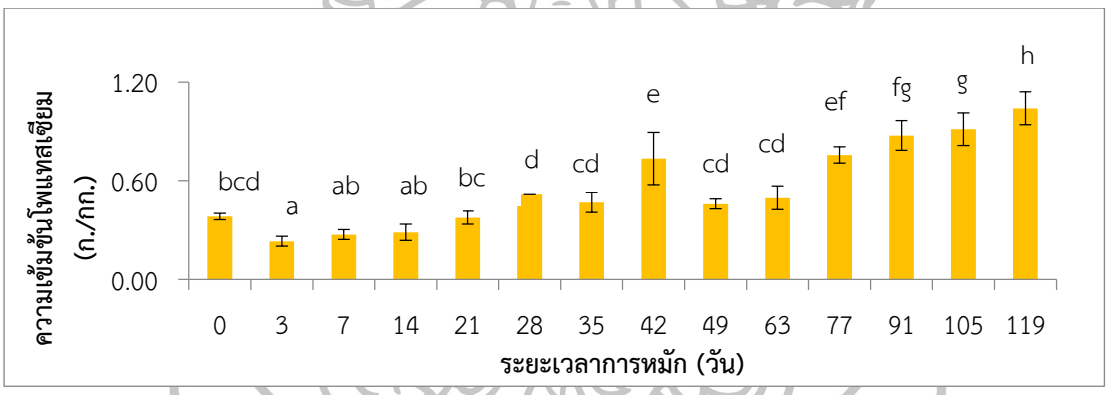
พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรียวัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
รูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลหมู	0.935**	-0.610*	-0.674**	-0.573*
รูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลไก่	0.710**	-0.636*	-0.787**	-0.863**

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

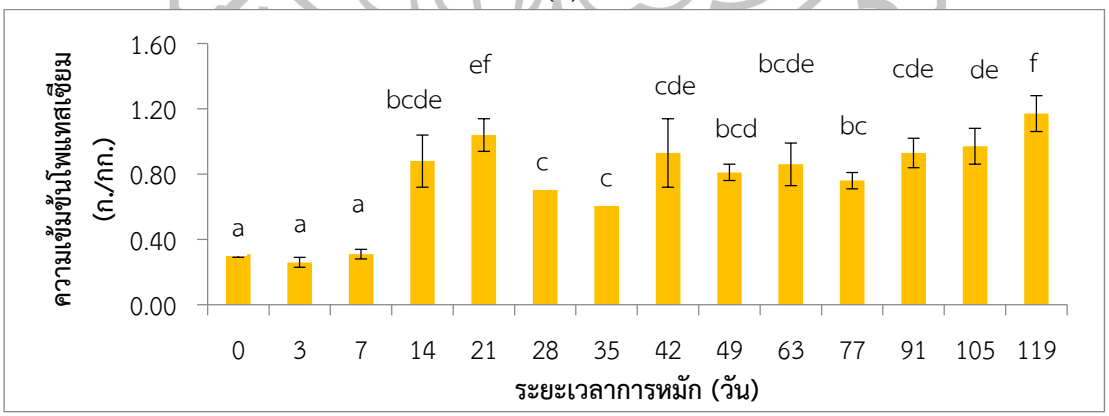
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

เมื่อจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของความเข้มข้นโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักได้กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน 8 กลุ่ม มูลไก่ 6 กลุ่ม แสดงในภาพที่ 23 (ก) และ (ข) ได้ดังนี้

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



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test (ก) ปุ๋ยหมักมูลหมู (ข) ปุ๋ยหมักมูลไก่

จะเห็นได้ว่าเมื่อจัดกลุ่มเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ พบว่าปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักมูลหมูจะมีค่าสูงตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป ในขณะที่ปุ๋ยหมักมูลไก่ปริมาณโพแทสเซียมรูปสารประกอบออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและ

ค่อนข้างคงที่เมื่อปุ๋ยมีอายุมากขึ้น สำหรับรูปคงค้างของแข็งในปุ๋ยหมักมูลไก่จะมีค่าสูงตั้งแต่วันที่ 77 และรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์จะมีค่าสูงตั้งแต่วันที่ 91 เป็นต้นไป โดยมีปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้แปรปรวนตลอดระยะเวลาการหมัก แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของวัตถุดิบที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลไก่ที่มีมากกว่ามูลหมู ดังนั้น การศึกษารูปแบบของโพแทสเซียมระหว่างการหมักปุ๋ยจึงมีความสำคัญในการช่วยบ่งบอกถึงปริมาณและรูปแบบที่เป็นประโยชน์ตลอดจนรูปแบบอื่นๆ ที่อาจปลดปล่อยออกมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภายหลัง ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าว่าการหมักปุ๋ยเป็นการเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมหลายรูปแบบอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าคุณลักษณะของวัตถุดิบในการหมักจะมีความแตกต่างกันก็ตาม

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี ปริมาณและรูปแบบ เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมตลอดจนศักยภาพในการปลดปล่อยโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบ ณ เวลาการหมักต่างๆ โดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยวิธี Community Bureau of Reference (BCR) (Fernández et al., 2004; Zimmerman and Weindort, 2010) ระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ โดยทำการหมักเป็นเวลา 119 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 พบว่าสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม เป็นระยะที่อุณหภูมิของปุ๋ยหมักใกล้เคียงกับบรรยากาศ มองเห็นส่วนผสมของวัสดุหมักได้อย่างชัดเจน (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง เป็นระยะที่อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ของจุลินทรีย์ ปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีสีน้ำตาลโดยปุ๋ยหมักมูลไก่มีกลิ่นฉุนของแอมโมเนียรุนแรงกว่าปุ๋ยหมักมูลหมู (ปุ๋ยหมักมูลหมูวันที่ 1-35, ปุ๋ยหมักมูลไก่ วันที่ 1-42) และระยะเจริญเต็มที่ เป็นระยะที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ลักษณะของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรร่วนซุยมีสีดำหรือน้ำตาลเข้มไม่สามารถมองเห็นส่วนผสมตั้งต้นได้ (ปุ๋ยหมักมูลหมูวันที่ 35, ปุ๋ยหมักมูลไก่วันที่ 42 เป็นต้นไป)

เมื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและเคมีตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 เพื่อการจำหน่ายพบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีปริมาณอินทรียวัตถุค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 39.4-47.8 และ 43.7-49.6 ตามลำดับ อยู่เกณฑ์กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยแม้ปริมาณอินทรียวัตถุในมูลไก่มีมากกว่าแต่อัตราการสูญเสียอินทรียวัตถุของมูลหมูจะช้ากว่ามูลไก่ 2.4 เท่า แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของสารอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลหมูที่ดีกว่ามูลไก่ที่ประกอบไปด้วยแกลบที่ถูกย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงไปได้เร็วและมากกว่า ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ในปุ๋ยหมักมูลหมู (วันที่ 35 เป็นต้นไป) มีค่าน้อยกว่ามูลไก่ (วันที่ 42 เป็นต้นไป) โดยในปุ๋ยหมักมูลหมูมีค่าอยู่ในช่วง 9.1-13.5 และในปุ๋ยหมักมูลไก่มีค่าอยู่ในช่วง 9.1-10.3 ตามลำดับ ซึ่งปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) ในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่พร้อมจำหน่ายที่กำหนดไว้ให้มีค่าน้อยกว่า 20

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก พบว่าโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปแบบที่เด่นในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่คิดเป็นร้อยละ 94.6 และ 99.4 โดยมีปริมาณเฉลี่ย 43.4 และ 253.3 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่พร้อมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืชและปริมาณโพแทสเซียมทุกรูปแบบของปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักคล้ายคลึงกัน โดยลักษณะที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้เรียกว่า Condensation of Metals (Jenn and Shang, 2001)

เมื่อนำมาจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ของโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นรูปที่พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่

อยู่ในช่วง 16.7-74.5 และ 74.5-314.4 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณความเข้มข้นโพแทสเซียมรูปแบบนี้ในมูลไก่สูงกว่ามูลหมูเฉลี่ยถึง 5.8 เท่า

สำหรับโพแทสเซียมรูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์ รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ และรูปคงค้างของแข็งพบว่าเป็นรูปแบบที่มีปริมาณน้อยทั้งในในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์อยู่ในช่วง 0.44-2.92 และ 0.08-0.54 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.17-1.06 และ 0.07-0.67 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และรูปคงค้างของแข็งอยู่ในช่วง 0.23-1.04 และ 0.26-1.17 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโพแทสเซียมรูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์และรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ในปุ๋ยหมักมูลหมูมีมากกว่ามูลไก่ถึง 19 เท่า และ 7 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักและคุณภาพของอินทรียวัตถุในปุ๋ยหมักมูลหมูที่ช่วยตรึงและดูดซับโพแทสเซียมให้อยู่ในรูปที่ไม่ถูกชะออกไปโดยง่าย โดยปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่โดยภาพรวมจะมีค่าสูงตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่า อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมทั้ง 4 รูปแบบอย่างชัดเจน โดยปริมาณโพแทสเซียมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นและการหมักปุ๋ยจะได้โพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปแบบที่เด่นในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรเหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช นอกจากนี้ยังพบว่าปุ๋ยหมักมูลหมูมีคุณภาพของสารอินทรีย์ที่ดีกว่ามูลไก่มีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมให้อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่ค่อยๆ ทยอยปลดปล่อยโพแทสเซียมแก่สิ่งแวดล้อมได้ในภายหลัง ดังนั้นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ไม่เพียงแต่จะทราบถึงปริมาณและรูปแบบของโพแทสเซียม ณ เวลาต่างๆ ที่เหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ยังทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการเก็บกักและปลดปล่อยโพแทสเซียมออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วย อันจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในการใช้และปรับปรุงสูตรปุ๋ยหมักในอนาคตต่อไป

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. **คู่มือการจัดการอินทรียวัตถุเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. หน้า 42-53.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **คู่มือปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับเกษตรกร).** กรุงเทพฯ.

_____. 2548. **เอกสารวิชาการปุ๋ยอินทรีย์**: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

จุฑาวรรณ สุคนธนิตย์. 2557. **การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี:การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เจนวิทย์ กรอบทอง. 2544. **การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียกับสารไบโอนิคในการทำปุ๋ยหมักจากวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมกระป๋องและใบไม้แห้ง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ดวงใจ โง้ววัฒนา. 2553. ผลของการใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับการจัดการธาตุอาหารเฉพาะพื้นที่ต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตข้าวพันธุ์ปทุมธานีในชุดดินสรรพยา. **แก่นเกษตร** 42 (3) : 369-374.

ทิพวรรณ สิทธิรังค์สรรค์. 2547. **ปุ๋ยหมัก ดินหมักและปุ๋ยหมักชีวภาพ.** โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ธงชัย มาลา. 2546. **ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

นรีลักษณ์ ชูวรเวช. 2548. **การใช้มูลสุกรร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในการผลิตปุ๋ยหมักมูลสุกรไร้กลิ่น.** กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

นัทธีรา สรรมณี. 2555. **โลหะในแหล่งน้ำ.** พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

_____., กุลนาถ อบสุวรรณ, กมลชนก พานิชการ และศุภโชค กำภูพงษ์. 2558. การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก และผลการเป็นสารคีเลตต่อความสามารถในการปลดปล่อยจุลธาตุอาหาร. **รายงานผลการวิจัยปีที่ 1 โครงการต่อเนื่อง 2 ปี.** สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.

ประกาศิต อินทรสำอางค์. 2549. **การแปรสภาพและคุณภาพของปุ๋ยหมักจากฟางข้าว ชานอ้อย ขี้เลื่อย เปลือกยูคาลิปตัสและตะกอนน้ำเสียโรงงานเยื่อกระดาษ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัทมา วิตยากร. 2547. **ความอุดมสมบูรณ์ของดินขั้นสูง.** ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. **เคมีดิน.** คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ภัทราพร กังวานเจษฎา. 2555. **การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2548. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน.** พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. **ธาตุอาหารพืช.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____., อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร. 2551. **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รสสุคนธ์ พุ่มพันธุ์วงศ์. 2549. **การผลิตปุ๋ยอินทรีย์.** สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดเอ็มพอร์เรียม, กรุงเทพฯ.

วีระ กสารติกุล. 2536. **การศึกษาคุณภาพของหญ้าและถั่วอาหารสัตว์เขตร้อนบางชนิดที่ระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สรณพงษ์ บัวโรย. 2544. **การศึกษาคุณสมบัติและการใช้ประโยชน์จากขี้แดดนาเกลือ ตำบลบางแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม.** สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

สุธรรม ประทุมสวัสดิ์. 2545. เทคนิคการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ (Composting). **พัฒนาเทคนิคศึกษา** 14 (43): 38-42.

สุนทรี มีเพ็ชร์. 2543. **อิทธิพลของคุณภาพซากพืชและการจัดการต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรียวัตถุในส่วนต่าง ๆ และการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในดินไร่เนื้อทรายที่เป็นกรดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุรเดช จินตกานนท์. 2530. **คำบรรยายวิชาธาตุอาหารพืช.** ภาควิชาปฐพีวิทยา. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อำนาจ สุวรรณฤทธิ์. 2525. **ความสัมพันธ์ระหว่างดินกับพืช.** ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Allison, L.E., W.E. Bollen and C.D. Moodie. 1965. **Total carbon**. 1346-1366. In C.A. Black, ed. **Methods of soil analysis. Part 2.** Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI.

Aparna, C., P. Saritha, V. Himabindu ,Y. Anjaneyulu. 2008. Techniques for the evaluation of maturity for composts of industrially contaminated lake sediments. **Waste Management**. 28: 1773–1784.

Barber, Stanley A. 1995. **Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach**. 2nd Edition. United States of America.

Bernardi, A. C. C., M. C. S. Carvalho, J. C. Polidoro, and V. M. Benites. 2013. **Potassium Fertilization in Tropical Soils under No-Tillage System.** Research Findings. No. 34, June 2013. International Potash Institute.

Brady, N. C., and R. R. Weil. 2008. **The Nature and Properties of Soil.** 14 th Edition. Prentice Hall, New Jersey.

Bustamante, M.A., C. Pareds, F.C. Marhenda-Egea, A. Pérez-Espinosa, M.P. Bernal and R. Moral. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. **Chemosphere**. 72: 551-557.

Charest, M.H. and C.J. Beauchamp. 2002. Composting of de-inking paper sludge with poultry manure at three nitrogen levels using mechanical turning: behavior of physic-chemical parameters. **Bioresource Technology.** 81: 7-17.

Cheng, C., Wany R, and J. Jiang. 2007. Variation of soil fertility and carbonsequestration by planting Havea brasiliensis in Kainan Island, Chaina. **Journal of Environmental Science.** 19:348-352.

Darunsontaya, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, N. Prakongkep, and R. J. Gilkes. 2012. The forms and availability to plants of soil potassium as related mineralogy for upland Oxisols and Ultisols form Thailand. **Geoderma.** 170:11-24.

Fernández E, Jiménez R, Lallena AM and Aguilar J. 2004. Evaluation of the BCR sequential extraction procedure applied for two unpolluted Spanish soils. **Environmental Pollution**. 131: 355-364.

Fourti, O., N. Jedidi and A. Hassen. 2010. Humic substances change during the co-composting process of municipal solid wastes and sewage sludge. **World Microbiol Biotechnol.** 26: 2117-2122.

Gil, M. V., M. T. Carballo and L. F. Calvo. 2008. Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients. **Waste Management.** 28: 1432–1440.

Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 2005. **Soil Fertility and Fertilizers : An Introduction to nutrient management.** 7th Edition. Courier company, Hicksville.

Huang, G.F., J.W.C. Wong, Q.T. Wu and B.B. Nagar. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. **Waste Management.** 24: 805-813.

JennHung Hsu and ShangLien Lo. 2001. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. **Environmental Pollution**. 114: 119-127.

Karthikakuttyammma, M., P. R. Suresh, V. P. George, and R. S. Aiyer. 1998. Effect of continuous cultivation of rubber (Hevea brasiliensis) on morphological features and organic carbon, total nitrogen, phosphorous and potassium content of soil. **Indian journal of natural rubber research**. 11:73-79.

Loughnan, F.C. 1969. **Chemical weathering of the silicate minerals.** American Elsevier Publishing Co., Inc. New York, NY.

McCall, W. Wade. 1980. **Chicken Manure.** Hawaii Cooperative Extension Service, College of Tropical Agricuture and Human Resources University of Hawaii.

Miaomiao He, Li Wenhong, Liang Xinqiang, Wu Donglei and Tian Guangming. 2009. Effect of composting process on phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead in sewage sludge and swine manure. **Waste Management.** 29: 590-597.

Michael, S.P.. 1995. **Composting processes**. Im Bioconversion of waste material to industrial products, 3th ed. Edited by Martind, A.M. Elsevier Applied Science; London, U.K. PP. 147-186.

Rich, C.I. 1968. **Mineralogy of soil potassium.** In: Kilmer VJ, Younts S.E., and Brady N.C. (eds) The Role of Potassium in Agriculture, pp. 79 – 108. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America.

Samadi, A., B. Dovlati, and M. Barin. 2008. Effect of continuous cropping on potassium forma and potassium adsorption characteristics in calcareous soil of Iran. **Australian Journal of Soil Research.** 46:265-272.

Sparks, DL. 2003. **Environmental Soil Chemistry.** 2nd, Academic Press 525 B Street, Suite 1900, San Diego California, USA.

Tessier, A., P.G.C. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. **Anal.Chem.** 51: 844-850.

Tiquia, S.M., N.F.Y. Tam and I.J. Hodgkiss. 1998. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. **Agriculture, Ecosystems and Environment.** 67: 79-89.

_____. and N.F.Y. Tam. 2000. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. **Environmental Pollution.** 110: 535-541.

Troeh, F.R. and L.M. Thompson. 2005. **Soils and Soil Fertility.** 6 th ed. Blackwell Publishing., Iowa, US.

Ulaganathan, A., R. J. Gilkes, M. D. Jessy, K. K. Ambily, and N. U. Nair. 2012. Distribution of potassium forms in soil under repeated rubber cultivation and virgin forest. P. 141-142. **In: International rubber conference**. 28-31 October 2012. Kovalam, Kerala.

Wada, D., S-I. Wada. 1999. Kinetics of speciation of copper, lead, and zinc loaded to soils that differ in cation exchanger composition at low moisture content. Commum. **Soil.Sci.** Plant Anal. 30(17&18): 2363-2375.

William, H. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAO International.** 17 th ed. America.

Wong, J.W.C., K. F. Mak, N. W. Chan, A. Lam, M. Fang, L. X. Zhou, Q. T. Wu and X. D. Liao. 2001. Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. **Bioresource Technology.** 76: 99-106.

Zeng, G.M., H.L. Huang, D.L. Huang, X.Z. Yuan, R.Q. Jiang, M. Yu, H.Y. Yu, J.C. Zhang, R.Y. Wang and X.L. Liu. 2009. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. **Process Biochemistry.** 44: 396-400.

Zimmerman AJ and Weindort DC. 2010. Heavy metal and trace metal analysis in soil by sequential extraction: A review of procedures. **International Journal of Analytical Chemistry.** 2100: 1-7.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์การสกัดแบบลำดับขั้นของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

ตารางที่ 13 ร้อยละของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้	รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์	รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	รูปคงค้างของแข็ง
0	93.61	3.55	1.22	1.62
3	95.14	2.54	0.99	1.32
7	94.29	3.10	1.31	1.31
14	95.23	2.19	1.14	1.43
21	95.64	1.92	1.11	1.34
28	95.83	2.11	1.05	1.01
35	94.65	2.91	1.22	1.22
42	94.59	2.62	1.37	1.41
49	95.39	2.20	1.33	1.08
63	94.75	2.91	1.15	1.19
77	94.02	3.80	1.16	1.01
91	94.12	3.53	1.18	1.18
105	93.71	3.76	1.36	1.18
119	93.96	3.52	1.21	1.31

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 14 ร้อยละของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ระยะเวลา (วัน)	รูปที่แลกเปลี่ยนได้	รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์	รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์	รูปคงค้างของแข็ง
0	74.45	0.08	0.07	0.31
3	91.51	0.12	0.10	0.26
7	102.17	0.12	0.07	0.31
14	314.41	0.51	0.47	0.88
21	307.47	0.53	0.59	1.04
28	281.55	0.46	0.51	0.73
35	252.64	0.38	0.57	0.69
42	299.73	0.45	0.60	0.93
49	331.08	0.45	0.56	0.81
63	287.05	0.48	0.67	0.86
77	295.70	0.45	0.46	0.76
91	286.21	0.43	0.63	0.93
105	312.90	0.41	0.67	0.97
119	309.44	0.54	0.67	1.17

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 15 ปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลหมูที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ระยะเวลา (วัน)	โพแทสเซียม (กรัม/กิโลกรัม)												
	รูปที่แลกเปลี่ยนได้			รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์			รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์			รูปคงค้างของแข็ง			รวม
	Mean	±	SD	Mean	±	SD	Mean	±	SD	Mean	±	SD	
0	22.18	±	1.04	0.84	±	0.08	0.29	±	0.00	0.38	±	0.02	23.70
3	16.74	±	0.01	0.45	±	0.02	0.17	±	0.00	0.23	±	0.03	17.60
7	19.78	±	0.76	0.65	±	0.04	0.27	±	0.03	0.27	±	0.03	20.98
14	19.15	±	0.43	0.44	±	0.04	0.23	±	0.00	0.29	±	0.05	20.11
21	26.91	±	0.93	0.54	±	0.02	0.31	±	0.02	0.38	±	0.04	28.14
28	48.90	±	0.01	1.08	±	0.07	0.54	±	0.03	0.52	±	0.00	51.04
35	36.43	±	1.24	1.12	±	0.05	0.47	±	0.03	0.47	±	0.06	38.49
42	49.10	±	0.90	1.36	±	0.11	0.71	±	0.06	0.73	±	0.16	51.91
49	40.73	±	0.75	0.94	±	0.06	0.57	±	0.03	0.46	±	0.03	42.70
63	39.70	±	0.03	1.22	±	0.11	0.48	±	0.00	0.50	±	0.07	41.90
77	70.26	±	2.39	2.84	±	0.29	0.87	±	0.05	0.76	±	0.05	74.72
91	70.11	±	4.50	2.63	±	0.07	0.88	±	0.04	0.88	±	0.09	74.49
105	72.74	±	2.17	2.92	±	0.15	1.06	±	0.05	0.91	±	0.10	77.62
119	74.45	±	2.48	2.79	±	0.22	0.96	±	0.05	1.04	±	0.10	79.23

ตารางที่ 16 ปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมูลไก่ที่สกัดได้ด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น

ระยะเวลา (วัน)	โพแทสเซียม (กรัม/กิโลกรัม)												
	รูปที่แลกเปลี่ยนได้			รูปที่จับกับสารประกอบออกไซด์			รูปที่จับกับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์			รูปคงค้างของแข็ง			รวม
	Mean	±	SD	Mean	±	SD	Mean	±	SD	Mean	±	SD	
0	74.45	±	1.50	0.08	±	0.01	0.07	±	0.02	0.31	±	0.02	74.91
3	91.51	±	1.81	0.12	±	0.01	0.10	±	0.00	0.26	±	0.03	91.99
7	102.17	±	3.23	0.12	±	0.00	0.07	±	0.03	0.31	±	0.03	102.67
14	314.41	±	15.62	0.51	±	0.05	0.47	±	0.05	0.88	±	0.16	316.27
21	307.47	±	4.06	0.53	±	0.02	0.59	±	0.10	1.04	±	0.10	309.63
28	281.55	±	12.31	0.46	±	0.04	0.51	±	0.05	0.73	±	0.01	283.25
35	252.64	±	17.41	0.38	±	0.02	0.57	±	0.00	0.69	±	0.08	254.28
42	299.73	±	21.27	0.45	±	0.02	0.60	±	0.05	0.93	±	0.21	301.71
49	331.08	±	2.52	0.45	±	0.15	0.56	±	0.16	0.81	±	0.05	332.90
63	287.05	±	5.17	0.48	±	0.00	0.67	±	0.08	0.86	±	0.13	289.06
77	295.70	±	18.39	0.45	±	0.05	0.46	±	0.05	0.76	±	0.05	297.37
91	286.21	±	4.36	0.43	±	0.02	0.63	±	0.05	0.93	±	0.09	288.20
105	312.90	±	11.47	0.41	±	0.14	0.67	±	0.06	0.97	±	0.11	314.95
119	309.44	±	28.19	0.30	±	0.00	0.59	±	0.00	1.04	±	0.10	294.86

ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมู

		Day	Temp	Moist	pH	OM	C/N	KEx	KOx	KOrg	KRes
Day	Pearson Correlation	1	-.701**	-.889**	-.438	-.585*	-.544*	.936**	.925**	.937**	.935**
	Sig. (2-tailed)		.005	.000	.118	.028	.044	.000	.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Temp	Pearson Correlation	-.701**	1	.829**	.331	.354	.774**	-.610*	-.541*	-.635*	-.610*
	Sig. (2-tailed)	.005		.000	.248	.214	.001	.021	.046	.015	.021
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Moist	Pearson Correlation	-.889**	.829**	1	.232	.495	.676**	-.859**	-.753**	-.848**	-.805**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.425	.072	.008	.000	.002	.000	.001
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
pH	Pearson Correlation	-.438	.331	.232	1	.213	.517	-.445	-.534*	-.444	-.502
	Sig. (2-tailed)	.118	.248	.425		.465	.058	.111	.049	.111	.067
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
OM	Pearson Correlation	-.585*	.354	.495	.213	1	.590*	-.698**	-.697**	-.709**	-.674**
	Sig. (2-tailed)	.028	.214	.072	.465		.026	.005	.006	.005	.008
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
C/N	Pearson Correlation	-.544*	.774**	.676**	.517	.590*	1	-.596*	-.523	-.607*	-.573*
	Sig. (2-tailed)	.044	.001	.008	.058	.026		.024	.055	.021	.032
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมู (ต่อ)

		Day	Temp	Moist	pH	OM	C/N	KEx	KOx	KOrg	KRes
KEx	Pearson Correlation	.936**	-.610*	-.859**	-.445	-.698**	-.596*	1	.960**	.984**	.966**
	Sig. (2-tailed)	.000	.021	.000	.111	.005	.024		.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KOx	Pearson Correlation	.925**	-.541*	-.753**	-.534*	-.697**	-.523	.960**	1	.954**	.941**
	Sig. (2-tailed)	.000	.046	.002	.049	.006	.055	.000		.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KOrg	Pearson Correlation	.937**	-.635*	-.848**	-.444	-.709**	-.607*	.984**	.954**	1	.970**
	Sig. (2-tailed)	.000	.015	.000	.111	.005	.021	.000	.000		.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KRes	Pearson Correlation	.935**	-.610*	-.805**	-.502	-.674**	-.573*	.966**	.941**	.970**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.021	.001	.067	.008	.032	.000	.000	.000	
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลไก่

		Day	Temp	Moist	pH	OM	C/N	KEx	KOx	KOrg	KRes
Day	Pearson Correlation	1	-.684**	-.550*	-.807**	-.728**	-.646*	.615*	.566*	.719**	.710**
	Sig. (2-tailed)		.007	.041	.000	.003	.013	.019	.035	.004	.004
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Temp	Pearson Correlation	-.684**	1	.819**	.570*	.408	.454	-.580*	-.514	-.614*	-.636*
	Sig. (2-tailed)	.007		.000	.033	.148	.103	.030	.060	.020	.014
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Moist	Pearson Correlation	-.550*	.819**	1	.364	.110	.237	-.387	-.343	-.505	-.498
	Sig. (2-tailed)	.041	.000		.201	.709	.414	.172	.230	.066	.070
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
pH	Pearson Correlation	-.807**	.570*	.364	1	.885**	.883**	-.834**	-.780**	-.882**	-.784**
	Sig. (2-tailed)	.000	.033	.201		.000	.000	.000	.001	.000	.001
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
OM	Pearson Correlation	-.728**	.408	.110	.885**	1	.876**	-.822**	-.764**	-.787**	-.751**
	Sig. (2-tailed)	.003	.148	.709	.000		.000	.000	.001	.001	.002
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
C/N	Pearson Correlation	-.646*	.454	.237	.883**	.876**	1	-.816**	-.812**	-.863**	-.784**
	Sig. (2-tailed)	.013	.103	.414	.000	.000		.000	.000	.000	.001
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลไก่ (ต่อ)

		Day	Temp	Moist	pH	OM	C/N	KEx	KOx	KOrg	KRes
KEx	Pearson Correlation	.615*	-.580*	-.387	-.834**	-.822**	-.816**	1	.969**	.933**	.921**
	Sig. (2-tailed)	.019	.030	.172	.000	.000	.000		.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KOx	Pearson Correlation	.566*	-.514	-.343	-.780**	-.764**	-.812**	.969**	1	.916**	.937**
	Sig. (2-tailed)	.035	.060	.230	.001	.001	.000	.000		.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KOrg	Pearson Correlation	.719**	-.614*	-.505	-.882**	-.787**	-.863**	.933**	.916**	1	.934**
	Sig. (2-tailed)	.004	.020	.066	.000	.001	.000	.000	.000		.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
KRes	Pearson Correlation	.710**	-.636*	-.498	-.784**	-.751**	-.784**	.921**	.937**	.934**	1
	Sig. (2-tailed)	.004	.014	.070	.001	.002	.001	.000	.000	.000	
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ของปุ๋ยหมักมูลหมู (P) กับปุ๋ยหมักมูลไก่ (C)

		KExP	KOxP	KOrgP	KResP	KExC	KOxC	KOrgC	KResC
KExP	Pearson Correlation	1	.936**	.925**	.937**	.935**	.615*	.566*	.719**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.019	.035	.004
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KOxP	Pearson Correlation	.936**	1	.960**	.984**	.966**	.589*	.526	.659*
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.027	.053	.010
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KOrgP	Pearson Correlation	.925**	.960**	1	.954**	.941**	.428	.363	.511
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000	.000	.127	.202	.062
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KResP	Pearson Correlation	.937**	.984**	.954**	1	.970**	.581*	.490	.654*
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000		.000	.029	.076	.011
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KExC	Pearson Correlation	.935**	.966**	.941**	.970**	1	.544*	.499	.653*
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000		.044	.069	.011
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KOxC	Pearson Correlation	.615*	.589*	.428	.581*	.544*	1	.969**	.933**
	Sig. (2-tailed)	.019	.027	.127	.029	.044		.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 19 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโพแทสเซียมรูปแบบต่างๆ ของปุ๋ยหมักมูลหมู (P) กับปุ๋ยหมักมูลไก่ (C) (ต่อ)

		KExP	KOxP	KOrgP	KResP	KExC	KOxC	KOrgC	KResC
KOrgC	Pearson Correlation	.719**	.659*	.511	.654*	.653*	.933**	.916**	1
	Sig. (2-tailed)	.004	.010	.062	.011	.011	.000	.000	
	N	14	14	14	14	14	14	14	14
KResC	Pearson Correlation	.710**	.638*	.514	.635*	.675**	.921**	.937**	.934**
	Sig. (2-tailed)	.004	.014	.060	.015	.008	.000	.000	.000
	N	14	14	14	14	14	14	14	14

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 20 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลหมู

Day	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
3	3	16.7400							
14	3	19.1533	19.1533						
7	3	19.7833	19.7833						
0	3		22.1833						
21	3			26.9100					
35	3				36.4300				
63	3					39.7033			
49	3					40.7300			
28	3						48.9033		
42	3						49.1033		
91	3							70.1133	
77	3							70.2533	
105	3							72.7367	72.7367
119	3								74.4500
Sig.		.051	.052	1.000	1.000	.476	.889	.091	.238
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000									

ตารางที่ 21 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของปุ๋ยหมักมูลไก่

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	74.4467						
3	3	91.5133	91.5133					
7	3		102.1700					
35	3			252.6367				
28	3				281.5467			
91	3				286.2133			
63	3				287.0533	287.0533		
77	3				295.7000	295.7000	295.7000	
42	3				299.7333	299.7333	299.7333	
21	3					307.4667	307.4667	
119	3						309.4400	
105	3						312.9000	312.9000
14	3						314.4167	314.4167
49	3							331.0733
Sig.		.075	.257	1.000	.087	.051	.083	.072
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.								
Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000								

ตารางที่ 22 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลหมู

Day	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
14	3	.4400							
3	3	.4500							
21	3	.5400							
7	3	.6500	.6500						
0	3		.8400	.8400					
49	3			.9367	.9367				
28	3				1.0767	1.0767			
35	3				1.1200	1.1200			
63	3					1.2233	1.2233		
42	3						1.3633		
91	3							2.6267	
119	3							2.7867	2.7867
77	3								2.8433
105	3								2.9167
Sig.		.064	.069	.344	.094	.178	.174	.122	.232
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000									

ตารางที่ 23 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบออกไซด์ของปุ๋ยหมักมูลไก่

Day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	.0833			
3	3	.1167			
7	3	.1233			
35	3		.3800		
105	3		.4067	.4067	
91	3		.4300	.4300	.4300
42	3		.4500	.4500	.4500
77	3		.4500	.4500	.4500
49	3		.4533	.4533	.4533
28	3		.4567	.4567	.4567
63	3		.4800	.4800	.4800
14	3			.5100	.5100
21	3				.5333
119	3				.5367
Sig.		.451	.089	.079	.072
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.					
Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000					

ตารางที่ 24 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลหมู

Day	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	3	.1700								
14	3		.2300							
7	3		.2700	.2700						
0	3		.2900	.2900						
21	3			.3100						
35	3				.4733					
63	3				.4800					
28	3					.5400				
49	3					.5700				
42	3						.7133			
77	3							.8633		
91	3							.8767		
119	3								.9567	
105	3									1.0567
Sig.		1.000	.056	.197	.817	.303	1.000	.645	1.000	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000										

ตารางที่ 25 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของปุ๋ยหมักมูลไก่

Day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
7	3	.0667			
0	3	.0700			
3	3	.1000			
77	3		.4567		
14	3		.4667		
28	3		.5133	.5133	
49	3		.5633	.5633	.5633
35	3		.5700	.5700	.5700
21	3			.5933	.5933
42	3			.6000	.6000
91	3			.6300	.6300
63	3				.6667
105	3				.6667
119	3				.6667
Sig.		.573	.074	.070	.115
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.					
Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000					

ตารางที่ 26 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลหมู

Day	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
3	3	.2300							
7	3	.2700	.2700						
14	3	.2900	.2900						
21	3		.3800	.3800					
0	3		.3867	.3867	.3867				
49	3			.4633	.4633				
35	3			.4700	.4700				
63	3			.4967	.4967				
28	3				.5200				
42	3					.7333			
77	3					.7567	.7567		
91	3						.8767	.8767	
105	3							.9167	
119	3								1.0433
Sig.		.346	.080	.086	.051	.696	.052	.504	1.000
Means for groups in homogeneous subsets are displayed. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000									

ตารางที่ 27 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan Test ของโพแทสเซียมในรูปคงค้างของแข็งของปุ๋ยหมักมูลไก่

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
3	3	.2600					
7	3	.3067					
0	3	.3100					
35	3		.6900				
28	3		.7267				
77	3		.7567	.7567			
49	3		.8100	.8100	.8100		
63	3		.8633	.8633	.8633	.8633	
14	3		.8767	.8767	.8767	.8767	
91	3			.9267	.9267	.9267	
42	3			.9300	.9300	.9300	
105	3				.9700	.9700	
21	3					1.0367	1.0367
119	3						1.1733
Sig.		.572	.053	.072	.096	.072	.107
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.							
Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000							

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวปัญจาภา ส่งเสริม
Miss Panjapa Songserm
สถานที่ทำงาน วิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี 388 หมู่ 5 ถนนสุขุมวิท ตำบลบ้านสวน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000
โทรศัพท์ 0847884437
Email address panja-pa@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คณะเกษตรศาสตร์บางพระ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

พ.ศ. 2555 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

ปัจจุบัน

ข้าราชการครูและบุคลากรทางการศึกษา ตำแหน่งครูชำนาญการ สังกัดวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

ปัญจาภา ส่งเสริม, กุลนาถ อบสุวรรณ และนัทธีรา สรรมณี. 2559. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมักของมูลสุกร. ในการประชุมทางวิชาการเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 14 “เกษตรและสุขภาพ” (Agriculture and Health) วันที่ 1 - 2 พฤศจิกายน 2559 ณ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. หน้า 14-20.