



พลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยผสมของมูลวัวและมูลหมู



โดย

นายกฤตภาส ธรรมเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

พลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยผสมของมูลวัวและมูลหมู



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE DYNAMICS OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM DURING FERMENTING  
PERIOD OF MIXED COW AND PIG MANURES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2021  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	พลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ย ผสมของมูลวัวและมูลหมู
โดย	กฤตภาส ธรรมเจริญ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมนิ

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

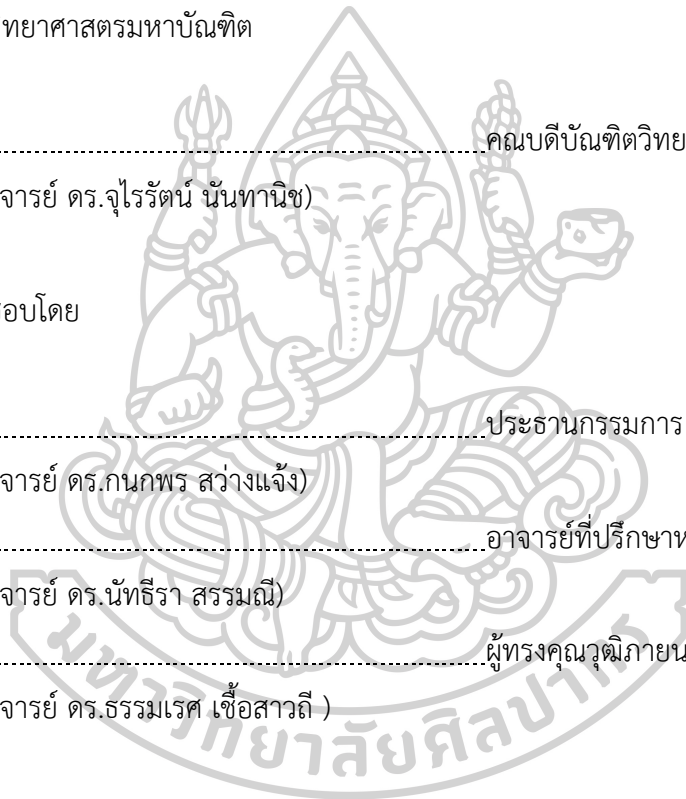
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สว่างแจ้ง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมนิ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวลี)



60311309 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : ธาตุอาหารพืช, ฟอสฟอรัส, โปแทสเซียม, ปุ๋ยหมักมูลสัตว์

นาย กฤตภาส ธรรมเจริญ: พลวัตของฟอสฟอรัสและโปแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยผสมของมูลวัวและมูลหมู อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรภณี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโปแทสเซียม และอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งสอง ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน แบ่งปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสมวันที่ 0 ระยะอุณหภูมิสูงวันที่ 1 – 13 และระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่พร้อมที่จะนำไปใช้ได้ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป เมื่อศึกษารูปแบบของธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโปแทสเซียมตลอดระยะเวลาการหมัก พบว่าฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (FP) มีสัดส่วนมากกว่าโปแทสเซียมที่ถูกตรึง (FK) เนื่องจากในธรรมชาติฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปประจุลบเกิดพันธะได้ดีกับไอออนประจุบวกและอินทรีย์วัตถุ จึงอยู่ในรูปที่ถูกตรึงได้ดีกว่า ขณะที่โปแทสเซียมที่มีประจุ +1 จะถูกแทนที่ได้ง่ายและปลดปล่อยออกมาได้ดีกว่า โดยมีรูปแบบที่ถูกตรึงคิดเป็นร้อยละ 99.30 – 99.65 และ 55.91 – 70.58 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าอิทธิพลของกระบวนการหมักจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของรูปแบบที่ถูกตรึงของธาตุทั้งสอง โดยสัมพันธ์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (FP  $r = -0.411$ ,  $p < 0.05$  และ FK  $r = -0.537$ ,  $p < 0.01$ ) แต่ฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าโดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 49 ขณะที่โปแทสเซียมมีค่าสูงสุดในวันที่ 63 สำหรับรูปแบบที่เป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (AP) และโปแทสเซียม (AK) ได้รับอิทธิพลจากการปลดปล่อยออกมาชัดเจนจากรูปแบบที่ถูกตรึง ทำให้ตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการย่อยสลาย โดยสัมพันธ์กับ C/N ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (AP  $r = -0.334$ ,  $p < 0.05$  และ AK  $r = -0.455$ ,  $p < 0.01$ ) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณธาตุอาหารโดยรวมในช่วงอายุที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่พร้อมที่จะนำไปใช้ได้ (วันที่ 14-76) พบว่าปุ๋ยหมักมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสและโปแทสเซียมอยู่ในช่วงร้อยละ 1.31 – 2.26 และ 1.60 – 2.20 ตามลำดับ ซึ่งหากเก็บไว้เกินกว่า 77 วัน ธาตุอาหารทั้งสองจะค่อย ๆ ลดลง และคุณสมบัติอื่นอาจไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เช่น ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น จะเห็นได้ว่าธาตุอาหารแตกต่างกัน แม้ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีอัตราการปลดปล่อยที่เร็วช้าแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกปุ๋ยหมักเพื่อนำไปใช้จึงควรเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของเกษตรกรที่จะนำไปปรับปรุงดินที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาธาตุอาหารชนิดอื่น ๆ ที่อาจมีความเหมือนและแตกต่างกันในอนาคตต่อไป

60311309 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Nutrient, Phosphorus, Potassium, Manure compost

MR. KRITTAPAS THAMCHAROEN : THE DYNAMICS OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM DURING FERMENTING PERIOD OF MIXED COW AND PIG MANURES THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR NATDHERA SANMANEE, Ph.D.

The objective of this research was to study the dynamics of phosphorus and potassium during the fermenting period. The study was conducted for 4 months. The compost was divided after temperature into 3 phases, initial phase (day 0), thermophilic phase (day 1 – 13) and mature phase (since day 14) -- a ready state for utilization. Fixed and available forms of phosphorus and potassium were studied along with other fertilizer's characteristics. Fixed phosphorus (FP) was found greater than fixed potassium (FK) accounted for 99.30% – 99.65% and 55.91% – 70.58%, respectively. This corresponded with the nature of phosphorus in anion forms that easily bond well with common cations and organic matters. As potassium has a +1 charge, it is easily replaced with other higher charged cations and consecutively readily to be available. Although the composting process increased both fixed forms as noticeably by significantly correlated with carbon by nitrogen ration (C/N) (FP  $r = -0.411$ ,  $p < 0.05$  and FK  $r = -0.537$ ,  $p < 0.01$ ), fixed phosphorus increased at a faster rate. The highest peak of fixed phosphorus was reached within 49 days while fixed potassium took longer time for 63 days. The available forms of phosphorus (AP) and potassium (AK) were replenished by their fixed forms thorough out the fermenting period. Both also slowly increased when the fermenting process progressed as they were corresponding with C/N as well (AP  $r = -0.334$ ,  $p < 0.05$  and AK  $r = -0.455$ ,  $p < 0.01$ ). Nevertheless, all nutrient indices and other compost characteristics during the mature phase (days 14-76) was higher than the standard of the Department of Agriculture (2014). Total phosphorus and potassium were in the range of 1.31% - 2.26% and 1.60% - 2.20%, respectively. However, keeping compost longer than 77 days, both nutrients tended to decrease including other qualifications, such as electrical conductivity, etc., that might not meet the standard. In conclusion, although the composting process increased both nutrients in the same direction, the different nutrients got the different rates. Therefore, in order to apply compost to the field the purposes of farmers on the selective nutrients would deter the proper date to improve different soil qualities. Other nutrients might yield similar or different results. So, more study in this area should be investigated.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยอบรมสั่งสอน รวมถึงให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ พร้อมชี้แนะแนวทางในการทำงานและเทคนิคการเขียนงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อีกทั้งขอขอบคุณท่านอาจารย์กรรมการทั้ง 2 ท่าน ได้แก่รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และรองศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สว่างแจ้ง เป็นอย่างสูงที่คอยให้คำแนะนำและตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณ คุณผ่องศรี เผ่าภูรี และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกท่าน ซึ่งคอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนพระคุณแต่บิดา นายบุญสังข์ ธรรมเจริญ และมารดา นางแสงจันทร์ ธรรมเจริญ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาตลอด และเป็นแรงผลักดันให้แก่ผู้วิจัย

นาย กฤตภาส ธรรมเจริญ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 ปุ๋ยหมักมูลสัตว์.....	4
2.1.1 กระบวนการหมักปุ๋ย.....	5
2.1.1.1 การหมักแบบใช้ออกซิเจน.....	6
2.1.1.2 การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	6
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชของปุ๋ยหมัก.....	6
2.1.2.1 อุณหภูมิ.....	6
2.1.2.2 ความชื้น.....	7
2.1.2.3 ลักษณะของวัสดุที่นำมาหมัก.....	7

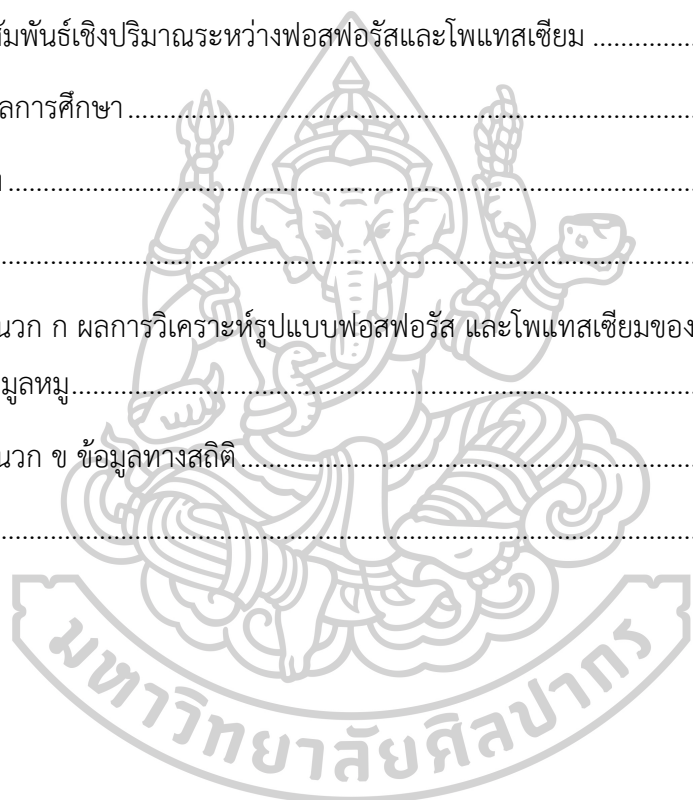


2.1.2.4	ความเป็นกรด - ต่าง.....	7
2.1.3	ประโยชน์ของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ .....	8
2.1.3.1	เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช.....	8
2.1.3.2	ปรับปรุงคุณภาพดินในทางเคมี.....	8
2.1.3.3	ปรับปรุงคุณภาพดินในทางกายภาพ .....	9
2.1.3.4	ปรับปรุงคุณภาพดินในทางชีวภาพ .....	10
2.2	ฟอสฟอรัส.....	10
2.2.1	รูปแบบของฟอสฟอรัส.....	12
2.2.1.1	ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง .....	12
2.2.1.2	ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์.....	12
2.2.2	วัฏจักรฟอสฟอรัส.....	12
2.2.3	บทบาทของฟอสฟอรัสที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	13
2.2.3.1	การงอกของเมล็ด.....	13
2.2.3.2	การเพิ่มความแข็งแรงของรากและการแตกหน่อ.....	14
2.2.3.3	การพัฒนาของดอกและเมล็ด.....	14
2.3	โพแทสเซียม.....	14
2.3.1	รูปแบบทางเคมีของโพแทสเซียม.....	16
2.3.1.1	รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้.....	16
2.3.1.2	รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้.....	16
2.3.2	รูปแบบความเป็นประโยชน์ต่อพืช.....	18
2.3.2.1	โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที.....	18
2.3.2.2	โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ.....	18
2.3.2.3	โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที.....	19
2.3.3	วัฏจักรโพแทสเซียม.....	20

2.3.4	บทบาทของโพแทสเซียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช .....	21
2.3.4.1	การงอกของเมล็ดพันธุ์.....	21
2.3.4.2	การเจริญเติบโตของพืช .....	21
2.3.4.3	การควบคุมปากใบของพืช .....	22
2.3.4.4	การลำเลียงน้ำและอาหาร .....	22
2.3.4.5	การสังเคราะห์แสง.....	22
2.3.4.6	ควบคุมสมดุลของสารอาหาร.....	22
2.3.4.7	การเจริญสืบพันธุ์และการพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช .....	23
2.3.4.8	ผลผลิต.....	23
2.3.4.9	คุณภาพของการเก็บเกี่ยว.....	23
2.4	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	23
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	28
3.1	อุปกรณ์และสารเคมี.....	28
3.1.1	อุปกรณ์ .....	28
3.1.2	สารเคมี.....	28
3.2	ขั้นตอนการหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ย.....	29
3.2.1	ขั้นตอนการหมักปุ๋ย.....	29
3.2.2	การเตรียมตัวอย่างปุ๋ย.....	29
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	30
3.3.1	อุณหภูมิ (Temperature).....	30
3.3.2	ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH).....	30
3.3.3	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity).....	30
3.3.4	ค่าความชื้น (Moisture).....	30
3.3.5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter).....	30

3.3.6 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (Phosphorus).....	30
3.3.6.1 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus; TP).....	31
3.3.6.2 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus; AP).....	31
3.3.6.3 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่ถูกต้อง (Fixed phosphorus; FP).....	31
3.3.6.4 Ascorbic Acid Method.....	31
3.3.7 วิธีการวิเคราะห์โพแทสเซียม (Potassium).....	32
3.3.7.1 การวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้งหมด (Total potassium; TK).....	32
3.3.7.2 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available potassium; AK).....	32
3.3.7.3 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ถูกต้อง (Fixed potassium; FK).....	32
3.3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	33
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา.....	34
4.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก.....	34
4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature).....	34
4.1.1.1 ระยะเริ่มผสม.....	35
4.1.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง.....	35
4.1.1.3 ระยะเจริญเต็มที่.....	35
4.1.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักตามกรมวิชาการเกษตร.....	36
4.1.2.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content).....	38
4.1.2.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH).....	38
4.1.2.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity).....	39
4.1.2.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter).....	40
4.1.2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio).....	41
4.1.2.6 ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และโพแทสเซียมทั้งหมด.....	42

4.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟอสฟอรัสระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย .....	42
4.2.1 สัดส่วนฟอสฟอรัส.....	42
4.2.2 ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ .....	44
4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโพแทสเซียมกระบวนการหมักปุ๋ย.....	48
4.3.1 สัดส่วนโพแทสเซียม.....	48
4.3.2 ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ .....	49
4.4 ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม .....	53
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	54
รายการอ้างอิง .....	56
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์รูปแบบฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักผสมมูลวัวและ มูลหมู.....	67
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางสถิติ.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	81



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุอาหารหลักในมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 ผลการศึกษาปริมาณธาตุอาหารจากปุ๋ยหมักมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ .....	5
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของฟอสฟอรัส.....	11
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโพแทสเซียม.....	16
ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่.....	25
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของการทำปุ๋ยหมัก.....	29
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลวัวผสมมูลหมูกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อการจัดจำหน่ายตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557 .....	37
ตารางที่ 4.2 การแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง และ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เรียงจากน้อยไปหามาก .....	44
ตารางที่ 4.3 การแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมด โพแทสเซียมที่ถูกตรึง และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เรียงจากน้อยไปหามาก.....	50
ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมทั้ง 2 รูปแบบ.....	53

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของปุ๋ยหมักมูลสัตว์.....	4
ภาพที่ 2.2 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของฟอสฟอรัส.....	11
ภาพที่ 2.3 วัฏจักรฟอสฟอรัส.....	13
ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของโพแทสเซียม.....	15
ภาพที่ 2.5 โพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) ที่ดูดยึดไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดิน.....	17
ภาพที่ 2.6 รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ในแร่ดินเหนียว.....	17
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ในระบบดิน - พืช.....	19
ภาพที่ 2.8 วัฏจักรโพแทสเซียม.....	21
ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุและฟอสฟอรัสทั้งหมดตลอดกระบวนการหมัก... 24	24
ภาพที่ 2.10 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบปริมาณของโพแทสเซียมในรูปใช้ประโยชน์ได้ง่ายที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักในกองปุ๋ยหมักมูลหมู (กรัม/กิโลกรัม) โดยใช้ Duncan Test.....	25
ภาพที่ 2.11 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปใช้ประโยชน์ได้ง่ายที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักในกองปุ๋ยหมักมูลไก่ (กรัม/กิโลกรัม) โดยใช้ Duncan Test. 26	26
ภาพที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโพแทสเซียม.....	26
ภาพที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์.....	27
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก.....	35
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก.....	38
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก... 39	39
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก.....	40
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักกับระยะเวลาการหมัก ( $r = -0.515, p < 0.01$ ).....	41

ภาพที่ 4.6	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักกับระยะเวลาการหมัก ( $r = -0.674, p < 0.01$ ) .....	42
ภาพที่ 4.7	สัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (Fixed phosphorus; FP) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus; AP) ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	43
ภาพที่ 4.8	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test ( $p < 0.01$ )	45
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และรูปแบบของฟอสฟอรัส ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (FP) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (AP) ( $p < 0.05$ ).....	46
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N/P) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ( $r = -0.931, p < 0.01$ ).....	47
ภาพที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสและระยะเวลาการหมัก .....	47
ภาพที่ 4.12	สัดส่วนของโพแทสเซียมที่ถูกตรึงและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก .....	48
ภาพที่ 4.13	การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมด โพแทสเซียมที่ถูกตรึง และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test ( $p < 0.01$ ) .....	51
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และรูปแบบของโพแทสเซียม ได้แก่ โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (FK) และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (AK) ( $p < 0.05$ )....	52



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการหมักจากวัสดุที่เหลือใช้จากการทำเกษตรกรรม ซึ่งเป็นการลดต้นทุนจากการใช้ปุ๋ยเคมี อีกทั้งยังลดการปนเปื้อนของดินและสารเคมีตกค้างจากการใช้ปุ๋ยเคมี โดยใช้มูลสัตว์ไม่ว่าจะเป็น มูลไก่ มูลหมู มูลควายและมูลวัว ซึ่งนำมาหมักผสมกับเศษพืชต่าง ๆ และหัวเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ปุ๋ยหมักจะเปลี่ยนสภาพเป็นผงเปื่อยยุ่ย ละเอียดและมีสีน้ำตาลปนดำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) ซึ่งปุ๋ยหมักเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุจึงมีคุณสมบัติในการช่วยปรับปรุงคุณภาพดินทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยทางกายภาพปุ๋ยหมักมีความสามารถอุ้มน้ำได้ดี ทำให้ดินมีความชื้นพอเหมาะ ไม่แห้ง ในส่วนของทางด้านเคมีปุ๋ยหมักเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบในปริมาณมาก ทำให้ดินสามารถดูดซับธาตุอาหารได้สูง (Apori et al., 2021) จึงช่วยลดการสูญเสียธาตุอาหาร และทางชีวภาพทำให้ดินมีจุลินทรีย์ เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังเป็นแหล่งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559; Manitoba, 2015) ซึ่งกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักจะปลดปล่อยธาตุอาหารและเพิ่มปริมาณธาตุอาหารให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่ายขึ้น (Zaha et al., 2013) รวมทั้งอินทรีย์วัตถุที่เสถียร เช่น สารฮิวมิก ช่วยตรึงธาตุอาหารเหล่านี้ไม่ให้ถูกชะจากดินไปได้โดยง่าย (Jindo et al., 2016)

ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อความต้องการของพืช เนื่องจากพืชใช้ในการเจริญเติบโต ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารสำคัญที่ช่วยให้พืชสามารถจัดเก็บและถ่ายโอนพลังงาน รวมถึงการสังเคราะห์แสง นอกจากนี้ยังช่วยสังเคราะห์โปรตีนที่สำคัญต่อพืช ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของราก ดอก และเมล็ดของพืช (Alexander, 2016; Elliott, Davis, Waskom, Self, & Christensen, 2014) ซึ่งฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชนั้น ต้องอยู่ในรูปของฟอสเฟตไอออน ได้แก่ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ( $H_2PO_4^-$ ) และไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ( $HPO_4^{2-}$ ) สำหรับโพแทสเซียมมีหน้าที่สำคัญในการกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แป้งและโปรตีนของพืช อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการควบคุมการเปิด ปิดของปากใบ (Armstrong, 1987; พูนศิริ หอมจันทร์, 2559) ในธรรมชาติฟอสฟอรัสอาจถูกชะออกไปจากดินได้ ก่อให้เกิดปัญหากับแหล่งน้ำ ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) (Sharpley & Tunney, 2000) โดยการตรึงฟอสฟอรัสในดินด้วยอินทรีย์วัตถุ ช่วยทำให้ฟอสฟอรัสสามารถคงอยู่ในดินได้เป็นเวลานานขึ้นและทยอยปลดปล่อยออกมาสู่พืช เช่นเดียวกับโพแทสเซียมที่มีประจุ +1 ซึ่งถูกไล่ที่ด้วยไอออนที่มีประจุมากกว่าได้ง่าย



(Hue & Silva, 2000) ทำให้ถูกชะออกไปจากดินได้ง่าย และพืชมักง่ายต่อการขาดโพแทสเซียม ดังนั้นในพื้นที่ทางการเกษตรจึงมักมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช และจำเป็นต้องมีการเติมธาตุอาหารจำพวกฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในรูปแบบของปุ๋ยชนิดต่าง ๆ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาศักยภาพการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ ตลอดจนอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อปริมาณและสัดส่วนของรูปแบบฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม อันจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้ปุ๋ยหมัก ตลอดจนระยะเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสม รวมถึงแนวทางที่จะนำจัดการปุ๋ยหมักที่จะนำไปใช้ในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ณ ระยะเวลาต่าง ๆ ทั้งในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ และรูปที่ถูกตรึง

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมของปุ๋ยหมัก

1.2.3 เพื่อเป็นฐานข้อมูลให้แก่เกษตรกรได้นำไปเลือกใช้ปุ๋ยหมักที่ให้ธาตุอาหารทั้งสองในปริมาณที่มากที่สุด ตลอดจนระยะเวลาการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่เหมาะสมที่ยังคงให้ปริมาณธาตุอาหารทั้งสองที่เพียงพอและเป็นประโยชน์ได้

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อสัดส่วนปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม โดยศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยของธาตุอาหารทั้งสองที่ต่างชนิดกันจะมีความแตกต่างกัน

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการหมักปุ๋ยหมักมูลวัวผสมกับมูลหมู โดยนำมาหมักร่วมกับมูลค่างควา รำละเอียด น้ำหมักปลา และกากน้ำตาล ในอัตราส่วนร้อยละ 37.50 : 53.89 : 0.94 : 3.15 : 1.14 : 3.43 เป็นระยะเวลา 119 วัน และเก็บตัวอย่างปุ๋ยที่ระยะเวลา 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน จากนั้นนำตัวอย่างปุ๋ยไปทำการตรวจวัดพารามิเตอร์พื้นฐานเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557 ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารหลักที่ผ่านเกณฑ์กำหนด จากนั้นศึกษาสัดส่วนปริมาณและรูปแบบของธาตุอาหารหลัก 2 ชนิด ได้แก่ ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ทั้งในแง่ที่

เป็นประโยชน์ต่อพืช และรูปที่พร้อมจะปลดปล่อยออกมาได้ภายหลัง โดยมีอิทธิพลของกระบวนการหมักด้านระยะเวลาเป็นปัจจัยกำหนด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ในกระบวนการหมักที่อาจมีอิทธิพลต่อธาตุทั้งสอง ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เป็นต้น นำผลการศึกษามาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ณ ระยะเวลาต่าง ๆ ทั้งในรูปที่เป็นประโยชน์ และรูปที่ถูกตรึง

1.5.2 ทราบถึงระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมที่ให้ธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงที่สุด

1.5.3 ได้ฐานข้อมูลให้แก่เกษตรกรได้นำไปเลือกใช้ปุ๋ยหมักที่ให้ธาตุอาหารทั้งสองในปริมาณที่มากที่สุด ตลอดจนระยะเวลาการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่เหมาะสมที่ยังคงให้ปริมาณธาตุอาหารทั้งสองที่เพียงพอและเป็นประโยชน์ได้



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

ปุ๋ยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีธาตุอาหารของพืชเป็นองค์ประกอบ เมื่อใส่ลงในดินแล้วจะเกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารที่สำคัญให้แก่พืช โดยงานวิจัยฉบับนี้เน้นในเรื่องของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ ซึ่งเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ไม่มีการเติมแต่งสารเคมีลงไปในช่วงตอนการผลิต โดยธาตุอาหารของพืชมาจากกระบวนการหมักที่ใช้วัสดุอินทรีย์และอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย โดยกระบวนการหมักมีความสำคัญของปุ๋ยหมัก ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารของพืชของปุ๋ยหมัก และประโยชน์ของปุ๋ยหมัก มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ปุ๋ยหมักมูลสัตว์

ปุ๋ยหมักมูลสัตว์ (animal manure) เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ประกอบด้วยมูลสัตว์ สิ่งขับถ่ายของสัตว์ รวมถึงวัสดุที่รองบนพื้นคอกของสัตว์ชนิดต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งปุ๋ยหมักมูลสัตว์ช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหลักให้แก่พืชไม่ว่าจะเป็น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม รวมถึงธาตุอาหารรอง เช่น ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี โดยสัตว์ต่างชนิดกันจะให้ธาตุอาหารที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้สิ่งแวดล้อม ที่อยู่อาศัยของสัตว์ และอาหารที่สัตว์กินเข้าไป ยังทำให้คุณสมบัติและธาตุอาหารในปุ๋ยหมักมูลสัตว์มีความแตกต่างกัน (Lorimor, Powers, & Sutton, 2004; Manitoba, 2015) ซึ่งปุ๋ยหมักมูลสัตว์ยังช่วยเป็นสารปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมแก่การเพาะปลูกพืช



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของปุ๋ยหมักมูลสัตว์.

ปรับปรุงจาก *Properties of Manure* (P.1), by Manitoba Agriculture, 2015, Food and Rural Development.

## ตารางที่ 2.1

ปริมาณธาตุอาหารหลักในมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ

มูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	ฟอสฟอรัส (ร้อยละ)	โพแทสเซียม (ร้อยละ)
มูลสุกร	1.70	2.57	1.05
มูลไก่	2.33	2.52	2.45
มูลวัว	1.40	0.41	1.65
มูลเป็ด	1.38	1.27	1.10
มูลกระบือ	1.27	0.48	1.03
มูลค่างคาว	1.54	14.28	0.60

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก วัสดุอินทรีย์และปุ๋ยคอกในพื้นที่ทำการเกษตร (น.26 – 27), กรมวิชาการเกษตร, 2548, กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร.

นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาปริมาณธาตุอาหารระหว่างกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ โดยนำมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ มาหมักร่วมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงปริมาณของธาตุอาหารที่เพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 2.2

## ตารางที่ 2.2

ผลการศึกษาปริมาณธาตุอาหารจากปุ๋ยหมักมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ

ปุ๋ยหมักมูลสัตว์	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม	อ้างอิง
มูลโคเนื้อ/ฟางข้าว	1.99%	2.01%	1.97%	Eckhardt et al., 2018
มูลหมู/ฟางข้าว	31.1 g/Kg	3.01%	1.85%	Chi et al., 2020
มูลวัว/ผักตบชวา	1.40%	-	2.62%	Singh, 2013
มูลไก่/รำละเอียด	3.30%	1.2%	9.9%	ปัญญา สงเสริม, 2559

## 2.1.1 กระบวนการหมักปุ๋ย

กระบวนการหมักปุ๋ยเป็นการย่อยวัสดุจำพวกสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ให้เป็นฮิวมัส (Humus) ซึ่งช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างดิน ช่วยเพิ่มโพรงอากาศ ทำให้ลดการอัดตัวของดิน นอกจากนี้ยังช่วยให้ดินระบายน้ำและอากาศได้ดี (ฉัตรชัย จันทร์แดงดวง, 2550) โดยกระบวนการ

หมักปุ๋ยสามารถทำได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ กระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน (aerobic compost) และ กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic compost) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.1.1 การหมักแบบใช้ออกซิเจน

การหมักแบบใช้ออกซิเจนเป็นการหมักโดยอาศัยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุไม่ว่าจะเป็นไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งในการหมักแบบใช้ออกซิเจนนี้ จำเป็นต้องมีสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น มีออกซิเจนเพียงพอต่อการใช้งานของจุลินทรีย์ มีสัดส่วนของธาตุอาหารไนโตรเจนต่อคาร์บอนที่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ และมีความชื้นที่เหมาะสม โดยในขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ประเภทไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายแล้ว และพลังงานความร้อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2547; Mehta & Sirari, 2018)

### 2.1.1.2 การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นการหมักแบบใช้จุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต โดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ มีความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุประเภทไนโตรเจนได้สูง แต่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุประเภทคาร์บอนได้ต่ำ และมีปัญหาเรื่องการส่งกลิ่นเหม็นของแก๊สมีเทน แก๊สไข่เน่า และแก๊สแอมโมเนีย นอกจากนี้การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังได้ปุ๋ยที่มีคุณภาพต่ำและยังใช้เวลาในการหมักนานกว่าการหมักแบบใช้ออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2547; Gotaas, 1956)

## 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชของปุ๋ยหมัก

การย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชของปุ๋ยหมักมักเกิดในสภาวะที่เหมาะสม เช่น ได้รับอุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด - ด่างที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์ลงในดิน สารประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในปุ๋ยหมักไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสารอื่น ๆ จะถูกปลดปล่อยออกมาและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน เกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ไนเตรทไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) และฟอสฟอรัส 2 รูปแบบ ได้แก่ โมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) โดยรากของพืชจะดูดซับได้ทันที ในส่วนของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักมูลสัตว์มักอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้และเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที (Mehta & Sirari, 2018; Misra, Roy, & Hiraoka 2003; Pace, Miller, & Farrell-Poe, 1995)

### 2.1.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก โดยทั่วไปอุณหภูมิในการหมักปุ๋ยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม ระยะอุณหภูมิสูง และระยะที่เจริญเต็มที่ ซึ่งในระยะเริ่มผสมเป็นระยะที่เริ่มทำการผสมปุ๋ยหมัก อุณหภูมิในช่วงนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมภายนอก ในส่วนของระยะอุณหภูมิสูง จะเกิดขึ้นใน 2 - 3 หลังจากทำการหมักปุ๋ย โดย



อุณหภูมิสูงถึง 50 – 65 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงที่อุณหภูมิสูงเป็นลักษณะที่ดีของการหมักทำปุ๋ยแบบใช้ออกซิเจนและบ่งบอกถึงจุลินทรีย์มีความสามารถในการทำงานได้ดี โดยในระยะนี้แบคทีเรียที่ก่อโรคจะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเมล็ดวัชพืชจะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส (Misra, Roy, & Hiraoka 2003) หากอุณหภูมิในปุ๋ยหมักสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุช้าลง และระยะที่เจริญเต็มที่ อุณหภูมิจะคงที่ปุ๋ยหมักพร้อมใช้งานสามารถนำไปใช้ประโยชน์แก่พืชได้ (Diaz & Savage, 2007)

### 2.1.2.2 ความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งปริมาณความชื้นที่ดีที่สุดในการทำปุ๋ยหมักอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 50 – 60 หากมีปริมาณความชื้นต่ำเกินไปหรือต่ำกว่าร้อยละ 30 จะส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถเข้าถึงเนื้อปุ๋ยได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ได้ยาก ในขณะที่ปริมาณความชื้นสูงเกินไป ส่งผลให้ปุ๋ยหมักระบายอากาศได้ไม่ดี ทำให้เกิดการย่อยแบบไร้ออกซิเจนและเกิดปัญหาของกลิ่นได้ (Misra, Roy, & Hiraoka 2003) นอกจากนี้เกษตรกรหรือผู้ผลิตปุ๋ยหมักที่ขาดอุปกรณ์วัดความชื้นสามารถตรวจวัดความชื้นได้ด้วยตนเอง โดยใช้มือกำปุ๋ยหมักแล้วบีบเบา ๆ หากมีปริมาณน้ำซึมออกตามร่องนิ้วมือเล็กน้อยแสดงถึงความพอเหมาะ แต่หากบีบแล้วเนื้อปุ๋ยไหลออกมากับน้ำด้วยหมายความว่าปุ๋ยหมักนั้นมีปริมาณความชื้นจนเกินไป และหากดักปุ๋ยหมักขึ้นมาแล้วไม่สามารถกำหรือบีบให้เกาะเป็นก้อนได้ แสดงว่าปุ๋ยหมักจวนเกินไป (Pace, Miller, & Farrell-Poe, 1995) อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ซึ่งจากการระเหยของน้ำเกษตรกรอาจพิจารณาการเติมน้ำระหว่างกระบวนการหมัก เพื่อให้อัตราส่วนอากาศและน้ำอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ตลอดเวลา

### 2.1.2.3 ลักษณะของวัสดุที่นำมาหมัก

วัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาทำการหมักปุ๋ยควรคำนึงถึงขนาดและปริมาณน้ำ ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นที่มีขนาดเล็ก ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ดี เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้จุลินทรีย์สัมผัสกับพื้นที่ผิวของวัตถุดิบได้ดี แต่หากวัสดุที่มีขนาดเล็กจนเกินไป ทำให้เกิดการระบายอากาศได้ไม่ดี ในส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นที่มีความสด ทำให้มีปริมาณน้ำมาก ส่งผลให้ปุ๋ยหมักระบายอากาศได้ไม่ดีและเกิดกลิ่นเหม็นได้เช่นกัน (Misra, Roy, & Hiraoka 2003; Pace, Miller, & Farrell-Poe, 1995)

### 2.1.2.4 ความเป็นกรด - ด่าง

ค่าความเป็นกรด - ด่างของปุ๋ยหมัก ส่งผลโดยตรงต่อประชากรของจุลินทรีย์ โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงระหว่าง 5.5 – 8.5 หากปุ๋ยหมักมีความเป็นด่างมากเกินไปจะส่งผลต่อการสูญเสียไนโตรเจน โดยไนโตรเจนจะระเหยไปในรูปของแอมโมเนีย

(Misra, Roy, & Hiraoka 2003) และหากปุ๋ยหมักมีความเป็นกรดมากเกินไป ส่งผลให้แบคทีเรียและแอคติโนมัยซีสเจริญเติบโตช้าลง แต่เชื้อราจะเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้ดีกว่า เนื่องจากเชื้อราเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถทนกรดได้มากกว่า (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

### 2.1.3 ประโยชน์ของปุ๋ยหมักมูลสัตว์

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักมูลสัตว์มีมากมายหลายด้านไม่ว่าจะเป็นแหล่งธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองแก่พืช อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพดินในด้านต่าง ๆ และเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1.3.1 เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช

ปุ๋ยหมักมูลสัตว์เป็นหลักธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองให้แก่พืชไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน โดยปุ๋ยหมักปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ และพืชสามารถนำธาตุอาหารเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558) ซึ่งในธาตุอาหารแต่ละชนิดมีความสำคัญต่อพืชแตกต่างกันออกไป เช่น ไนโตรเจนช่วยให้พืชมีสีเขียว เร่งการเจริญเติบโตทางใบ ในส่วนของฟอสฟอรัสช่วยเร่งการเจริญเติบโตของพืช ควบคุมการออกดอกออกผล และการสร้างเมล็ดพืช และโพแทสเซียมช่วยในการสังเคราะห์น้ำตาล ช่วยให้ผลเจริญเติบโตและมีรสชาติที่ดี (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

#### 2.1.3.2 ปรับปรุงคุณภาพดินในทางเคมี

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ในการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี โดยปุ๋ยหมักมูลสัตว์ช่วยทำให้ดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) และนำไฟฟ้า (EC) ได้มากขึ้น (Kuo, Ortiz-Escobar, Hue, & Hummel, 2004) ส่งผลให้ดินดูดซับธาตุอาหารของพืชไว้ได้สูง ลดการสูญเสียธาตุอาหาร ทำให้พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559) นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมความเป็นกรด – ด่างแก่ดิน โดยเฉพาะในปุ๋ยหมักมูลสัตว์ปีก มีส่วนช่วยเพิ่ม pH ให้แก่ดิน ทำให้ดินที่มีความเป็นกรดอยู่ในสภาพที่เป็นกลาง ทำให้ดินเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืช โดยมีการศึกษาของ Boman et al. (1996) ได้มีการนำปุ๋ยหมักมูลสัตว์มาใช้ปลูกพืชในบางแปลงเป็นระยะเวลา 10 ปี พบว่าหน้าดินของแปลงที่มีการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.32 ซึ่งสูงกว่าแปลงควบคุมที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.83 และการศึกษาของ Sharpley et al. (1993) ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด – ด่างของดินที่มีการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์ พบว่าพื้นผิวของดินที่มีการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์และปุ๋ยหมักมูลสัตว์ปีกเป็นเวลา 5 ปี มีค่าความเป็นกรด – ด่างสูงกว่าดินที่ไม่ได้เติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์ในช่วงเวลาเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบการตอบสนองการเติบโตของพืชตระกูลถั่วในเขตร้อนกับปุ๋ยหมักและปุ๋ยอินทรีย์ในการปรับปรุงดินเปรี้ยว ซึ่งทำการเพาะปลูกในโรงเรือน พบว่าปุ๋ยหมักมูลไก่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับปุ๋ยหมัก (Ca(OH)<sub>2</sub>) ในการเพิ่มค่าความเป็นกรด – ด่างของดิน และมีส่วน

ช่วยลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al) (Hue, 1992) ซึ่งการศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าพืชตระกูลถั่วในเขตร้อนสามารถดูดซับแคลเซียมจากปุ๋ยหมักมูลสัตว์ได้ดี ดังนั้นการใช้ปุ๋ยหมักมูลสัตว์กับดินเปรี้ยวไม่เพียงแต่ให้สารอาหารและอินทรีย์วัตถุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชเท่านั้น แต่ยังช่วยลดความเป็นกรดของดินด้วย ซึ่งจะช่วยเพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมในดิน (Risse et al., 2006)

### 2.1.3.3 ปรับปรุงคุณภาพดินในทางกายภาพ

การใช้ปุ๋ยหมักมูลสัตว์เป็นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้แกดิน ซึ่งอินทรีย์วัตถุนี้ช่วยในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน (Risse et al., 2006) เช่น ทำให้ดินมีความอุ้มน้ำได้ดี ส่งผลให้ดินมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังช่วยให้ดินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ทำให้ดินที่หยาบสามารถเกาะตัวกันได้ดีขึ้น ในส่วนของดินเหนียวปุ๋ยหมักจะช่วยให้ดินเหนียวมีความร่วนซุย ทำให้เกิดการระบายอากาศและระบายน้ำได้ดี และยังสามารถช่วยลดความหนาแน่นของดิน เมื่ออากาศแห้งจะทำให้ดินไม่แข็งตัว (โสฬส แซ่ลี้ม, 2559; Kuo, Ortiz-Escobar, Hue, & Hummel, 2004) ซึ่งการเพาะปลูกพืชไร่แบบไม่มีการหมุนเวียน อาจทำให้คุณภาพทางกายภาพของดินทางการเกษตรลดลง โดยคุณภาพทางกายภาพของดินที่ลดลงนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเจริญเติบโตของพืชลดลง และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน ในการศึกษาของ Reynolds, Bowman, Drury, Tan, & Lu (2002) พบว่าการแก้ไขดินเสื่อมโทรมด้วยปุ๋ยหมักช่วยลดความหนาแน่นและปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และในการศึกษาดินร่วนปนทรายของ Schjonning et al. (1994) พบว่าดินที่ผ่านการเติมปุ๋ยหมักมีการบดอัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้เติมปุ๋ยหมักที่มีปริมาณน้ำและความหนาแน่นเท่ากัน และการศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มมากขึ้นในดินที่มีปุ๋ยหมัก ทำให้ดินมีความเปราะ ระบายน้ำและอากาศได้ดี ทั้งนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของอินทรีย์วัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณปุ๋ยหมักที่เติมลงไป ซึ่ง Nyakatawa et al. (2001) รายงานว่าการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์ปีกลงในดินร่วนปนทรายตลอดระยะเวลา 3 ปี ส่งผลให้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นร้อยละ 55 – 80 และการศึกษาส่วนใหญ่ระบุว่าควรมีการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์อย่างน้อย 2 ปี เพื่อให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น (Stewart, 1991) โดยการศึกษาของ Carter et al. (2004) พบว่าประโยชน์ของปุ๋ยหมักในคุณสมบัติทางกายภาพของดิน (ความหนาแน่นรวม, ความพรุนของดิน, อัตราการแพร่ของออกซิเจน, พื้นที่รูพรุน ระบายน้ำ ระบายอากาศ) ทำให้พื้นที่ที่เติมปุ๋ยหมักมีปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ควบคุม ซึ่งการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน โดยการเติมปุ๋ยหมักยังช่วยลดพลังงานที่จำเป็นสำหรับการไถพรวนแล้ว ยังช่วยลดความเสื่อมโทรมของดินได้อีกด้วย (Risse et al., 2006)

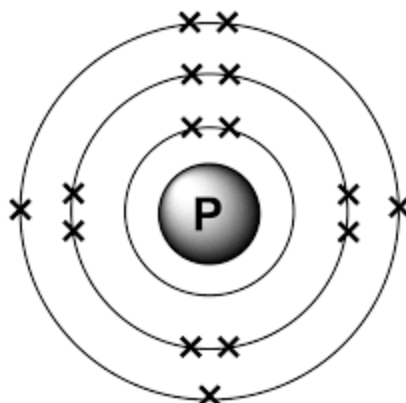


### 2.1.3.4 ปรับปรุงคุณภาพดินในทางชีวภาพ

การปรับปรุงคุณภาพดินในทางชีวภาพของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ เป็นการเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินและกระบวนการทางชีวภาพ (Risse et al., 2006) โดยการศึกษาของ Wander, Traina, Stinner, & Peters (1994) ได้ทำการศึกษาจุลินทรีย์ในดิน 3 ระบบ ได้แก่ (1) ปลูกพืชโดยใช้ปุ๋ยหมักมูลสัตว์ (2) พืชตระกูลถั่ว และ (3) การปลูกพืชแบบธรรมชาติที่ใช้ปุ๋ยเคมีมีไนโตรเจน พบว่าการปลูกพืชโดยใช้ปุ๋ยหมักและปลูกพืชตระกูลถั่ว มีกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระดับสูงและมีความหลากหลายของจุลินทรีย์มากกว่าระบบทั่วไป นอกจากนี้การเติมปุ๋ยหมักยังทำให้ดินเป็นแหล่งพลังงานและเป็นสารอาหารให้แก่จุลินทรีย์ ส่งผลให้จุลินทรีย์ในดินเพิ่มจำนวน เพิ่มปริมาณ และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการหมุนเวียนและถ่ายเทธาตุอาหารในบริเวณที่มีการเติมปุ๋ยหมักมูลสัตว์ (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

## 2.2 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นธาตุในกลุ่มอโลหะ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1669 โดยมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ P เลขอะตอม 15 น้ำหนักมวลอะตอม 30.974 จุดเดือด 280.5 °C จุดหลอมเหลว 44.15 °C ดังตารางที่ 2.3 และมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน คือ [Ne] 3s<sup>2</sup>3p<sup>3</sup> ดังภาพที่ 2.2 (Royal society of chemistry, 2021) โดยในธรรมชาติฟอสฟอรัสสามารถทำปฏิกิริยาได้สูง จึงไม่พบในรูปอิสระ ส่วนใหญ่จะพบในรูปของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ยาก หรือเรียกว่าฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (Fixed Phosphorus) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ต้องอาศัยกระบวนการต่าง ๆ ทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แก่พืชจะอยู่ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ หรืออยู่ในรูปของฟอสเฟตไอออน เช่น H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> และ HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>



ภาพที่ 2.2 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของฟอสฟอรัส.

From *Explanation of phosphorus ionizations*, by Lefteris Kaliambos, 2015, Retrieved from [https://lefteris-kaliambos.wikia.org/wiki/EXPLANATION\\_OF\\_PHOSPHORUS\\_IONIZATIONS](https://lefteris-kaliambos.wikia.org/wiki/EXPLANATION_OF_PHOSPHORUS_IONIZATIONS)

ตารางที่ 2.3

คุณสมบัติทั่วไปของฟอสฟอรัส

คุณสมบัติของฟอสฟอรัส	
สัญลักษณ์ทางเคมี	P
เลขอะตอม	15
การจัดเรียงค่าอิเล็กตรอน	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
มวลอะตอม	30.974
ความหนาแน่นที่ 20 °C	$1.823 \text{ g/cm}^3$
จุดหลอมเหลว	44.15 °C
จุดเดือด	280.5 °C

หมายเหตุ. Adapted from *Phosphorus*, by Royal Society of Chemistry, 2021, Retrieved from <https://www.rsc.org/periodictable/element/15/phosphorus#:~:text=It%20has%20a%20tetrahedral%20shape%20and%20has%20the%20formula%20P4.&text=The%20two%20main%20forms%20of,flammable%20when%20exposed%20to%20air.>

## 2.2.1 รูปแบบของฟอสฟอรัส

### 2.2.1.1 ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง

ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงหรือฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำ มักอยู่ในรูปขององค์ประกอบกลุ่มแร่ฟอสเฟต เช่น แร่อะพาไทต์ และรูปที่ถูกตรึงในอนุภาคดินเหนียว ซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่พืชได้ยาก ต้องอาศัยการผุพัง การสลายตัว และการย่อยสลายของจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการมิเนอร์ลไลเซชัน (Mineralization) ในการเปลี่ยนรูปให้เป็นประโยชน์แก่พืช นอกจากนี้การตรึงฟอสฟอรัสยังขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยในสภาวะที่เป็นกรดฟอสฟอรัสจะจับกับออกไซด์ (Oxide) หรือไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) ของอะลูมิเนียมหรือเหล็ก เช่น  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และในสภาวะที่เป็นด่างฟอสฟอรัสจะถูกตรึงอยู่กับแคลเซียม (Calcium) หรือแมกนีเซียม (Magnesium) เช่น  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$  ซึ่งฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงนี้ยังทำหน้าที่เป็นแหล่งสำรองของฟอสฟอรัสในดินหรือปุ๋ยหมักที่ค่อย ๆ ทยอยปลดปล่อยรูปที่เป็นประโยชน์ออกมาให้แก่พืชในภายหลัง

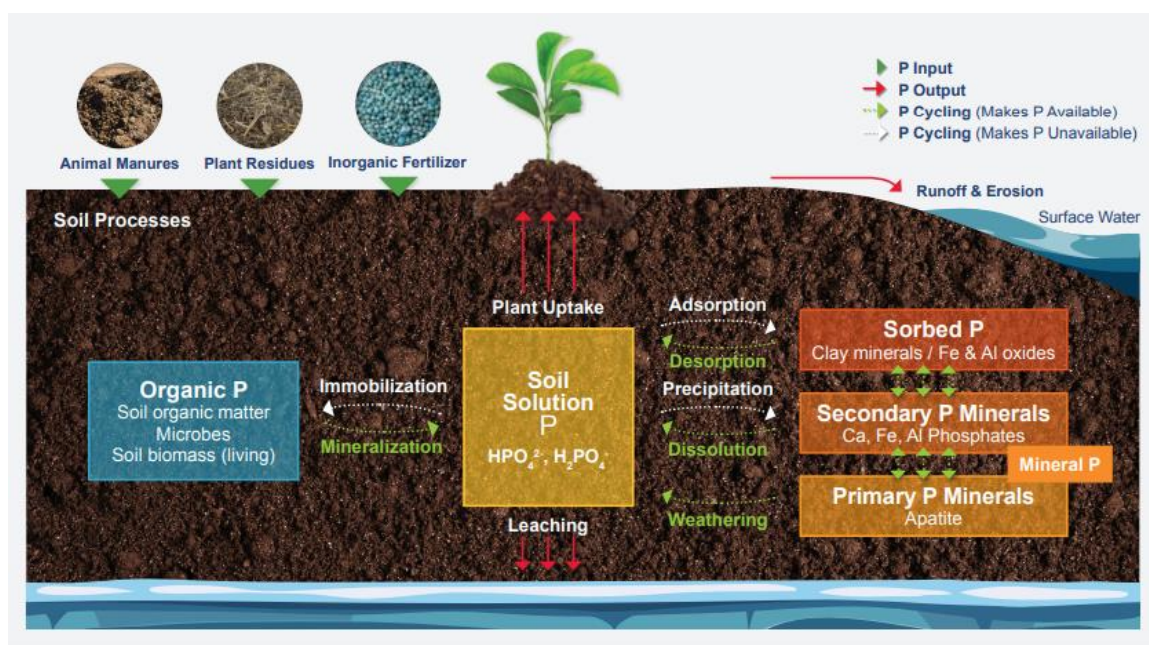
### 2.2.1.2 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์พบในรูปของฟอสเฟตไอออน เช่น ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) และ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยฟอสฟอรัสในรูปนี้มักได้จากการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในรูปที่ถูกตรึงผ่านกระบวนการมิเนอร์ลไลเซชัน ในทางกลับกันฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อาจถูกเปลี่ยนไปเป็นฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงด้วยเช่นกัน ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของดินและปุ๋ยหมัก เช่น ค่าความเป็นกรด - ด่าง เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดค่อนข้างสูง เหล็กและอะลูมิเนียมจะจับกับฟอสเฟตได้ง่าย ซึ่งทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ถูกตรึง และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก ส่วนปริมาณดินเหนียวในดินจะเกิดการยึดกันระหว่างประจุลบของฟอสเฟตกับประจุบวกบริเวณผิวดินเหนียว ด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าสถิต (Electrostatic bonding) จากนั้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange reaction) ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนกันระหว่างไฮดรอกไซด์กับฟอสเฟต และเมื่อฟอสเฟตเข้าไปแทนที่จะเกิดพันธะเคมีกับโครงสร้างของดินเหนียวทำให้ฟอสเฟตนั้นอยู่ในรูปที่ถูกตรึงเช่นกัน

## 2.2.2 วัฏจักรฟอสฟอรัส

การเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสให้แก่ดินโดยผ่านการใส่ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมักมูลสัตว์ สารชีวภาพ หรือซากพืชซากสัตว์ และหินแร่ต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในดิน ส่งผลให้ดินมีฟอสฟอรัสหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยฟอสฟอรัสที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ฟอสฟอรัสอินทรีย์ ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงโดยแร่ธาตุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และหินแร่ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ เช่น แร่อะพาไทต์ (apatite) สตรองไคต์ (strengite) และวาริสไซต์ (variscite) เมื่อฟอสฟอรัสรูปแบบเหล่านี้เกิดการผุพัง การสลายตัว และการย่อยสลายด้วย

กิจกรรมของจุลินทรีย์ เกิดเป็นฟอสฟอรัสรูปที่ละลายน้ำได้และเป็นประโยชน์แก่พืช ทำให้พืชสามารถนำไปใช้งานได้ทันที ในส่วนของฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Prasad & Chakraborty, 2019) พืชสามารถนำไปใช้งานได้ทันที นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังสามารถเปลี่ยนจากรูปละลายน้ำได้เป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำได้อีกด้วย อีกทั้งหากพืชและสัตว์ตายลง จะทำให้เกิดการหมุนเวียนฟอสฟอรัสกลับลงสู่ดินอีกครั้ง จึงเกิดเป็นวัฏจักรฟอสฟอรัส เมื่อระยะเวลาผ่านไป ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินอาจลดน้อยลงจากการถูกชะล้างและเกิดการพัดพาลงสู่แหล่งน้ำ และเกิดการสะสมในตะกอนต่อไป ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรฟอสฟอรัส.

From *Phosphorus Basics: Understanding phosphorus forms and their cycling in the soil*, by R. Prasad and D. Chakraborty, 2019, Agriculture. Copyright 2019 by The Alabama cooperative extension system.

### 2.2.3 บทบาทของฟอสฟอรัสที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ฟอสฟอรัสจัดเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญของพืช ซึ่งบทบาทของฟอสฟอรัสในกระบวนการเจริญเติบโตและการเพิ่มผลผลิตของพืช ได้แก่ การงอกของเมล็ด การเพิ่มความแข็งแรงของรากและลำต้น และการสร้างดอกและเมล็ด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.2.3.1 การงอกของเมล็ด

ฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการงอกของเมล็ดและยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของต้นกล้า ซึ่งหลังจากการงอกของเมล็ดฟอสฟอรัสจะถูกดูดซึมผ่านรากของพืช ทำให้ต้นอ่อนเกิด



การเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น โดยงานวิจัยของ Zhu and Smith (2001) พบว่าเมล็ดข้าวสาลีที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสำรองสูงมีความสามารถในการดูดซึมฟอสฟอรัสในดินได้ดีกว่าเมล็ดข้าวสาลีที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสำรองต่ำ เนื่องจากในเมล็ดข้าวสาลีที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสำรองสูงมีการพัฒนาระบบรากได้ดี แต่อย่างไรก็ตามเมล็ดพืชที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำ ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของต้นกล้าเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดพืชที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง (Malhotra, Sharma & Pandey, 2018)

### 2.2.3.2 การเพิ่มความแข็งแรงของรากและการแตกหน่อ

ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก น้ำตาล และไขมัน ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชตั้งแต่ระดับเซลล์จนถึงระดับพืชทั้งหมด เช่น ความสูงของพืช พื้นที่ใบ จำนวนใบ การแตกหน่อ โดยใบของพืชที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีขนาดเซลล์เล็กกว่าใบที่มีฟอสฟอรัสเพียงพอ นอกจากนี้ฟอสฟอรัวยังทำหน้าที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโตและการแพร่กระจายของราก ทำให้เกิดการดูดซึมธาตุอาหารจากรากไปสู่ใบและลำต้นได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในสภาวะที่พืชขาดฟอสฟอรัสในระยะยาว ส่งผลให้ความแข็งแรงของลำต้นและระบบรากลดลง (Malhotra, Sharma & Pandey, 2018)

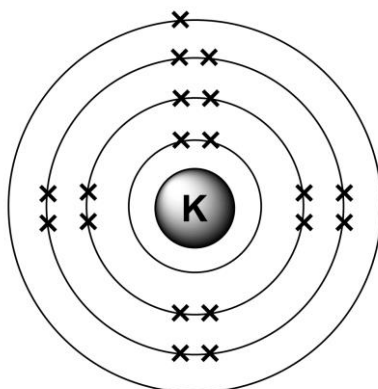
### 2.2.3.3 การพัฒนาของดอกและเมล็ด

ฟอสฟอรัสมีบทบาทที่สำคัญในการปรับปรุงการเจริญพันธุ์ของพืช รวมถึงการเกิดดอกและเมล็ด อีกทั้งฟอสฟอรัวยังมีส่วนช่วยในการผลิตแอนโธไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดง น้ำเงิน และม่วงในดอกและผลของพืช โดยพบว่าแอนโธไซยานินจะลดลงในสภาวะที่พืชขาดฟอสฟอรัส (Chen et al., 2013) นอกจากนี้ยังพบฟอสฟอรัสจำนวนมากในเมล็ดและผลของพืช ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างและพัฒนาเมล็ดในธัญญาพืช เช่น ข้าว และข้าวสาลี และในงานวิจัยของ Ma et al. (2002) ได้ทำการเปรียบเทียบการตอบสนองต้นดอก lupin ขาว (white lupin) ที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่าง ๆ ในดิน พบว่าดินที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำมีผลกระทบต่อระยะเวลาของการออกดอกและจำนวนดอกของต้นดอก lupin สีขาว ส่งผลให้จำนวนดอกของต้น lupin ลดลงและใช้ระยะเวลาในการออกดอกนานขึ้น

## 2.3 โปแทสเซียม

โปแทสเซียม (Potassium) เป็นธาตุในกลุ่มโลหะอัลคาไล มีลักษณะเป็นโลหะสีขาวเงินอ่อน ๆ ซึ่งมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ K เลขอะตอม 19 น้ำหนักมวลอะตอม 39.102 จุดเดือด 774.0 °C จุดหลอมเหลว 63.65 °C ดังตารางที่ 2.4 และมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน [Ar] 4s<sup>1</sup> ดังภาพ 2.4 ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1807 (Tiecke, 2019) ซึ่งโปแทสเซียมบริสุทธิ์ในธรรมชาติมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก จึงมักพบโปแทสเซียมในรูปของสารประกอบมากกว่า โดยทั่วไปโปแทสเซียมที่พบ

ในธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นในแหล่งน้ำ ในดินและแร่ มักมีรูปแบบแตกต่างกันออกไป โดยโพแทสเซียมในแหล่งน้ำส่วนใหญ่จะปะปนอยู่ในดินตะกอน ในส่วนของโพแทสเซียมในดินและแร่เกิดมาจากการสลายตัวของหินและแร่ นอกจากนี้ในปัสสาวะของสัตว์ยังเป็นอีกรูปแบบที่ทำให้เกิดโพแทสเซียมในดินได้ โดยโพแทสเซียมที่อยู่ในดินหากอยู่ในรูปแบบของโพแทสเซียมไอออนพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Prajapati & Modi, 2016)



ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของโพแทสเซียม.

From *Table of Elements*, by Shrenil Sharma, 2014, Retrieved from <https://sites.google.com/site/tableofelementsbyshrenilsharma/Downhome/potassium>

com/site/tableofelementsbyshrenilsharma/Downhome/potassium



## ตารางที่ 2.4

## คุณสมบัติทั่วไปของโพแทสเซียม

คุณสมบัติของธาตุโพแทสเซียม	
สัญลักษณ์ทางเคมี	K
กลุ่มโลหะ	อัลคาไล
เลขอะตอม	19
การจัดเรียงค่าอิเล็กตรอน	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
มวลอะตอม	19
ความหนาแน่นที่ 20 °C	0.862 g/cm <sup>3</sup>
ความดันไอที่ 20 °C	$1.3 \times 10^{-8}$ mbar
จุดหลอมเหลว	63.65 °C
จุดเดือด	774.0 °C

หมายเหตุ. Adapted from *Properties of Potassium* (pp. 3), by T.G. Tiecke, 2019, Retrieved from <https://www.tobiastiecke.nl/archive/PotassiumProperties.pdf>

### 2.3.1 รูปแบบทางเคมีของโพแทสเซียม

รูปแบบทางเคมีของโพแทสเซียมมี 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ และรูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

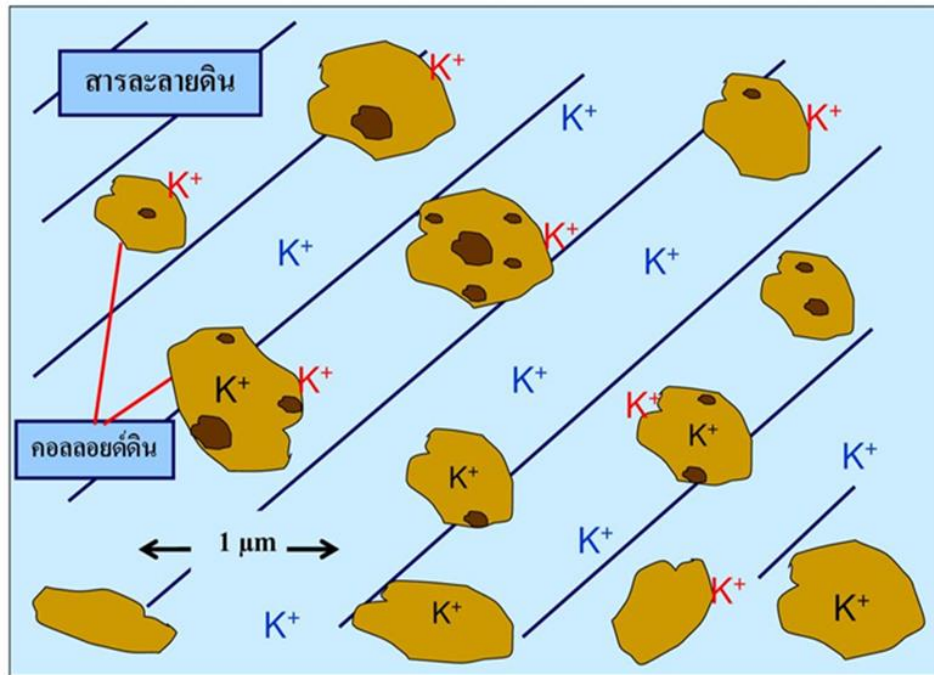
#### 2.3.1.1 รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้

รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ เช่น โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปไอออน ( $K^+$ ) ซึ่งถูกยึดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตที่สารคอลลอยด์ดิน โดยเฉพาะแร่ดินเหนียว ดังภาพที่ 2.5 (Mouhamad, Alsaede, & Iqbal, 2016) ซึ่งโพแทสเซียมในรูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้พืชสามารถนำไปประโยชน์ได้ทันที

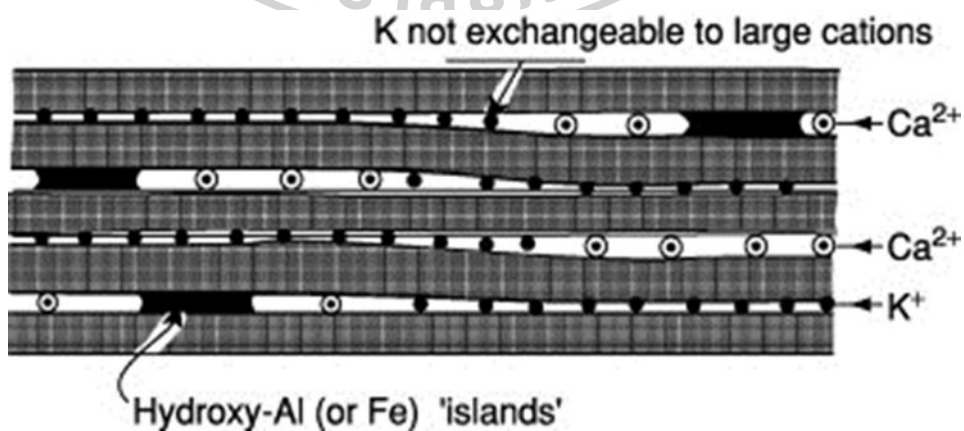
#### 2.3.1.2 รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้

โพแทสเซียมในรูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ยาก แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบในแร่ต่าง ๆ และโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในอนุภาคของดินเหนียว โดยโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบในแร่ต่าง ๆ พบในโซนลิ้ม (wedge zones) ของแร่ไมกา (micas) ที่ผู้กร่อนและเวอร์มิคูไลต์ (vermiculites) เฉพาะไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกับโพแทสเซียมไอออนเท่านั้นที่สามารถแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมจากโซนลิ้มได้ ส่วนไอออนบวกที่มีขนาดใหญ่ เช่น แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) ไม่สามารถเข้าไปในโซนลิ้มได้ ทำให้เกิดการตรึงโพแทสเซียมไอออนไว้ในอนุภาคของดินเหนียว ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งการปลดปล่อยโพแทสเซียมรูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ไปเป็นรูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ต้องอาศัยการผุพัง

ของแร่ดังกล่าว และเกิดจากการชะล้างหรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Rich, 1964) ในส่วนของโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในอนุภาคของดินเหนียว โดยจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโพแทสเซียมและพื้นผิวของดินเหนียวมากกว่าแรงไฮเดรชันระหว่างโพแทสเซียมไอออนแต่ละตัว ส่งผลให้โครงสร้างผลึกในแร่ดินเหนียวยุบลงบางส่วน และโพแทสเซียมไอออนถูกกักไว้ในอนุภาคของแร่ดินเหนียว ทำให้โพแทสเซียมถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ (Sparks, 1987)



ภาพที่ 2.5 โพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) ที่ติดยึดไว้ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดิน.  
จาก *ความสมบูรณ์ของดินชั้นสูง*, โดย ปัทมา วิทยากรม, (2547), ขอนแก่น: ภาควิชาทรัพยากรที่ดิน  
และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



ภาพที่ 2.6 รูปแบบไอออนที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ในแร่ดินเหนียว.

Form *Soil Nutrient Bioavailability*, by Barber, A., 1995, West Sussex: Wiley



### 2.3.2 รูปแบบความเป็นประโยชน์ต่อพืช

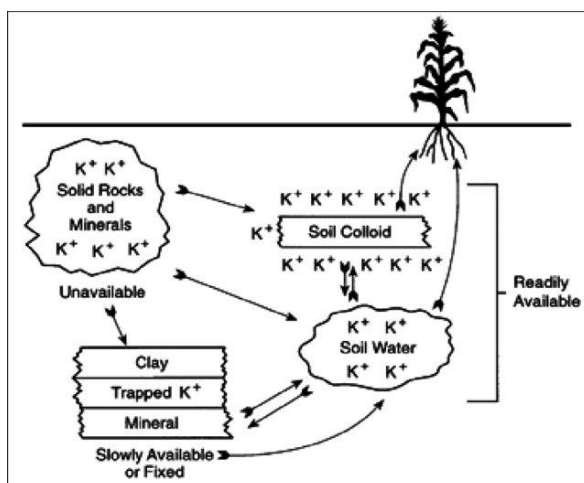
รูปแบบของโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช หมายถึงโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มี 3 รูปแบบ ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที (Relative unavailable form) โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ (Slowly available form) และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Readily available form) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.3.2.1 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที

โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที ส่วนใหญ่เป็นโพแทสเซียมที่อยู่ในแร่เฟลด์สปาร์และไมกา ซึ่งพบในดินปริมาณมาก โดยคิดเป็นร้อยละ 90 – 98 ของดินทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินในพื้นที่นั้น ๆ ด้วย พืชส่วนใหญ่จะไม่สามารถนำโพแทสเซียมในรูปแบบนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ทันที เนื่องจากแร่ธาตุเหล่านี้ต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานในการผุพังและสลายตัว ทำให้โพแทสเซียมถูกปลดปล่อยออกมาช้าเกินไป ทำให้บางส่วนเกิดการชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้พืชไม่ได้รับสารอาหารที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามยังมีบางส่วนเปลี่ยนเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ดังภาพที่ 2.7 (Prajapati & Modi, 2012)

#### 2.3.2.2 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ

โพแทสเซียมในรูปแบบนี้จะติดอยู่ระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียว หรือเรียกว่าโพแทสเซียมที่ถูกตรึง (Fixed potassium) ซึ่งพืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในรูปแบบของโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ จะแตกต่างกันไปตามประเภทของดินเหนียว โดยโพแทสเซียมจะถูกตรึงเมื่อดินแห้ง และถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อดินมีความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ บางตัวสามารถถูกปลดปล่อยออกมาให้ประโยชน์แก่พืชได้ แต่อย่างไรก็ตามโพแทสเซียมในรูปแบบนี้ยังเป็นแหล่งเก็บกักโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีในระหว่างชั้นดินเหนียว ซึ่งในบางครั้งทำให้โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีถูกเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ ดังภาพที่ 2.7 (Prajapati & Modi, 2012)



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ในระบบดิน - พืช.

Adapted from the importance of potassium in plant growth – A review, by Kalavati Prajapati and H.A. Modi, 2012, *Indian Journal of Plant Sciences*, Vol. 1 (02-03). ISSN: 2319-3824

### 2.3.2.3 โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที

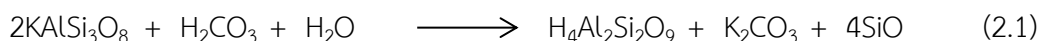
โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ได้แก่ โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปไอออน ( $K^+$ ) หรือโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ (water soluble) และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนบนพื้นผิวอนุภาคของดินเหนียว (exchangeable K) ซึ่งพืชสามารถนำโพแทสเซียมในรูปแบบนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยพืชจะดูดซับโพแทสเซียมที่ละลายน้ำในดินได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนบนพื้นผิวอนุภาคของดินเหนียวยังเป็นประโยชน์ต่อพืชมากกว่าโพแทสเซียมที่ติดอยู่ระหว่างชั้นของดินเหนียว (Prajapati & Modi, 2012) โดยความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำสามารถสรุปได้ดังนี้



ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ ติดตามกันไปเป็นลูกโซ่

### 2.3.3 วัฏจักรโพแทสเซียม

โพแทสเซียมกำเนิดมาจากการสลายตัวของหิน และแร่หลายชนิดในดิน พบมากในแร่ เฟลด์สปาร์ และไมกา โพแทสเซียมจะอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที เนื่องจากแร่ เหล่านี้จะสลายตัวได้อย่างช้า ๆ และจะปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาในรูปที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ ได้ ดังสมการที่ 2.1 (Blake et al., 2008)

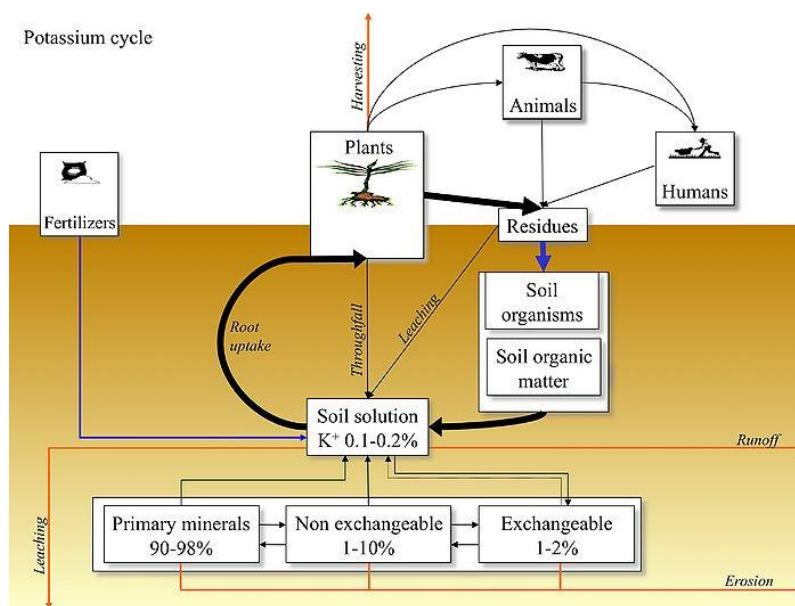


Microcline feldspar

Hydrated silicate Soluble carbonate

สัตว์จะขับถ่ายโพแทสเซียมออกมาในรูปแบบของปัสสาวะ และมูลสัตว์ จากนั้นจุลินทรีย์จะย่อยสลาย ของเสียเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ เพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป นอกจากนั้นเมื่อสัตว์ตายลงก็จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เช่นกัน ส่งผลให้โพแทสเซียมหมุนเวียนกลับ ลงสู่ดิน ซึ่งพืชสามารถนำโพแทสเซียมไปใช้โดยตรงแล้ว ยังพบว่าโพแทสเซียมบางส่วนถูกกระบวนการ ชะล้างพัดพาลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทะเล ทำให้โพแทสเซียมปะปนอยู่ในดินตะกอนทั้งทะเลลึกและตื้น และถูกสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ในแหล่งน้ำนั้นนำมาใช้ถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารตั้งแต่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ถึงสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ โพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้อีกส่วนหนึ่งที่พืชไม่ได้นำไปใช้ จะลงไปเป็นดินชั้น ล่างหรือน้ำใต้ดิน ซึ่งปริมาณที่สูญเสียโพแทสเซียมลงในดินชั้นล่างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนในพื้นที่นั้น และลักษณะของดินทราย และดินร่วน จะสูญเสียโพแทสเซียมได้มากกว่าดินเหนียว เนื่องจาก โพแทสเซียมถูกตรึงอยู่ระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียว ทำให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ ดัง ภาพที่ 2.





ภาพที่ 2.8 วัฏจักรโพแทสเซียม.

Form SoilWeb/Soil Biology/Nutrient Cycles/Potassium (K), by Wilson J., 2014, Retrieved from [https://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil\\_Biology/Nutrient\\_Cycles/Potassium\\_\(K\)](https://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil_Biology/Nutrient_Cycles/Potassium_(K))

### 2.3.4 บทบาทของโพแทสเซียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

โพแทสเซียมมีบทบาทที่สำคัญต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชหลายอย่างไม่ว่าจะเป็น การงอกของเมล็ด การควบคุมปากใบ การลำเลียงอาหาร ควบคุมสมดุลของไอออนบวก ไอออนลบ การสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์แสง การถ่ายโอนพลังงาน การดูดซึมอาหาร การกระตุ้นของ เอนไซม์ และควบคุมสมดุลของสารอาหารและความต้านทานต่อความเครียด (Marschner, 2012)

#### 2.3.4.1 การงอกของเมล็ดพันธุ์

โพแทสเซียมช่วยในการงอกของเมล็ด โดยโพแทสเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในการงอกของเมล็ดและอัตราการเกิดของต้นอ่อน รูปแบบของโพแทสเซียมที่พบมากที่สุดในการช่วยงอกของเมล็ดพันธุ์ ได้แก่ โพแทสเซียมไนเตรต ( $KNO_3$ ) โพแทสเซียมคลอไรด์ ( $KCl$ ) และ ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $K_2HPO_4$ ) โดยมีงานวิจัยได้ทำการศึกษารูปแบบของโพแทสเซียมมีผลต่อการงอกของเมล็ดฝ้าย พบว่าการใช้โพแทสเซียมไนเตรต ทำให้ได้อัตราการงอกที่ดีในจีโนไทป์ของฝ้าย (Cokkizgin & Bolek, 2015)

#### 2.3.4.2 การเจริญเติบโตของพืช

โพแทสเซียมมีบทบาทที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช โดยมีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช จาก

การศึกษาในมันฝรั่งพบว่าความสูงและจำนวนใบของต้นมันฝรั่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโพแทสเซียม (Tang et al., 2015) ในส่วนของการศึกษาการปลูกฝ้าย พบว่าต้นฝ้ายที่ขาดโพแทสเซียมทำให้เกิดการแห้งเหี่ยวของใบ ขนาดและลำปล้องเจริญเติบโตได้ช้า Gerardeaux, Jordan-Meille, Constantin, Pellerin, & Dingkuhn, 2010)

#### 2.3.4.3 การควบคุมปากใบของพืช

การควบคุมการเปิดและการปิดของปากใบที่ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการผลิตพลังงานในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสง การระบายความร้อนของพืช และการขนส่งน้ำและสารอาหาร เมื่อมีโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) เซลล์ป้องกันปากใบจะดูดซับน้ำ ทำให้ปากใบเปิด ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของก๊าซระหว่างพืชและสิ่งแวดล้อม แต่ในทางกลับกันภายใต้สภาวะขาดน้ำ โพแทสเซียมไอออนจะถูกสูบออกจากเซลล์ ทำให้ปากใบปิดแน่น ดังนั้นโพแทสเซียมจึงควบคุมการระเหยของน้ำในสภาพแวดล้อมที่ดินขาดน้ำและช่วยปกป้องพืชจากความเครียดของน้ำ อย่างไรก็ตามหากปริมาณโพแทสเซียมไม่เพียงพอจะส่งผลเสียต่อการทำงานของปากใบ ทำให้การปิดปากใบล่าช้า (Thomas, 2009)

#### 2.3.4.4 การลำเลียงน้ำและอาหาร

โพแทสเซียมช่วยในการขนส่งน้ำและการเคลื่อนย้ายสารประกอบแร่ธาตุทั้งหมดผ่านไซเล็ม (Xylem) ในกรณีที่ปริมาณของโพแทสเซียมไม่อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายของสารประกอบแร่ธาตุ เช่น ไนเตรต ( $NO_3^-$ ) ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) แมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) และการดูดซึมกรดอะมิโนจะลดลง ดังนั้นการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมที่เหมาะสมจะช่วยให้พืชลดผลกระทบของการขาดน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการลำเลียงน้ำและอาหารได้ดีขึ้น (Martineau et al., 2017; Schwartzkopf, 2018) นอกจากนี้การเติมโพแทสเซียมที่เหมาะสมลงในต้นข้าวโพด ส่งผลให้ต้นข้าวทนต่อความแห้งแล้งได้อีกด้วย

#### 2.3.4.5 การสังเคราะห์แสง

โพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง การเคลื่อนย้าย และการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรต ซึ่งในพืชที่ขาดโพแทสเซียม จะทำให้จำนวนของใบและขนาดของใบลดลง ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลง เมื่อปริมาณการสังเคราะห์แสงลดลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Hasanuzzaman et al., 2018)

#### 2.3.4.6 ควบคุมสมดุลของสารอาหาร

ในสภาวะที่พืชขาดโพแทสเซียม กระบวนการสร้างโปรตีนในพืชจะถูกยับยั้งเนื่องจากโพแทสเซียมจะกระตุ้นการทำงานของไนเตรตรีดักเตส (Nitrate reductase) ซึ่งทำหน้าที่รักษาสมดุลการสังเคราะห์แป้งและเอนไซม์ และทำหน้าที่ในการผลิตโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต หากพืชได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่เพียงพอ จะทำให้พืชลดการดูดซึมสารอาหารที่เป็นอันตราย และยัง



เพิ่มความทนทานต่อเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มผลผลิตให้แก่เกษตรกรอีกด้วย (Coskun, Britto, & Kronzucker, 2017; Ganie et al., 2017; Fageria, 2016)

#### 2.3.4.7 การเจริญเติบโตและการพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช

โพแทสเซียมมีบทบาทในการเพิ่มอัตราการออกดอกและการงอกของละอองเรณู รวมถึงการพัฒนาเมล็ดพันธุ์ ซึ่งมีงานวิจัยได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมกับการเจริญเติบโตของพืช พบว่าพืชที่ขาดโพแทสเซียมระยะของการพัฒนาในรอบปีของพืช (Phenological development) เช่น การออกดอก การเจริญเติบโตทางกายภาพจะล่าช้า (Fan, Wang, Wang, Wu, 2001)

#### 2.3.4.8 ผลผลิต

โพแทสเซียมมีส่วนช่วยในการเพิ่มผลผลิตของพืช โดย Islam & Muttaleb, (2016). ได้ทำการศึกษาการปลูกข้าวในพื้นที่ที่มีปริมาณโพแทสเซียมต่างกัน พบว่าโพแทสเซียมช่วยเพิ่มการดูดซึมของไนโตรเจน และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิตของข้าว ทำให้ผลผลิตข้าวในพื้นที่ที่มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นจากพื้นที่ที่ไม่มีโพแทสเซียมคิดเป็นร้อยละ 32.17 ตันต่อปี

#### 2.3.4.9 คุณภาพของการเก็บเกี่ยว

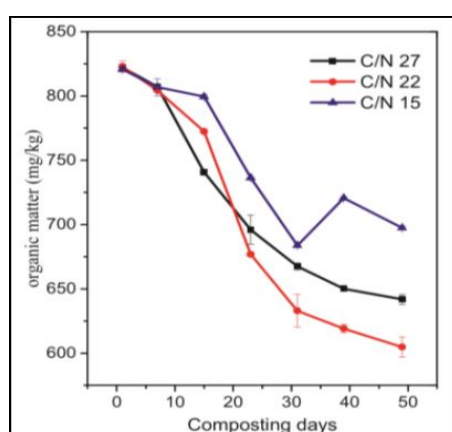
โพแทสเซียมนอกจากจะทำให้ผลผลิตของพืชสูงขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มคุณภาพของการเก็บเกี่ยวด้วย ดังนั้นโพแทสเซียมจึงทำให้พืชผลมีมูลค่าสูงขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อผู้ปลูก ในบางครั้งธาตุอาหารโพแทสเซียม เรียกว่า "องค์ประกอบคุณภาพ" เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการผลิตพืชที่ดีขึ้น โดยมีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ปุ๋ยที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่สมดุล ทำให้ร้อยละโปรตีนในเมล็ดข้าวโพดสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใส่ปุ๋ยที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงอย่างเดียว ร้อยละโปรตีนและคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดก็ลดลง และเมื่อใส่ปุ๋ยคอกที่มีธาตุอาหารหลักครบ 3 ชนิด ร้อยละโปรตีนจะสูงกว่าปกติ นอกจากนี้ยังช่วยต้านทานต่อโรคในพืชเพิ่มขึ้นอีกด้วย (Pettigrew, 2003; Yang et al., 2004)

### 2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

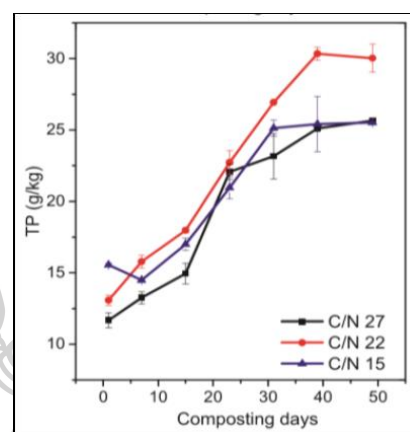
Zaha et al. (2013) ได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักที่มีวัตถุดิบมาจากเศษผัก กากตะกอนน้ำเสีย และขี้เลื่อย พบว่าจากการทดลองเกิดการย่อยสลายของปริมาณอินทรีย์วัตถุทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง แต่แปรผกผันกับค่าการนำไฟฟ้าในการทดลองนี้ที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปทดลองใช้กับพืช พบว่าพืชมีการเจริญเติบโตได้ดี

Wang et al. (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักที่เป็นปัจจัยสำคัญในการตรึงฟอสฟอรัส ทองแดง และสังกะสี ในการทำปุ๋ยหมักภายใต้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่

แตกต่างกัน โดยปุ๋ยแต่ละกองมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน คือ 15, 22 และ 27 ตามลำดับ เมื่อได้ทำการศึกษพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ดังภาพที่ 2.9 (ก) เนื่องจากการย่อยวัตถุตั้งต้นโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสมีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 2.9 (ข) แสดงให้เห็นว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลงสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุและฟอสฟอรัสทั้งหมดตลอดกระบวนการหมัก.  
หมายเหตุ. (ก) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (ข) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (กรัม/กิโลกรัม)

ปัญญาภา ส่งเสริม (2559) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย 2 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยหมักมูลหมู และมูลไก่ พบว่ามูลหมักมูลหมูและมูลไก่มีปริมาณโพแทสเซียมรูปที่ใช้ประโยชน์ได้ง่ายเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญกับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ( $r=0.936$ ,  $p<0.01$  และ  $r=0.615$ ,  $p<0.05$ ) ดังตารางที่ 2.5 แสดงถึงการได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักอย่างชัดเจนจากความสัมพันธ์เชิงปริมาณกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแบบผกผัน โดยเมื่อปุ๋ยหมักมูลหมูและหมูไก่อมีอุณหภูมิเย็นลงพร้อมที่จะนำไปใช้ มีปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่ใช้ประโยชน์ได้ง่ายมากขึ้น ( $r=0.610$  และ  $r=0.580$ ,  $p<0.05$ ) เช่นเดียวกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักมูลหมูและหมูไก่อ ( $r=0.698$  และ  $r=0.882$ ,  $p<0.01$ ) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ และปลดปล่อยปริมาณโพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ได้ง่ายให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $r=0.596$ ,  $p<0.05$  และ  $r=0.816$ ,  $p<0.01$ )

## ตารางที่ 2.5

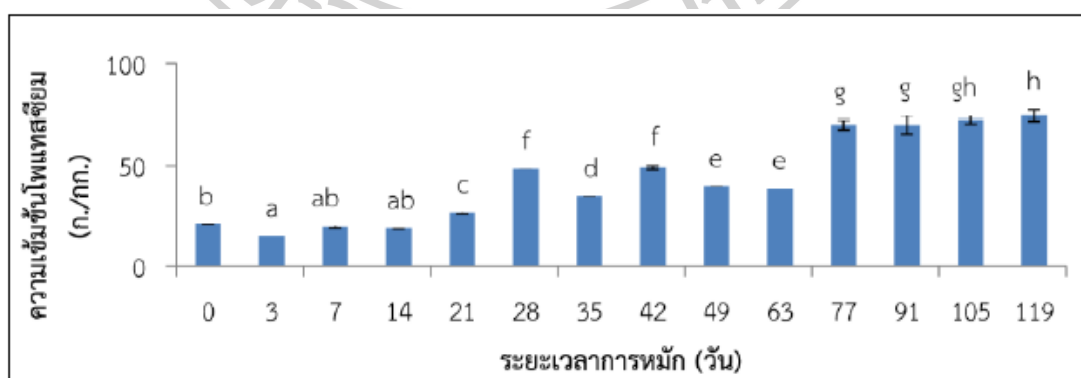
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้กับปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
โพแทสเซียมรูปที่ใช้				
ปุ๋ยหมักมูลหมู	0.936**	-0.610*	-0.698**	-0.596*
ปุ๋ยหมักมูลไก่	0.615*	-0.580*	-0.882**	-0.816

หมายเหตุ. \* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

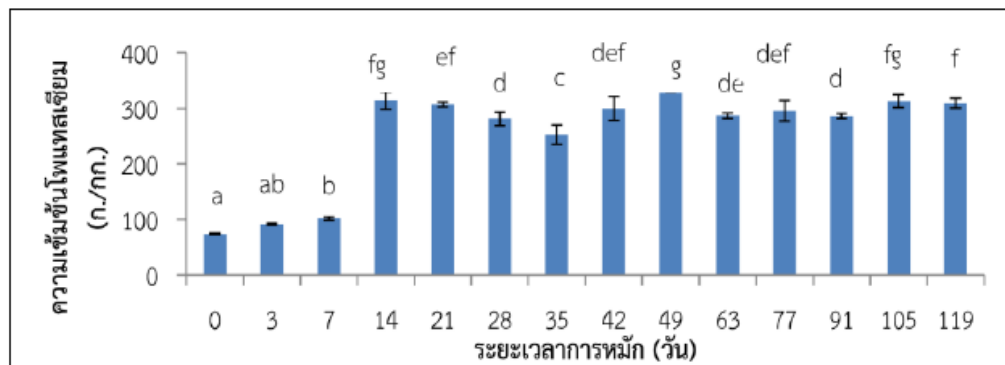
\*\* มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

โพแทสเซียมรูปนี้เป็นรูปที่พบมากที่สุดที่พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร เนื่องจากเป็นรูปที่ถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายด้วยโลหะที่มีเวเลนซ์ที่สูงกว่า โดยในปุ๋ยหมัก ทั้ง 2 สูตรมีปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่ใช้ปุ๋ยหมักมูลหมูต่างกันอย่างมาก โดยปุ๋ยหมักมูลหมูมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 16.7 – 74.5 ดังภาพที่ 2.10 และปุ๋ยหมักมูลไก่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 74.5 – 314.4 กรัม/กิโลกรัม ดังภาพที่ 2.11 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 93.6 – 95.8 และ 99.4 – 99.5 ตามลำดับ



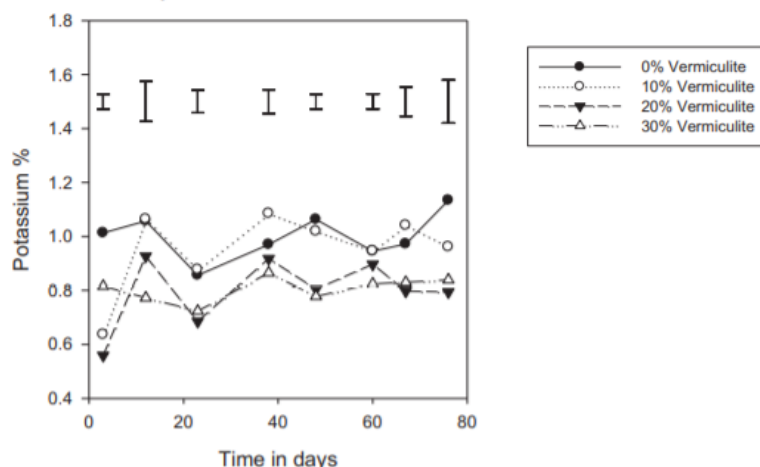
ภาพที่ 2.10 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบปริมาณของโพแทสเซียมในรูปใช้ปุ๋ยหมักมูลหมูที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักในกองปุ๋ยหมักมูลหมู (กรัม/กิโลกรัม) โดยใช้ Duncan Test





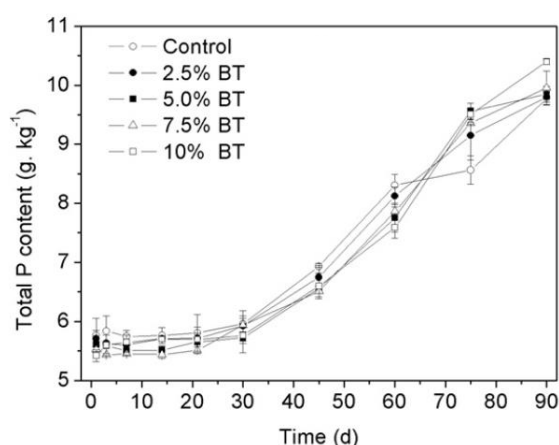
ภาพที่ 2.11 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมในรูปใช้ประโยชน์ได้ง่ายที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักในกองปุ๋ยหมักมูลไก่ (กรัม/กิโลกรัม) โดยใช้ Duncan Test

Pisa, Wuta, & Muchaonyerwa. (2020) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและการเกิดธาตุอาหารของพืชในปุ๋ยหมักมูลวัวที่มีส่วนผสมของเวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่าปุ๋ยหมักมูลวัวที่ผสมเวอร์มิคูไลท์ปริมาณของฟอสฟอรัสไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสจะลดลงในช่วง 38 วันแรกของการหมักปุ๋ย เนื่องจากอาจเกิดการตรึงโดยจุลินทรีย์และเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมในรูปมอนอแคลเซียม ฟอสเฟต (Monocalcium phosphates) และไตรแคลเซียม ฟอสเฟต (Tricalcium phosphate) โดยหลังจากวันที่ 38 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักลดลง ส่งผลให้มีปริมาณของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้น ในส่วนปริมาณของโพแทสเซียมจะมีความแปรปรวนในช่วง 38 วันแรก หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ ซึ่งในปุ๋ยหมักมูลวัวที่ผสมด้วยเวอร์มิคูไลท์ร้อยละ 0 และ 10 มีปริมาณโพแทสเซียมสูงกว่าปุ๋ยหมักมูลวัวที่ผสมด้วยเวอร์มิคูไลท์ร้อยละ 20 และ 30 ดังภาพที่ 2.12

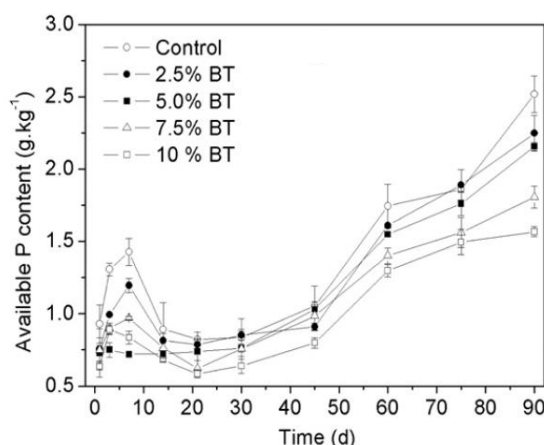


ภาพที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโพแทสเซียม

Li et al. (2012) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเบนโทไนต์ (Bentonite) ในปริมาณต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยหมักจากมูลหมู พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก ดังภาพที่ 2.13 (ก) ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ในส่วนของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในช่วงแรกจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากนั้นจะลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งตามระยะเวลาการหมัก ดังภาพที่ 2.13 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

Faridullah et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสในปุ๋ยหมักมูลสัตว์ 4 ชนิด ได้แก่ มูลควาย มูลวัว มูลแพะ และมูลสัตว์ปีก พบว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสทั้งหมดในปุ๋ยหมักมูลสัตว์ปีกมีค่าเฉลี่ยมากกว่าปุ๋ยหมักชนิดอื่น รองลงมา คือ ปุ๋ยหมักจากมูลวัว มูลแพะ และมูลควาย ตามลำดับ ในส่วนของฟอสฟอรัสรูปที่ละลายน้ำ พบว่าปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ปีกปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปละลายได้มากที่สุด และปุ๋ยหมักจากมูลควายปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปละลายน้ำได้ต่ำสุด

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาพลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยผสมของมูลวัวและมูลหมู โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากขั้นตอนหมักปุ๋ย ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง และการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น XS204 ทำการตกตะกอนด้วยเครื่อง Centrifuge ยี่ห้อ Orto alresa กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร วัดค่าการดูดกลืนโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530

##### 3.1.2 สารเคมี

ในการศึกษาพลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจากกระบวนการหมักปุ๋ยจากมูลสัตว์ใช้กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid;  $\text{HClO}_4$ ) เข้มข้นร้อยละ 70 บริษัท Kemaus และกรดไนตริก (Nitric acid;  $\text{HNO}_3$ ) เข้มข้นร้อยละ 68 จากบริษัท JT. Beaker ในการย่อยตัวอย่างปุ๋ย ในส่วนของการสกัดฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ใช้ 0.01M แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride;  $\text{CaCl}_2$ ) จากบริษัท Merck จากนั้นใช้ 5M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide;  $\text{NaOH}$ ) จากบริษัท Merck 1M ซัลฟูริก (Sulfuric acid;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) จากบริษัท Merck และ Phenolphthalein ทำให้เกิดสีชมพูอ่อน และใช้สาร Potassium antimonyl tartrate จากบริษัท Carlo Erba Ammonium molybdate จากบริษัท Ajax และ Ascorbic acid จากบริษัท Ajax ในการทำให้เกิดสีก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง และใช้สาร Potassium Dihydrogen phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) จากบริษัท Ajax เป็นสารมาตรฐานฟอสฟอรัส ในส่วนของการย่อยโพแทสเซียมทั้งหมดใช้ 1:1 กรดไนตริก จากบริษัท JT. Beaker และการทดลองโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ใช้กรดอะซิติก จากบริษัท JT. Beaker และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จากบริษัท Mallinckrodt ในการสกัด

### 3.2 ขั้นตอนการหมักปุ๋ยและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

#### 3.2.1 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

ส่วนผสมของการหมักปุ๋ยในการศึกษาคั้งนี้ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นของแห้งและส่วนที่เป็นน้ำหมัก โดยส่วนผสมที่เป็นของแห้ง เช่น มูลวัว มูลหมู มูลค่างควา รำละเอียด ในส่วนของส่วนผสมที่เป็นน้ำหมัก เช่น น้ำหมักปลา กากน้ำตาล ซึ่งอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยขั้นตอนการหมักปุ๋ยเริ่มจากคลุกเคล้าส่วนผสมที่เป็นของแห้งไม่ว่าจะเป็นมูลวัว มูลหมู มูลค่างควา รำละเอียด ให้เข้ากัน จากนั้นเติมส่วนผสมที่เป็นน้ำหมัก ได้แก่ น้ำหมักปลา และกากน้ำตาลลงไปคลุกเคล้าให้เข้ากัน เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ตักแบ่งใส่ถุงที่มีอากาศผ่านเข้าออกได้จำนวน 10 ถุง ถุงละ 25 กิโลกรัม แล้วมัดด้วยเชือกฟาง จากนั้นนำมาหมักต่อในสถานที่ ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก

ตารางที่ 3.1

อัตราส่วนผสมของการทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม	ชนิดของส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้ (ร้อยละ)
ของแห้ง	มูลวัว	37.50
	มูลหมู	53.89
	มูลค่างควา	0.94
	รำละเอียด	3.15
น้ำหมัก	ปลาหมัก	1.14
	กากน้ำตาล	3.43

#### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยเพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยหมักที่ทำการหมักตลอดระยะเวลา 119 วัน โดยเก็บตัวอย่างทุกวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ซึ่งก่อนการเก็บตัวอย่างต้องมีการพลิกกลับถุงปุ๋ยเพื่อให้ปุ๋ยผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างปุ๋ยที่ตรงกลางของถุงใส่ปุ๋ย ถุงละ 200 กรัม จำนวน 10 ถุง โดยมีน้ำหนักรวมกันประมาณ 2 กิโลกรัม และทำการบดปุ๋ย จากนั้นนำไปร่อนแห้ง (Dry sieving) โดยร่อนผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ในส่วนของขั้นตอนการวิเคราะห์ปุ๋ยหมักมูลวัว ซึ่งแบ่งพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

การวิเคราะห์อุณหภูมิของปุ๋ยหมักสามารถทำได้โดยนำเทอร์โมมิเตอร์วัดตรงกลางของกระสอบปุ๋ย เพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างปุ๋ยทั้งหมดในกระสอบนั้น

#### 3.3.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

การวัดค่าความเป็นกรด - ด่างของปุ๋ยหมักมูลวัวทำในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ย 2 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วย magnetic stirrer เป็นระยะเวลา 15 นาที วัดค่าความเป็นกรด - ด่างในส่วนของสารแขวนลอยด้วย pH meter ของบริษัท Metrohm รุ่น 173 จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้อีก 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด - ด่างในส่วนของเหลวเหนือตะกอน

#### 3.3.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

การวัดค่าการนำไฟฟ้าทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ย 4 - 6 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 1:5 และกวนด้วย magnetic stirrer เป็นระยะเวลา 15 นาที ปลอຍให้ปุ๋ยตะกอน แล้วนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้า

#### 3.3.4 ค่าความชื้น (Moisture)

การวิเคราะห์ค่าความชื้นสามารถทำได้โดยนำถ้วยทำความชื้นไปอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วย และทำการชั่งน้ำหนักปุ๋ยปริมาณ 2 กรัม ลงในถ้วยที่ผ่านการอบแล้ว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความชื้น

#### 3.3.5 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุทำตามวิธีของ Tong et al. (2019) โดยการนำตัวอย่างที่ทำให้แห้งจากการหาค่าความชื้นข้อ 3.3.4 มาเผาที่ 550 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง และนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังการเผา หลังจากนั้นทำซ้ำ ขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักที่คงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปนำมาคำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุ

#### 3.3.6 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง โดยปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สามารถทำได้จากการทดลอง ในส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงคำนวณได้จากผลต่างของฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.6.1 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus; TP)

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมดในงานวิจัยนี้ใช้วิธีมาตรฐานของ Method of Soil Analysis Part 3 (Kuo, 1996) เป็นการย่อยฟอสฟอรัสด้วยกรด  $\text{HClO}_4$  และ  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น ซึ่งการเติม  $\text{HNO}_3$  เข้มข้นเป็นการออกซิไดซ์อินทรีย์วัตถุออกจากตัวอย่าง สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ย 2 กรัม ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร และปิเปตกรด  $\text{HNO}_3$  เข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์มแล้วเจาะรูตั้งทิ้งไว้ 1 คืน หลังจากนั้นปิเปตกรด  $\text{HClO}_4$  เข้มข้น ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และใส่เม็ดแก้ว ปิดด้วยกรวยกรอง แล้วนำขวดตัวอย่างใส่ลงในภาชนะตั้งบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ในเครื่องดูดควัน (Hood) ย่อยตัวอย่างจนเกิดควันและตะกอนสีขาว จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 203 องศาเซลเซียส อีก 20 นาที ยกลงจากเตาให้ความร้อน รอให้ตัวอย่างเย็น ทำการเทตัวอย่างลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนครบ 250 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน และเก็บสารละลายส่วนใสใส่ขวด ปริมาณ 60 มิลลิลิตร นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสพร้อมตัวอย่างของวันอื่น ๆ โดยใช้วิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic method) ซึ่งทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

### 3.3.6.2 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus; AP)

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ใช้วิธีการสกัดด้วยสาร  $\text{CaCl}_2$  เป็นตัวสกัดสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ย 5 กรัม ลงในขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 0.01M  $\text{CaCl}_2$  ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์มนำไปแช่ 1 ชั่วโมง แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส โดยใช้วิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic method) ซึ่งทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด

### 3.3.6.3 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (Fixed phosphorus; FP)

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงได้จากการคำนวณจากผลต่างของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดกับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ดังสมการ

$$\text{FP (mg/g)} = \text{TP (mg/g)} - \text{AP (mg/g)}$$

### 3.3.6.4 Ascorbic Acid Method

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นฟอสฟอรัสด้วยวิธีแอสคอร์บิกสามารถทำได้โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างจากข้อ 3.3.6.1 หรือ 3.3.6.2 มา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออนปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ Phenolphthalein 5 หยด ปรับค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายตัวอย่างให้เป็นสีชมพูอ่อน



ด้วย NaOH แล้วเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนครบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมน้ำยารวมปริมาณ 8 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.75 และ 1.0 โมล

### 3.3.7 วิธีการวิเคราะห์โพแทสเซียม (Potassium)

การวิเคราะห์โพแทสเซียม มีวิธีการวิเคราะห์ 3 รูปแบบ ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์หาโพแทสเซียมทั้งหมด โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่ถูกตรึงซึ่งได้จากการคำนวณผลต่างของโพแทสเซียมทั้งหมด และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ โดยมีรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ดังนี้

#### 3.3.7.1 การวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้งหมด (Total potassium; TK)

การวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้งหมดด้วย Flame Atomic Adsorption Spectrometry (FLAA) โดยย่อยด้วยกรดไนตริกที่มีสารออกซิไดซ์กับไฮโดรเจนร่วมด้วย สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ยหนัก 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 1:1 HNO<sub>3</sub> ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา จากนั้นนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนประมาณ 10 – 15 นาที แล้วเติม HNO<sub>3</sub> เข้มข้นประมาณ 5 มิลลิลิตร ให้ความร้อนต่ออีก 30 นาที ทำซ้ำจนกระทั่งควันหายไป ให้ความร้อนต่ออีก 2 ชั่วโมง จนสารละลายตัวอย่างเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 2 มิลลิลิตร และ 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นค่อย ๆ เติม 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพิ่มทีละ 1 มิลลิลิตร จนตัวอย่างไม่มีฟอง (ไม่ควรเกิน 10 มิลลิลิตร) ให้ความร้อนต่อไปอีกเรื่อย ๆ จนตัวอย่างเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วเติม HCl เข้มข้นประมาณ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมด้วยเครื่อง flame atomic absorption spectroscopy

#### 3.3.7.2 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available potassium; AK)

การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ใช้วิธี Ammonium Acetate Method ของ Thomas (1982) สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักปุ๋ย 2 กรัม ลงในหลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 1M NH<sub>4</sub>OAc ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge จำนวนรอบ 2,000 rpm เป็นระยะเวลา 10 นาที เทของเหลวเหนือตะกอนใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 1M NH<sub>4</sub>OAc จากนั้นนำไปวัดหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมด้วยเครื่อง flame atomic absorption spectroscopy

#### 3.3.7.3 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (Fixed potassium; FK)

การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ถูกตรึงได้จากการคำนวณผลต่างของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดกับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ดังสมการ

$$FK \text{ (mg/g)} = TK \text{ (mg/g)} - AK \text{ (mg/g)}$$

### 3.3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์รูปแบบต่าง ๆ ทดสอบโดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างระยะเวลาในการหมักโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) และทดสอบการเปรียบเทียบทีละคู่ด้วยสถิติทดสอบของดันแคน (Duncan's Test) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Version 23



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

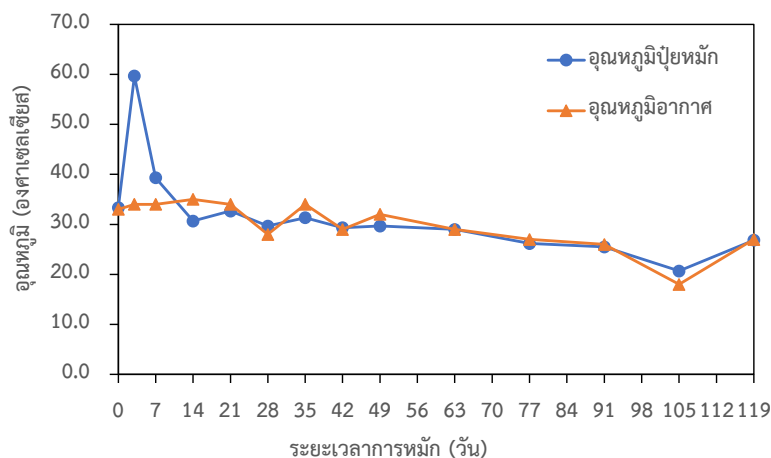
งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต ระยะเวลาต่าง ๆ ระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยหมักมูลวัวผสมมูลหมู โดยผสมร่วมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นระยะเวลา 119 วัน ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105, และ 119 จากนั้นวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) รวมถึงศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งสองชนิด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

การศึกษาคคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก เช่น อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยข้อมูลพื้นฐานของปุ๋ยหมักนี้ได้มาจากการวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี และคณะ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการหมักดังนี้

##### 4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

กระบวนการหมักปุ๋ย โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์มีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในปุ๋ยหมัก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic Phase) และระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Mature phase) ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอินซูลินของตับอ่อนตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.1.1.1 ระยะเริ่มผสม

ระยะเริ่มผสม ได้แก่ วันที่ 0 เป็นระยะที่เริ่มทำการผสมวัตถุดิบตั้งต้นของปุ๋ยหมักเข้าด้วยกัน ซึ่งยังไม่เกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ลักษณะภายนอกของปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล และมีกลิ่นของวัตถุดิบตั้งต้นที่รุนแรง โดยอินซูลินในระยะเริ่มผสมนี้มีค่าเท่ากับ 33.3 งามาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอินซูลินในอากาศ

#### 4.1.1.2 ระยะอินซูลินสูง

ระยะอินซูลินสูง ได้แก่ ช่วงวันที่ 1 – 13 โดยในระยะนี้อินซูลินของปุ๋ยหมักจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีค่าอยู่ในช่วง 30.6 – 59.6 งามาเซลเซียส และสูงสุดในวันที่ 3 มีค่าเท่ากับ 59.7 งามาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.1 โดยมีกลิ่นจากวัตถุดิบตั้งต้นลดลงแต่มีกลิ่นของแอมโมเนียที่ค่อนข้างฉุนเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ ลักษณะของปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้มและยังมองเห็นวัตถุดิบตั้งต้นบ้าง ในระยะนี้กิจกรรมของจุลินทรีย์อินซูลินสูงย่อยสลายองค์ประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากปลดปล่อยความร้อนออกมา อินซูลินในกองปุ๋ยหมักจึงสูงขึ้น (Zhou, 2017; Duan et al., 2019) จากนั้นอินซูลินจะค่อย ๆ ลดลง เข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ต่อไป

#### 4.1.1.3 ระยะเจริญเต็มที่

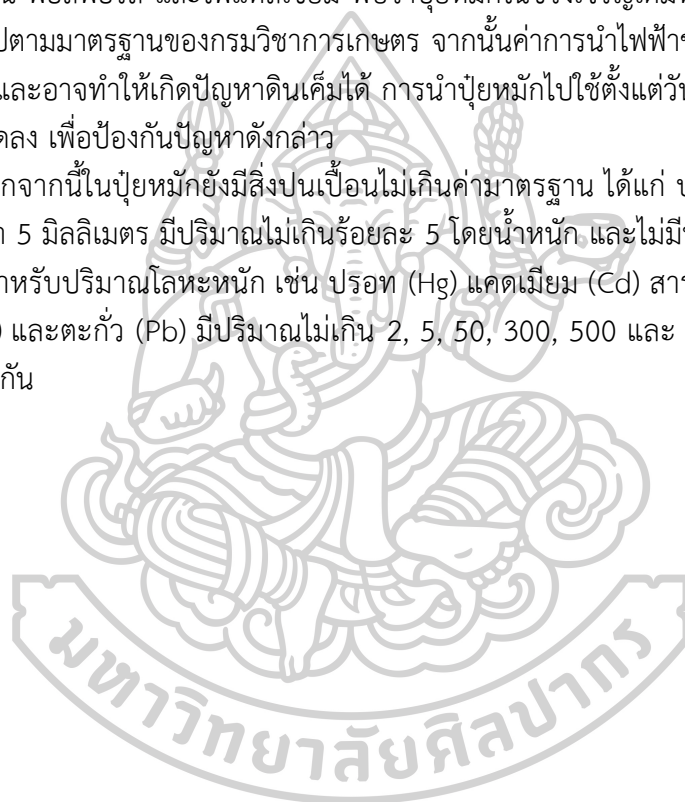
ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ ได้แก่ วันที่ 14 เป็นต้นไป โดยมีอินซูลินอยู่ในช่วง 20.6 – 32.6 งามาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับอินซูลินในอากาศ ปุ๋ยมีลักษณะแห้งเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็ก อ่อนนุ่ม ยุ่ย และมีสีน้ำตาลเข้มปนดำไม่ได้กลิ่นของแอมโมเนีย และมีกลิ่นคล้ายดิน เป็นระยะที่กิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอินซูลินสูงลดลงจากการที่สารตั้งต้นที่ย่อยสลายยากหมดไป และมีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์กลุ่มอินซูลินปานกลางเพิ่มขึ้นแทน ในระยะนี้อินทรีย์วัตถุเริ่มเสถียรมากขึ้น (Li et al., 2019) และเป็นระยะที่ปุ๋ยพร้อมที่จะนำไปใช้งานได้

#### 4.1.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักตามกรมวิชาการเกษตร

ปัจจุบันมีการผลิตปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น เพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรได้ใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน และเป็นการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารของพืช ดังนั้นกรมวิชาการเกษตรจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อควบคุมการผลิตและคุณภาพของปุ๋ยหมักก่อนที่จะนำไปจำหน่าย อันจะเป็นประโยชน์แก่ผู้บริโภคมากที่สุด โดยกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดพารามิเตอร์และค่ามาตรฐานของปุ๋ยหมักไว้ดังตารางที่ 4.1

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร ได้แก่ ความชื้น ความเป็นกรด – ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม พบว่าปุ๋ยหมักในช่วงเจริญเต็มที่ ตั้งแต่วันที่ 14 – 63 มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร จากนั้นค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักจะสูงขึ้นเกินค่ามาตรฐาน และอาจทำให้เกิดปัญหาดินเค็มได้ การนำปุ๋ยหมักไปใช้ตั้งแต่วันที่ 77 – 119 จึงต้องใช้ในปริมาณที่ลดลง เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

นอกจากนี้ในปุ๋ยหมักยังมีสิ่งปนเปื้อนไม่เกินค่ามาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณหินและกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม โลหะอื่น ๆ สำหรับปริมาณโลหะหนัก เช่น ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) สารหนู (As) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) มีปริมาณไม่เกิน 2, 5, 50, 300, 500 และ 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับเช่นกัน



ตารางที่ 4.1

การเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักมูลวัวผสมมูลหมูกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจัดการจำหน่ายตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557

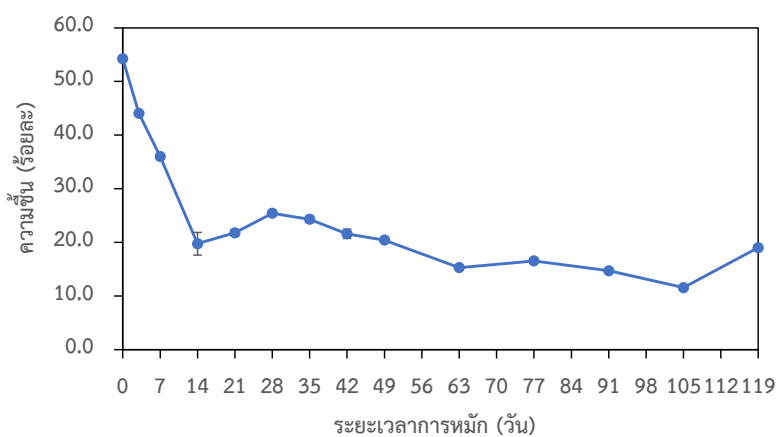
คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระยะเวลาการหมัก (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
อุณหภูมิ	ไม่กำหนด	33.3	59.7	39.3	30.7	32.7	29.7	31.3	29.3	29.7	29.0	26.1	25.5	20.7	26.9
ความชื้น	≤ ร้อยละ 35	54.23	44.08	36.02	19.75	21.78	25.42	24.30	21.59	20.42	15.29	16.54	14.71	11.56	19.02
pH	5.5 – 8.5	7.52	8.84	8.56	8.25	8.19	8.10	8.02	6.95	6.82	7.35	7.70	8.16	7.75	7.89
ค่าการนำไฟฟ้า	≤ 6 dS/m	3.38	3.39	4.02	4.62	5.24	4.68	5.16	5.06	5.34	5.45	6.07	5.89	6.04	6.02
อินทรีย์วัตถุ	≥ ร้อยละ 30	65.48	64.26	61.77	62.75	62.54	61.96	56.56	61.46	62.16	60.83	62.36	62.29	59.46	58.06
C/N ratio	≤ 20:1	15.24	16.43	14.04	14.04	13.84	13.39	12.45	13.09	12.90	13.16	13.24	13.46	12.83	12.29
ไนโตรเจนทั้งหมด	≥ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	2.49	2.27	2.55	2.57	2.62	2.68	2.63	2.73	2.79	2.68	2.73	2.68	2.68	2.74
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	1.61	1.29	1.40	1.31	1.41	1.66	1.88	2.01	2.26	1.57	2.13	1.10	1.78	1.35
โพแทสเซียมทั้งหมด	≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	1.47	1.65	1.54	1.60	1.80	1.71	1.88	1.96	2.18	2.20	2.08	1.93	1.79	1.86
ปริมาณธาตุอาหารหลัก	≥ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	5.57	5.21	5.49	5.48	5.83	6.05	6.39	6.70	7.23	6.45	6.94	5.71	6.25	5.95
หมายเหตุ.	ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน														

ข้อมูลพื้นฐานของปุ๋ยหมักได้มาจากงานวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรพณี และคณะ



#### 4.1.2.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการหมักปุ๋ย โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการทำปุ๋ยหมักอยู่ในช่วงร้อยละ 40 – 65 (Pace & Farrell-Poe, 1995) ซึ่งจากภาพที่ 4.2 พบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของการหมักปุ๋ยมีค่าร้อยละ 54.23 จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะอุณหภูมิสูง จากการระเหยของน้ำและการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ (Li et al., 2020) และเมื่อเข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ปริมาณความชื้นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.56 – 25.42 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) โดยกำหนดปริมาณความชื้นเพื่อการจำหน่ายไม่เกินร้อยละ 30

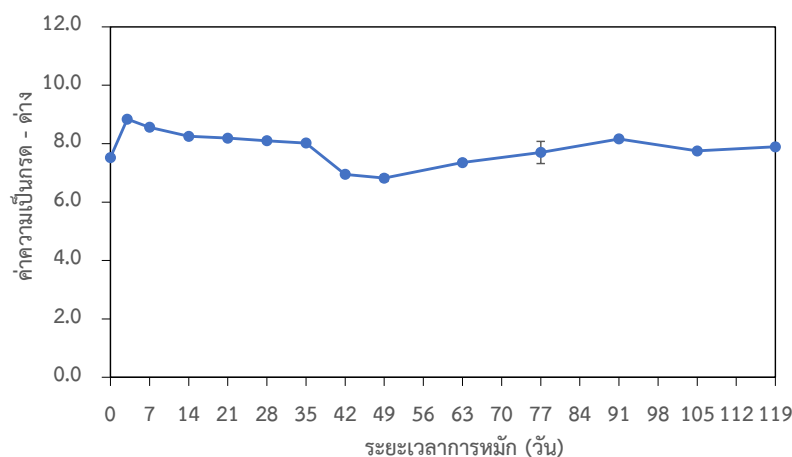


ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.1.2.2 ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด – ด่างของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมักอยู่ในช่วง 6.8 – 8.8 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) โดยกำหนดไว้ที่ 5.5 – 8.5 และเป็นช่วงที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีธาตุอาหารอยู่ในรูปแบบที่เป็นประโยชน์แก่พืช (Reitsma & Clay, 2011) หากค่าความเป็นกรด – ด่างอยู่นอกช่วงที่กำหนด พืชจะไม่สามารถใช้ธาตุที่จำเป็นอย่างมีประสิทธิภาพได้ ส่งผลให้อัตราการเติบโตช้าและให้ผลผลิตต่ำเนื่องจากขาดธาตุอาหาร โดยจากภาพที่ 4.3 พบว่าค่าความเป็นกรด – ด่างที่สูงสุดในวันที่ 3 (Yao et al., 2021) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ในปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายซากพืช ซากสัตว์ ปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมา สอดคล้องกับกลิ่นฉุนของแก๊สแอมโมเนียในช่วงระยะอุณหภูมิสูง (Wong, Fung & Selvam, 2009) จากนั้นค่าความเป็นกรด – ด่างมีแนวโน้มลดลง จากการลดลงของอินทรีย์วัตถุตั้งต้น ขณะที่กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปาน

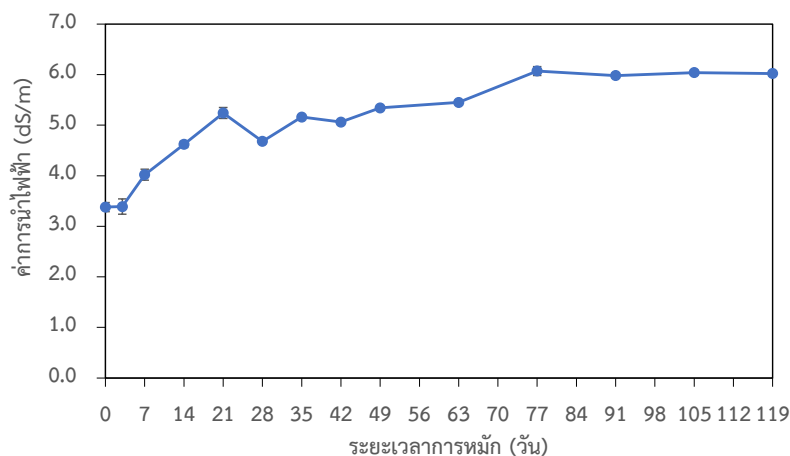
กลางเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไปเป็นไนเตรท นอกจากนี้อาจสูญเสียแอมโมเนียได้จากการระเหย (Caceres, Flotats & Marfa, 2006)



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.1.2.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.38 – 6.07 เดซิซีเมนต์/เมตร ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งอาจเกิดจากความอุดมสมบูรณ์ของปริมาณธาตุอาหารที่ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของประจุบวกและลบที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ เช่น ธาตุอาหารไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) และโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการหมัก (Yao et al., 2021) ดังตารางที่ 4.1 โดยในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5.98 – 6.07 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) เล็กน้อย ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต์/เมตร ดังนั้นหากนำปุ๋ยหมักไปใช้งานควรใช้ในปริมาณที่น้อย เนื่องจากปุ๋ยหมักกอนี้มีความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารในปริมาณมาก



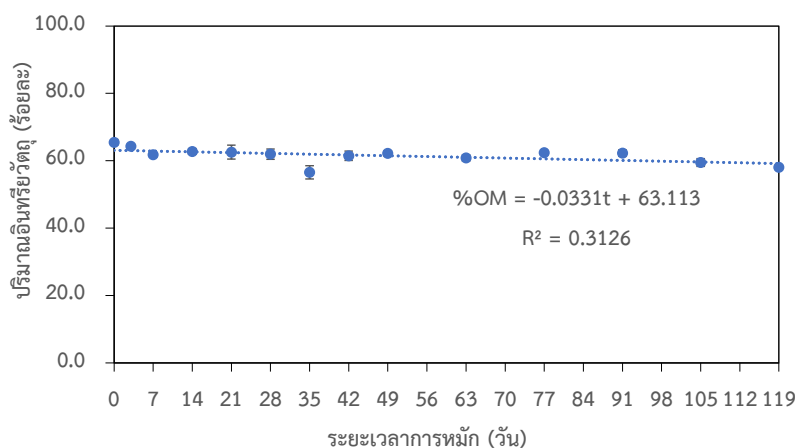
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก

#### 4.1.2.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter; OM) เป็นดัชนีเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักที่บ่งบอกถึงกระบวนการย่อยสลายที่สำคัญ โดยมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์กรมวิชาการเกษตร (2557) ได้กำหนดคุณภาพอินทรีย์วัตถุไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 30 โดยในวันที่ 0 ซึ่งเป็นวันเริ่มต้นของการหมักปุ๋ยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 65.48 และมีแนวโน้มลดลงในอัตราร้อยละ 0.033 ต่อวัน โดยในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่และพร้อมใช้งาน (วันที่ 14 – 119) ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงอยู่ในช่วง 56.56 – 62.54 จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักโดยจุลินทรีย์ (Yang et al., 2020) ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = -0.515$ ,  $p < 0.01$ ) ดังภาพที่ 4.5 แสดงสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุกับระยะเวลา ดังนี้

$$\%OM = -0.0331t + 63.113 \quad R^2 = 0.3126 \quad (4.1)$$

โดย OM คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ  
t คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักกับระยะเวลาการหมัก  
( $r = -0.515$ ,  $p < 0.01$ )

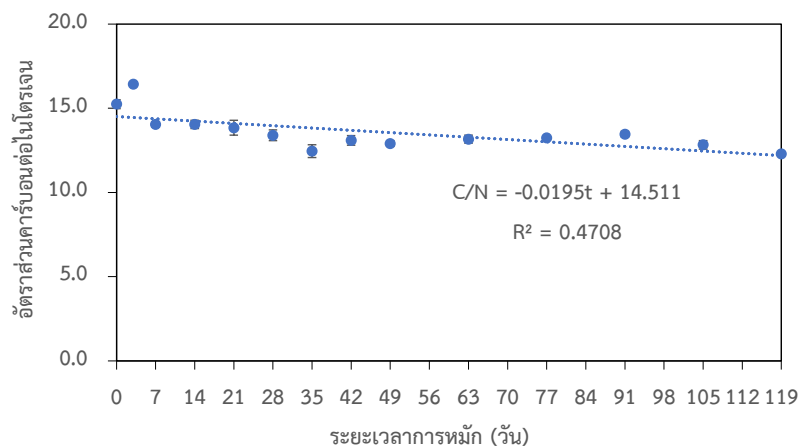
#### 4.1.2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) เป็นดัชนีบ่งชี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าปุ๋ยหมักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 15.24 ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากปุ๋ยหมักมีวัตถุดิบตั้งต้นจากมูลสัตว์เป็นหลัก โดยมูลสัตว์จะมีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง (Ajibade et al., 2020; Zhou, 2017) อย่างไรก็ตาม กระบวนการหมักยังคงสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ เนื่องจากการสูญเสียปริมาณคาร์บอนและมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (Sevik, Tosun & Ekinici, 2018) โดยการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจากกระบวนการหมักยังสัมพันธ์กับระยะเวลา ( $r = -0.674$ ,  $p < 0.01$ ) ดังสมการ

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

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

ในวันที่ 21 – 119 ปุ๋ยหมักมีปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในช่วง 12.29 – 14.04 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดสารฮิวมิกที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินดีที่สุด ที่ควรมีค่าอยู่ในช่วง 10 – 15 (Tan, 2003) และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่ควรมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำกว่า 20:1



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักกับระยะเวลาการหมัก ( $r = -0.674$ ,  $p < 0.01$ )

#### 4.1.2.6 ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และ โปแทสเซียมทั้งหมด

กระบวนการหมักย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและมีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารเชิงปริมาณที่เป็นประโยชน์ต่าง ๆ ได้ โดยมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรกำหนดให้ผลรวมของปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม ต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณธาตุอาหารโดยรวมตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.21 – 7.23 (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารหลักที่มีมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก

โดยมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม อยู่ในช่วงร้อยละ 2.27 – 2.79, 1.10 – 2.26 และ 1.47 – 2.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และล้วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557 ที่กำหนดไว้ให้มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม มากกว่าร้อยละ 1.0, 0.5, และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟอสฟอรัสระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย

รูปแบบของฟอสฟอรัสสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ รูปแบบที่ถูกตรึง (Fixed phosphorus; FP) และรูปแบบที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus; AP) โดยรูปแบบที่ถูกตรึงพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการต่าง ๆ ในการเปลี่ยนรูปก่อนพืชจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งการศึกษารูปแบบฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จึงมีความสำคัญควบคู่ไปกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เพื่อบ่งบอกถึงศักยภาพในการเก็บสะสมและปลดปล่อยปริมาณฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

##### 4.2.1 สัดส่วนฟอสฟอรัส

การศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยหมัก พบว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบที่ถูกตรึงมีสัดส่วนที่พบอยู่ในช่วงร้อยละ 99.30 – 99.65 และฟอสฟอรัสรูปแบบที่

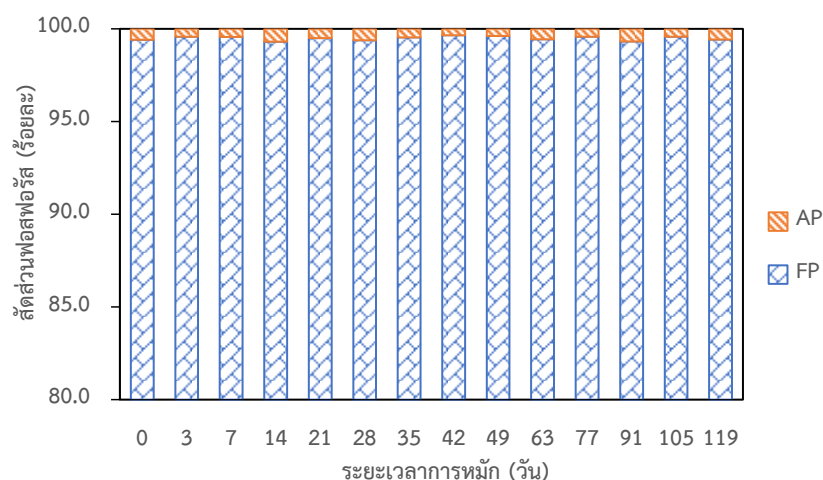
เป็นประโยชน์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.35 – 0.70 ดังภาพที่ 4.7 โดยการศึกษาของ Wang et al. (2019) พบว่าฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 80 และกระบวนการหมักทำให้สัดส่วนฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการมิเนอร์ลไลเซชัน (Mineralization) ซึ่งเปลี่ยนฟอสฟอรัสอินทรีย์เป็นฟอสฟอรัสอนินทรีย์ เช่น ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) ที่สามารถเกิดสารประกอบกับไอออนประจุบวกในปุ๋ยหมัก เช่น แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) อะลูมิเนียมไอออน ( $\text{Al}^{3+}$ ) เหล็กไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) สารฮิวมิก (Humic substance; hum) และฟอสฟอรัสอินทรีย์ มีลำดับเสถียรภาพของการเกิดสารประกอบ ดังนี้

$$P_{\text{Ca+Mg}} > P_{\text{Fe+Al}} > P_{\text{residue}} > P_{\text{hum}} > P_{\text{L-org}} \approx P_{\text{ML-org}}$$

โดย  $P_{\text{L-org}}$  คือ ฟอสฟอรัสที่จับกับลิแกนด์อินทรีย์

$P_{\text{ML-org}}$  คือ ฟอสฟอรัสที่จับกับสารประกอบโลหะอินทรีย์

ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นนี้ ช่วยลดปัญหาการชะฟอสฟอรัสออกไปจากดินได้ คงอยู่ในดินและค่อย ๆ ทยอยปลดปล่อยให้เป็นประโยชน์แก่พืช ลดปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชัน จากการชะฟอสฟอรัสในดินลงสู่แหล่งน้ำ (Sharpley & Tunney, 2000) โดยค่าความเป็นกรด – ด่างของปุ๋ยหมัก มีค่าอยู่ในช่วง 7.5 – 8.5 ทำให้รูปแบบฟอสฟอรัสอยู่ในรูปประจุลบเอื้อต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนประจุดังกล่าว



ภาพที่ 4.7 สัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (Fixed phosphorus; FP) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus; AP) ตลอดระยะเวลาการหมัก



#### 4.2.2 ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่พบในปุ๋ยหมัก ได้แก่ รูปแบบที่ถูกตรึง และรูปแบบที่เป็นประโยชน์ โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10.95 – 22.60 และ 0.06 – 0.11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99.30 – 99.6 และ 0.35 – 0.70 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.8 เมื่อทำการจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของปุ๋ยหมักสามารถแบ่งความแตกต่างออกเป็น 7 กลุ่ม และ 6 กลุ่ม ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2

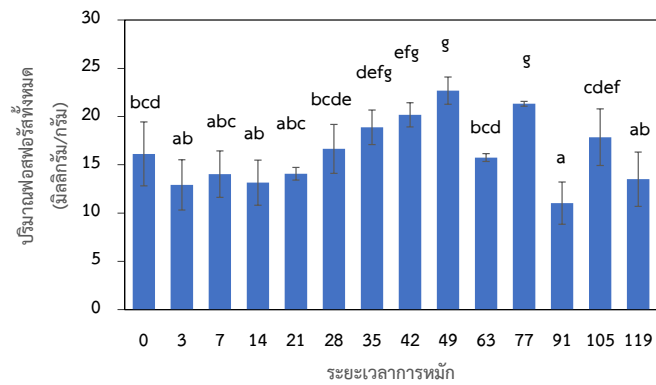
ตารางที่ 4.2

การแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เรียงจากน้อยไปหามาก

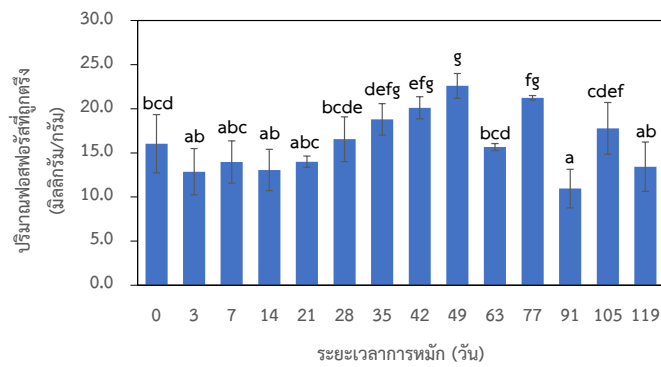
ปริมาณ	กลุ่ม	รูปแบบทั้งหมด	รูปแบบที่ถูกตรึง	รูปแบบที่เป็นประโยชน์
น้อยที่สุด	a	วันที่ 3, 7, 14, 21, 91 และ 119	วันที่ 3, 7, 14, 21, 91 และ 119	วันที่ 3 และ 7
	b	วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 63 และ 119	วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 63 และ 119	วันที่ 7, 21 และ 42
	c	วันที่ 0, 7, 21, 28, 63 และ 105	วันที่ 0, 7, 21, 28, 63 และ 105	วันที่ 21, 42, 91, 105 และ 119
	d	วันที่ 0, 28, 35, 63 และ 105	วันที่ 0, 28, 35, 63 และ 105	วันที่ 35 และ 119
	e	วันที่ 28, 35, 42 และ 105	วันที่ 28, 35, 42 และ 105	วันที่ 0, 14, 35, 49, 63 และ 77
	f	วันที่ 35, 42, 77 และ 105	วันที่ 35, 42, 77 และ 105	วันที่ 0 และ 28
	มากที่สุด	g	วันที่ 35, 42, 49 และ 77	วันที่ 35, 42, 49 และ 77

หมายเหตุ. อักษร a, b, c, d, e, f และ g แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

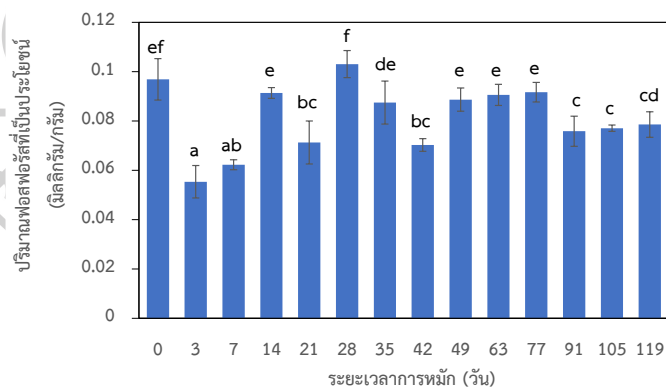
จากการศึกษาพบว่าจากสัดส่วนที่ค่อนข้างมากของฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดและรูปแบบที่ถูกตรึงไปในทิศทางเดียวกัน ( $r = 1.000$ ,  $p < 0.01$ ) โดยกระบวนการหมักทำให้ฟอสฟอรัสทั้งหมดและรูปแบบที่ถูกตรึงมีปริมาณมากที่สุดในช่วงปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ในวันที่ 35 – 49 มีค่าอยู่ในช่วง 18.89 – 22.69 มิลลิกรัม/กรัม และ 18.80 – 22.60 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากนั้นการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงจะแปรปรวนโดยมีแนวโน้มลดลงจากสารตั้งต้นทั้งหมดไปและถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์ (Haroon et al., 2018; Wang et al., 2019)



(ก) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP)



(ข) ฟอสฟอรัสที่ถูตรึง (Fixed Phosphorus; FP)



(ค) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available Phosphorus; AP)

ภาพที่ 4.8 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่ถูตรึง และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test ( $p < 0.01$ )

หมายเหตุ. อักษร a, b, c, d, e, f และ g แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และค่าความคลาดเคลื่อน (bar chart) หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)

สำหรับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าสูงที่สุดในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่วันที่ 28 โดยมีค่า 103.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 70.3 – 91.7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์นี้สัมพันธ์กับฟอสฟอรัสที่ถู

ตรังอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.326$ ,  $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อรูปแบบทั้งสองไปในทิศทางเดียวกัน ดังสมการที่ 4.3 ที่แสดงความสัมพันธ์เชิงซ้อนระหว่างรูปแบบทั้งสอง

$$AP = 0.0014FP + 0.0587 \quad R^2 = 0.129 \quad (4.3)$$

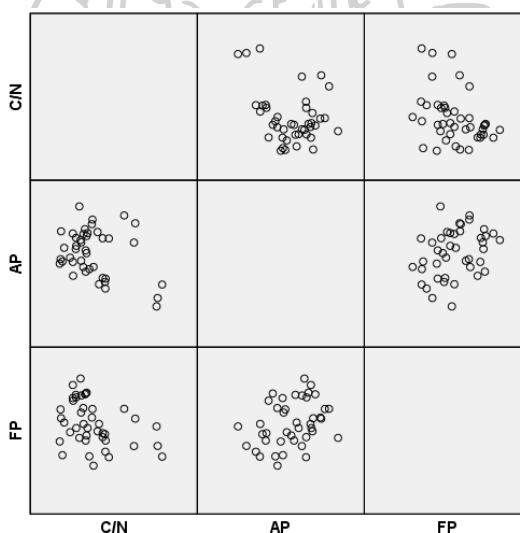
โดย AP คือ รูปที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัม/กรัม)

FP คือ รูปที่ถูกตรึง (มิลลิกรัม/กรัม)

นอกจากนี้ปริมาณของรูปแบบทั้งสองยังสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้กระบวนการย่อยสลายของปุ๋ยหมักด้วย โดยปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงเพิ่มมากขึ้น ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อย ๆ ลดลง ( $r = -0.334$  และ  $r = -0.411$  ตามลำดับ,  $p < 0.05$ ) ดังภาพที่ 4.9 สามารถเขียนสมการเชิงเส้นอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูปแบบฟอสฟอรัสทั้งสองกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนได้ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5

$$AP = -0.0041 \text{ C/N} + 0.1376 \quad R^2 = 0.112 \quad (4.4)$$

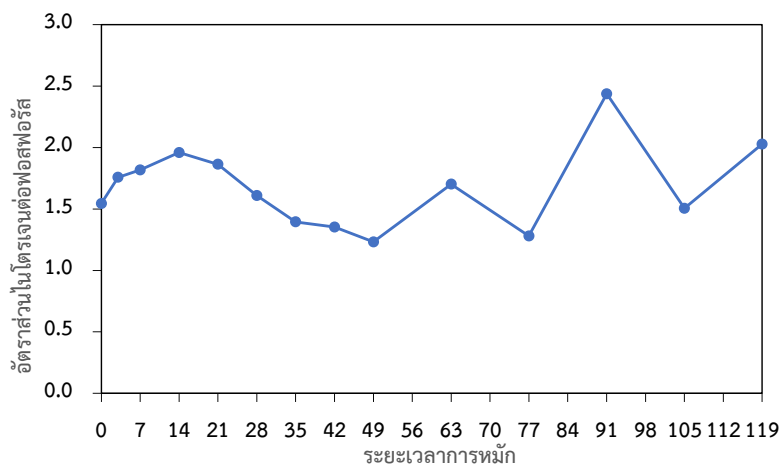
$$FP = -1.2934 \text{ C/N} + 33.807 \quad R^2 = 0.169 \quad (4.5)$$



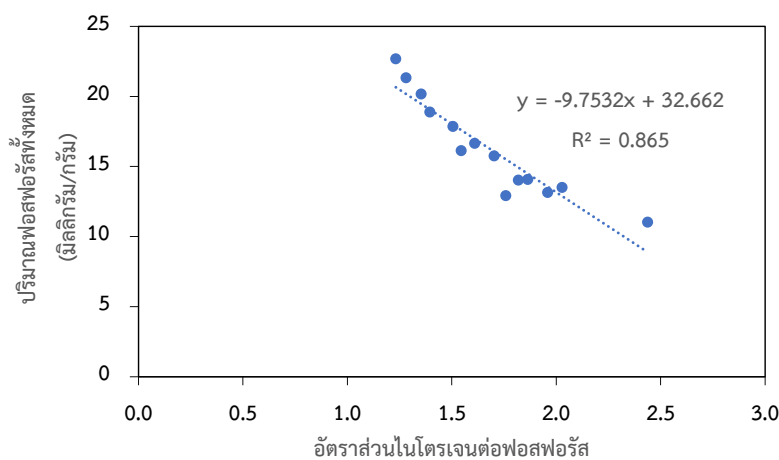
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และรูปแบบของฟอสฟอรัส ได้แก่ ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง (FP) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (AP) ( $p < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาดัชนีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่ใช้บ่งชี้ความอุดมสมบูรณ์ของจุลินทรีย์ พบว่าอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N/P) ซึ่งเป็นดัชนีอัตราส่วนของธาตุอาหารที่ใช้บ่งบอกความหลากหลายของชนิดจุลินทรีย์ โดยมีความหลากหลายมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนนี้ลดลง (Delgado-Baquerizo et al., 2017) และการศึกษาของ Wei et al. (2016) พบว่าอุณหภูมิสูงจะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ในช่วงอุณหภูมิสูงพบว่าอัตราส่วนนี้มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 14 จากนั้นเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะเจริญเต็มที่จะมีแนวโน้มลดต่ำลงจนถึงวันที่ 49 (ภาพที่ 4.10) บ่งบอกถึงการเพิ่มของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางในช่วงนี้ อย่างไรก็ตามหากทิ้งปุ๋ยไว้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน อัตราส่วนนี้จะค่อนข้างแปรปรวนจากที่ธาตุอาหารของจุลินทรีย์ลดต่ำลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน

ไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ( $r = -0.931$ ,  $p < 0.01$ ) และภาพที่ 4.11) ขณะที่สัมพันธ์อย่างไม่มีนัยสำคัญกับปริมาณไนโตรเจน ( $p > 0.05$ ) แสดงให้เห็นถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นเพียงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนนี้



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (N/P) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ( $r = -0.931$ ,  $p < 0.01$ )



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสและระยะเวลาการหมัก

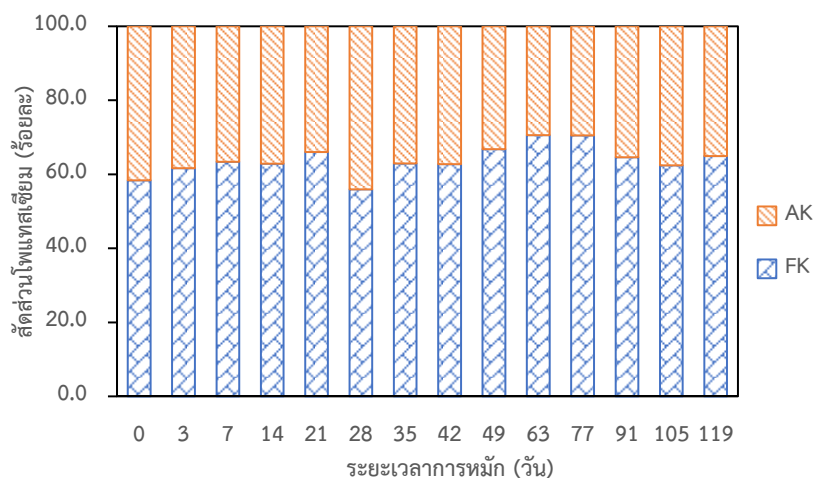
สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟอสฟอรัสได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมัก โดยเมื่อปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง รูปแบบฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และรูปแบบทั้งสองแปรตามกัน ( $p < 0.05$ ) โดยพบสัดส่วนรูปแบบที่ถูกตรึงในปริมาณสูงที่สุด มากกว่าร้อยละ 99 ทำให้รูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่เด่นและกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดด้วย โดยวันที่ 49 ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงและฟอสฟอรัสทั้งหมดจะมีปริมาณมากที่สุด สอดคล้องกับอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่มีค่าต่ำที่สุดด้วย สำหรับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 28 ซึ่งค่าที่ค่อนข้างน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์นี้ บางส่วนอาจถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์ หรืออาจถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ทำให้ค่าที่พบแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ โดยมีแนวโน้ม

ลดลงเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาความเหมาะสมเชิงปริมาณพบว่า ระยะเวลาการหมักในช่วงวันที่ 35 – 49 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมากที่สุด ปุ๋ยมีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่ำ จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ แต่หากเก็บไว้นานเกิน 49 วัน ปริมาณของฟอสฟอรัสทุกรูปแบบจะลดลงเช่นเดียวกับที่อัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารในปุ๋ยหมักที่ลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสยังคงมีค่ามากกว่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) (ตารางที่ 4.1) ดังนั้นการเก็บรักษาปุ๋ยหมักไว้เป็นระยะเวลานานจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติของปุ๋ยหมักด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย เพราะอาจไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จากคุณภาพที่ลดลงของอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหาร

### 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโพแทสเซียมกระบวนการหมักปุ๋ย

การศึกษาารูปแบบของโพแทสเซียมทั้งหมดสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ เช่นเดียวกันกับฟอสฟอรัส ได้แก่ รูปแบบที่ถูกตรึง (Fixed potassium; FK) และรูปแบบที่เป็นประโยชน์ (Available potassium; AK) โดยรูปแบบที่ถูกตรึงพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ต้องอาศัยกระบวนการต่าง ๆ ในการเปลี่ยนแปลงก่อน พืชถึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้การศึกษารูปแบบโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์จึงมีความสำคัญควบคู่ไปกับปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ซึ่งจะบ่งบอกถึงศักยภาพการเก็บกักและการปลดปล่อยโพแทสเซียมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคตต่อไป

#### 4.3.1 สัดส่วนโพแทสเซียม



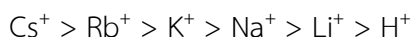
ภาพที่ 4.12 สัดส่วนของโพแทสเซียมที่ถูกตรึงและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก

การศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก พบว่ารูปแบบของโพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบที่ถูกตรึงอยู่ในช่วงร้อยละ 55.91 – 70.58 สำหรับรูปแบบที่เป็นประโยชน์อยู่ในช่วงร้อยละ 29.42 – 44.09 ดังภาพที่ 4.12 ซึ่งในดินส่วนใหญ่ที่พบรูปแบบของโพแทสเซียมส่วนใหญ่ ร้อยละ 99 จะถูกชะออกไปได้ง่าย (Sposito, 2008; The Royal Horticultural Society, 2021) เนื่องจากโพแทสเซียมส่วนใหญ่ที่พบมีประจุ +1 และจัดอยู่ในโลหะกลุ่ม 1A ที่ถูกไล่ที่ด้วยโลหะที่มี

ออกซิเดชันสเตตสูงกว่า ได้แก่ ประจุ  $2+$  และ  $3+$  เป็นต้น โดยมีลำดับของการแทนที่ไอออนโลหะดังนี้ (Sposito, 2008)



และสำหรับไอออนประจุ  $+1$  กลุ่มเดียวกันโพแทสเซียมจะถูกไล่ที่ด้วยไอออนโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ (Sparks, 2003) เช่น



สำหรับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะโดยรวมที่พบในสิ่งแวดล้อม (Sparks, 2003) ดังนี้  $\text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Cs}^{+} > \text{Rb}^{+} > \text{K}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Na}^{+} > \text{Li}^{+}$

ดังนั้นกระบวนการหมักมีส่วนช่วยในการตรึงโพแทสเซียมให้อยู่ในรูปที่ถูกตรึงที่จะทยอยปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ภายหลัง โดยสัดส่วนที่ถูกตรึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ และมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 63 – 77

#### 4.3.2 ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์

ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดที่พบในปุ๋ยหมัก ได้แก่ รูปแบบที่ถูกตรึง และรูปแบบที่เป็นประโยชน์ โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 8.58 – 15.57 และ 5.64 – 7.57 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 55.91 – 70.58 และ 29.42 – 44.09 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.12 เมื่อทำการจัดแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณความเข้มข้นโพแทสเซียมพบว่ารูปแบบทั้งหมดสามารถแบ่งความแตกต่างออกเป็น 8 กลุ่ม ในส่วนของรูปแบบที่ถูกตรึงและรูปแบบที่เป็นประโยชน์ สามารถแบ่งความแตกต่างออกเป็น 5 กลุ่ม ดังตารางที่ 4.3 ได้ดังนี้





## ตารางที่ 4.3

การแบ่งกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมด โพแทสเซียมที่ถูกตรึง และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เรียงจากน้อยไปหามาก

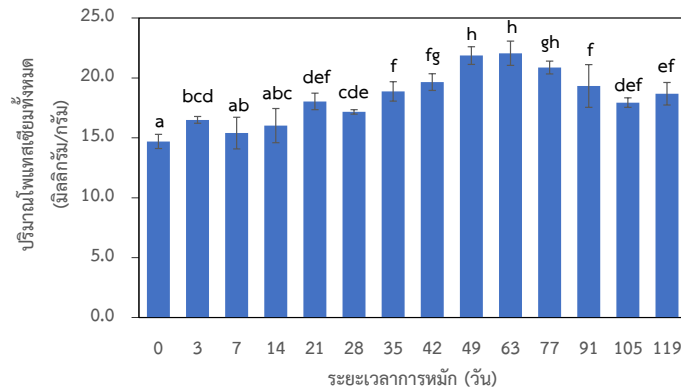
ปริมาณ	กลุ่ม	รูปแบบทั้งหมด	รูปแบบที่ถูกตรึง	รูปแบบที่เป็นประโยชน์
น้อย ที่สุด       ↓       ↑       มาก ที่สุด	a	วันที่ 0, 7 และ 14	วันที่ 0, 3, 7, 14 และ 28	วันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 63, 77, 105 และ 119
	b	วันที่ 3, 7 และ 14	วันที่ 3, 7, 14, 21, 28, 35 และ 105	วันที่ 0, 3, 14, 21, 35, 63, 77, 91, 105 และ 119
	c	วันที่ 3, 14 และ 28	วันที่ 3, 14, 21, 35, 42, 105 และ 119	วันที่ 0, 3, 21, 35, 49, 63, 77, 91, 105 119
	d	วันที่ 3, 21, 28 และ 105	วันที่ 3, 21, 35, 42, 91, 105, 119	วันที่ 3, 35, 42, 49, 63, 91, 105 และ 119
	e	วันที่ 21, 28, 105 และ 119	วันที่ 49, 63, 77	วันที่ 28, 35, 42, 49, 63, 91, 105 และ 119
	f	วันที่ 21, 35, 42, 91, 105 และ 119	-	-
	g	วันที่ 42, 77 และ 91	-	-
	h	วันที่ 49, 63 และ 77	-	-

หมายเหตุ. อักษร a, b, c, d, e, f, g และ h แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

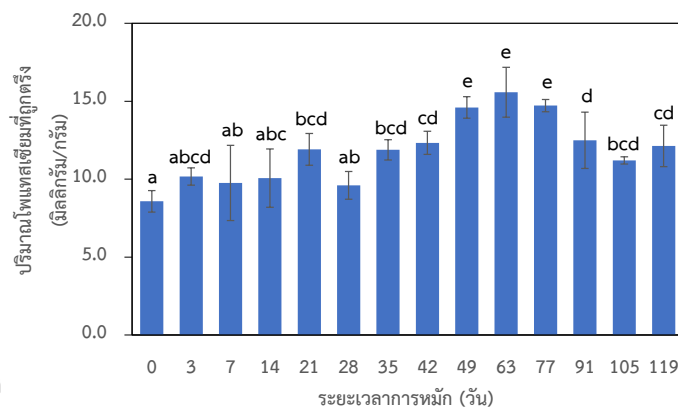
พบว่ากระบวนการหมักเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดตั้งแต่วันเริ่มผสมไปจนถึงมีค่ามากที่สุดในวันที่ 63 จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง จากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์และไม่มีการทดแทนสารตั้งต้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhen et al. (2020) ที่พบว่ากระบวนการหมักช่วยเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในปุ๋ยหมักมูลวัว มูลหมู และมูลไก่ ซึ่งจากการที่พบปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมีอิทธิพลต่อปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.950$ ,  $p < 0.01$ ) ขณะที่ไม่พบความสัมพันธ์ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดกับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ( $p > 0.05$ ) โดยปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมีค่ามากที่สุดในช่วงวันที่ 49 – 77 มีค่าอยู่ในช่วง 20.87 – 22.06 และ 14.60 – 15.57 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากนั้นการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมีแนวโน้มลดลง

สำหรับโพแทสเซียมรูปแบบที่เป็นประโยชน์ค่อนข้างแปรปรวนตลอดระยะเวลาการหมักโดยมีค่าสูงสุดในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่วันที่ 28 โดยมีค่า 7.57 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งถึงแม้ว่าปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมีปริมาณลดลงหลังจากวันที่ 77 ก็ตาม แต่มีการทยอยปลดปล่อยรูปแบบที่เป็นประโยชน์ออกมาอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิต่ำ

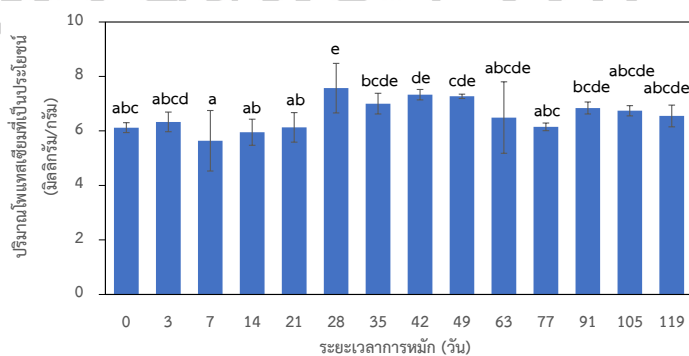
กลางยังคงทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาชัดเจน ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์แม่ในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.00 – 7.33 มิลลิกรัม/กรัม



(ก) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total Potassium; TK)



(ข) ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกรีด (Fixed Potassium; FK)



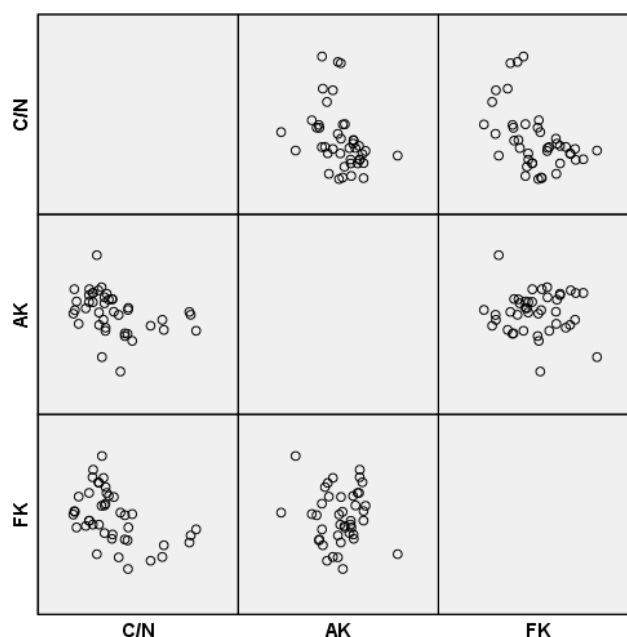
(ค) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available Potassium; AK)

ภาพที่ 4.13 การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมด โพแทสเซียมที่ถูกรีด และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการหมัก โดยใช้ Duncan Test ( $p<0.01$ )  
หมายเหตุ. อักษร a, b, c, d, e, f, g และ h แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) และค่าความคลาดเคลื่อน (bar chart) หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)

อย่างไรก็ดีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่ถูกตรึงยังคงสัมพันธ์กับดัชนีกระบวนการหมักอื่น ๆ เช่น อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยปริมาณของโพแทสเซียมรูปแบบที่เป็นประโยชน์และรูปแบบที่ถูกตรึงเพิ่มมากขึ้น ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อย ๆ ลดลง ( $r = -0.455$  และ  $r = -0.537$  ตามลำดับ,  $p < 0.01$ ) ดังภาพที่ 4.13 สามารถเขียนสมการเชิงเส้นอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูปแบบโพแทสเซียมทั้งสองกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนได้ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7

$$AK = -0.2352 C/N + 9.7785 \quad R^2 = 0.2077 \quad (4.6)$$

$$FK = -1.0158 C/N + 25.601 \quad R^2 = 0.2889 \quad (4.7)$$



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และรูปแบบของโพแทสเซียม ได้แก่ โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (FK) และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (AK) ( $p < 0.05$ )

สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโพแทสเซียมได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมัก โดยเมื่อปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงจะปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดและปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยรูปแบบที่เป็นประโยชน์จะถูกปลดปล่อยออกมาชัดเจน ทำให้รูปแบบนี้ไม่ลดลงมากนัก แม้โพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงจะลดลงก็ตาม ดังนั้นเมื่อพิจารณาความเหมาะสมในเชิงปริมาณจะพบว่าในช่วงวันที่ 49 – 77 วัน ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงมากที่สุดมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ แต่หากเก็บไว้นานเกิน 77 วัน ปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมดและโพแทสเซียมที่ถูกตรึงจะลดลง แม้จะไม่ได้มีอิทธิพลต่อปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์แต่อาจทำให้คุณค่าธาตุอาหารเชิงปริมาณน้อยกว่าและเสถียรภาพของอินทรีย์วัตถุ เช่น สารฮิวมิก ที่เกิดจากกระบวนการหมักมีค่าลดลง (Wang et al., 2019; Li et al., 2021) แม้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดจะมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) ก็ตาม

#### 4.4 ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

การศึกษาพลวัตของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักพบว่ารูปแบบที่ศึกษาทั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ถูกตรึงและรูปแบบที่เป็นประโยชน์ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการหมักมีความสัมพันธ์กับดัชนีของกระบวนการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบที่ถูกตรึงของธาตุทั้งสองไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ( $p > 0.05$ ) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการย่อยสลายและทยอยปลดปล่อยออกมาของปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเกิดขึ้นมากน้อยในช่วงเวลาที่ต่างกัน โดยรูปแบบที่ถูกตรึงถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายกว่า ทำให้ฟอสฟอรัสในรูปแบบนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 49 (ภาพที่ 4.8) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีค่าสูงที่สุดในวันนี้ด้วย ขณะที่โพแทสเซียมถูกปลดปล่อยออกมาได้ช้ากว่า ทำให้มีปริมาณสูงสุดในวันที่ 63 (ภาพที่ 4.12) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sharma et al. (2018) ที่พบว่าการเติมมูลวัวร่วมกับเศษดอกไม้และชีเลื่อยจะมีปริมาณฟอสฟอรัสปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเร็วกว่าโพแทสเซียม ขณะที่การหมักด้วยเศษดอกไม้เพียงอย่างเดียวหรือเศษดอกไม้ผสมชีเลื่อยจะมีอัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ช้ากว่าและใกล้เคียงกับโพแทสเซียม สำหรับรูปแบบที่เป็นประโยชน์จะได้รับอิทธิพลจากกระบวนการย่อยสลายและการปลดปล่อยออกมาชัดเจนจากรูปแบบที่ถูกตรึง ทำให้รูปแบบทั้งสองค่อนข้างแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ โดยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่เด่นชัดนักและสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ( $r = 0.369, p < 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมทั้ง 2 รูปแบบ

พารามิเตอร์	โพแทสเซียมที่ถูกตรึง	โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์
ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง	0.169	0.093
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	0.216	0.369*

หมายเหตุ. \*มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนเชิงปริมาณของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก พบว่าฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่ถูกตรึงมากกว่าโพแทสเซียม (ภาพที่ 4.7 และ 4.12) เนื่องจากธรรมชาติของโพแทสเซียมจะถูกแลกเปลี่ยนและชะออกมาได้ง่ายจากคุณสมบัติของโพแทสเซียมไอออนที่มีประจุ +1 ทำให้ในการปรับปรุงดินด้วยการเติมปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) หรือโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ซึ่งเป็นการเติมไอออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ที่มีประจุ 2+ สามารถไล่ที่โพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) ออกจากดิน พืชเกิดการขาดโพแทสเซียมได้ (Hue & Silva, 2000) ดังนั้นการเติมอินทรีย์วัตถุจึงช่วยเพิ่มการดูดซับประจุของดินและตรึงโพแทสเซียมให้อยู่ในดินได้นานขึ้น ทำให้ปริมาณผลผลิตของพืชเพิ่มขึ้น (Hanc et al., 2008) นอกจากนี้ยังป้องกันฟอสฟอรัสที่จะถูกชะลงแหล่งน้ำโดยเปลี่ยนฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกตรึง ลดการเกิดปัญหายูโทรฟิเคชันได้อีกด้วย (Heinrich et al., 2020)

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม และอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งสองในปุ๋ยหมักมูลวัวผสมกับมูลหมูร่วมกับรำละเอียด มูลค่างควา น้ำหมักปลา และกากน้ำตาล โดยทำการหมักเป็นระยะเวลา 119 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 จากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ร่อนแล้วมาศึกษาปริมาณและรูปแบบของธาตุอาหารทั้งสองควบคู่ไปกับการตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักและเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) เพื่อให้ได้ระยะเวลาการหมักตลอดจนระยะเวลาเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่เหมาะสมที่จะให้ปริมาณธาตุอาหารทั้งสองที่เป็นประโยชน์ที่สุด อันจะเป็นแนวทางให้เกษตรกรได้นำไปปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยหมักและเลือกใช้ปุ๋ยหมักให้เป็นประโยชน์ได้ในอนาคตต่อไป

โดยการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) วันที่ 0 ในระยะนี้องค์ประกอบของปุ๋ยหมักยังเห็นส่วนผสมของวัตถุดิบตั้งต้นที่ชัดเจน มีกลิ่นของวัตถุดิบตั้งต้นต่าง ๆ ชัดเจน ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงที่สุดร้อยละ 65.48 และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 15.24 เมื่อปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) วันที่ 1 – 13 ซึ่งเป็นระยะที่เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยากโดยจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูง ระยะนี้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30.6 – 59.6 องศาเซลเซียส ปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อย ๆ ลดต่ำลงเช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ระยะนี้ปุ๋ยหมักเริ่มมองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้นและมีกลิ่นของแอมโมเนีย ความชื้นของปุ๋ยหมักเริ่มลดลง และเมื่อปุ๋ยหมักเย็นตัวลงอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งเป็นระยะที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ (Mature phase) ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป ลักษณะของปุ๋ยหมักในระยะนี้จะร่วนซุย มีสีดำและพร้อมที่จะนำไปใช้งาน เมื่อทำการตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมัก พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร (2557) วันที่ 14 – 63 จากนั้นค่าการนำไฟฟ้าจะไม่ผ่านมาตรฐานจากการปลดปล่อยของไอออนต่าง ๆ ในกระบวนการย่อยสลายที่ยังคงเกิดขึ้นจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิต่ำอย่างต่อเนื่อง สำหรับในระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่นี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าอยู่ในช่วง 56.56 – 62.75 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 12.45 – 14.04 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดสารฮิวมิกที่เสถียร (Tan, 2003)

ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่พบในปุ๋ยหมักมีสัดส่วนของรูปแบบที่ถูกตรึงและรูปแบบที่เป็นประโยชน์แตกต่างกัน ฟอสฟอรัสที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปประจุลบ ทำให้เกิดพันธะกับดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) และเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) หรือจับกับแร่ธาตุ เช่น แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจพบฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงด้วยจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างยาก (Parnes, 2013; Wang et al., 2019) ขณะที่โพแทสเซียมที่มีประจุ +1 จะถูกแทนที่ด้วยไอออนที่มีประจุมากกว่า ทำให้โพแทสเซียมถูกตรึงอยู่บนพื้นผิวของดินเหนียว สารประกอบออกไซด์ และอินทรีย์วัตถุได้น้อยกว่า (Hue & Silva, 2000) ถึงแม้ในปุ๋ยหมักจะพบธาตุทั้งสองส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบที่ถูกตรึง



แต่สัดส่วนที่พบมีความแตกต่างกันจากคุณสมบัติที่เคลื่อนที่ค่อนข้างยากของฟอสฟอรัส ทำให้เมื่ออินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายแล้วพบสัดส่วนฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงมากกว่าโพแทสเซียม โดยคิดเป็นร้อยละ 99.30 – 99.60 และ 55.91 – 70.58 ตามลำดับ และคิดเป็นปริมาณ 18.89 – 22.69 และ 8.58 – 15.57 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ และมีสัดส่วนรูปแบบที่เป็นประโยชน์ร้อยละ 0.35 – 0.70 และ 29.42 – 44.09 ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณ 0.07 – 0.09 และ 5.64 – 7.57 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนที่ถูกตรึงที่พบมากที่สุดนี้จะช่วยลดปัญหาการชะล้างธาตุอาหารออกจากดินและทยอยปลดปล่อยรูปแบบที่เป็นประโยชน์แก่พืชออกมาในภายหลัง

เมื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมพบว่าแตกต่างกัน โดยฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายกว่า และเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วมีค่าสูงที่สุดในเวลาที่สั้นกว่า (49 วัน) ขณะที่โพแทสเซียมจะถูกปลดปล่อยออกมาและเพิ่มปริมาณในระยะเวลาที่ช้ากว่า (63 วัน) ถึงแม้ว่ารูปแบบที่ถูกตรึงของธาตุทั้งสองจะได้รับอิทธิพลจากกระบวนการย่อยสลายของปุ๋ยหมักจากความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงและรูปแบบที่ถูกตรึงของธาตุอาหารทั้งสองเพิ่มขึ้น (ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึง  $r = -0.411$ ,  $p < 0.05$  และโพแทสเซียมที่ถูกตรึง  $r = -0.537$ ,  $p < 0.01$ ) สำหรับรูปแบบที่เป็นประโยชน์ของธาตุอาหารทั้งสองสัมพันธ์กับดัชนีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเช่นกัน โดยเมื่อปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายจะปลดปล่อยรูปแบบที่เป็นประโยชน์นี้ออกมาเพิ่มมากขึ้น (ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์  $r = -0.334$ ,  $p < 0.05$  และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์  $r = -0.455$ ,  $p < 0.01$ ) อย่างไรก็ตามก็ตีหากเก็บปุ๋ยหมักไว้นานเกินไปปริมาณธาตุอาหารทั้งสองโดยรวมจะลดต่ำลง แม้จะมีการปลดปล่อยชดเชยจากรูปที่ถูกตรึงออกมาในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ รวมถึงเกณฑ์มาตรฐานอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในช่วงนี้ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้นทั้งฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม โดยกระบวนการย่อยสลายจะปลดปล่อยปริมาณธาตุอาหารออกมาในระยะเวลาที่แตกต่างกัน ที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้หรือการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้ปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาจึงควรเป็นไปให้สอดคล้องกับความต้องการเกษตรกรต่อปริมาณธาตุอาหารชนิดต่าง ๆ ที่อาจแตกต่างกันไป รวมถึงคุณภาพของอินทรีย์วัตถุที่ลดต่ำลงจากการถูกย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง และปริมาณค่าการนำไฟฟ้าที่อาจเพิ่มมากขึ้นจนเกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นการศึกษาถึงศักยภาพการปลดปล่อยธาตุอาหารต่าง ๆ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจรวมถึงระยะเวลาที่สามารถเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่ให้คุณค่าของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการแนะนำเกษตรกรให้ถูกต้องต่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพดินในอนาคตต่อไป



## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2547). คู่มือการทำปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอย. กรุงเทพฯ: สำนักการจัดการกากและของเสียอันตราย.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2550). *การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่งชุปเปอร์ พด. 1*. สืบค้นจาก [http://www.ldd.go.th/menu\\_Dataonline/G1/G1\\_13.pdf](http://www.ldd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf)
- กรมวิชาการเกษตร. (2558). *ปุ๋ยอินทรีย์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). สำนักพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ 8). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยพิมพ์เกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- ฉัตรชัย จันทร์แดงดวง. (2550). การทำปุ๋ยหมัก. *วารสารศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*, (น.48 – 54), กรุงเทพฯ.
- พูนศิริ หอมจันทร์. (2559). การหาปริมาณธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม) ในน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตจากเศษปลาและเศษกุ้ง. *การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชชมงคล สุนทรวิชาการ ครั้งที่ 8”*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, สุรินทร์.
- ปัญญาภา ส่งเสริม. (2559). *การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก: การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). บัณฑิตวิทยาลัย ศิลปาคร, นครปฐม.
- ปัทมา วิทยากรม. (2547). *ความสมบูรณ์ของดินชั้นสูง*. ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- โสฬส แซ่ลิ้ม. (2559). *ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย*. กลุ่มวิจัยและพัฒนากิจการอินทรีย์วัตถุ กองเทคโนโลยีชีวภาพดิน, กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.
- Ajibade, S., Mupambwa, H.A., Manyever, A., & Mnkeni, P.N.S. (2020). Role of psychrotrophic fungal strains in accelerating and enhancing the maturity of pig manure composting under low-temperature conditions. *Bioresource Technology*. (20)31676-X.
- Alexander, R. (2016). *Phosphorus And Compost Use Dynamics*. Retrieved from <https://www.biocycle.net/phosphorus-compost-use-dynamics/>

- Apori, S. O., Byalebeka, J., Murongo, M., Ssekandi, J., & Noel, G. L. (2021). Effect of co-applied corncob biochar with farmyard manure and NPK fertilizer on tropical soil. *Resources, Environment and Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100034>
- Armstrong, D. L. (1987). Potassium for Agriculture. *BETTER CROPS With Plant Food*, Atlanta.
- Barber, A., (1995). *Soil Nutrient Bioavailability*. West Sussex: Wiley
- Blake, G. R., Steinhardt, G. C., Pombal, X. P., Muñoz, J. C. N., Cortizas, A. M., Arnold, R. W., ... Chesworth, W. (2008). Potassium cycle. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 583–587. doi:10.1007/978-1-4020-3995-9\_461
- Boman, R.K., Taylor, S.L., Raun, W.R., Johnson, G.V., Bernardo, D.J., & Singleton, L.L. (1996). The Magruder Plots: A century of wheat research in Oklahoma. *Published by Department of Agronomy, Oklahoma State University*.
- Caceres, R., Flotats, X., Marfa, O. (2006). Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies. *Waste Management*. (26),1081–1091.
- Carter, M. R., Sanderson, J. B. & MacLeod, J. A. (2004). Influence of compost on the physical properties and organic matter fractions of a fine sandy loam throughout the cycle of a potato rotation. *Can. J. Soil Sci.* 84: 211–218.
- Chen, R., Song, S., Li, X., Liu, H., & Huang, D. (2013). Phosphorus deficiency restricts plant growth but induces pigment formation in the flower stalk of Chinese kale. *Hortic Environ Biotechnol.* 54:243–248
- Chi, C. P., Chu, S., Wang, B., Zhang, D., Zhi, Y., Yang, X., & Zhou, P. (2020). Dynamic bacterial assembly driven by *Streptomyces griseorubens* JSD-1 inoculants correspond to composting performance in swine manure and rice straw co-composting. *Bioresour Technol*, 313, 123692. doi:10.1016/j.biortech.2020.123692
- Çokkizgin, H., & Bölek, Y. (2015). Priming treatments for improvement of germination and emergence of cotton seeds at low temperature. *Plant Breed. Seed Sci.* 71, 121–134.
- Coskun, D.; Britto, D.T.; Kronzucker, H.J. (2017). The nitrogen–potassium intersection: Membrane’s metabolism and mechanism. *Plant Cell Environ.* 40, 2029–2041.

- Delgado-Baquerizo, M., Reich, P.B., Khachane, A.N., Campbell, C.D., Thomas, N., Freitag, T.E., Al-Soud, W.A., Sorensen, S., Bardgett, R.D., Singh, B.K., 2017. It is elemental: soil nutrient stoichiometry drives bacterial diversity. *Environ. Microbiol.* 19 (3), 1176–1188.
- Diaz, L. F., & Savage, G. M. (2007). Chapter 4 Factors that affect the process. *Waste Management Series*, 49–65. doi:10.1016/s1478-7482(07)80007-8
- Duan, Y., Awasthi, S. K., Liu, T., Verma, S., Wang, Q., Chen, H., Ren, X., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2019). Positive impact of biochar alone and combined with bacterial consortium amendment on improvement of bacterial community during cow manure composting. *Bioresour Technol*, 280, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.biotech.2019.02.026>
- Eckhardt, D. P., Redin, M., Santana, N. A., Conti, L. D., Dominguez, J., Jacques, R. J. S., & Antonioli, Z. I. (2018). Cattle Manure Bioconversion Effect on the Availability of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42(0). doi:10.1590/18069657rbcs20170327
- Elliott, A.L., Davis, J.G., Waskom, R.M., Self, J.R., and Christensen, D.K. (2014). Phosphorus Fertilizers for Organic Farming Systems. *Crop Series Soil*. Colorado State University, Colorado.
- Fan, L., Wang, Y., Wang, H., Wu, W. (2001). In vitro Arabidopsis pollen germination and characterization of inward potassium currents in Arabidopsis pollen grain protoplasts. *J. Exp. Bot.* 52, 1603–1614.
- Faridullah, F., Hafeez, S., Ahmed, T., Alam, S., Naz, A., Shah, W., & Khalid, S. (2018). Characterization of Phosphorus in Fresh and Composted Manures of Different Livestock. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27 ( 2 ) , 6 1 5 - 6 2 2 . doi:10.15244/pjoes/68883
- Gerardeaux, E., Jordan-Meille, L., Constantin, J., Pellerin, S., & Dingkuhn, M. (2010). Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by potassium deficiency in *Gossypium hirsutum* L. *Environ. Exp. Bot.* 67, 451–459.
- Gotaas, B. H. (1956). *Composting sanitary disposal and reclamation of organic wastes*. World health organization, Palais des nations, Geneva.

- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Nahar, K., Hossain, S., Mahmud, J. A., Hossen, S., ..., Fujita, M. (2018). Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*, 8, 31; doi:10.3390/agronomy8030031
- Hanc, A., Tlustos, P., Szakova, J., & Balik, J. (2008). The influence of organic fertilizers application on phosphorus and potassium bioavailability. *Plant soil Environ*, 54,(6)247-254
- Haroon, B., Abbasi, A.M., Faridullah, P., Pervez, A., & Irshad, M. (2018). Chemical Characterization of Cow Manure and Poultry Manure after Composting with Privet and Cypress Residues. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49:22, 2854-2866, DOI:10.1080/00103624.2018.1546873
- Heinrich, A., Falen, J., & Stone, A. (2020). *High soil test phosphorus and potassium levels on a long-term organic farm: trends, causes, and solutions*. Retrieved from <https://eorganic.org/node/20735>
- Hue, N.V. (1992). Correcting soil acidity of a highly weathered ultisol with chicken manure and sewage sludge. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23:241-264.
- Hue, N.V., & Silva, J.A. (2020). *Organic Soil Amendments for Sustainable Agriculture: Organic Sources of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium*. Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Manoa.
- Islam, A., & Muttaleb, A. (2016). Effect of potassium fertilization on yield and potassium nutrition of Boro rice in a wetland ecosystem of Bangladesh. *Arch. Agron. Soil Sci.* 62, 1530–1540.
- Jindo, K., Sonoki, T., Matsumoto, K., Canellas, L., Roig, A., & Sanchez-Monedero, M. A. (2016). Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures. *Waste Manag*, 49, 545-552. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.007>
- Kaliambos, L. (2015). *Explanation of phosphorus ionizations*. Retrieved from [https://lefteris-kaliambos.wikia.org/wiki/EXPLANATION\\_OF\\_PHOSPHORUS\\_IONIZATIONS](https://lefteris-kaliambos.wikia.org/wiki/EXPLANATION_OF_PHOSPHORUS_IONIZATIONS)

- Kuo S. (1996). Phosphorus. *In Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods*. Sparks DL, Page AL, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, and Sumner ME. Eds. Soil Science Society of America, Inc., and American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 869-920 pp.
- Kuo, S., Ortiz-Escobar, M. E., Hue, N. V., & Hummel, R. L. (2004). *Composting and compost utilization for agronomic and container crops*. Developments in Environmental Biology, Washington State University, Puyallup.
- Li, R., Wang, J. J., Zhang, Z., Shen, F., Zhang, G., Qin, R., . . . Xiao, R. (2012). Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite. *Bioresour Technol*, *121*, 362-368. doi: 10.1016/j.biortech.2012.06.065
- Li, Y., An, S., Zhang, F., Liu, X., & Hu, B. (2019). Influence of Ligneous Bulking Agents on the Complexation of Heavy Metals to Humic Substances Formed in Pig Manure Composting. *Bull Environ Contam Toxicol*, *103*(2), 323-329. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02659-1>
- Li, Y., Achinas, S., Zhao, J., Geurkink, B., Krooneman, J., & Willem Euverink, G. J. (2020). Co-digestion of cow and sheep manure: Performance evaluation and relative microbial activity. *Renewable Energy*, *153*, 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.041>
- Li, C., Li, H., Yao, T., Su, M., Ran, F., Li, J., He, L., Chen, X., Zhang, C., & Qiu, H. (2021). Effects of swine manure composting by microbial inoculation: Heavy metal fractions, humic substances, and bacterial community metabolism. *J Hazard Mater*, *415*, 125559. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125559>
- Lorimor, J., Powers, W., & Sutton, A. (2004). *Manure Characteristics*. *MidWest Plan Service*, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Ma, Q., Longnecker, N., & Atkins, C. (2002). Varying phosphorus supply and development, growth and seed yield in narrow-leafed lupin. *Plant Soil*. 239:79-85
- Malhotra, H., Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Respon  
se to Deficiency and Excess. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7)

- Manitoba. (2015). *Properties of manure*. Food and Rural Development, Manitoba Agriculture.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3<sup>rd</sup> ed). Academic Press: London, UK. pp. 178–189.
- Martineau, E., Domec, J.C., Bosc, A., Denoroy, P., Fandino, V.A., Lavres, J., & Jordan-Meille, L. (2017). The effects of potassium nutrition on water use in field-grown maize (*Zea mays* L.). *Environ. Exp. Bot.* 134, 62–71.
- McKenzie, R. H. (2013). Potassium Fertilizer Application in Crop Production. *Alberta Agriculture and Rural Development Agriculture Centre*, Lethbridge.
- Mehta, C. M., & Sirari, K. (2018). Comparative study of aerobic and anaerobic composting For better understanding of organic waste Management: a mini review. *Plant Archives*, Vol. 18 No. 1, 2018 pp. 44-48. ISSN 0972-5210.
- Misra, R.V., Roy, R.N., & Hiraoka, H. (2003). On-Farm Composting Methods. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome.
- Mouhamad, R., Alsaede, A., & Iqbal, M. (2016). Behavior of Potassium in Soil: A mini review. *Chemistry International*. 2(1) 58-69, ISSN: 2410-9649.
- Möller, K., Müller, T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Eng. Life Sci.* 12 (3), 242–257.
- Nyakatawa, E.Z., Reddy, K.C., & Sistani, K.R. (2001). Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. *Soil & Tillage Research*, 58:69-79.
- Parnes, R. (2013). *Soil Fertility: A Guide to Organic and Inorganic Soil Amendments*. Retrieved from <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0>
- Pace, M. G., Miller, B. E., Farrell-Poe, K. L. (1995). *The composting processes*. Utah State University, Logan.
- Pettigrew, W.T. (2003). Relationship between insufficient potassium and crop maturity in cotton. *Agron. J.* 95, 1323–1329.
- Pisa, C., Wuta, M., & Muchaonyerwa, P. (2020). Effects of incorporation of vermiculite on carbon and nitrogen retention and concentration of other nutrients during composting of cattle manure. *Bioresource Technology Reports*, 9. doi: 10.1016/j.biteb.2020.100383



- Prajapati, K., & Modi H.A. (2012). The importance of potassium in plant growth – a review. *Indian Journal of Plant Sciences*, Vol. 1(02-03) Jul.-Sept. & Oct.-Dec., pp.177-186. ISSN: 2319-3824 (Online)
- Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019). *Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil*. Crop Soil and Environmental Science, Auburn University.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., & Lu, X. (2002), *Geoderma*, 110, 131.
- Reitsma, K.D., Clay, D.E., & Carlson, C.G. (2011). Alternative Practices for Agronomic Nutrient and Pest Management in South Dakota (Edition 1). *Soil Fertility. Agriculture and Biological Sciences*, South Dakota State University.
- Rich, C.I. (1964). Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil. *Soil Science*. 98: 100-106.
- Royal society of chemistry. (2021). *Phosphorus*. Retrieved from <https://www.rsc.org/periodictable/element/15/phosphorus#:~:text=It%20has%20a%20tetrahedral%20shape%20and%20has%20the%20formula%20P4.&text=The%20two%20main%20forms%20of,flammable%20when%20exposed%20to%20air>.
- Risse, L. M., Cabrera, M. L., Franzluebber, A. K., Gaskin, J. W., Gilley, J. E., Killorn, R., Radcliffe, D. E., Tollner, W. E., Zhang H. (2006). *Land Application of Manure for Beneficial Reuse*. National Center for Manure & Animal Waste Management.
- Schjonning, P., Christensen, B.T., & Carstensen, B. (1994). Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *European Journal of Soil Science*, 45:245-268.
- Sevik, F., Tosun, I., & Ekinci, K. (2018). The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks. *Waste Manag*, 80, 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.051>
- Sharma, D., Yadav, K. D., & Kumar, S. (2018). Role of sawdust and cow dung on compost maturity during rotary drum composting of flower waste. *Bioresour Technol*, 264, 285-289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.091>
- Sharpley, A.N., Smith, S.J., Bain, R. (1993). Effect of poultry litter application on the nitrogen and phosphorus content of Oklahoma soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1131-1137.

- Sharpley, A., Tunney, H., 2000. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21<sup>st</sup> century. *J. Environ. Qual.* 29 (1), 176–181.
- Shrenil Sharma. (2014). Table of Elements, Retrieved from <https://sites.google.com/site/tableofelementsbyshrenilsharma/Downhome/potassium>
- Singh, J. (2013). *Chemical Speciation and bioavailability of heavy metals during water hyacinth composting*. (p. 110), Guwahati (India).
- Sparks, D. L., (1987). Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science*. 6: 1 – 63.
- Sparks, D. L., (2003). *Environmental Soil Chemistry* 2<sup>nd</sup> edition. John Weley & Sons, Inc. New York. USA
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford University: New York.
- Stewart, B.A. 1991. *Effect of animal manure on soil physical and chemical properties*. In: *J.* 60:1021-1037.
- Tan, K.H. (2003). *Humic Matter in Soil and the Environment*. Marcel Dekker, Inc. New York. USA.
- The Royal Horticultural Society. (2021). *Nutrient deficiencies*. Retrieved from <https://www.rhs.org.uk/advice/profile?pid=456>
- Thomas, T.C., & Thomas, A.C. (2009). Vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. *Plant Signal. Behav.* 4, 240–243.
- Tiecke, T.G. (2019). *Properties of Potassium*. Retrieved from <https://www.tobiastiecke.nl/archive/PotassiumProperties.pdf>
- Tong, B., Wang, X., Wang, S., Ma, L., & Ma, W. (2019). Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods. *Bioresour Technol*, 293, 122046. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122046>
- Turner, B.L., Leytem, A.B., 2004. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: chemical speciation and a novel fractionation procedure. *Environ. Sci. Technol.* 38 (22), 6101–6108.
- Wander, M.M., Traina, S.J., Stinner, B.R., and Peters, S.E. (1994), *Soil Science. Soc. Am. J.* 58, 1130.

- Wang, L., Lia, Y., Prasher, S. O., Yan, B., Ou, Y., Cui, H., and Cui, Y. (2019). Organic matter, a critical factor to immobilize phosphorus, copper, and zinc. *Bioresource Technology*, 1-6.
- Wei, Y.Q., Wei, Z.M., Cao, Z.Y., Zhao, Y., Zhao, X.Y., Lu, Q., Wang, X.Q., Zhang, X., 2016. A regulating method for the distribution of phosphorus fractions based on environmental parameters related to the key phosphate-solubilizing bacteria during composting. *Bioresour. Technol.* 211, 610–617.
- Wilson, J., (2014). SoilWeb/Soil Biology/Nutrient Cycles/Potassium (K), Retrieved from [https://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil\\_Biology/Nutrient\\_Cycles/Potassium\\_\(K\)](https://wiki.ubc.ca/LFS:SoilWeb/Soil_Biology/Nutrient_Cycles/Potassium_(K))
- Wong, J. W., Fung, S. O., & Selvam, A. (2009). Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting. *Bioresour Technol*, 100(13), 3324-3331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.063>
- Yang, Y., Awasthi, M. K., Bao, H., Bie, J., Lei, S., & Lv, J. (2020). Exploring the microbial mechanisms of organic matter transformation during pig manure composting amended with bean dregs and biochar. *Bioresour Technol*, 313, 123647. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123647>
- Yao, F., Gui-zhen, W., Yuan-wang, L., Deng-miao, C., Shuang-hu, F., Quansheng, Z., XUE3, J., Shu-qing, Z., & Zhao-jun, L. (2021). The impacts of oxytetracycline on humification during manure composting can be alleviated by adjusting initial moisture contents as illustrated by NMR. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(8): 2277–2288
- Zaha, C., Dumitrescu, L., & Manciulea, J. (2013). correlations between composting conditions and characteristics of compost as biofertilizer. *Engineering Sciences*, 6 (55)1.
- Zhen, X. F., Luo, M., Dong, H.Y., Li, S.B., Li, M.C., & Kang, J. (2020). variations of n-p-k contents in livestock and livestock manure composting. *applied ecology and environmental research*, 19(1):249-261.
- Zhu, Y. G., & Smith, S. E., (2001). Seed phosphorus (P) content affects growth, and P uptake of wheat plants and their association with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Plant Soil*. 231:105–112

Zhou. (2017). The Effect of Different C/N Ratios on the Composting of Pig Manure and Edible Fungus Residue with Rice Bran. *compost science & utilization*. (25). 2, 120–129.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการวิเคราะห์รูปแบบฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักผสมมูลวัวและมูลหมู

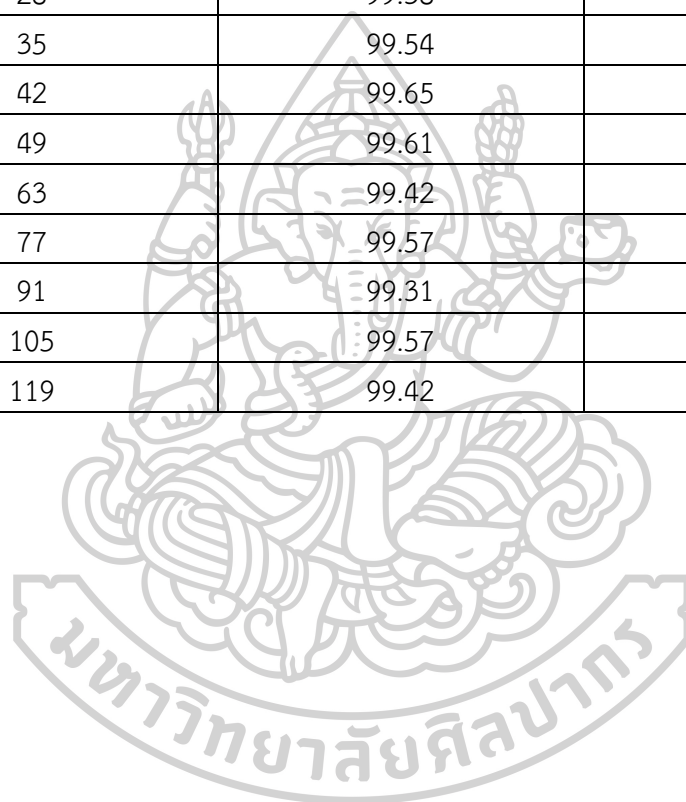




ตารางที่ ก.1

ร้อยละของฟอสฟอรัสในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมัก

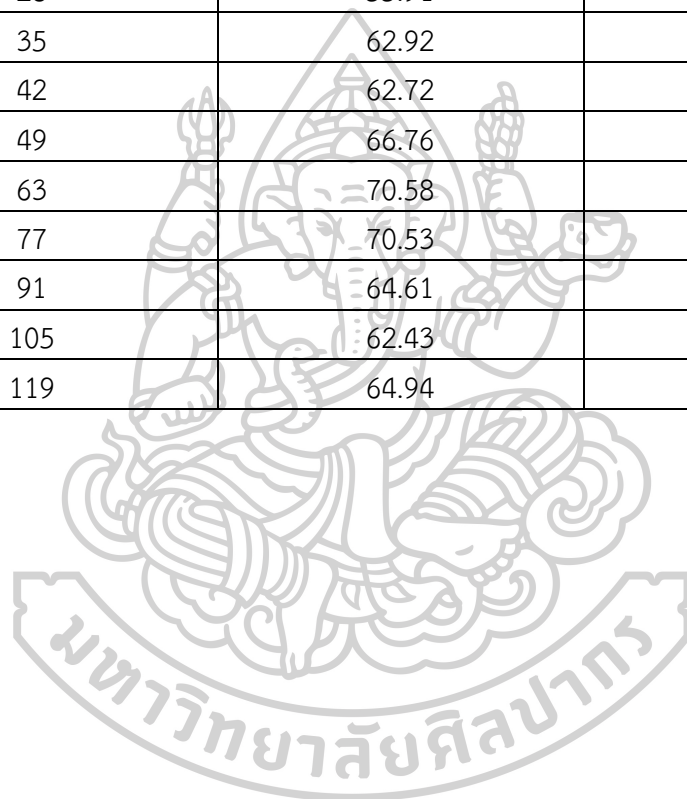
ระยะเวลา (วัน)	รูปแบบที่ถูกตรึง	รูปแบบที่เป็นประโยชน์
0	99.40	0.60
3	99.57	0.43
7	99.56	0.44
14	99.30	0.70
21	99.49	0.51
28	99.38	0.62
35	99.54	0.46
42	99.65	0.35
49	99.61	0.39
63	99.42	0.58
77	99.57	0.43
91	99.31	0.69
105	99.57	0.43
119	99.42	0.58



ตารางที่ ก.2

ร้อยละของโพแทสเซียมในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมัก

ระยะเวลา (วัน)	รูปแบบที่ถูกตรึง	รูปแบบที่เป็นประโยชน์
0	58.37	41.63
3	61.64	38.36
7	63.38	36.62
14	62.86	37.14
21	66.02	33.98
28	55.91	44.09
35	62.92	37.08
42	62.72	37.28
49	66.76	33.24
63	70.58	29.24
77	70.53	29.47
91	64.61	35.39
105	62.43	37.57
119	64.94	35.06



ตารางที่ ก.3

ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมัก

ระยะเวลา (วัน)	ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/กรัม ปุ๋ย)		
	รูปแบบที่ถูกต้อง ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	รูปแบบที่เป็นประโยชน์ ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	รวม
0	16.03 ± 3.31	0.0969 ± 0.008	16.13
3	12.86 ± 2.62	0.0554 ± 0.007	12.92
7	13.97 ± 2.40	0.0623 ± 0.002	14.03
14	13.06 ± 2.34	0.0914 ± 0.002	13.15
21	14.00 ± 0.65	0.0713 ± 0.009	14.07
28	16.55 ± 2.54	0.1031 ± 0.006	16.65
35	18.80 ± 1.79	0.0875 ± 0.009	18.89
42	20.11 ± 1.25	0.0703 ± 0.003	20.18
49	22.60 ± 1.40	0.0887 ± 0.005	22.69
63	15.66 ± 0.40	0.0906 ± 0.004	15.75
77	21.24 ± 0.25	0.0917 ± 0.004	21.33
91	10.95 ± 2.18	0.0759 ± 0.006	11.03
105	17.78 ± 2.94	0.0771 ± 0.001	17.86
119	13.43 ± 2.80	0.0786 ± 0.005	13.51



ตารางที่ ก.4

ปริมาณโพแทสเซียมในรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมัก

ระยะเวลา (วัน)	โพแทสเซียม (มิลลิกรัม/กรัม ปุ๋ย)		
	รูปแบบที่ถูกตรึง ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	รูปแบบที่เป็นประโยชน์ ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	รวม
0	8.58 ± 0.69	6.12 ± 0.18	14.70
3	10.17 ± 0.56	6.33 ± 0.36	16.50
7	9.76 ± 2.41	5.64 ± 1.11	15.40
14	10.07 ± 1.87	5.95 ± 0.48	16.02
21	11.91 ± 1.02	6.13 ± 0.54	18.04
28	9.60 ± 0.89	7.57 ± 0.91	17.17
35	11.88 ± 0.65	7.00 ± 0.38	18.88
42	12.33 ± 0.74	7.33 ± 0.19	19.66
49	14.60 ± 0.69	7.27 ± 0.08	21.87
63	15.57 ± 1.60	6.49 ± 1.31	22.06
77	14.72 ± 0.39	6.15 ± 0.14	20.87
91	12.49 ± 1.81	6.84 ± 0.22	19.33
105	11.20 ± 0.23	6.74 ± 0.19	17.94
119	12.13 ± 1.33	6.55 ± 0.40	18.68





ภาคผนวก ข  
ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ข.1  
 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพอลิฟอร์มที่แตกต่างกัน กับปัจจัยทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

	Day	Temp	pH	EC	Moisture	OM	C/N	Avai P	Fixed P
<b>Day</b>									
Pearson Correlation	1	-.646**	-.289	.884**	-.730**	-.515**	-.674**	.063	.083
Sig. (2-tailed)		.000	.063	.000	.000	.000	.000	.692	.602
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Temp</b>									
Pearson Correlation	-.646**	1	.535**	-.763**	.687**	.393*	.796**	-.517**	-.301
Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.010	.000	.000	.053
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>pH</b>									
Pearson Correlation	-.289	.535**	1	-.352*	.284	.080	.474**	-.396**	-.640**
Sig. (2-tailed)	.063	.000		.022	.068	.613	.002	.009	.000
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>EC</b>									
Pearson Correlation	.884**	-.763**	-.352*	1	-.916**	-.546**	-.815**	.159	.222
Sig. (2-tailed)	.000	.000	.022		.000	.000	.000	.315	.157
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Moisture</b>									
Pearson Correlation	-.730**	.687**	.284	-.916**	1	.519**	.771**	-.138	-.160
Sig. (2-tailed)	.000	.000	.068	.000		.000	.000	.385	.312
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42



ตารางที่ ข.1  
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพอลิฟอร์มต่างๆ กับปัจจัยทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก (ต่อ)

	Day	Temp	pH	EC	Moisture	OM	C/N	Avai P	Fixed P
OM	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-.515** .010	.080 .613	-.546** .000	.519** .000	1 42	.786** .000	-.057 .722	-.128 .420
C/N	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-.674** .000	.474** .002	-.815** .000	.771** .000	42 42	1 .000	-.323* .037	-.360* .019
Avai P	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.063 .692	-.396** .009	.159 .315	-.138 .385	42 42	42 .037	1 .035	.326* .035
Fixed P	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	.083 .602	-.640** .000	.222 .157	-.160 .312	42 42	42 .019	.326* .035	1 .035
N		42	42	42	42	42	42	42	42

หมายเหตุ \*มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

\*\*มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.2  
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโหนดสีเขียวรูปแบบต่าง ๆ กับปัจจัยทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

	Day	Temp	pH	EC	Moisture	OM	C/N	Avai K	Fixed K
<b>Day</b>	1								
Pearson Correlation		-.646**	-.289	.884**	-.730**	-.515**	-.674**	.211	.483**
Sig. (2-tailed)									
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Temp</b>									
Pearson Correlation	-.646**	1	.535**	-.763**	.687**	.393*	.796**	-.180	-.360*
Sig. (2-tailed)									
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>pH</b>									
Pearson Correlation	-.289	.535**	1	-.352*	.284	.080	.474**	-.354*	-.501**
Sig. (2-tailed)									
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>EC</b>									
Pearson Correlation	.884**	-.763**	-.352*	1	-.916**	-.546**	-.815**	.234	.625**
Sig. (2-tailed)									
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Moisture</b>									
Pearson Correlation	-.730**	.687**	.284	-.916**	1	.519**	.771**	-.247	-.596**
Sig. (2-tailed)									
N	42	42	42	42	42	42	42	42	42

ตารางที่ ข.2  
 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างโหนดสีเขียวรูปแบบต่าง ๆ กับปัจจัยทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก (ต่อ)

	Day	Temp	pH	EC	Moisture	OM	C/N	Avai K	Fixed K
<b>OM</b>	Pearson Correlation	-.515**	.393*	.080	-.546**	.519**	.786**	-.274	-.245
	Sig. (2-tailed)	.000	.010	.613	.000	.000	.000	.079	.117
	N	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>C/N</b>	Pearson Correlation	-.674**	.796**	.474**	.771**	.786**	1	-.357*	-.466**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.002	.000	.000		.020	.002
	N	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Avai K</b>	Pearson Correlation	.211	-.180	-.354*	.234	-.247	-.357*	1	-.052
	Sig. (2-tailed)	.180	.255	.021	.137	.079	.020		.743
	N	42	42	42	42	42	42	42	42
<b>Fixed K</b>	Pearson Correlation	.483**	-.360*	-.501**	.625**	-.596**	-.466**	-.052	1
	Sig. (2-tailed)	.001	.019	.001	.000	.117	.002	.743	
	N	42	42	42	42	42	42	42	42

หมายเหตุ \*มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

\*\*มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.3

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของฟอสฟอรัสรูปแบบที่ถูกตรึงของปุ๋ยหมัก

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
91	3	10.9553						
3	3	12.8690	12.8690					
14	3	13.0616	13.0616					
119	3	13.4288	13.4288					
7	3	13.9642	13.9642	13.9642				
21	3	13.9959	13.9959	13.9959				
63	3		15.6590	15.6590	15.6590			
0	3		16.0319	16.0319	16.0319			
28	3		16.5490	16.5490	16.5490	16.5490		
105	3			17.7870	17.7870	17.7870	17.7870	
35	3				18.7985	18.7985	18.7985	18.7985
42	3					20.1072	20.1072	20.1072
77	3						21.2336	21.2336
49	3							22.6049
Sig.		.136	.078	.062	.118	.071	.080	.054

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.4

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของฟอสฟอรัสรูปแบบที่เป็นประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

Day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
3	3	.055441					
7	3	.062288	.062288				
42	3		.070300	.070300			
21	3		.071251	.071251			
91	3			.075939			
105	3			.077127			
119	3			.078607	.078607		
35	3				.087528	.087528	
49	3					.088680	
63	3					.090625	
14	3					.091449	
77	3					.091677	
0	3					.096929	.096929
28	3						.103144
Sig.		.143	.072	.112	.060	.077	.182

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.5

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของโพแทสเซียมรูปแบบที่ถูกตรึงของปุ๋ยหมัก

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
0	3	8.5807				
28	3	9.5960	9.5960			
7	3	9.7521	9.7521			
14	3	10.0663	10.0663	10.0663		
3	3	10.1694	10.1694	10.1694	10.1694	
105	3		11.1962	11.1962	11.1962	
35	3		11.8808	11.8808	11.8808	
21	3		11.9117	11.9117	11.9117	
119	3			12.1323	12.1323	
42	3			12.3293	12.3293	
91	3				12.4930	
49	3					14.5982
77	3					14.7215
63	3					15.5628
Sig.		.168	.053	.058	.052	.373

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.



ตารางที่ ข.6

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของโพแทสเซียมรูปแบบที่เป็นประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
7	3	5.6434				
14	3	5.9546	5.9546			
0	3	6.1172	6.1172	6.1172		
21	3	6.1259	6.1259	6.1259		
77	3	6.1519	6.1519	6.1519		
3	3	6.3315	6.3315	6.3315	6.3315	
63	3	6.4937	6.4937	6.4937	6.4937	6.4937
119	3	6.5513	6.5513	6.5513	6.5513	6.5513
105	3	6.7439	6.7439	6.7439	6.7439	6.7439
91	3		6.8401	6.8401	6.8401	6.8401
35	3		6.9970	6.9970	6.9970	6.9970
49	3			7.2712	7.2712	7.2712
42	3				7.3276	7.3276
28	3					7.5691
Sig.		.060	.076	.050	.085	.064
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.						
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.						

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กฤตภาส ธรรมเจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	09 มิถุนายน 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดปราจีนบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต วิชาเอกวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	30 ซอยเทียนทะเล 7 แยก 6-3 ถนนบางขุนเทียน - ชายทะเล แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150

