



อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถูงถ่ายเทอากาศต่อรูปแบบไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูล

สุกร

โดย

นางสาวปิยกมล อัจจินดา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถ่วงถ่ายเทอากาศต่อรูปแบบไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูล
โคและมูลสุกร



โดย
นางสาวปิยกมล อัจจินดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF COMPOSTING PROCESS USING AIR-FLOW BAG ON NITROGEN
SPECIATION IN MIXED BOVINE AND PORCINE MANURE COMPOST



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 2022
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ อธิพิพลของกระบวนการหมักแบบถ่วงถ่ายเทอากาศต่อรูปแบบ
ไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร
โดย นางสาวปิยกมล อัจจินดา
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

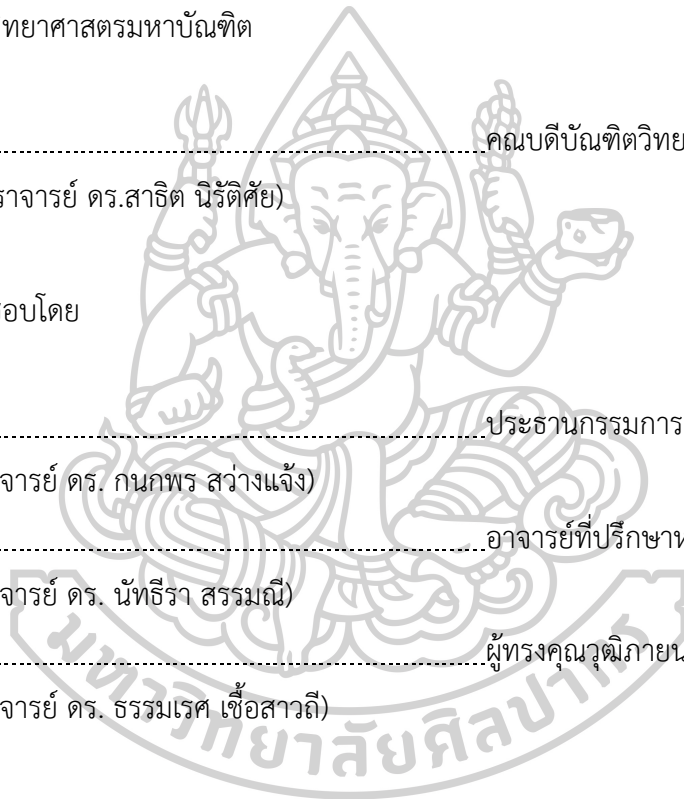
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นีรัตย์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

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

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

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



620720025 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : ไนโตรเจน, ปุ๋ยหมัก, ธาตุอาหาร

นางสาว ปิยกมล อาจจินดา: อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถ่วงถ่ายเทอากาศต่อรูปแบบไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจนระหว่างกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร โดยหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน เก็บตัวอย่างวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ปุ๋ยหมักแบ่งตามอุณหภูมิได้ 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง (ระหว่างวันที่ 1 – 13) และระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป) จากการศึกษาพบว่าไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) เป็นสัดส่วนที่พบมากที่สุดโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 88.26 – 96.54 ในขณะที่ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ซึ่งประกอบด้วยแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3.46 – 11.74 นอกจากนี้ปริมาณของไนโตรเจนอินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมัก ($r=0.577$, $p<0.01$) เช่นเดียวกับปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ($r=0.899$, $p<0.01$) โดยสอดคล้องกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r=0.655$, $p<0.01$) จากกระบวนการย่อยสลายที่ปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ ออกมาเพิ่มขึ้นผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ในระยะอุณหภูมิสูง ซึ่งแอมโมเนียมไนโตรเจนจะถูกปลดปล่อยออกมามากในช่วงนี้และจะมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ จากการถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรทไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักทำให้ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณไนเตรทไนโตรเจนจึงมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ลดลงเรื่อย ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($r=-0.945$, $p<0.01$) โดยปริมาณธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า (EC) เพิ่มขึ้นเช่นกันทำให้ปุ๋ยหมักมีค่าการนำไฟฟ้าเกินมาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป นอกจากนี้ดัชนีไนตริฟิเคชัน (Nitrification index) ยังบ่งบอกว่าหลังจากวันที่ 28 ปุ๋ยหมักเหมาะแก่การนำไปใช้ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดควรอยู่ในช่วงวันที่ 42 – 63 ซึ่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ และไนเตรทไนโตรเจน มีค่าสูงกว่าพารามิเตอร์อื่น ๆ และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรเหมาะแก่การนำไปใช้

620720025 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Nitrogen, Compost, Nutrient

MISS PIYAKAMOL ARTJINDA : EFFECT OF COMPOSTING PROCESS USING AIR-FLOW BAG ON NITROGEN SPECIATION IN MIXED BOVINE AND PORCINE MANURE COMPOST THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR NATDHERA SANMANEE, Ph.D.

This research investigates the dynamic of nitrogen species during composting of mixed bovine and porcine manure compost. The samples were collected for 4 months at days 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, and 119. The maturation of compost was divided after temperature into 3 stages: the initial stage (at day 0), the thermophilic stage (during day1-13), and the mature stage (since day 14). The most proportion of nitrogen was organic nitrogen (Org-N) with in the range of 88.26-96.54% while the available nitrogen (AN) consisting of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) was found with in the range of 3.46—11.74%. The amounts of Org-N increased corresponding with time ($r=0.577$, $p<0.01$) together with $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($r=0.899$, $p<0.01$) which in responding with the increasing amounts of total nitrogen (TN) ($r=0.655$, $p<0.01$). This explained the decomposition process releasing more forms of nitrogen and increasing the nitrogen contents. The ammonification process prevailed during the thermophilic phases releasing more $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents and gradually decreased when approaching the mature stage via the nitrification process. Therefore, the amounts of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was in the opposite direction of the amounts of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($r=-0.945$, $p<0.01$). However, the electrical conductivity (EC) increased upon the composting process as more nutrient ions were discharged. The ECs were exceeding the standard of Thai compost quality since day 77. The nitrification index ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$) indicated that after day 28 the compost was appropriate to use. Nevertheless, the best utilizing of this compost should be during day 42-63 in which the TN, Org-N, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were in the higher amounts and other parameters were met the standard of Thai compost criteria.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมนี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่าง ๆ ในการเขียนรายงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงยังสอนแนวทางในการดำเนินชีวิต การทำงาน และสิ่งอื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และรองศาสตราจารย์ ดร. กนกพร สว่างแจ้ง เป็นอย่างสูงที่คอยแนะนำและตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านทั้งหลายมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อทดแทนพระคุณแต่บิดา สิบเอก ประจักษ์ อาจจินดา และมารดา นางละมุล อาจจินดา ที่คอยสนับสนุนในทุกด้านตลอดชีวิตของผู้วิจัยเกินที่จะพรรณนา อันเป็นเบื้องหลังของความสำเร็จในครั้งนี้ของผู้วิจัย

นางสาว ปิยกมล อาจจินดา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปุ๋ยหมัก.....	4
2.1.1 ปังจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก.....	4
2.1.1.1 ลักษณะของวัสดุหมัก.....	5
2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหมัก.....	5
2.1.1.3 ความชื้น.....	6
2.1.1.4 การระบายอากาศ.....	6
2.1.1.5 อุณหภูมิ.....	6
2.1.1.6 ค่าความเป็นกรด - ด่าง.....	7

2.1.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมัก.....	7
2.1.2.1 แบคทีเรีย (Bacteria)	7
2.1.2.2 แอคติโนมัยซีท (Actinomycetes).....	8
2.1.2.3 เชื้อรา (Fungi).....	8
2.1.3 มาตรฐานคุณภาพของปุ๋ยหมัก	9
2.1.4 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก.....	9
2.1.4.1 แหล่งธาตุอาหารของพืช.....	9
2.1.4.2 ปรับปรุงบำรุงดิน.....	11
2.2 ไนโตรเจน.....	13
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไนโตรเจน.....	13
2.2.2 วัฏจักรไนโตรเจนและกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจน.....	14
2.2.3 ความสำคัญของไนโตรเจน.....	17
2.2.4 แหล่งที่มาของไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก.....	17
2.3 ดัชนีเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจน.....	18
2.3.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....	19
2.3.2 อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N/NO}_3^-\text{-N}$).....	21
2.4 การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ (Decomposition) และการสูญเสียไนโตรเจน (Nitrogen loss) 22	
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 กระบวนการทำปุ๋ยหมัก.....	32
3.1.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้ในการหมัก.....	32
3.1.2 ขั้นตอนการหมัก	32
3.1.3 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก	33
3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์	33

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.2.1 เครื่องมือ	34
3.2.2 สารเคมี.....	34
3.3 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	35
3.3.1 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต.....	35
3.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 11.25 นอร์มอล	35
3.3.3 สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.025 นอร์มอล	35
3.3.4 สารละลายมาตรฐานทัญทอไมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 นอร์มอล.....	36
3.3.5 สารละลายมาตรฐานปรอทอมิกรดไฮโดรคลอริก 0.025 นอร์มอล.....	36
3.3.6 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Standardization).....	36
3.4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	36
3.4.1 พารามิเตอร์พื้นฐาน	38
3.4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature).....	38
3.4.1.2 ความชื้น (Moisture content).....	38
3.4.1.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter; OM).....	38
3.4.1.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	39
3.4.1.5 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC).....	39
3.4.2 พารามิเตอร์ไนโตรเจน	39
3.4.2.1 ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; TN).....	41
3.4.2.2 แอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$).....	42
3.4.2.3 ไนเตรทไนโตรเจน (Nitrate nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$)	44
3.4.2.4 ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (Available nitrogen; AN)	45
3.4.2.5 ไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic nitrogen; Org-N)	46
3.4.3 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (Organic matter loss; OM loss).....	46

3.4.4 การสูญเสียไนโตรเจน (Nitrogen loss; TN loss).....	47
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	47
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา	49
4.1 คุณลักษณะปุ๋ยหมักและการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร	49
4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)	50
4.1.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	55
4.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)	56
4.1.4 ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม	57
4.1.5 ปริมาณหิน กรวด ทราย และโลหะหนัก	57
4.2 สัดส่วนไนโตรเจนตลอดกระบวนการหมัก	58
4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของไนโตรเจนตลอดกระบวนการหมัก	60
4.3.1 ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; TN).....	60
4.3.2 ไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic nitrogen; Org-N).....	63
4.3.3 ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (Available nitrogen; AN).....	65
4.3.3.1 แอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$).....	69
4.3.3.2 ไนเตรทไนโตรเจน (Nitrate nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$)	72
4.3.3.3 อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)....	74
4.4 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$).....	76
4.5 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการหมักต่อรูปแบบของไนโตรเจน	77
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	78
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์รูปแบบไนโตรเจนของปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร.....	88

ภาคผนวก ข ข้อมูลทางสถิติ 91

ประวัติผู้เขียน 98



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557	10
ตารางที่ 2.2 ปริมาณไนโตรเจนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ในมูลสัตว์ และพืชชนิดต่าง ๆ.....	18
ตารางที่ 3.1 ชนิดและปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยหมัก.....	32
ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	35
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจัดจำหน่ายตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557.....	51
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$) ของปุ๋ยหมัก.....	75



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ธาตุไนโตรเจน.....	14
ภาพที่ 2.2 วัฏจักรไนโตรเจน.....	15
ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการหมัก ปุ๋ยมูลสุกรผสมฟางข้าวสาลี 4 กอง ได้แก่ SB0, SB05, SB10 และ SB15 ซึ่งผสมถ่าน ชีวภาพร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ	20
ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ไนเตรทไนโตรเจน และอัตราส่วน แอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนกับระยะเวลาหมักของขยะมูลฝอยชุมชน	22
ภาพที่ 2.5 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ และการสูญเสียไนโตรเจน ในระหว่างกระบวนการหมักของปุ๋ย หมักซากอุนผสมมูลโค (Pile 1) และปุ๋ยหมักซากอุนผสมมูลไก่ (Pile 2).....	23
ภาพที่ 2.6 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ การสูญเสียไนโตรเจน และอุณหภูมิกับระยะเวลาหมัก	25
ภาพที่ 2.7 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ อัตราการปลดปล่อยแอมโมเนีย และอุณหภูมิกับ ระยะเวลาหมัก	27
ภาพที่ 2.8 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ และอัตราการปลดปล่อยแอมโมเนียกับระยะเวลาหมัก รวมถึงการสูญเสียไนโตรเจนของการหมักทั้ง 4 วิธี และดัชนีการงอก.....	29
ภาพที่ 2.9 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด - ต่าง สัดส่วนของกรดฮิวมิก ต่อฟัลวิค และดัชนีการงอกกับระยะเวลาหมัก	31
ภาพที่ 3.1 แผนผังการวิเคราะห์ในภาพรวม.....	37
ภาพที่ 3.2 ภาพรวมขั้นตอนการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$).....	40
ภาพที่ 3.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN).....	42
ภาพที่ 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$).....	43
ภาพที่ 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$).....	45
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดกระบวนการหมัก.....	50

ภาพที่ 4.2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter: OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาหมัก ($r = -0.515$ และ -0.681 , $p < 0.01$ ตามลำดับ).....	54
ภาพที่ 4.3 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (OM loss) ตลอดกระบวนการหมัก.....	55
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด – ต่างตลอดกระบวนการหมัก.....	56
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าตลอดกระบวนการหมักปุ๋ย.....	57
ภาพที่ 4.6 สัดส่วนของไนโตรเจนทั้งหมด ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- \text{-N}$).....	59
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ด้วยวิธี Duncan.....	61
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.435$ และ -0.894 , $p < 0.01$ ตามลำดับ).....	61
ภาพที่ 4.9 การสูญเสียไนโตรเจน (TN loss) ตลอดกระบวนการหมัก.....	63
ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) ด้วยวิธี Duncan.....	64
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM).....	64
ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ด้วยวิธี Duncan.....	66
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.321$, $p < 0.05$).....	67
ภาพที่ 4.14 สัดส่วนของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- \text{-N}$).....	68
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) กับไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) หลังจากวันเริ่มผสม (ไม่รวมวันที่ 0) ($r = -0.945$, $p < 0.01$).....	69
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) ด้วยวิธี Duncan.....	70
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) กับปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.715$ และ 0.394 , $p < 0.01$ ตามลำดับ).....	70
ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) ด้วยวิธี Duncan.....	73

ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) กับปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = 0.740$ และ -0.801 , $p < 0.01$ ตามลำดับ)..... 73

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) 76



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งเกิดจากการนำซากหรือเศษเหลือจากพืชมาหมักรวมกันและผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ จนเปลี่ยนสภาพไปจากเดิมเป็นวัสดุที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม เปื่อยยุ่ย ไม่แข็งกระด้าง และมีสีน้ำตาลปนดำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารสำคัญของพืชที่ประกอบไปด้วยธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม โดยหนึ่งในธาตุอาหารหลักที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน (ไนโตรเจน แอสไมล์, 2559) เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตซึ่งพืชสามารถดูดซึมไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์ได้เมื่ออยู่ในรูปของไนเตรทไนโตรเจน (Nitrate nitrogen; NO_3^- -N) ที่พบว่ามีความมากในช่วงที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังมีคุณสมบัติในการปรับปรุงบำรุงดินทำให้ดินร่วนซุยอนุภาคของดินจะเชื่อมเกาะกันเล็กน้อยทำให้เกิดช่องว่างสามารถถ่ายเทอากาศได้และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ช่วยลดปัญหาดินแน่น รวมถึงยังสามารถดูดซับธาตุอาหารเพื่อทยอยปลดปล่อยให้แก่พืชได้ในภายหลัง

ไนโตรเจนในปุ๋ยหมักแบ่งตามการใช้ประโยชน์ของพืชได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic nitrogen; Org-N) และไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (Available nitrogen; AN) โดยส่วนใหญ่ไนโตรเจนในปุ๋ยหมักจะอยู่ในรูปของไนโตรเจนอินทรีย์ที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงต้องถูกย่อยสลายเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium nitrogen; NH_4^+ -N) และไนเตรทไนโตรเจน โดยย่อยสลายผ่านกระบวนการมินิอรัลไลเซชัน (Mineralization) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ อะมิไนเซชัน (Aminization) แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) และไนตริฟิเคชัน (Nitrification) จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืชในที่สุด (Johnson et al., 2005; Yu et al., 2019; Zhong et al., 2020) โดยไนเตรทไนโตรเจนมีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืชและเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก เอนไซม์ และรงควัตถุในใบพืชสีเขียว (Chlorophyll) ซึ่งช่วยในการสังเคราะห์แสง หากพืชขาดไนโตรเจนจะทำให้ใบแก่ของพืชมีสีเหลืองและหยุดการเจริญเติบโต

(คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541; ปัทมา วิทยากร, 2559) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในระหว่างกระบวนการหมักยังได้รับอิทธิพลจากวัสดุตั้งต้นที่ใช้หมักเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน รวมถึงระยะเวลาในการหมักและสภาพแวดล้อมของปุ๋ยหมัก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรด – ด่าง เป็นต้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลต่อสัดส่วน ปริมาณ และรูปแบบของไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาสัดส่วนและรูปแบบของไนโตรเจน ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ ซึ่งประกอบด้วยแอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ในการหมักปุ๋ยที่ระยะเวลาต่าง ๆ รวมถึงศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนตลอดกระบวนการหมัก โดยสามารถพิจารณาได้จากดัชนีไนโตรเจน ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นดัชนีเชิงคุณภาพในแง่ปริมาณธาตุอาหารของพืช ทำให้ทราบถึงระยะเวลาการพัฒนาเต็มตัวของปุ๋ยหมักที่มีธาตุอาหารเพียงพอแก่การนำไปใช้ประโยชน์ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนและรูปแบบของไนโตรเจนในการหมักปุ๋ยที่ระยะเวลาต่าง ๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก
- 1.2.3 เพื่อประเมินระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมต่อการนำปุ๋ยหมักไปใช้ประโยชน์ที่ยังคงให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนที่เพียงพอและเป็นประโยชน์ได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อรูปแบบและปริมาณไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สัดส่วนและปริมาณไนโตรเจนที่พบที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรที่นำมาศึกษานี้เป็นปุ๋ยหมักที่ผลิตขึ้นเอง โดยใช้สูตรปุ๋ยหมักของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี ที่พัฒนาร่วมกับศูนย์การเรียนรู้ชุมชนบ้านหัวอ่าว ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม โดยใช้พื้นที่หมักปุ๋ยในตำบลดอนพุทรา อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ซึ่งวัสดุหมักสามารถหาได้โดยทั่วไปในท้องถิ่นและใช้ระยะเวลาในหมัก 4 เดือน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 จากนั้นนำตัวอย่างปุ๋ยไปทำการตรวจวัดพารามิเตอร์พื้นฐานเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารหลักที่ผ่านเกณฑ์กำหนด นำไปศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบและปริมาณของไนโตรเจนรวมถึงสัดส่วนที่พบที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ ร่วมกับการประเมินการสูญเสียไนโตรเจนและอินทรีย์วัตถุที่จัดเป็นดัชนีของกระบวนการย่อยสลายในกระบวนการหมัก จากนั้นนำผลการศึกษาที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SPSS

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบสัดส่วนและรูปแบบของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก
- 1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อศักยภาพและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ
- 1.5.3 ทราบถึงระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งยังคงให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนที่เพียงพอและเป็นประโยชน์ได้
- 1.5.4 เป็นข้อมูลให้แก่เกษตรกรได้นำไปปรับปรุงคุณภาพของปุ๋ยหมัก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปุ๋ยหมักเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน และยังมีคุณสมบัติในการปรับปรุงบำรุงดินทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมถึงอุดมไปด้วยธาตุอาหารต่าง ๆ โดยเฉพาะไนโตรเจนที่เป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชโดยเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนในเซลล์พืช ไนโตรเจนในปุ๋ยหมักถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ จึงสามารถใช้เป็นดัชนีเชิงคุณภาพในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมัก ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนรูปแบบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

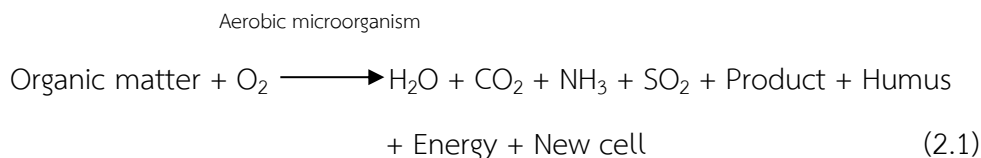
2.1 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้มาจากการนำเศษพืช ซากสัตว์ หรือวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่าง ๆ จากชุมชนนำมาผ่านกรรมวิธี สับ บด ร่อน และนำเศษชิ้นส่วนของวัสดุหมักเหล่านี้มากองรวมกัน จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการหมักซึ่งเป็นการย่อยสลายทางชีววิทยาโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จนกระทั่งได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน มีสีน้ำตาลปนดำ ไม่มีกลิ่น มีลักษณะพรุน ยุ่ย ร่วนซุย มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ และมีอัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายจนเสร็จสมบูรณ์จะได้ปุ๋ยหมักที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงบำรุงดิน ซึ่งทำให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำ มีความพรุนสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการดูดซับและเพิ่มปริมาณธาตุอาหารให้แก่พืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541; ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์, 2547; ธงชัย มาลา, 2546; มุกดา สุขสวัสดิ์, 2560)

2.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการหมัก

กระบวนการหมักปุ๋ยเป็นกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต

เซลลูโลส และลิกนิน จนได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วยอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน น้ำ พลังงานความร้อน และแก๊สต่าง ๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แอมโมเนีย (NH₃) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการที่ 2.1



อย่างไรก็ดีปัจจัยด้านสภาวะแวดล้อมรวมถึงลักษณะของวัสดุหมักจัดเป็นสิ่งที่มอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุภายในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งอาจส่งเสริมหรือยับยั้งอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเหล่านั้น โดยปัจจัยด้านสภาวะแวดล้อมดังกล่าวมีดังนี้

2.1.1.1 ลักษณะของวัสดุหมัก

ลักษณะของวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยหมักนั้นหากมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และสามารถคลุกเคล้าได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้วัสดุเหล่านั้นถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้มากกว่า แต่จะสามารถระบายอากาศได้น้อยกว่าวัสดุหมักที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นเส้นหรือท่อน นอกจากนี้ความสดของวัสดุหมักยังมีผลต่อความชื้น เนื่องจากหากมีปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้การระบายอากาศไม่ดีเกิดการเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็น (ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์, 2547)

2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหมัก

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหมักนั้น ต้องพิจารณาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เนื่องจากเซลล์ของจุลินทรีย์จะประกอบด้วยคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นสารเหล่านี้จึงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยสารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานและสามารถพบได้ในวัสดุที่มีสีน้ำตาล (นันทวัน ฤทธิ์เดช, 2556) ส่วนสารประกอบไนโตรเจนจะเป็นแหล่งไนโตรเจนในการสร้างส่วนประกอบของเซลล์ เช่น การสังเคราะห์โปรตีน และกรดนิวคลีอิก เป็นต้น และสามารถพบได้ในวัสดุที่มีสีเขียว อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่จุลินทรีย์ต้องการใช้คาร์บอน 10 ส่วนต่อไนโตรเจน 1 ส่วน ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในตอนเริ่มของกระบวนการหมักควรมีค่าอยู่ในช่วง 25 – 45 (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559) เพื่อให้มีแหล่งอาหารที่เพียงพอในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ใหม่ และเมื่อกระบวนการหมักสิ้นสุดลงปุ๋ยหมักควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยกว่า 20 (Tong et al., 2019) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่อยู่ในช่วง 10 – 15 จะทำให้เกิดกรดฮิวมิกที่ดี (Tan, 2003) แต่ถ้าในกองปุ๋ยหมักมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก คือมี

องค์ประกอบที่มีปริมาณคาร์บอนสูงแต่ปริมาณไนโตรเจนมีน้อย จะส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อการใช้อยู่สลายปริมาณคาร์บอน การเติมปุ๋ยนี้ลงไปดินอาจทำให้ต้องดึงไนโตรเจนจากดินมาใช้ พืชเกิดการขาดแคลนไนโตรเจนได้

2.1.1.3 ความชื้น

ความชื้นมีความสำคัญในการดำรงชีวิตรวมถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับปริมาณน้ำภายในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งความชื้นที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายมีค่าประมาณร้อยละ 60 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) หากมีความชื้นต่ำเกินไปจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ช้า และหากความชื้นมากเกินไปกองปุ๋ยหมักจะระบายอากาศได้ไม่ดี จึงทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจนและส่งกลิ่นไม่พึงประสงค์ออกมา (ทิพวรรณ สิทธิธรรม, 2547) อย่างไรก็ตามในกองปุ๋ยหมักในระยะแรกของการหมักจึงควรมีความชื้นประมาณร้อยละ 60 จากนั้นปล่อยให้ลดลงจนเหลือร้อยละ 40 สำหรับในตอนสุดท้ายนั้นปุ๋ยหมักควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 35 (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

2.1.1.4 การระบายอากาศ

การระบายอากาศมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นในการหมักปุ๋ยจึงต้องมีการพลิกกลับกองปุ๋ยเพื่อให้มีการระบายอากาศที่ดี หรือมีการให้อากาศแบบอื่น ๆ เช่น มีการสอดท่อเพื่อเติมอากาศจากใต้กองปุ๋ย อย่างไรก็ตามการเติมอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ปุ๋ยแห้งและอาจทำให้ต้องพรมน้ำเพิ่มลงไป หากมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอจะทำให้เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดแก๊สแอมโมเนีย และอาจทำให้การย่อยสลายเป็นไปได้อย่างช้าลง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

2.1.1.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมการย่อยสลายทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ และเป็นดัชนีสำคัญในการแบ่งระยะปุ๋ยหมักอีกทั้งกำหนดระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักนำไปใช้ได้ แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ 1) ระยะเริ่มผสม (initial stage) อุณหภูมิจะเท่ากับอุณหภูมิภายนอก 2) ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic stage) ระยะนี้อุณหภูมิสูงขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ย่อยสลายอาหารและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปความร้อน ในระยะนี้อุณหภูมิอาจสูงถึง 45 – 70 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 – 4 วัน จะเพียงพอให้ทำลายเมล็ดวัชพืชที่ปะปนมากับมูลสัตว์ รวมถึงตัวอ่อนของแมลงวันและเชื้อโรคได้ แต่หากอุณหภูมิสูง

ถึง 70 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายจะเร็วขึ้นเป็น 2 เท่าของที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่หากสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลายและการย่อยสลายเป็นไปได้ช้าลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) และ 3) เมื่อกองปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ (mature stage) ปุ๋ยหมักจะอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานสามารถนำไปปรับปรุงดิน ในระยะนี้ยังคงมีกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่มอุณหภูมิปานกลางคอยย่อยสลายและปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ดิน อย่างไรก็ตามหากปุ๋ยหมักเก็บอยู่ในระยะนี้นานเกินไปจุลินทรีย์จะย่อยสลายธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืชและมีประโยชน์ในการปรับปรุงดิน ดังนั้นระยะเวลาการเก็บรักษาปุ๋ยหมักตลอดจนการเลือกใช้ปุ๋ยหมักในระยะเวลาที่เหมาะสมที่ขึ้นกับวัตถุดิบที่แตกต่างกันจึงมีความสำคัญ

2.1.1.6 ค่าความเป็นกรด - ด่าง

ความเป็นกรด - ด่างเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรด - ด่างระหว่าง 6.5 - 7.0 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง โดยแบคทีเรียและแอคติโนมัยซีทสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6.0 - 8.0 แต่เมื่อค่าความเป็นกรด - ด่างต่ำกว่า 5.0 แบคทีเรียและแอคติโนมัยซีทจะเจริญเติบโตช้าลง ในขณะที่เชื้อราจะเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้มากกว่า เนื่องจากเชื้อราเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถทนกรดได้ดีกว่า โดยระดับค่าความเป็นกรด - ด่างที่เหมาะสมในกระบวนการหมักจะอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 - 8.5 (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

2.1.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมัก

กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์หลายชนิดซึ่งมีบทบาทแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลารวมขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของกองปุ๋ยหมัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในกองปุ๋ยหมักนั้นเกิดขึ้นอย่างเป็นขั้นตอนตามกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์แบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้ (Trautmann & Krasny, 2014; โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559; อานัฐ ตันโซ, 2558)

2.1.2.1 แบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรียเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กมีลักษณะแตกต่างกันไป เช่น ทรงกลม (cocci) รูปร่างเป็นท่อนหรือแท่ง (bacilli) และรูปร่างบิดเป็นเกลียว (spiral) ซึ่งแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วจึงมีจำนวนมากตั้งแต่เริ่มกระบวนการหมักและมีปริมาณมากที่สุด ในกองปุ๋ยหมักถึงประมาณร้อยละ 80 - 90 แบคทีเรียที่พบ ได้แก่ *Bacillus* sp., *Pseudomonas*

sp., *Cellulomonas* sp., *Flavobacterium* sp., *Micrococcus* sp. และ *Achromobacter* sp. หากวัสดุที่ใช้หมักมีสารอาหารที่สามารถย่อยสลายง่าย เช่น แป้ง และน้ำตาล แบคทีเรียจะย่อยสลายอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยความร้อนออกมาปริมาณมากทำให้ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิถึง 50 – 55 องศาเซลเซียส ในระยะนี้จะพบแบคทีเรียพวก *Bacillus subtilis* และ *Bacillus stearothermophilus* ที่สามารถทนความร้อนและสามารถสร้างสปอร์ได้ ส่วนแบคทีเรียที่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้จะชะงักการเจริญเติบโต เมื่อเวลาผ่านไปกองปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส แบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิต่ำปานกลางจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอีกครั้งและมีบทบาทมากกว่ากลุ่มอื่น ๆ ไปตลอดจนกระบวนการหมักสิ้นสุด

2.1.2.2 แอคติโนมัยซีท (Actinomycetes)

แอคติโนมัยซีทเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรียชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีผนังเซลล์ องค์ประกอบของเซลล์ และขนาดที่เหมือนกับแบคทีเรียทั่วไป แต่มีลักษณะการเจริญเติบโตแตกแขนงเป็นเส้นใยและมีการสร้างสปอร์คล้ายเชื้อรา จึงมีการเจริญเติบโตช้ากว่าเชื้อราและแบคทีเรียในช่วงแรกของการหมัก โดยสามารถเจริญเติบโตและมีปริมาณมากขึ้นเมื่อกระบวนการหมักผ่านไป 5 – 7 วัน กลุ่มจุลินทรีย์แอคติโนมัยซีทมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ความชื้นต่ำ อุณหภูมิสูง ในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยจะทำการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสำหรับย่อยเซลลูโลสซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ดังนั้นแอคติโนมัยซีทจึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส ลิกนิน และสารประกอบอื่น ๆ ที่ย่อยสลายได้ยากที่มีอยู่ในปุ๋ยหมักในระยะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแอคติโนมัยซีทที่มักพบส่วนใหญ่ในปุ๋ยหมัก ได้แก่ *Thermoactinomyces* sp. และ *Thermomonospora* sp. นอกจากนี้อาจพบ *Streptomyces* sp. และ *Micropolyspora* sp. ได้เช่นกัน

2.1.2.3 เชื้อรา (Fungi)

เชื้อราเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อกันและมีสปอร์กระจายอยู่ทั่วไป มักพบเชื้อราบริเวณผิวนอกของกองปุ๋ยหมักซึ่งมีอุณหภูมิต่ำและมีความชื้นน้อยกว่าภายในกองปุ๋ยหมัก เชื้อราเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจะมีปริมาณมากใกล้เคียงกับแบคทีเรียในช่วงแรกของการหมัก เนื่องจากในช่วงแรกยังคงมีสารอาหารที่สามารถย่อยสลายง่ายอยู่จำนวนมากซึ่งในช่วงนี้มักพบเชื้อราพวก *Geotrichum candidum* และ *Aspergillus fumigatus* เมื่ออุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงกว่า 50 องศาเซลเซียสจนถึง 60 องศาเซลเซียส มักพบเชื้อราพวก

Cladosporium sp., *Mucor* sp. และ *Aspergillus* sp. และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้จะพบ *Penicillium duponti* อย่างไรก็ตามชนิดของเชื้อราดังกล่าวที่พบจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและวัตถุดิบที่นำมาหมัก

2.1.3 มาตรฐานคุณภาพของปุ๋ยหมัก

กรมวิชาการเกษตรได้มีการควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ เนื่องจากปัจจุบันมีการส่งเสริมการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการปรับปรุงบำรุงดินจึงมีการผลิตเพื่อจำหน่าย ดังนั้นเพื่อประโยชน์ของเกษตรกรในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ กรมวิชาการเกษตรจึงต้องมีการควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์โดยออกเป็นประกาศกรมวิชาการเกษตรเรื่องมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.4 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นอินทรีย์วัตถุชนิดหนึ่งที่ถูกย่อยสลายจนเปลี่ยนรูปเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความเสถียร ได้แก่ ฮิวมิก ซึ่งมีความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน รวมถึงอุดมไปด้วยธาตุอาหารที่พืชต้องการนำไปใช้ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักลงดินจะทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ไปด้วยธาตุอาหารที่จะทยอยปลดปล่อยให้แก่พืชได้ในระยะยาวอันเนื่องมาจากโครงสร้างของฮิวมิกที่สามารถช่วยตรึงธาตุอาหาร นอกจากนี้ยังทำให้โครงสร้างของดินมีความร่วนซุยเหมาะสำหรับการพัฒนาของรากพืชในการเจริญเติบโต

2.1.4.1 แหล่งธาตุอาหารของพืช

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุตามที่พืชต้องการ ซึ่งไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับพืชโดยมีส่วนช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืช นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบสำคัญของโปรตีน เอนไซม์ กรดนิวคลีอิก และสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ รวมถึงเป็นองค์ประกอบของรงควัตถุในใบพืชสีเขียว (Chlorophyll) ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541; ปัทมา วิทยากร, 2559) เมื่อพืชได้รับไนโตรเจนในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้พืชแข็งแรง มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ใบพืชมีสีเขียวสด (กรมพัฒนาที่ดิน, 2563) หากพืชขาดไนโตรเจนจะส่งผลต่อระบบรากและการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ใบ และกิ่งก้าน ทำให้พืชแคระแกร็น ใบแก่ของพืชมีสีเหลือง และพืชผลที่เก็บเกี่ยวได้มีปริมาณโปรตีนต่ำ (Johnson et al., 2005) สำหรับฟอสฟอรัสมีบทบาทในการช่วยให้รากพืชมีความแข็งแรงกระจายตัวได้ดีทำให้พืชสามารถดูดธาตุอาหารไปใช้ได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในการออกดอกเร่งการออกผลของพืช

ตารางที่ 2.1

เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5x12.5 มิลลิเมตร
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ย่อยได้	ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
3	ปริมาณหินและกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะ อื่น ๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5.5 – 8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ไม่เกิน 20:1
8	ค่าการนำไฟฟ้า	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก	- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก - ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P ₂ O ₅) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก - ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K ₂ O) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
10	การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่าร้อยละ 80
11	สารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

หมายเหตุ. จาก “กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557” โดย กรมวิชาการเกษตร, 2557, สืบค้นจาก

<https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2019/11/FEDOA11.pdf>

หากพืชขาดธาตุอาหารฟอสฟอรัสจะส่งผลให้ลำต้นแคระแกรน ไม่ผลิตดอก และระบบของรากพืชไม่เจริญเติบโต ส่วนโพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในการเร่งการออกผล การสร้างแป้ง น้ำตาล และโปรตีน ทำให้ผลมีขนาดใหญ่รสชาติหวาน หากพืชขาดธาตุอาหารโพแทสเซียมจะทำให้ใบพืชมีรอยไหม้และมีจุดต่างคำบริเวณของใบรวมถึงพืชจะมีความต้านทานต่อโรคและศัตรูพืชลดลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าปุ๋ยหมักจะมีปริมาณธาตุอาหารน้อยกว่าปุ๋ยเคมีแต่ธาตุอาหารที่อยู่ในปุ๋ยหมักจะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ เนื่องจากคุณสมบัติของฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่โครงสร้างมีประจุลบจำนวนมากจึงสามารถช่วยยึดจับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ดี (สุพจน์ บุญแรง, 2562) ทำให้ลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้างน้อยกว่าปุ๋ยกว่าเคมี (โสฬส แซ่ลิ้ม, 2559)

2.1.4.2 ปรับปรุงบำรุงดิน

ปุ๋ยหมักมีคุณสมบัติในการปรับปรุงบำรุงดินทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยทำให้โครงสร้างของดินร่วนซุย อุ่มน้ำ ระบายอากาศได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถตรึงธาตุอาหารเพื่อทยอยปลดปล่อยให้แก่พืชได้ในระยะยาว รวมถึงส่งเสริมกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดินทำให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินช่วยให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

1. ทางกายภาพ

ปุ๋ยหมักทำให้ดินมีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำเนื่องจากฮิวมัสที่อยู่ในปุ๋ยหมักซึ่งได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจนมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ โดยดินที่มีสีน้ำตาลหรือสีดำนั้นจะแสดงถึงการมีอินทรีย์วัตถุในดินปริมาณสูง เมื่ออินทรีย์วัตถุสลายตัวจะเกิดสารเชื่อมกับสารเหนียวจากจุลินทรีย์บางชนิด ซึ่งจะเชื่อมอนุภาคของดินที่อยู่ใกล้เคียงเชื่อมยึดกันเกิดเป็นเม็ดดิน และจุลินทรีย์บางชนิด เช่น เชื้อราที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจะเจริญเติบโตคล้ายร่างแหซึ่งจะทำการรัดอนุภาคของดินเข้าด้วยกันเกิดเป็นเม็ดดิน นอกจากนี้ดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง จะมีโครงสร้างดินที่เสถียร ความหนาแน่นรวมต่ำ ดินมีการอุ้มน้ำดีขึ้น การระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดี ส่งผลให้รากพืชสามารถกระจายตัวได้กว้างและลึกขึ้น จึงดูดซึมธาตุอาหารและน้ำได้มากขึ้น ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ดี อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยหมักลงดินที่มีลักษณะเนื้อดินต่างกันจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินเปลี่ยนแปลง โดยดินเนื้อละเอียด เช่น ดินเหนียวและดินร่วนเหนียวที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักลงไปจะทำให้ความหนาแน่นของดินลดลงการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดีขึ้น ส่วนดินเนื้อหยาบ เช่น ดินทรายและดินร่วนปนทรายที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำหรือปานกลาง เมื่อใส่ปุ๋ยหมักลงไปจะช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น เนื่องจากฮิวมัสในปุ๋ยหมักเป็นตัวเชื่อมที่ดีทำให้อนุภาคของดินเชื่อม

กันเป็นเม็ดดินและก้อนดินตามลำดับ ส่งผลให้โครงสร้างดินมีเสถียรภาพและทนต่อการกัดกร่อน ซึ่งสามารถช่วยในการควบคุมการชะล้างพังทลายของหน้าดิน (โสฬส แซ่ลิ่ม, 2559)

2. ทางเคมี

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชเมื่อใส่ลงดินจะเป็นการเพิ่มธาตุอาหารในดินโดยตรงและจะทยอยปลดปล่อยออกมาให้แก่พืชในระยะยาว และปุ๋ยหมักยังสามารถช่วยดูดซับแคตไอออนบางชนิดไม่ให้เกิดการสูญเสียออกไปจากดินได้เนื่องจากปุ๋ยหมักมีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินได้ดีมากโดยมากกว่าดินเหนียวประมาณ 5 – 10 เท่า รวมถึงปุ๋ยหมักยังช่วยลดความเป็นพิษของธาตุอาหารบางชนิดที่มีมากปริมาณมากเกินไปในดิน เช่น การใส่ปุ๋ยหมักลงในดินที่มีสภาพเป็นกรดจะสามารถช่วยลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมและแมงกานีสได้โดยจะช่วยดูดซับธาตุทั้งสองชนิดไว้ซึ่งลดการละลายออกสู่ดิน โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยหมักควบคู่กับปูนขาวจะช่วยลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมและแมงกานีสได้ดีที่สุด นอกจากนี้ปุ๋ยหมักยังเป็นบัฟเฟอร์ในดินที่ช่วยเพิ่มความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินทำให้เกิดขึ้นไม่รวดเร็วจนเกินไปจนกระทั่งเป็นอันตรายต่อพืช (บัญญัติ รัตน์ู, 2552)

3. ทางชีวภาพ

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดิน การใส่ปุ๋ยหมักลงดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำหรือปานกลาง จะเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินซึ่งเป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ ทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะพวก Heterotrophic microorganism เป็นผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะกระบวนการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดิน ได้แก่ กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สาร กระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) ซึ่งพืชสามารถดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้ กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุนี้ยังทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อนส่งผลให้ธาตุอาหารของพืชสามารถละลายออกมาได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยหมักทำให้ปริมาณแบคทีเรียเพิ่มขึ้นซึ่งจะยับยั้งการเจริญเติบโตและความสามารถในการก่อโรคของเชื้อโรคบริเวณใกล้รากพืช รวมถึงทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงส่งผลให้ปริมาณไส้เดือนเพิ่มขึ้นและกิจกรรมของไส้เดือนจะทำให้ดินร่วนซุย ทำให้การระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดีขึ้นรากพืชจึงเจริญเติบโตได้ดี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; โสฬส แซ่ลิ่ม, 2559)

2.2 ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีอยู่ตามธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ดิน แหล่งน้ำ รวมถึงสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชซึ่งเป็นผู้ผลิตปฐมภูมิต้องการในปริมาณมาก และเมื่อถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหาร มนุษย์และสัตว์นำมาใช้เพื่อสร้างเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไนโตรเจน

ไนโตรเจน ชื่อภาษาอังกฤษ Nitrogen มีรากศัพท์ มาจากภาษากรีก *Nitron* มีสัญลักษณ์ N เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 5A คาบ 2 จัดอยู่ในกลุ่ม p (p – block element) ตามตารางธาตุ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอโลหะ อะตอม 7 น้ำหนักอะตอม 14.00674 และมีการจัดเรียงอิเล็กตรอน $1s^2 2s^2 2p^3$ หรือ $[\text{He}] 2s^2 2p^3$ (Los Alamos National Laboratory, 2016) (ภาพที่ 2.1) โดยทั่วไปในบรรยากาศพบแก๊สไนโตรเจน (N_2) มากถึงร้อยละ 78 ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น (Walworth, 2013) ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ N จำนวน 2 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะสาม (triple bond) ซึ่งมีความแข็งแรงจึงไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่น ๆ เช่น น้ำ กรด ด่าง หรือฮาโลเจนได้ง่ายนักจัดเป็นแก๊สค่อนข้างเฉื่อยและมีความเสถียรอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของพันธะเคมี นอกจากนี้ในสิ่งแวดล้อมยังพบไนโตรเจนในรูปแบบอื่น ๆ จำนวนมาก จากความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างตามจำนวนเลขออกซิเดชันที่มากถึง 9 ค่า ได้แก่ -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4 และ +5 (Ohyama, 2010) รูปแบบที่พบทั่วไป (Seelig & Nowatzki, 2017) ได้แก่

กลุ่มเลขออกซิเดชัน -3 เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน ($-\text{CH}_2\text{-NH-}$) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และแอมโมเนีย (NH_3)

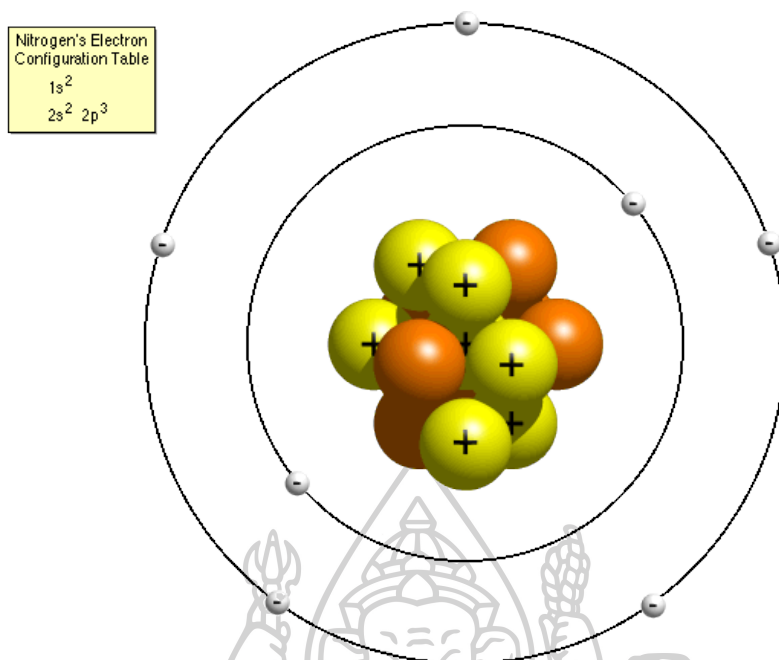
กลุ่มเลขออกซิเดชัน 0 เช่น แก๊สไนโตรเจน

กลุ่มเลขออกซิเดชัน +1 เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O)

กลุ่มเลขออกซิเดชัน +3 เช่น ไนไตรท์ไอออน (NO_2^-)

กลุ่มเลขออกซิเดชัน +5 เช่น ไนเตรทไอออน (NO_3^-)

ซึ่งไนเตรทไอออนจะเป็นไนโตรเจนรูปแบบที่มีเลขออกซิเดชันสูงสุด พบมากในสิ่งแวดล้อมทางดินและน้ำมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและละลายน้ำได้ดีพืชส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้ ขณะที่แก๊สแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนเป็นรูปแบบที่มีเลขออกซิเดชันต่ำสุด มีปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแต่จะพบมากในสภาวะที่น้ำเน่าเสียหรือสภาวะไร้ออกซิเจน



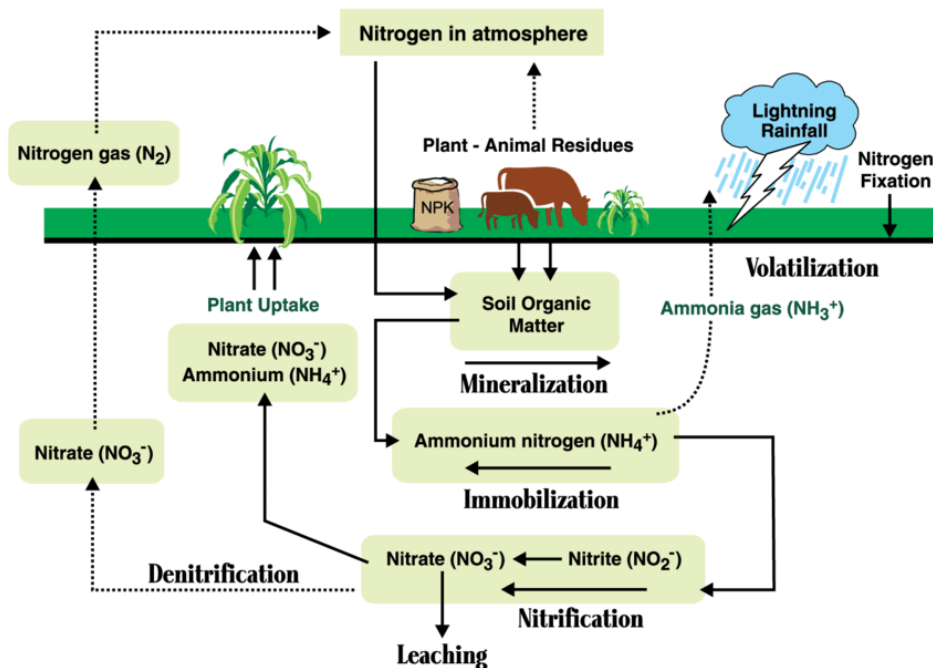
ภาพที่ 2.1 ธาตุไนโตรเจน

จาก *The Element Nitrogen*, โดย Jefferson Lab Science Education, 2020,

สืบค้นจาก <https://education.jlab.org/itselemental/ele007.html>

2.2.2 วัฏจักรไนโตรเจนและกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจน

ในบรรยากาศของโลกที่ประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจนปริมาณมากแต่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง (Killpack & Buchholz, 2020) จึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศโดยกระบวนการตรึงไนโตรเจนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยปรากฏการณ์ฟ้าแลบ (Non-biological nitrogen fixation) และกระบวนการตรึงทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ (Biological nitrogen fixation) โดยปรากฏการณ์ฟ้าแลบเป็นการออกซิไดซ์แก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศเป็นไนตรัสออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ จากนั้นเกิดการรวมตัวกับน้ำฝนกลายเป็นแอมโมเนียมและไนเตรทลงสู่พื้นดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2563) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 วัฏจักรไนโตรเจน

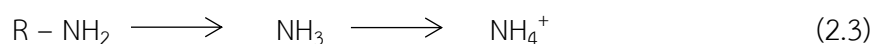
จาก *Nitrogen Behavior In the Environment*, โดย M. Keena, M. Meehan, and T. Scherer, 2020, North Dakota State University

ส่วนกระบวนการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพเป็นการรีดิวซ์แก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียโดยจุลินทรีย์กลุ่ม prokaryotic microorganisms ได้แก่ bacteria cyanobacteria actinomycetes และ archaea ซึ่งสามารถผลิตเอนไซม์ไนโตรจีเนส (Nitrogenase enzyme) ในการสลายพันธะสามของแก๊สไนโตรเจน (ปัทมา วิทยากร, 2559) ดังสมการที่ 2.2



ในส่วนของซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจน ได้แก่ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก โปรตีนในเนื้อเยื่อ รวมถึงของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ทั้งหมด และปัสสาวะ เมื่อเกิดการทับถมสารเหล่านี้จะสลายตัวทำให้เกิดอินทรีย์วัตถุในดินซึ่งอยู่ในรูปไนโตรเจนอินทรีย์ โดยเป็นรูปแบบที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Walworth, 2013) จึงต้องมีการเปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ไปเป็นแอมโมเนียมไอออนผ่านกระบวนการมิเนอราไลเซชัน

(Mineralization) (สมการที่ 2.3) (Johnson et al., 2005) โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางชีววิทยาโดยมีปัจจัยควบคุมที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณออกซิเจน เป็นต้น



เมื่อไนโตรเจนอินทรีย์เกิดกระบวนการมิเนอราไลเซชันจนเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียมไอออน จากนั้นเข้าสู่กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออนเป็นไนไตรท์และไนเตรทโดยแบคทีเรียไนตริไฟอิง (Nitrifying) ได้แก่ Nitrosomonas และ Nitrobacter (Ghaly & Ramakrishnan, 2015) ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันจะดำเนินไปอย่างรวดเร็วในดินที่มีความอุ่น ชื้น และมีการระบายอากาศที่ดี (Keena et al., 2022) ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

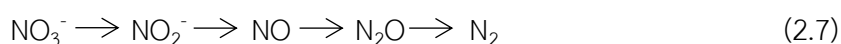


เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่สิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องการ จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินซึ่งต้องการไนโตรเจนเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบของเซลล์ โดยเปลี่ยนรูปจากไนโตรเจนอินทรีย์ ได้แก่ แอมโมเนียม และไนเตรท กลับไปเป็นไนโตรเจนอินทรีย์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ จุลินทรีย์ เรียกกระบวนการนี้ว่าอิมมูบิไลเซชัน (Immobilization) ดังสมการที่ 2.6 (Johnson et al., 2005) สำหรับวัสดุอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างน้อย เช่น เศษไม้ และฟางข้าว เมื่อถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายจุลินทรีย์จะไปดึงไนโตรเจนจากดินมาใช้ทำให้ดินขาดแคลนไนโตรเจนได้



นอกจากจะมีการตรึงแก๊สไนโตรเจนจากบรรยากาศแล้ว ของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ซึ่งเป็นไนโตรเจนอินทรีย์ เช่น ยูเรีย ($CO(NH_2)_2$) สามารถระเหยขึ้นสู่บรรยากาศได้ใน

รูปแอมโมเนีย (Killpack & Buchholz, 2020) และในสภาวะดินขาดออกซิเจน เช่น ดินแน่น หรือมีน้ำท่วมขัง ไนเตรท ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ในดินจะเปลี่ยนรูปด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) โดยกิจกรรมของแบคทีเรียเป็นแก๊สไนโตรเจนและระเหยกลับขึ้นสู่บรรยากาศได้เช่นกัน (Keena et al., 2022) ดังสมการที่ 2.7



2.2.3 ความสำคัญของไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารมหัพภาค (macronutrient) หรือธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก ซึ่งมีความสำคัญและมีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืช โดยเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดนิวคลีอิก และเอนไซม์ในพืช ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ใบ และกิ่งก้าน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) มักพบการขาดธาตุไนโตรเจนในดินส่งผลให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช อย่างไรก็ตามพืชจะได้รับธาตุไนโตรเจนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ จากการแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และจากการตรึงไนโตรเจนในอากาศของจุลินทรีย์บางชนิด พืชจะได้รับจากการสลายตัวของหินแร่ในปริมาณน้อยมาก ดังนั้นไนโตรเจนจึงจัดเป็นธาตุปุ๋ยที่จำเป็นต้องใส่ลงดินในรูปแบบปุ๋ยชนิดต่าง ๆ (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2560) เช่น ปุ๋ยหมัก เป็นต้น

2.2.4 แหล่งที่มาของไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารไนโตรเจนที่สำคัญของพืชที่ส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งเปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ไปเป็นไนโตรเจนอนินทรีย์ที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อย่างไรก็ตามชนิดและขนาดของวัสดุอินทรีย์ที่นำมาหมักจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยวัสดุหมักที่เป็นมูลสัตว์จะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงทำให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ จึงถูกย่อยสลายได้ง่ายและรวดเร็วรวมถึงปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีปริมาณมากกว่าวัสดุที่เป็นพืชซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนที่ย่อยสลายยากและมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; ธงชัย มาลา, 2546) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ปริมาณไนโตรเจนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ในมูลสัตว์ และพืชชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน (C/N)
มูลแพะ	3.00	10.99
มูลสุกร	2.44	11.71
มูลไก่	2.39	8.80
มูลโคนม	1.72	16.10
มูลโค	1.56	16.71
มูลเป็ด	1.53	9.67
มูลกระบือ	1.28	9.73
มูลโคเนื้อ	0.64	19.07
ฟางข้าว	0.87	50.53
ต้นข้าวฟ่าง	0.90	52.61
ขุยมะพร้าว	0.73	64.39
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	0.57	78.43
ซังข้าวโพด	0.43	114.57
เปลือกอ้อย	0.32	155.72
กากอ้อย	0.13	390.16

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “วัสดุอินทรีย์และปุ๋ยคอกในพื้นที่ทำการเกษตร” โดย สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, 2548, สืบค้นจาก <http://lib.doa.go.th/multim/e-book/EB00279.pdf>

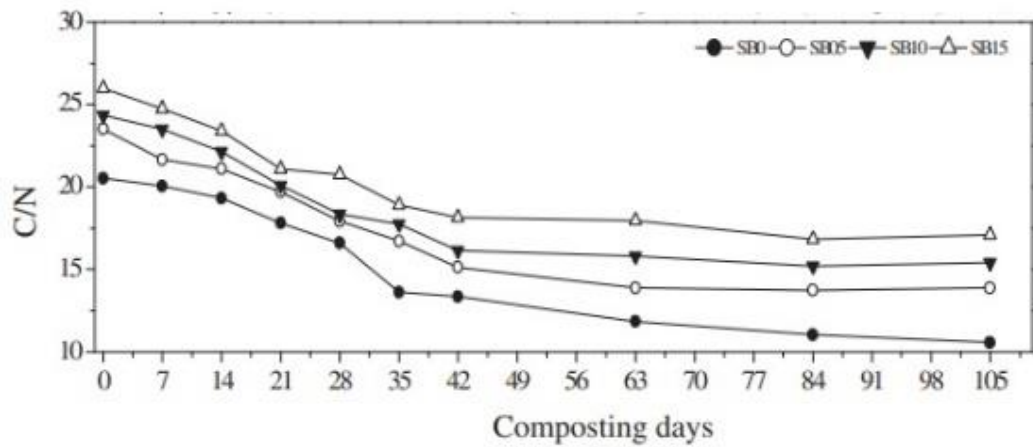
2.3 ดัชนีเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจน

กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ยหมักสามารถบ่งชี้ได้จากดัชนีไนโตรเจน ซึ่งเป็นดัชนีคุณภาพปุ๋ยหมักที่สามารถบ่งบอกถึงระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่และความเสถียรของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมในการนำไปใส่ลงดิน โดยสามารถพิจารณาได้จากการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

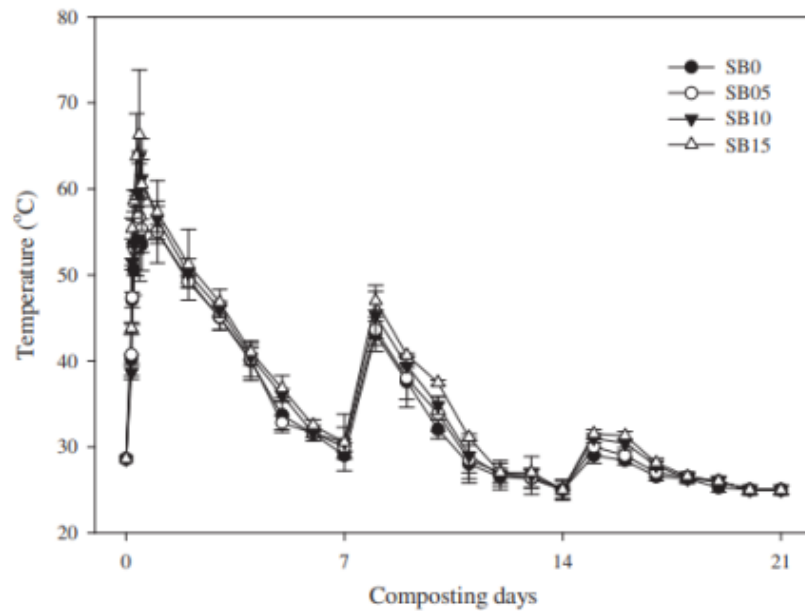
2.3.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เป็นดัชนีบ่งชี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนและไนโตรเจน โดยปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มคงที่ เนื่องจากวัสดุอินทรีย์ถูกย่อยสลายและใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตและเป็นองค์ประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ นอกจากนี้มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาระหว่างกระบวนการหมัก รวมถึงมีการสูญเสียไนโตรเจนจากการระเหยในรูปของแอมโมเนีย โดยเฉพาะในระยะอุณหภูมิสูง ส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประเมินการพัฒนาเต็มที่ของปุ๋ยหมัก โดยปุ๋ยหมักที่เหมาะสมในการนำไปใช้ควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่เกิน 20 : 1 ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557 ของกรมวิชาการเกษตร ซึ่งหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงเกินไปเมื่อนำไปใส่ลงดินจะทำให้ดินเกิดการขาดไนโตรเจนและหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำเกินไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษของแอมโมเนีย (Hwang et al., 2020; Iwegbue et al., 2006; Yu et al., 2019; Zhang et al., 2016; กรมวิชาการเกษตร, 2557)

Zhang et al. (2016) ได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักมูลสุกรผสมฟางข้าวสาธิตและถ่านชีวภาพ (Biochar) โดยแบ่งออกเป็นมูลสุกรผสมฟางข้าวสาธิตไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (SB0) มูลสุกรผสมฟางข้าวสาธิตและถ่านชีวภาพร้อยละ 5 (SB5) มูลสุกรผสมฟางข้าวสาธิตและถ่านชีวภาพร้อยละ 10 (SB10) และมูลสุกรผสมฟางข้าวสาธิตและถ่านชีวภาพร้อยละ 15 (SB15) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนและไนโตรเจนพิจารณาจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงของปุ๋ยหมักทุกสูตรเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น โดยในวันที่ 42 ปุ๋ยหมักเริ่มเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่และมีค่าต่ำกว่า 20 ทุกสูตร มีค่าเท่ากับ 13.3, 15.1, 16.2 และ 18.1 สำหรับปุ๋ยมูลสุกรผสมฟางข้าวที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ใส่ถ่านชีวภาพร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ (ภาพที่ 2.3 (ก)) การลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนนี้เป็นผลมาจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นเกิดมิเนอราไลเซชันจากกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ภาพที่ 2.3 (ข)) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงสามารถบ่งบอกถึงการย่อยสลายที่สมบูรณ์และช่วงเวลาที่ปุ๋ยหมักสามารถนำไปใส่ลงดินได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและอุณหภูมิระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยมูลสุกรผสมฟางข้าวสาลี 4 กอง ได้แก่ SB0, SB05, SB10 และ SB15 ซึ่งผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ

(ก) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (ข) อุณหภูมิ

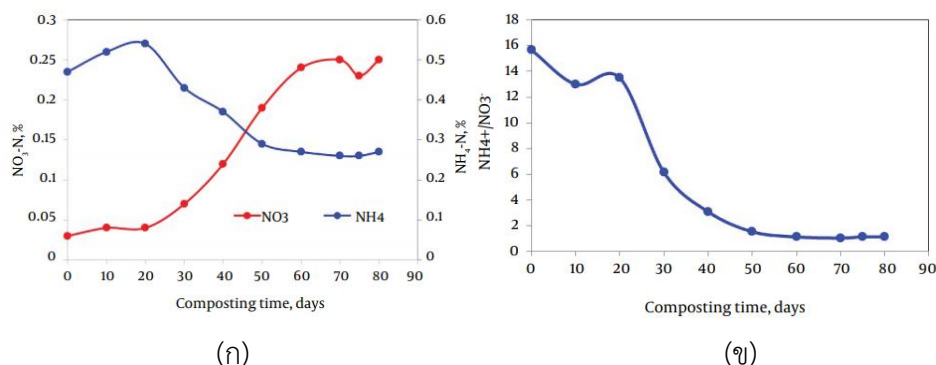
จาก “Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost,” โดย J. Zhang, G. Chen, H. Sun, S. Zhou, and G. Zou, 2016, *Bioresource Technology*, 200, 876-883

2.3.2 อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)

อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$) เป็นดัชนีไนตริฟิเคชัน (Nitrification index) ที่สามารถใช้ประเมินการพัฒนาเต็มตัวของปุ๋ยหมัก โดยอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก หากอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนมีค่าสูงแสดงถึงมีแอมโมเนียมไนโตรเจนในปริมาณสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่เสถียรของปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยหมักนั้นยังไม่พัฒนาเต็มที่ อย่างไรก็ตามปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดจะลดลงในระหว่างกระบวนการหมักแสดงถึงการเกิดมิเนอราไลเซชัน ซึ่งในระหว่างกระบวนการหมักปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะลดลงในขณะที่ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนมีค่าลดลง สามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ดังนี้ (Zhang et al., 2016)

- >3 แสดงถึง ปุ๋ยหมักยังไม่พัฒนาเต็มที่
- 0.5 – 3 แสดงถึง ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่
- <0.5 แสดงถึง ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่และมีประสิทธิภาพมากที่สุด

การศึกษาของ Bazrafshan et al. (2016) ที่ศึกษาการพัฒนาเต็มที่และความเสถียรของปุ๋ยหมักขยะมูลฝอยชุมชน พบว่าอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนมีค่าสูงในช่วงแรกจากนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการหมักไนโตรเจนอินทรีย์เกิดการมิเนอราไลเซชันโดยเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนียมไนโตรเจน ทำให้มีแอมโมเนียมไนโตรเจนในปริมาณสูงเท่ากับ 5.4 มิลลิกรัม/กรัม ในวันที่ 20 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิสูง เมื่อผ่านระยะนี้ไปปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะลดลงในขณะที่ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2.4 (ก)) เนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชันที่เปลี่ยนแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนเตรทไนโตรเจน ทำให้อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 1.08 หลังวันที่ 60 เป็นต้นไป ซึ่งเป็นระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (ภาพที่ 2.4 (ข)) ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งาน



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ไนเตรทไนโตรเจน และอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนกับระยะเวลาหมักของขยะมูลฝอยชุมชน

(ก) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)

(ข) อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)

จาก “Maturity and Stability Evaluation of Composted Municipal Solid Wastes,” โดย E. Bazrafshan, a. a. Zarei, F. Mostafapour, N. Poormollae, S. Mahmoodi, and M. Zazouli, 2016, *Health Scope*, 5

2.4 การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ (Decomposition) และการสูญเสียไนโตรเจน (Nitrogen loss)

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียอินทรีย์วัตถุและการสูญเสียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงปริมาณการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุรวมถึงสามารถใช้ประเมินการพัฒนาเต็มที่และความเสถียรของปุ๋ยหมักได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุยังมีความสัมพันธ์กับวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้หมัก โดยวัตถุดิบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงจะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ เช่น มูลสัตว์ จากปริมาณไนโตรเจนที่ปะปนในรูปยูเรียทำให้อัตราการย่อยสลายปุ๋ยหมักที่มาจากมูลสัตว์ที่มีไนโตรเจนเพียงพอก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าวัตถุดิบตั้งต้นที่มาจากพืช เช่น ฟางข้าว และขี้เลื่อย เป็นต้น ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูง

การศึกษาของ Bustamante et al. (2008) ที่ศึกษาปุ๋ยหมัก 2 สูตร โดยสูตรแรกมีวัตถุดิบตั้งต้นประกอบด้วยซากองุ่นผสมมูลโค (Pile 1) ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 20.2 และสูตรที่สองที่เป็นซากองุ่นผสมมูลไก่ (Pile 2) ที่มีแอมโมเนียเป็นองค์ประกอบปริมาณสูง ทำให้วัตถุดิบตั้งต้นมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นต่ำโดยมีค่าเท่ากับ 13.1 จากการศึกษาพบว่าปุ๋ย

หมักซากองุ่นผสมมูลไก่ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำกว่าจะมีปริมาณการย่อยสลายต่ำใน
ขณะที่อัตราการย่อยสลายเร็วกว่า

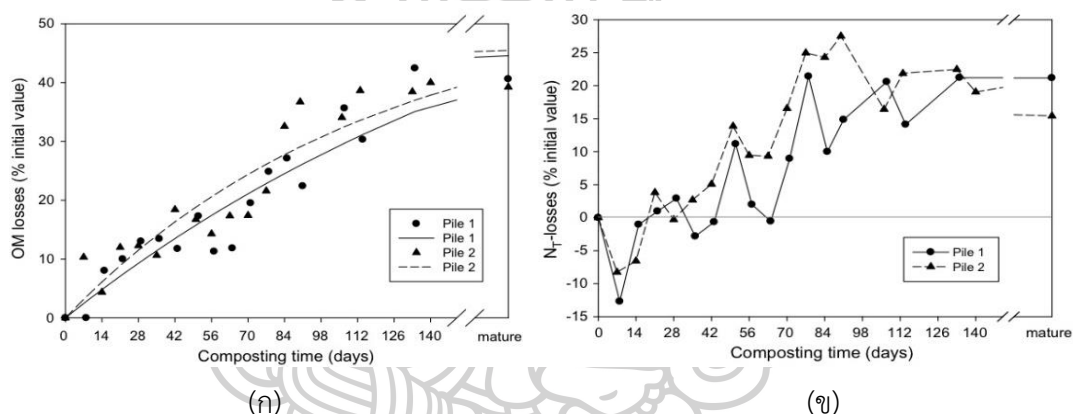
ปุ๋ยหมักซากองุ่นผสมมูลโค (Pile 1) : ปริมาณการย่อยสลายสูงสุด (A) = 74.4,

อัตราการย่อยสลาย (k) = 0.0048

ปุ๋ยหมักซากองุ่นผสมมูลไก่ (Pile 2) : ปริมาณการย่อยสลายสูงสุด (A) = 54.5,

อัตราการย่อยสลาย (k) = 0.0085

จะเห็นได้ว่าปริมาณการย่อยสลายสูงสุดและอัตราการย่อยสลายสัมพันธ์กับการสูญเสีย
อินทรีย์วัตถุและการสูญเสียไนโตรเจนที่ปุ๋ยหมักซากองุ่นผสมมูลโคมีแนวโน้มสูงกว่าปุ๋ยหมักซากองุ่น
ผสมมูลไก่ ดังภาพที่ 2.5



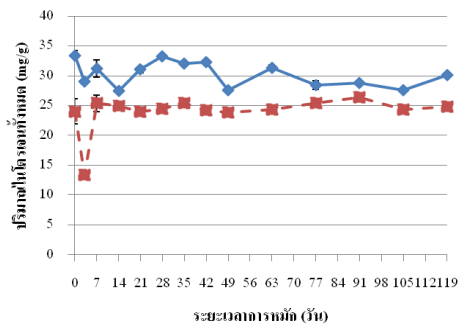
ภาพที่ 2.5 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ และการสูญเสียไนโตรเจน ในระหว่างกระบวนการหมักของปุ๋ย
หมักซากองุ่นผสมมูลโค (Pile 1) และปุ๋ยหมักซากองุ่นผสมมูลไก่ (Pile 2)
(ก) การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (OM loss) (ข) การสูญเสียไนโตรเจน (TN loss)

จาก “Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen
transformations in the evaluation of compost stability,” โดย M. A. Bustamante, C.
Paredes, F. C. Marhuenda-Egea, A. Pérez-Espinosa, M. P. Bernal, and R. Moral, 2008,
Chemosphere, 72(4), 551-557

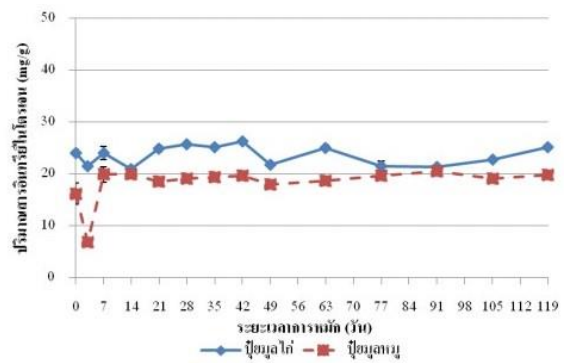
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรพร กังวานเจษฎา (2555) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการ พัฒนาเต็มที่ของปุ๋ยหมัก ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบกับระหว่างปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่และมูลสุกรโดยใช้ กระบวนการหมักที่เหมือนกัน ผลการศึกษาพบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่พบในปุ๋ยมูลไก่และมูล สุกรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นมูลสัตว์ที่ต่างกัน ซึ่งมูลไก่ ที่มีปริมาณกรดยูริกสูงจึงทำให้ไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยมูลไก่มีปริมาณมากกว่ามูลสุกร โดยมีค่าสูงสุด เท่ากับ 33.25 มิลลิกรัม/กรัม ในวันที่ 28 และ 26.41 มิลลิกรัม/กรัม ในวันที่ 91 สำหรับปุ๋ยมูลไก่ และมูลสุกร ตามลำดับ (ภาพที่ 2.6 (ก)) อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร มีความแตกต่างกันในเชิง ปริมาณแต่ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงในการสร้างและสลายรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจนไปในทิศทาง เดียวกัน โดยพบว่าไนโตรเจนอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้นในระยะแรก (ภาพที่ 2.6 (ข)) และมีแนวโน้มลดลง จากการเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันซึ่งเกิดขึ้นในระยะที่มี อุณหภูมิสูงช่วงวันที่ 1 – 41 สำหรับปุ๋ยมูลไก่ และ 1 – 34 สำหรับปุ๋ยมูลสุกร (ภาพที่ 2.6 (ค)) สอดคล้องกับการสูญเสียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถบ่งบอกอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นสูงในระยะ นี้ (ภาพที่ 2.6 (ง)) เมื่อปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่อุณหภูมิเริ่มลดลงในระยะนี้แอมโมเนียม ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรทไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้แอมโมเนียม ไนโตรเจนมีค่าลดลง (ภาพที่ 2.6 (จ)) ในขณะที่ไนเตรทไนโตรเจนมีค่าสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 77 และมีค่าสูง ที่สุดในวันที่ 91 ของปุ๋ยทั้ง 2 สูตร และมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น (ภาพที่ 2.6 (ฉ))

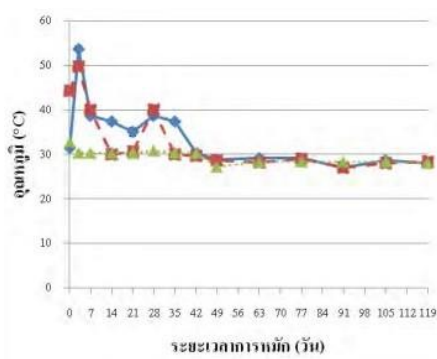
จะเห็นได้ว่ากระบวนการหมักมีผลต่อการเพิ่มไนโตรเจนเชิงปริมาณในปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร โดยเฉพาะไนเตรทไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้ อย่างไรก็ตามหากทิ้งปุ๋ยหมักไว้นานเกินไปอาจทำให้รูปแบบ ที่เป็นประโยชน์นี้ลดลง การศึกษาการปลดปล่อยไนโตรเจนจากกระบวนการหมักจึงเป็นแนวทางใน การเลือกอายุปุ๋ยหมักที่เป็นประโยชน์อันนำไปสู่การจัดการที่ดีในอนาคตต่อไป



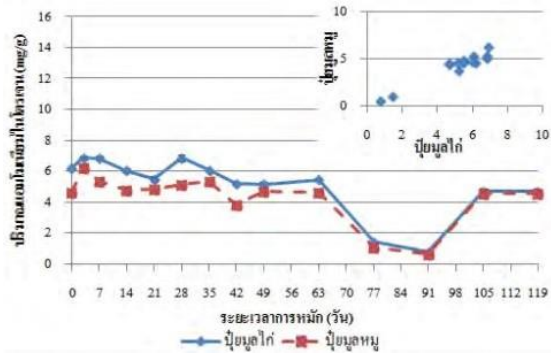
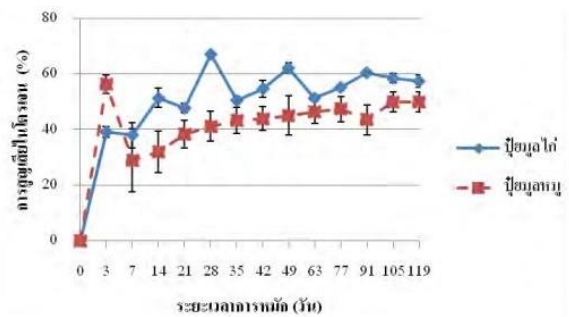
(ก)



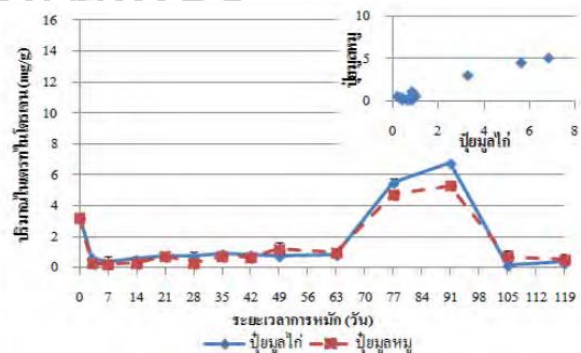
(ข)



(ค)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 2.6 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ การสูญเสียไนโตรเจน และอุณหภูมิกับระยะเวลาหมัก

(ก) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

(ข) ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N)

(ค) อุณหภูมิ

(ง) การสูญเสียไนโตรเจน (TN loss)

(จ) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

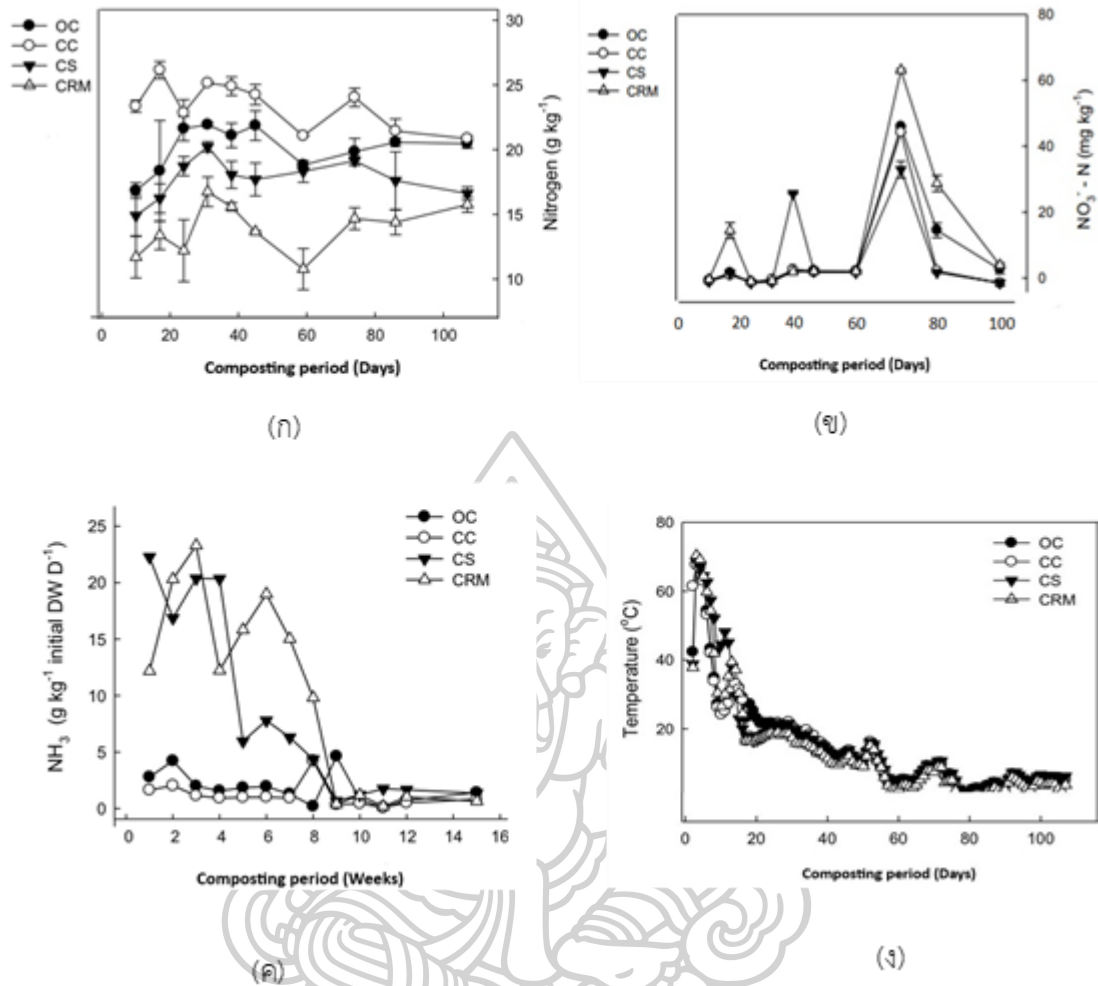
(ฉ) ไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)

จาก “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก” โดย

ภัทรพร กังวานเจษฎา, 2555, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร

Hwang et al. (2020) ได้ทำการศึกษากระบวนการหมักปุ๋ยมูลไก่ผสมวัตถุดิบอินทรีย์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร ได้แก่ ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ (OC) มูลไก่ผสมมูลโค (CC) มูลไก่ผสมมูลสุกร (CS) และมูลไก่ผสมเศษซากพืชและเห็ด (CRM) ซึ่งทำการหมักเป็นระยะเวลา 107 วัน โดยใช้ซีลี้อยู่ในการควบคุมความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นให้อยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 พบว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ผสมมูลโคมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุดตลอดกระบวนการหมัก รองลงมา ได้แก่ มูลไก่ มูลไก่ผสมมูลสุกร และมูลไก่ผสมซากพืชและเห็ด ตามลำดับ (ภาพที่ 2.7 (ก)) โดยมูลสัตว์เป็นวัตถุดิบที่ย่อยสลายง่ายและมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบปริมาณมากทำให้เข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ได้อย่างรวดเร็ว จึงเกิดการสูญเสียไนโตรเจนระหว่างกระบวนการหมักในรูปแอมโมเนียน้อยกว่าในระยะอุณหภูมิสูง ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของปุ๋ยมูลสัตว์ไม่ผสมพืชมากกว่าปุ๋ยที่มีซากพืชเป็นส่วนประกอบ แต่หากพิจารณาในแง่ของปริมาณไนโตรเจนรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อพืช พบว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ผสมซากพืชและเห็ดสามารถปลดปล่อยไนโตรเจนได้มากกว่าในช่วงท้าย ๆ ของการหมักระหว่างวันที่ 60 – 80 โดยมีปริมาณ 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ภาพที่ 2.7 (ข)) เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีสอดคล้องกับการอัตราการระเหยของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียที่สูงกว่าปุ๋ยสูตรอื่น (ภาพที่ 2.7 (ค)) ในระยะอุณหภูมิสูง (ภาพที่ 2.7 (ง))

ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัตถุดิบอินทรีย์ที่นำมาเป็นส่วนผสมในการหมักจึงมีความสำคัญไม่เพียงแต่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงแต่ต้องมีปริมาณคาร์บอนที่เพียงพอความต้องการของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเจริญเติบโตและเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายในปุ๋ยหมักให้เกิดขึ้นได้ดี



ภาพที่ 2.7 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ อัตราการปลดปล่อยแอมโมเนีย และอุณหภูมิกับระยะเวลาหมัก

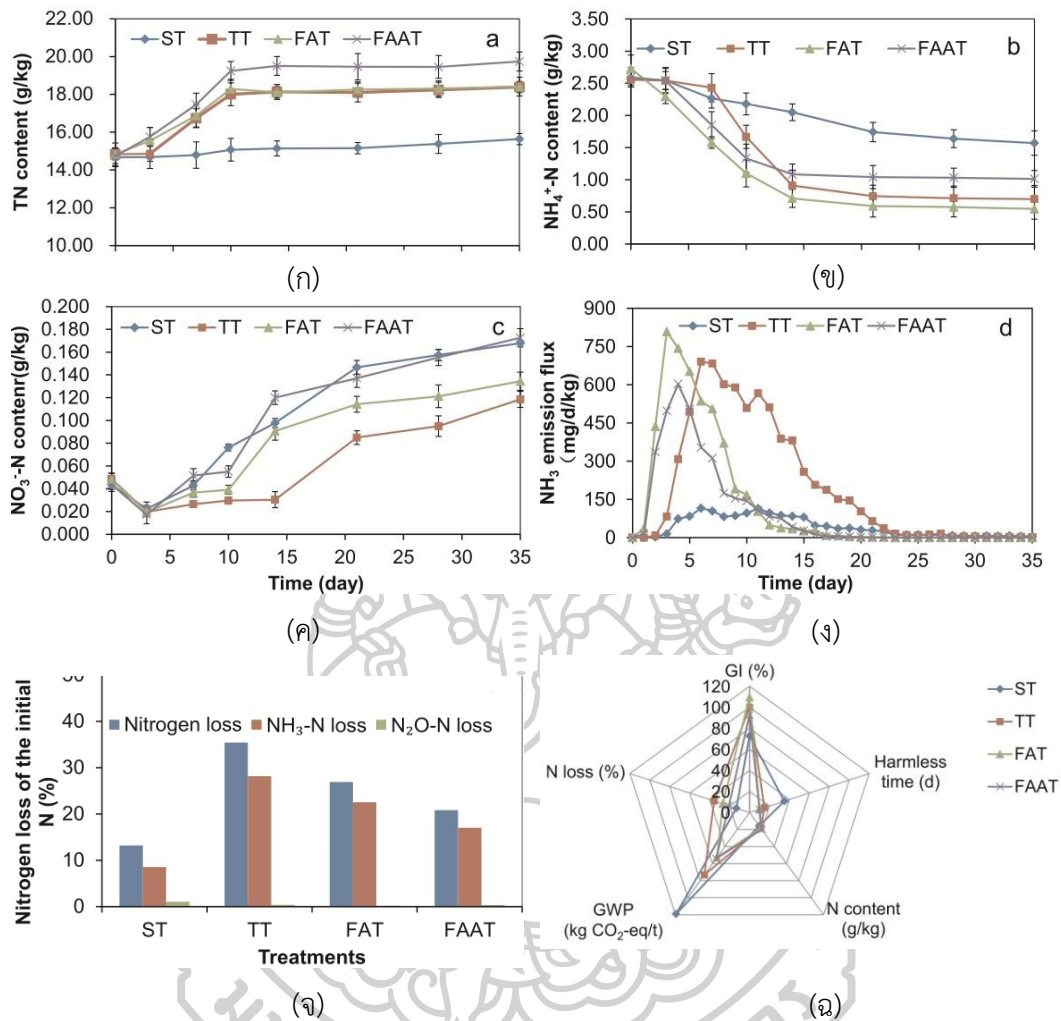
(ก) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) (ข) ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N)

(ค) อัตราการปลดปล่อยแอมโมเนีย (NH_3) (ง) อุณหภูมิ

จาก “Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality,” โดย H. Y. Hwang, S. H. Kim, M. S. Kim, S. J. Park, and C. H. Lee, 2020, *Applied Biological Chemistry*, 63(1), 3

Tong et al. (2019) ได้ทำการศึกษารูปแบบของไนโตรเจนในปุ๋ยหมักมูลโคผสมฟางข้าวโพด และทำการหมักเป็นระยะเวลา 35 วัน โดยใช้วิธีการหมักที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ การหมักแบบไม่พลิกกลับกอง (Static treatment; ST) การหมักแบบพลิกกลับกอง (Turning treatment; TT) การหมักแบบเติมอากาศ (Forced aeration treatment; FAT) และการหมักแบบเติมอากาศในสภาวะที่เป็นกรด (Forced aeration with acidification treatment; FAAT) พบว่าการหมักแบบเติมอากาศในสภาวะที่เป็นกรดมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ การหมักแบบพลิกกลับกอง และการเติมอากาศที่มีค่าเท่ากัน และการหมักแบบไม่พลิกกลับกอง ตามลำดับ (ภาพที่ 2.8 (ก)) อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีการย่อยสลายไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 วิธี เช่นเดียวกับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนที่มีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกันทุกวิธี (ภาพที่ 2.8 (ข)) จากกระบวนการไนตริฟิเคชันที่เปลี่ยนแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนเตรทไนโตรเจน สอดคล้องกับปริมาณไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นไนโตรเจนรูปที่เป็นประโยชน์ มีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกวิธีเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อพิจารณา ณ วันที่ 35 ของการหมัก พบว่าวิธีการหมักแบบเติมอากาศในสภาวะที่เป็นกรดมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนมากที่สุด (ภาพที่ 2.8 (ค)) เนื่องจากมีการปลดปล่อยแอมโมเนีย (ภาพที่ 2.8 (ง)) และการสูญเสียไนโตรเจนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการหมักแบบใช้อากาศทั้งหมด (ภาพที่ 2.8 (จ)) โดยการสูญเสียไนโตรเจนของวิธีการหมักแบบพลิกกลับกอง เติมอากาศ และเติมอากาศในสภาวะที่เป็นกรดคิดเป็นร้อยละ 84.2, 83.8 และ 81.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index; GI) เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ร่วมด้วย พบว่ามีดัชนีการงอกมากกว่าร้อยละ 80 ในปุ๋ยทุกสูตร (ภาพที่ 2.8 (ฉ))

สรุปได้ว่าวิธีการหมักแบบเติมอากาศในสภาวะเป็นกรดเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการศึกษานี้ เพราะนอกจากจะเป็นการควบคุมไม่ให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนแล้วการลดความเป็นด่างลงจะช่วยตรึงแอมโมเนียมไอออนให้เปลี่ยนรูปเป็นไนเตรทไนโตรเจน อันจะเป็นการเพิ่มรูปแบบที่พืชนำไปใช้ได้ให้มีปริมาณมากขึ้นอีกด้วย



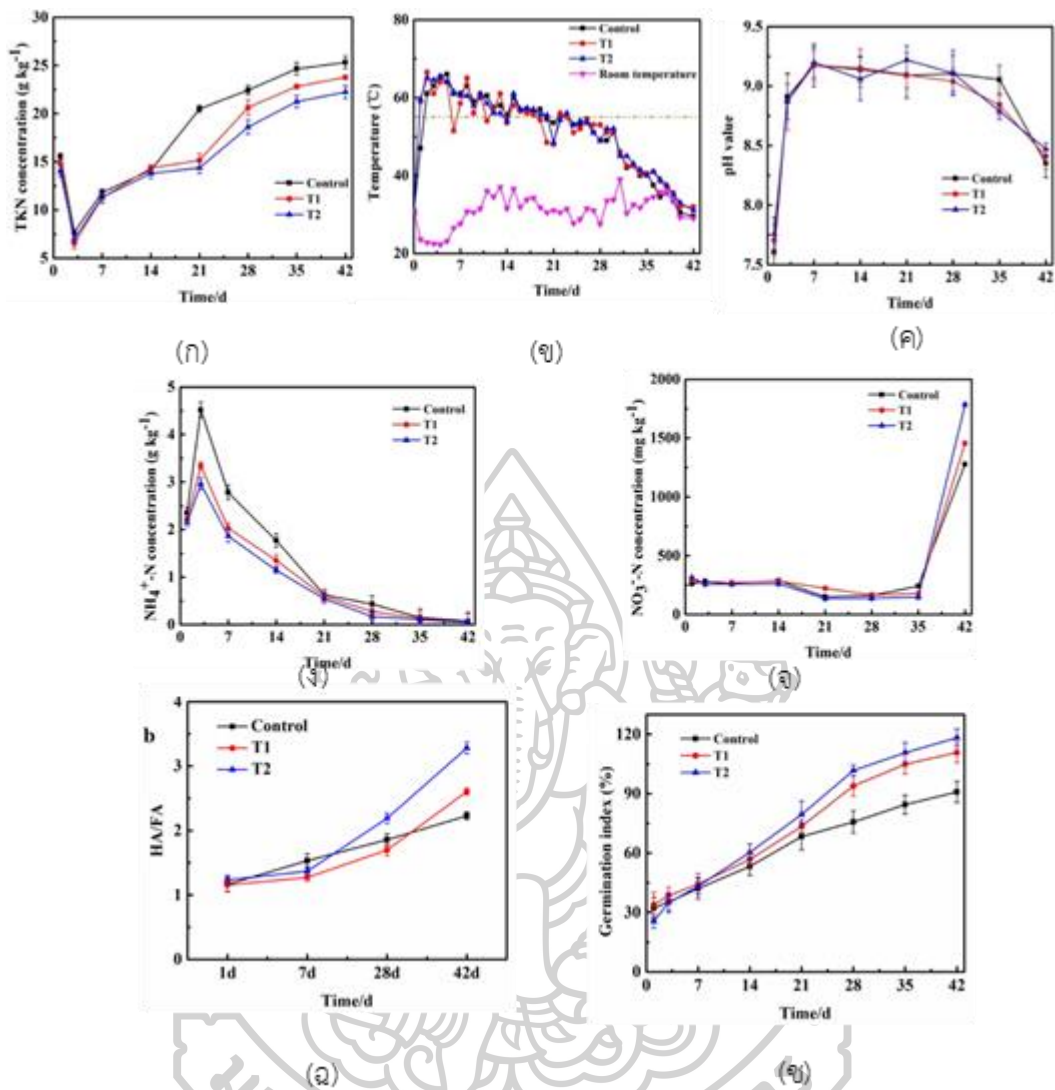
ภาพที่ 2.8 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ และอัตราการปลดปล่อยแอมโมเนียกับระยะเวลาหมัก รวมถึงการสูญเสียไนโตรเจนของการหมักทั้ง 4 วิธี และดัชนีการงอก

- (ก) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)
- (ข) แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N)
- (ค) ไนเตรทไนโตรเจน (NO₃⁻-N)
- (ง) อัตราการปลดปล่อยแอมโมเนีย (NH₃)
- (จ) การสูญเสียไนโตรเจน (TN loss)
- (ฉ) ดัชนีการงอก (Germination index; GI)

จาก “Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods,” โดย B. Tong, X. Wang, S. Wang, L. Ma, and W. Ma, 2019, *Bioresource Technology*, 293, 122046

Ren et al. (2019) ได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักมูลสุกรผสมขี้เลื่อยและเติมไดอะตอมไมต์ (Diatomite; DM) ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่โครงสร้างมีความพรุนและช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจน โดยเติมปริมาณที่แตกต่างกันคิดเป็นร้อยละ 0, 5 และ 10 ตามลำดับ โดยหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทุกสูตรมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากกระบวนการหมัก (ภาพที่ 2.9 (ก)) และมีทิศทางการสร้างและสลายไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยในระยะอุณหภูมิสูง ในช่วงระหว่างวันที่ 0 – 7 (ภาพที่ 2.9 (ข)) แอมโมเนียมไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันที่เปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแอมโมเนียมไนโตรเจน ทำให้ระยะนี้ปุ๋ยหมักมีค่าความเป็นกรด - ด่างสูงขึ้น (ภาพที่ 2.9 (ค)) เนื่องจากความเป็นต่างของแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมาปริมาณมาก และจะมีแนวโน้มลดลงหลังระยะอุณหภูมิสูง (ภาพที่ 2.9 (ง)) ในขณะที่ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 42 โดยพบว่าปุ๋ยหมักสูตรที่เติมไดอะตอมไมต์ร้อยละ 10 มีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ สูตรที่เติมไดอะตอมไมต์ร้อยละ 5 และไม่เติมตามลำดับ (ภาพที่ 2.9 (จ)) การเติมไดอะตอมไมต์เข้าไปจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปอินทรีย์วัตถุและปรับปรุงคุณภาพของปุ๋ยหมัก สอดคล้องกับสัดส่วนของกรดฮิวมิกต่อฟัลวิค (HA/HF) ที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2.9 (ฉ)) อันถือเป็นดัชนีสำคัญในการประเมินกระบวนการฮิวมิฟิเคชัน (humification) และพอลิเมอร์ไลเซชัน (polymerization) ของการเกิดโครงสร้างที่เสถียร นอกจากนี้ การศึกษาดัชนีการงอกของเมล็ดยังชี้ให้เห็นว่าดัชนีการงอกค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึง 42 ซึ่งหากดัชนีการงอกมีค่าเกินร้อยละ 80 แสดงถึงปุ๋ยหมักมีการพัฒนาเต็มที่และไม่เป็นพิษต่อพืช จากผลการศึกษาพบว่าปุ๋ยหมักมีดัชนีการงอกสำหรับสูตรที่ไม่เติมไดอะตอมไมต์ เติมไดอะตอมไมต์ร้อยละ 5 และเติมไดอะตอมไมต์ร้อยละ 10 คิดเป็นร้อยละ 118.27, 110.77 และ 90.87 ตามลำดับ (ภาพที่ 2.9 (ซ))

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเติมไดอะตอมไมต์สามารถปรับปรุงการการสลายตัวของฟัลวิค เกิดฮิวมิกที่มีความเสถียรเนื่องจากโครงสร้างที่มีความพรุนของไดอะตอมไมต์ และพบว่าการเติมไดอะตอมไมต์ร้อยละ 10 ในการหมักปุ๋ยจะช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนทำให้ปริมาณของไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นรูปแบบที่เป็นโยชน์ต่อพืชให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น และปริมาณไนโตรเจนที่มากเพียงพอนี้ช่วยในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทำให้เกิดสารฮิวมิกที่มีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 2.9 ปริมาณไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด - ด่าง สัดส่วนของกรดฮิวมิก ต่อฟัลวิก และดัชนีการงอกกับระยะเวลาหมัก

- (ก) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) (ข) แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N)
 (ค) ไนเตรทไนโตรเจน (NO₃⁻-N) (ง) อุณหภูมิ
 (จ) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) (ฉ) สัดส่วนของกรดฮิวมิกต่อฟัลวิก (HA/HF)
 (ช) ดัชนีการงอก (Germination index; GI)

จาก “Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission,” โดย X. Ren, Q. Wang, M. K. Awasthi, J. Zhao, J. Wang, T. Liu, R. Li, and Z. Zhang, 2019, *Bioresource Technology*, 286, 121377

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร โดยมีวิธีดำเนินงานวิจัยที่เริ่มจากการหมักปุ๋ย การเก็บตัวอย่าง การเตรียมสารเคมี การดำเนินการทดลอง และการวิเคราะห์ผลทางสถิติมีรายละเอียดดังนี้

3.1 กระบวนการทำปุ๋ยหมัก

3.1.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้ในการหมัก

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักสูตรผสมมูลโคและมูลสุกร ซึ่งวัสดุและส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยหมักนี้ เป็นวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ทั่วไปในพื้นที่ของจังหวัดนครปฐม โดยส่วนผสมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ น้ำหมัก ของแห้ง และมูลสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

ชนิดและปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม		ปริมาณ (ร้อยละ)
น้ำหมัก	ปลาหมัก	1.14
	กากน้ำตาล	3.43
ของแห้ง	รำละเอียด	3.15
	มูลค่างาว	0.94
มูลสัตว์	มูลโค	37.50
	มูลสุกร	53.89
รวม		100

3.1.2 ขั้นตอนการหมัก

ในการศึกษาปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้สูตรปุ๋ยหมักของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรพณี โดยพัฒนาร่วมกับศูนย์การเรียนรู้ชุมชนบ้านหัวอ่าว ตำบลบาง

ช้าง อำเภอสามพราณ จังหวัดนครปฐม ตั้งแต่ พ.ศ. 2558 และใช้พื้นที่หมักปุ๋ยในตำบลดอนพุทธรักษา อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ซึ่งห่างไกลจากแหล่งชุมชนเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนในการทำปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร สามารถทำได้โดยนำส่วนผสมมูลสัตว์เทกองบนพื้น จากนั้นฉีดน้ำให้ทั่วเพื่อให้มูลโคแยกออกจากกันและผสมเข้ากันโดยให้ความชื้นประมาณร้อยละ 60 จากนั้นใส่ส่วนผสมน้ำหมักและส่วนผสมของแห้ง ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันจะได้ปุ๋ยหมักสูตรผสมมูลโคและมูลสุกร จากนั้นทำการบรรจุปุ๋ยหมักใส่กระสอบจำนวน 10 กระสอบ กระสอบละประมาณ 15 กิโลกรัม ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบปุ๋ยไม่ต้องแน่นและติดฉลากหมายเลขของกระสอบปุ๋ย จากนั้นนำกลับมาหมักต่อที่เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.1.3 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก จะทำการพลิกกระสอบปุ๋ยไปมา 2 – 3 ครั้ง เพื่อให้ปุ๋ยในกระสอบผสมคลุกเคล้ากันก่อน เปิดกระสอบปุ๋ยออกทำการวัดอุณหภูมิและบันทึกอุณหภูมิของปุ๋ยหมักภายในกระสอบ บันทึกลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ ของปุ๋ยหมัก ได้แก่ สี กลิ่น และลักษณะของวัสดุหมัก เป็นต้น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักโดยใช้ปิ๊กเกอร์ตักปุ๋ยบริเวณกลางกระสอบ เพื่อเป็นตัวแทนของกองปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรที่ต้องการศึกษา ซึ่งเก็บตัวอย่างปุ๋ยทั้งหมด 10 กระสอบ ให้น้ำหนักรวมกันประมาณ 2 กิโลกรัม โดยบันทึกน้ำหนักของกระสอบ ปุ๋ยก่อนตักและหลังตักทุกครั้ง และเขียนฉลากติดข้างถุงพลาสติกที่ใส่ตัวอย่างปุ๋ยโดยระบุอายุและวันที่เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก การเก็บตัวอย่างปุ๋ยนี้จะเก็บเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ โดยทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักทั้ง 10 กระสอบตามวิธีที่กล่าวไปข้างต้น จนกระทั่งครบอายุการหมักที่ 119 วัน

3.1.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักก่อนนำมาวิเคราะห์ โดยนำตัวอย่างปุ๋ยหมักมาผึ่งให้แห้งในห้องปฏิบัติการที่มีความสะอาด จากนั้นเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557 ได้แก่ การคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ ออก และคัดแยกขนาดของอนุภาคปุ๋ยโดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 มิลลิเมตร นำปุ๋ยที่ผ่านการร่อนแล้วบรรจุใส่ถุงพลาสติก พร้อมทั้งติดฉลากข้างถุงโดยระบุอายุและวันที่เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักให้ชัดเจน ปุ๋ยหมักบางส่วนจะนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานซึ่งต้องทำการวิเคราะห์โดยทันที และ

ส่วนที่เหลือจะนำไปเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบโดยต้องนำปุ๋ยหมักออกมาผึ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์จะทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์ใช้วัดอุณหภูมิในถุงปุ๋ยหมัก เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น XS204 ใช้ชั่งตัวอย่างปุ๋ยเพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ของบริษัท Fisher scientific รุ่น AB150 และ เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ของบริษัท HANNA รุ่น HI 9835 ใช้วัดค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมัก สำหรับการวัดปริมาณความชื้นและปริมาณอินทรีย์วัตถุ จะใช้ตู้อบ (Dry oven) ของบริษัท Medcenter ยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtungen GmbH MMM-group และเตาเผาอุณหภูมิสูง Muffle furnace ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ไนโตรเจนจะใช้ชุดกลั่น สำหรับกลั่นไนโตรเจน

3.2.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ในขั้นตอนการย่อยไนโตรเจนทั้งหมด การกลั่นแอมโมเนีย และการไตเตรทเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจน โดยรายชื่อสารเคมี CAS number และ บริษัทผู้ผลิต ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

สารเคมี	CAS number	บริษัท
Sulfuric acid	7664-93-9	Merck
Salicylic acid	69-72-7	Ajax finechem
Sodium Thiosulfate	10102-17-7	Ajax finechem
Mercury oxide	21908-53-2	Ajax finechem
Potassium sulfate	7778-80-5	Ajax finechem
Magnesium oxide	1309-48-4	Ajax finechem
Sodium hydroxide	1310-73-2	Merck
Devarda's alloy	8049-11-4	Fluka
Hydrochloric acid	7647-01-0	Merck
Zink granule	7440-66-6	Fluka

3.3 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

ซังโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 80 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน กวนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรและเขย่าให้เข้ากัน

3.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 11.25 นอร์มอล

ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 450 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน กวนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรและเขย่าให้เข้ากัน

3.3.3 สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.025 นอร์มอล

ปิเปตกรดซัลฟูริก (95.97% H_2SO_4) จำนวน 1.34 มิลลิลิตร ใส่ขวดปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่ 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.3.4 สารละลายมาตรฐานทุติยภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 นอร์มอล

ซิงโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 2 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน กวนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้ได้ 2,000 มิลลิลิตร ในขวดปริมาตรและเขย่าให้เข้ากัน

3.3.5 สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิกรดไฮโดรคลอริก 0.025 นอร์มอล

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก (37% HCl) จำนวน 0.21 มิลลิลิตร ใส่ขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่ 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.3.6 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Standardization)

ปิเปตสารละลายจากข้อ 3.3.5 มา 10 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ หยดสารละลายเมธิลเรดอินดิเคเตอร์ 2 – 3 หยด นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ในข้อ 3.3.4 จนถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนสีจากชมพูเป็นสีเหลือง บันทึกผลและคำนวณหาความเข้มข้นจากสมการที่ 3.1

$$M_2 = (M_1 V_1) / V_2 \quad (3.1)$$

โดยที่ M_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)

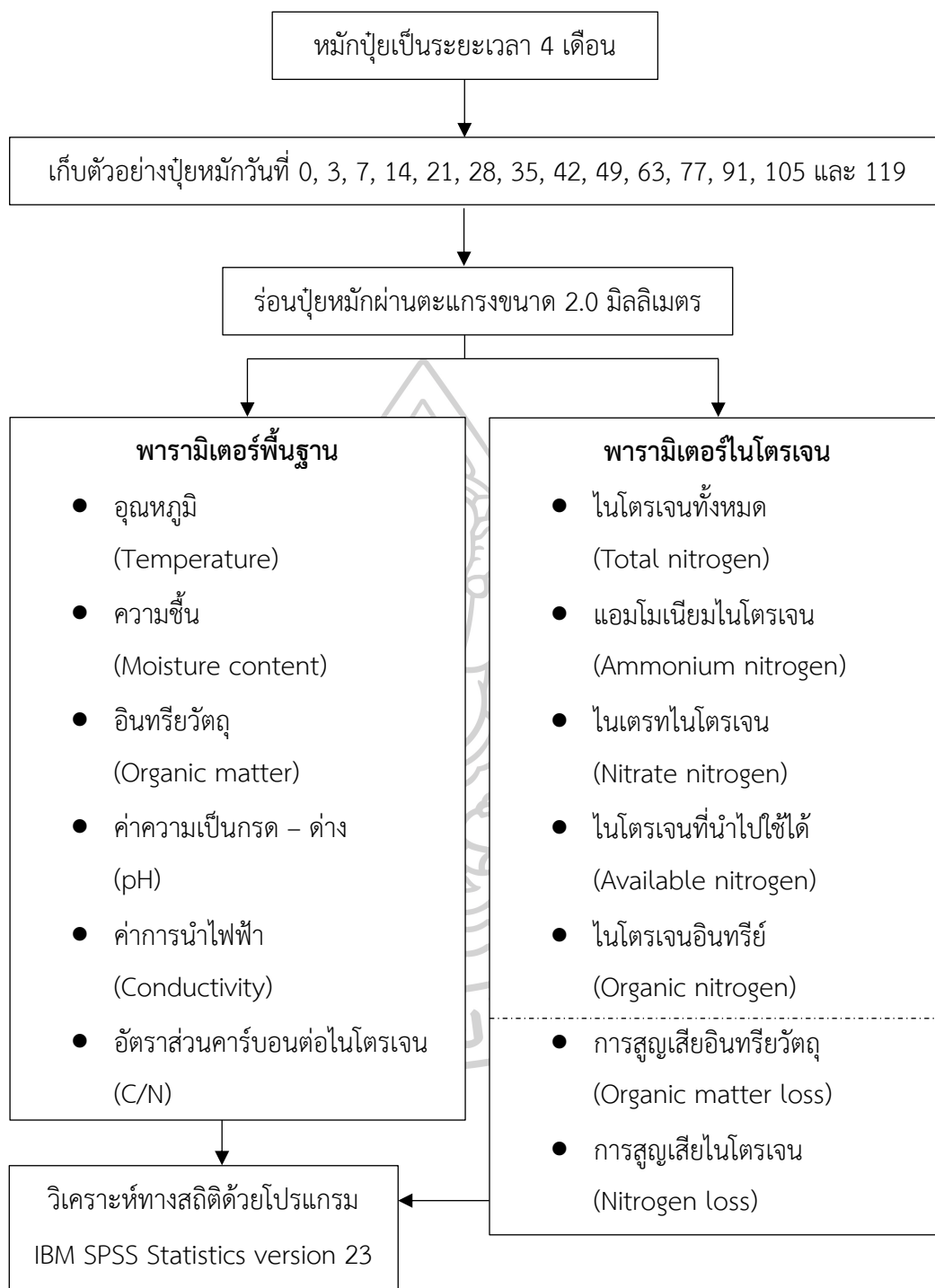
V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

M_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทุติยภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานทุติยภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

3.4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ในส่วนวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยภาพรวมจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์พื้นฐาน และพารามิเตอร์ไนโตรเจน รวมถึงการสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (OM loss) และการสูญเสียไนโตรเจน (TN loss) (ภาพที่ 3.1) จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แผนผังการวิเคราะห์ในภาพรวม

3.4.1 พารามิเตอร์พื้นฐาน

พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ในการศึกษานี้จะประกอบไปด้วย อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ค่าความเป็นกรด - ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

การวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยหลักการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อคายความร้อนของของเหลว ได้แก่ปรอทหรือแอลกอฮอล์ผสมสีแดง โดยเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวขึ้นไปตามหลอดแก้วเหนือกระเปาะ และหดตัวลงไปอยู่ในกระเปาะเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งการวัดอุณหภูมิของปุ๋ยหมักด้วยเทอร์โมมิเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยวัดอุณหภูมิบริเวณกลางกระสอบปุ๋ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนอุณหภูมิของปุ๋ยกระสอบนั้น ๆ

3.4.1.2 ความชื้น (Moisture content)

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นในปุ๋ยหมัก สามารถวิเคราะห์ได้จากผลต่างของน้ำหนักปุ๋ยก่อนอบและหลังอบ โดยผลต่างดังกล่าวคือปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปหลังการอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสามารถทำได้โดย ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบ Electric oven (Ecocell) และนำออกมาผึ่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังอบและทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักคงที่ โดยแตกต่างกันไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ดังสมการที่ 3.2

$$\text{ความชื้น (ร้อยละ)} = (\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}) / \text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ} \times 100 \quad (3.2)$$

3.4.1.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter; OM)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมัก สามารถวิเคราะห์ได้จากผลต่างของน้ำหนักปุ๋ยก่อนเผาและหลังเผา โดยผลต่างดังกล่าวคือปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ระเหยออกไปหลังการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุได้ ส่วนขั้นตอนในการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุสามารถทำได้โดย นำตัวอย่างปุ๋ยที่ผ่านการอบแห้งจากข้อ 3.4.1.2 มาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาที่มีความร้อนสูงและนำ

ออกมาฝั่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังการเผาและทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักคงที่ โดยแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 4 นำส่วนที่ระเหยออกไปมาคำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)} = (\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนเผา} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังเผา}) / \text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนเผา} \times 100 \quad (3.3)$$

3.4.1.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

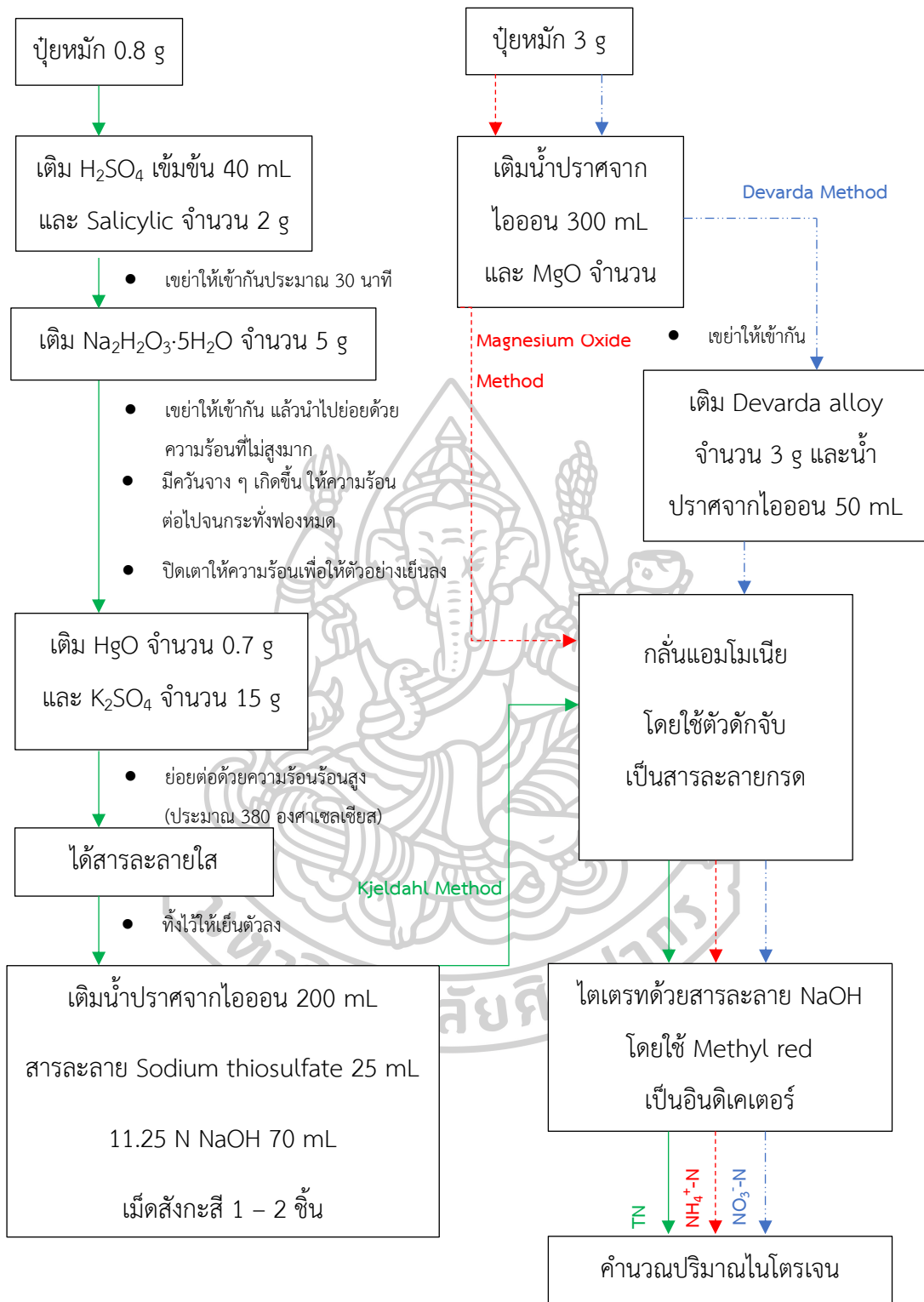
การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด - ด่างของปุ๋ยหมักด้วยพีเอชมิเตอร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของไอออนในสารละลายระหว่าง Glass electrode เปรียบเทียบกับ Reference electrode ซึ่งเป็นเซลล์มาตรฐานที่ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าแล้ว ส่วนขั้นตอนในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด - ด่าง สามารถทำได้โดยชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 4 - 6 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:5 นำไปกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที เพื่อให้ส่วนที่เป็นสารแขวนลอย (suspended soil) เกิดการเซตตัวและทำการวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง จากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนและทำการวัดค่าความเป็นกรด - ด่างของส่วนใสเหนือตะกอน (supernatant) ด้วยพีเอชมิเตอร์

3.4.1.5 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)

การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมัก สามารถวิเคราะห์ได้โดยนำส่วนใสเหนือตะกอน (supernatant) จากข้อ 3.4.1.4 มาวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

3.4.2 พารามิเตอร์ไนโตรเจน

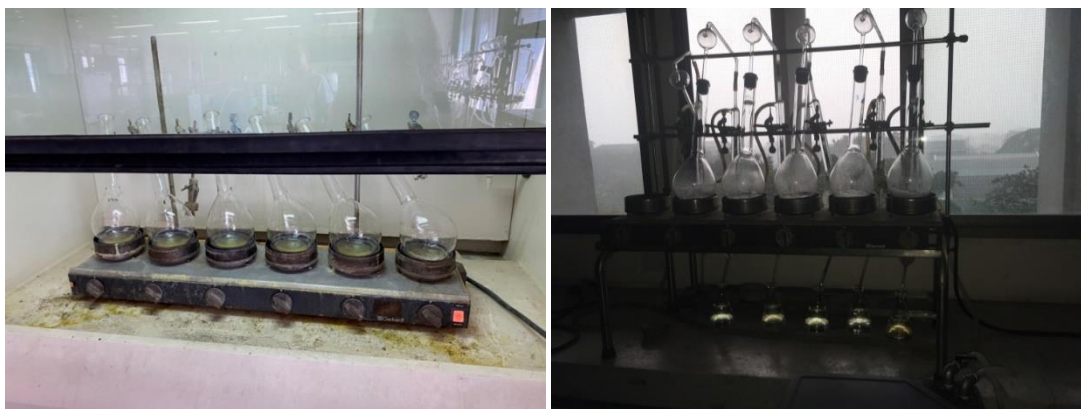
ในส่วนของพารามิเตอร์ไนโตรเจนที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด แอมโมเนียมไนโตรเจน ไนเตรทไนโตรเจน (ภาพที่ 3.2) รวมถึงไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) และไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.2 ภาพรวมขั้นตอนการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH_4^+-N) และไนเตรทไนโตรเจน ($NO_3^- - N$)

3.4.2.1 ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; TN)

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Kjeldahl Method ของ AOAC Official Method 955.04 (Latimer, 2012) ซึ่งในส่วนแรกเป็นการย่อยตัวอย่างอย่างสามารถทำได้โดย ชั่งตัวอย่างปุยจำนวน 0.8 กรัม ใส่ในขวด Kjeldahl ขนาด 800 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้ว 3 – 4 เม็ด เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง เติมกรด Sulfuric (H_2SO_4) เข้มข้นปริมาณ 40 มิลลิลิตร และเติมกรด Salicylic จำนวน 2 กรัม เขย่าให้ส่วนผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นเติม Sodium thiosulfate ($Na_2H_2O_3 \cdot 5H_2O$) จำนวน 5 กรัม เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที นำไปตั้งบนเตาย่อยให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิไม่สูงมากจนเกิดควันจาง ๆ และให้ความร้อนต่อไปจนกระทั่งฟองหมด ทำการปิดเตาให้ความร้อนเพื่อให้ตัวอย่างเย็นลง จากนั้นเติม Mercuric oxide (HgO) จำนวน 0.7 กรัม และ Potassium sulfate (K_2SO_4) จำนวน 15 กรัม ทำการย่อยต่อโดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดเดือดของกรด Sulfuric (ประมาณ 380 องศาเซลเซียส) ทำการย่อยจนกระทั่งได้สารละลายใส จากนั้นย่อยต่ออีกประมาณ 30 นาที ปิดเตาย่อยให้ความร้อนและทิ้งไว้จนตัวอย่างเย็นลง ในส่วนถัดมาเป็นการกลั่นแอมโมเนียสามารถทำได้โดย เติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในขวด Kjeldahl ที่มีตัวอย่างซึ่งผ่านการย่อยแล้ว ใส่เม็ดสังกะสี (Zink granule) 1 – 2 ชิ้น เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง จากนั้นเติมสารละลาย Sodium thiosulfate ปริมาณ 25 มิลลิลิตร และเติม 11.25 N NaOH ปริมาณ 70 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต่อเข้ากับชุดกลั่นแอมโมเนียทันที ซึ่งในขั้นตอนนี้ให้เตรียม 0.025 N HCl จำนวน 50 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นตัวดักจับแอมโมเนียใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และต่อเข้ากับชุดกลั่นให้เรียบร้อยก่อนโดยให้ปลายหลอดแก้วของชุดกลั่นจุ่มอยู่ในสารละลายดังกล่าว แล้วจึงเติมสารละลาย NaOH เข้มข้นลงไป จากนั้นทำการเปิดเตาให้ความร้อน โดยให้ความร้อนระดับกลางก่อนและค่อย ๆ ปรับระดับความร้อนให้สูงขึ้น ทำการกลั่นจนสารละลายในขวดรูปชมพู่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร หรือกลั่นจนกระทั่งไม่มีแอมโมเนียเหลืออยู่ ปิดเตาให้ความร้อนและยกปลายหลอดแก้วที่จุ่มในขวดรูปชมพู่ให้อยู่เหนือสารละลายที่กลั่นได้ 1 – 2 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.025 N NaOH โดยใช้ Methyl red เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งจะหยุดลงสารละลายในขวดรูปชมพู่ประมาณ 4 – 5 หยด ทำการไตเตรทจนสีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีแดงชมพูเป็นสีเหลืองอ่อน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการไตเตรทไปคำนวณหาปริมาณของไนโตรเจนดังสมการที่ 3.4 และทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่ตัวอย่าง ซึ่งทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

(ก) ขั้นตอนการย่อย

(ข) ขั้นตอนการกลั่น

$$\%N = \frac{[(\text{mL standard acid} \times \text{normality acid}) - (\text{mL standard NaOH} \times \text{normality NaOH})] \times 1.4007}{\text{g test portion}} \quad (3.4)$$

โดยที่	mL standard acid	คือ ปริมาตรกรดที่ใช้เป็นตัวจับ (มิลลิลิตร)
	mL standard NaOH	คือ ปริมาตรด่างที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	normality acid	คือ ความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวจับ (นอร์มอล)
	normality NaOH	คือ ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ในการไตเตรท (นอร์มอล)
	g test portion	คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กรัม)

3.4.2.2 แอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$)

การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ด้วยวิธี Magnesium Oxide Method ซึ่งประยุกต์จาก AOAC Official Method 920.03 (Latimer, 2012) สามารถทำได้โดยชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวด Kjeldahl ขนาด 800 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 300 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้ว 3 - 4 เม็ด และใส่เม็ดสังกะสี 1 - 2 ชิ้น เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง จากนั้นเติม Magnesium oxide (MgO) จำนวน 2 กรัม ฉีดน้ำปราศจากไอออนเล็กน้อยเพื่อล้างคอ

ขวด Kjeldahl เขย่าเล็กน้อยให้สารผสมเข้ากันและนำไปต่อเข้ากับชุดกลั่นแอมโมเนียทันที ซึ่งในขั้นตอนนี้ให้เตรียมสารละลาย $0.025\text{ N H}_2\text{SO}_4$ จำนวน 25 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นตัวดักจับแอมโมเนียใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และต่อเข้ากับชุดกลั่นให้เรียบร้อยก่อนโดยให้ปลายหลอดแก้วของชุดกลั่นจุ่มอยู่ในสารละลายดังกล่าว จากนั้นจึงเติม Magnesium oxide ลงไปและทำการเปิดเตาให้ความร้อน โดยให้ความร้อนระดับต่ำก่อน และค่อย ๆ ปรับระดับความร้อนให้สูงขึ้น ทำการกลั่นจนสารละลายในขวดรูปชมพู่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร หรือกลั่นจนกระทั่งไม่มีแอมโมเนียเหลืออยู่ ปิดเตาให้ความร้อนและยกปลายหลอดแก้วที่จุ่มในขวดรูปชมพู่ให้อยู่เหนือสารละลายที่กลั่นได้ 1 – 2 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.025 N NaOH โดยใช้ Methyl red เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งจะหยดลงสารละลายในขวดรูปชมพู่ประมาณ 4 – 5 หยด ทำการไตเตรทจนสีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีแดงชมพูเป็นสีเหลืองอ่อน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการไตเตรทไปคำนวณหาปริมาณของไนโตรเจนดังสมการที่ 3.5 และทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่ตัวอย่าง ซึ่งทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ



ภาพที่ 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

$$\%N = \frac{[(\text{mL standard acid} \times \text{normality acid}) - (\text{mL standard NaOH} \times \text{normality NaOH})] \times 1.4007}{(\text{g test portion})} \quad (3.5)$$

โดยที่	mL standard acid	คือ ปริมาตรกรดที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	mL standard NaOH	คือ ปริมาตรด่างที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	normality acid	คือ ความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวจับ (นอร์มอล)
	normality NaOH	คือ ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ในการไตเตรท (นอร์มอล)
	g test portion	คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กรัม)

3.4.2.3 ไนเตรทไนโตรเจน (Nitrate nitrogen; NO_3^- -N)

การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ด้วยวิธี Devarda Method ซึ่งประยุกต์จาก AOAC Official Method 920.03 และ 892.01 (Latimer, 2012) สามารถทำได้โดยนำสารที่เหลืออยู่ในขวด Kjeldahl หลังจากกลั่นแอมโมเนียออกไปแล้วจากข้อ 3.4.2.2 ที่เย็นตัวลงมาเติมผง Devarda alloy จำนวน 3 กรัม และเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 50 มิลลิลิตร นำไปต่อเข้ากับชุดกลั่นแอมโมเนียทันที ซึ่งในขั้นตอนนี้ให้เตรียมสารละลาย 0.025 N H_2SO_4 จำนวน 25 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นตัวดักจับแอมโมเนียใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และต่อเข้ากับชุดกลั่นให้เรียบร้อยก่อนโดยให้ปลายหลอดแก้วของชุดกลั่นจุ่มอยู่ในสารละลายดังกล่าว ทำการเปิดเตาให้ความร้อนโดยใช้ความร้อนในการกลั่นค่อนข้างอ่อน ทำการกลั่นจนสารละลายในขวดรูปชมพู่มีปริมาตร 150 มิลลิลิตร หรือกลั่นจนกระทั่งไม่มีแอมโมเนียเหลืออยู่ ปิดเตาให้ความร้อนและยกปลายหลอดแก้วที่จุ่มในขวดรูปชมพู่ให้อยู่เหนือสารละลายที่กลั่นได้ 1 – 2 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.025 N NaOH โดยใช้ Methyl red เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งจะหยุดลงสารละลายในขวดรูปชมพู่ประมาณ 4 – 5 หยด ทำการไตเตรทจนสีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีแดงชมพูเป็นสีเหลืองอ่อน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการไตเตรทไปคำนวณหาปริมาณของไนโตรเจนดังสมการที่ 3.6 และทำชุดควบคุมโดยไม่ใส่ตัวอย่าง ซึ่งทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ



ภาพที่ 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)

$$\%N = \frac{[(\text{mL standard acid} \times \text{normality acid}) - (\text{mL standard NaOH} \times \text{normality NaOH})] \times 1.4007}{(\text{g test portion})} \quad (3.6)$$

โดยที่	mL standard acid	คือ ปริมาตรกรดที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	mL standard NaOH	คือ ปริมาตรด่างที่ใช้ในการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	normality acid	คือ ความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวจับ (นอร์มอล)
	normality NaOH	คือ ความเข้มข้นของด่างที่ใช้ในการไตเตรท (นอร์มอล)
	g test portion	คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กรัม)

3.4.2.4 ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (Available nitrogen; AN)

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ สามารถทำได้โดยการคำนวณจากผลรวมของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Magnesium Oxide Method ดังข้อ 3.4.2.2 และปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Devarda Method ดังข้อ 3.4.2.3 โดยปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7

$$AN = NH_4^+-N + NO_3^- - N \quad (3.7)$$

โดยที่	AN	คือ ปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (มิลลิกรัม/กรัม)
	NH_4^+-N	คือ ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัม/กรัม)
	$NO_3^- - N$	คือ ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (มิลลิกรัม/กรัม)

3.4.2.5 ไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic nitrogen; Org-N)

การวิเคราะห์ไนโตรเจนอินทรีย์ สามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด กับปริมาณของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจน (Tong et al., 2019) ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Magnesium Oxide Method ดังข้อ 3.4.2.2 และวิธี Devarda Method ดังข้อ 3.4.2.3 ตามลำดับ โดยปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.8

$$Org-N = TN - NH_4^+-N - NO_3^- - N \quad (3.8)$$

โดยที่	Org-N	คือ ปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (มิลลิกรัม/กรัม)
	TN	คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)
	NH_4^+-N	คือ ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัม/กรัม)
	$NO_3^- - N$	คือ ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (มิลลิกรัม/กรัม)

3.4.3 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (Organic matter loss; OM loss)

การวิเคราะห์ค่าการสูญเสียอินทรีย์วัตถุ สามารถวิเคราะห์จากปริมาณเถ้า (ash content) จากนั้นสามารถนำมาคำนวณค่าการสูญเสียอินทรีย์วัตถุได้ดังสมการที่ 3.9 (Bustamante et al., 2008)

$$OM \text{ loss } (\%) = 100 - 100 [X_1(100-X_2)/(X_2(100-X_1))] \quad (3.9)$$

โดยที่	X_1	คือ ปริมาณเถ้าเริ่มต้น (กรัม)
	X_2	คือ ปริมาณเถ้าสุดท้าย (กรัม)

เมื่อกำหนดปริมาณการสูญเสียอินทรีย์วัตถุเป็นไปตามสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetic equation) ดังสมการที่ 3.10 ดังนี้ (Bustamante et al., 2008; Paredes et al., 2000)

$$\text{OM loss} = A (1 - e^{-kt}) \quad (3.10)$$

โดยที่	OM loss	คือ การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)
	A	คือ ปริมาณการย่อยสลายสูงสุด (ร้อยละ)
	k	คือ อัตราการย่อยสลาย (ต่อวัน)
	t	คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)

3.4.4 การสูญเสียไนโตรเจน (Nitrogen loss; TN loss)

การวิเคราะห์ค่าการสูญเสียไนโตรเจน สามารถทำได้โดยวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash content) และปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด จากนั้นนำค่าที่สามารถวิเคราะห์ได้มาคำนวณค่าการสูญเสียไนโตรเจนได้ดังสมการที่ 3.11 (Benito et al., 2003)

$$\text{TN loss (\%)} = 100 - 100 [(X_1 N_2) / (X_2 N_1)] \quad (3.11)$$

โดยที่	X_1	คือ ปริมาณเถ้าเริ่มต้น (กรัม)
	X_2	คือ ปริมาณเถ้าสุดท้าย (กรัม)
	N_1	คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเริ่มต้น (มิลลิกรัม/กรัม)
	N_2	คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสุดท้าย (มิลลิกรัม/กรัม)

เมื่อคำนวณปริมาณการสูญเสียไนโตรเจนเป็นไปตามสมการจลนศาสตร์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง ดังสมการที่ 3.12 ดังนี้ (Bustamante et al., 2008; Paredes et al., 2000)

$$\text{TN loss} = A (1 - e^{-kt}) \quad (3.12)$$

โดยที่	TN loss	คือ การสูญเสียไนโตรเจน (ร้อยละ)
	A	คือ ปริมาณการย่อยสลายสูงสุด (ร้อยละ)
	k	คือ อัตราการย่อยสลาย (ต่อวัน)
	t	คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบทางสถิติจะวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทดสอบทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 23 เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation) การทดสอบความแตกต่างเชิงปริมาณโดยจัดกลุ่ม

ของต้นแคณ (Duncan's test) และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กายภาพและเคมีกับรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจนในรูปแบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธี Multiple linear regression เลือกตัวแบบโดยวิธี stepwise



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

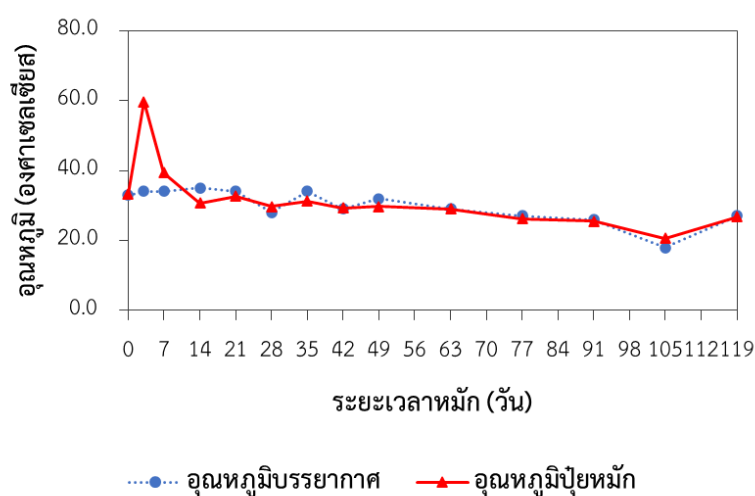
การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อรูปแบบไนโตรเจนในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร โดยทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 119 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรในช่วงระยะเวลาการหมักที่แบ่งตามอุณหภูมิ ตลอดจนการศึกษารูปแบบของไนโตรเจนที่สัมพันธ์กับกระบวนการหมักดังกล่าว อันนำไปสู่การประเมินศักยภาพของปุ๋ยหมักในการปลดปล่อยไนโตรเจนและรูปแบบที่นำไปใช้ได้ ส่งผลต่อการกำหนดระยะเวลาการหมักและการเก็บรักษาที่เหมาะสมเพื่อให้ปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพสูงสุด อันจะเป็นประโยชน์แก่เกษตรกรในอนาคตต่อไป

4.1 คุณลักษณะปุ๋ยหมักและการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักและปริมาณธาตุอาหารขึ้นกับกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ที่มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา (Li et al., 2019) ทำให้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับคุณลักษณะของปุ๋ยหมักที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ (Jain et al., 2018; Li et al., 2019; Zhou, 2017) สามารถแบ่งช่วงอายุของปุ๋ยหมักตามช่วงอุณหภูมิได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial stage) ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic stage) และระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (Mature stage) ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกลุ่มต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งในช่วงที่เป็นกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูง (thermophilic organisms) และกลุ่มอุณหภูมิตปานกลาง (mesophilic organisms) ซึ่งคุณลักษณะของปุ๋ยหมักในช่วงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ได้ อันเป็นแนวทางในการเลือกอายุปุ๋ยหมักตลอดจนระยะเวลาการเก็บรักษาปุ๋ยหมักดังกล่าวเพื่อใช้หรือจำหน่ายได้ในอนาคตต่อไป โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของปุ๋ยหมัก ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และปริมาณหิน กรวด ทราย และโลหะหนัก มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 อุณหภูมิ (Temperature)

ปุ๋ยหมักมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยพบว่าแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสมวันที่ 0 ระยะอุณหภูมิสูงวันที่ 1 – 13 และระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่ วันที่ 14 เป็นต้นไป การย่อยสลายในช่วงแรกจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายองค์ประกอบที่ย่อยสลายยาก และเมื่อวัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้หมดไปกิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลง อุณหภูมิของปุ๋ยหมักลดลงสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ($r = -0.646$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 4.1 โดยมีรายละเอียดคุณลักษณะของปุ๋ยหมักระยะต่าง ๆ ดังนี้



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดกระบวนการหมัก

1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสมวันที่ 0 อุณหภูมิของปุ๋ยหมักมีค่าเท่ากับ 33.3 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอกและยังคงสภาพตั้งต้นของวัสดุหมักทั้ง สี กลิ่น ความชื้น และความสดของวัสดุ ร่วมกับการหมักกองปุ๋ยด้วยน้ำหมักปลาเพื่อเพิ่มธาตุไนโตรเจนและจุลินทรีย์ ทำให้มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 54.19 โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 50 – 60 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Rastogi et al., 2020; Trautmann & Krasny, 2014) ในระยะนี้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุเริ่มต้นที่มาจากวัตถุดิบอินทรีย์ตั้งต้นต่าง ๆ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ โดยมีค่าร้อยละ 65.48 เช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงที่สุดเช่นกันมีค่าเท่ากับ 15.24 (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1

เปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาการหมักปุ๋ย (วัน)														
		ระยะเริ่มผสม					ระยะอุณหภูมิสูง					ระยะที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่				
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119	
คุณลักษณะทางกายภาพ																
ความชื้น	≤ ร้อยละ 35	54.19	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	
คุณลักษณะทางเคมี																
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	5.98	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	16.42	14.05	14.13	13.84	13.41	12.45	13.06	12.90	13.16	13.24	13.44	12.83	12.29	
ปริมาณธาตุอาหารหลัก																
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	≥ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	2.49	2.27	2.55	2.58	2.62	2.68	2.63	2.72	2.79	2.68	2.73	2.69	2.69	2.74	
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	≥ 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 (TK)	≥ 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	
หมายเหตุ:	ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน														

ข้อมูลพื้นฐานของปุ๋ยหมักได้มาจากวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรณีย์ และคณะ

2. ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงจะอยู่ในช่วงวันที่ 1 – 13 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 1 เท่ากับ 62.0 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักจะมีสีน้ำตาลเข้มแต่ยังคงสามารถมองเห็นลักษณะชิ้นส่วนของวัสดุตั้งต้นที่นำมาหมักและมีกลิ่นแอมโมเนียฉุนอย่างรุนแรงเกิดขึ้น ในระยะนี้การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยาก เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Yu et al., 2019) โดยจุลินทรีย์กลุ่มแอกติโนมัยซีทและราที่ชอบอุณหภูมิสูงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่งผลให้มีการสูญเสียคาร์บอนในรูปการระเหยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสัมพันธ์กับการหายใจระดับเซลล์ของจุลินทรีย์ (Do et al., 2021; Meng et al., 2020) ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและความชื้นค่อย ๆ ลดลงรวมถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อย ๆ ลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้คาร์บอนและไนโตรเจนเป็นแหล่งพลังงานและอาหารสำหรับการเจริญเติบโต นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นทำให้มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา ส่งผลให้อุณหภูมิสูงมากพอที่จะสามารถฆ่าเชื้อโรค แบคทีเรีย เมล็ดวัชพืช ไข่แมลงหรืออื่น ๆ ที่ปะปนมากับวัสดุหมัก (Li et al., 2019) ระยะนี้แม้ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะค่อย ๆ ลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 61.77 – 64.26 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนก็ค่อย ๆ ลดลงเช่นกันมีค่าอยู่ในช่วง 14.05 – 16.42 แต่ยังมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูงร้อยละ 36.02 – 44.08 ร่วมกับกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงที่ยังทำการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปุ๋ยในระยะนี้ไม่เหมาะกับการนำไปใช้เพราะจะเกิดการย่อยสลายต่อในดินและดึงไนโตรเจนจากดินไปใช้ทำให้ดินขาดธาตุไนโตรเจนได้ อีกทั้งกลุ่มจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่ต้องผ่านช่วงอุณหภูมิสูง เช่น *E. Coli*, *Salmonella spp.* และ *Listeria monocytogenes* ที่มาจากมูลสัตว์ (Erickson et al., 2014; Kim et al., 2012; Turner, 2002) อาจไม่ถูกทำลายหมดก่อให้เกิดการปนเปื้อนทางดินและส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคในภายหลัง

3. ระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (Mature phase)

ระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป ปุ๋ยหมักเย็นตัวลงโดยมีอุณหภูมิระหว่าง 20.7 – 32.7 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอก ลักษณะของปุ๋ยหมักเริ่มแห้ง อ่อนนุ่ม มีสีน้ำตาลปนดำ และกลิ่นของแอมโมเนียจะหมดไปเกิดเป็นกลิ่นคล้ายดินขึ้นมาแทน ในระยะนี้บทบาทการทำงานของจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูงและอัตราการย่อยสลายลดลง แต่ยังคงมีการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิต่ำที่ย่อยสลายองค์ประกอบต่อจากช่วงอุณหภูมิสูงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu et al. (2019) ที่ศึกษาปุ๋ยหมักมูลสุกรผสมก้อนเห็ดเก่าผสมฟางข้าว

สาละบุด พบว่ากระบวนการหมักจะลดปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งต้นเกิดสารอินทรีย์ที่เสถียร เช่น กรดฮิวมิก โดยเฉพาะในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ปริมาณกรดฟัลวิกที่มีความเสถียรน้อยกว่าจะลดลง เปลี่ยนเป็นกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรมากกว่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งต้นอาจมีแนวโน้มลดลงได้เล็กน้อยหรือคงที่ สอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 56.56 – 62.75 ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 12.29 – 14.13 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนลดลงในอัตราที่เร็วกว่าไนโตรเจนอันหมายถึงความเพียงพอของปริมาณไนโตรเจนสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ นอกจากนี้ยังพบว่าคุณภาพของปุ๋ยหมักผ่านมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) สามารถนำไปใช้และจำหน่ายได้ ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งจะนำไปกล่าวในหัวข้อถัดไป

สำหรับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลงตลอดระยะเวลาการหมักนี้สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.515$, $p < 0.01$) โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ 4.1 เช่นเดียวกับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.681$, $p < 0.01$) และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ 4.2 (ภาพที่ 4.2)

$$OM (\%) = -0.0331t + 63.113 \quad R^2 = 0.3128 \quad (4.1)$$

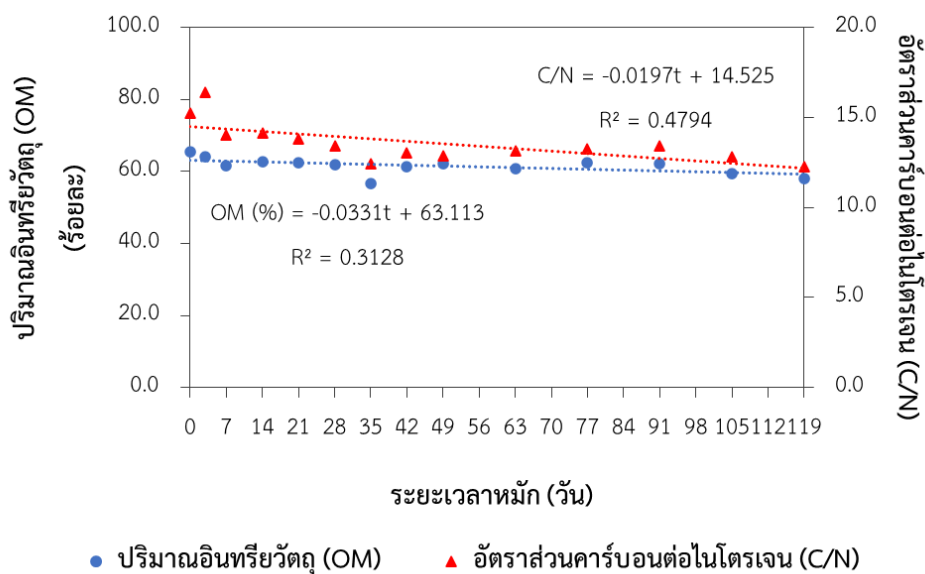
$$C/N = -0.0197t + 14.525 \quad R^2 = 0.4794 \quad (4.2)$$

โดย

OM คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)

C/N คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

t คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)



ภาพที่ 4.2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter: OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาหมัก ($r = -0.515$ และ -0.681 , $p < 0.01$ ตามลำดับ)

เมื่อคำนวณปริมาณการสูญเสียอินทรีย์วัตถุเป็นไปตามสมการจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง (First-order kinetic equation) ดังสมการที่ 4.3 ดังนี้

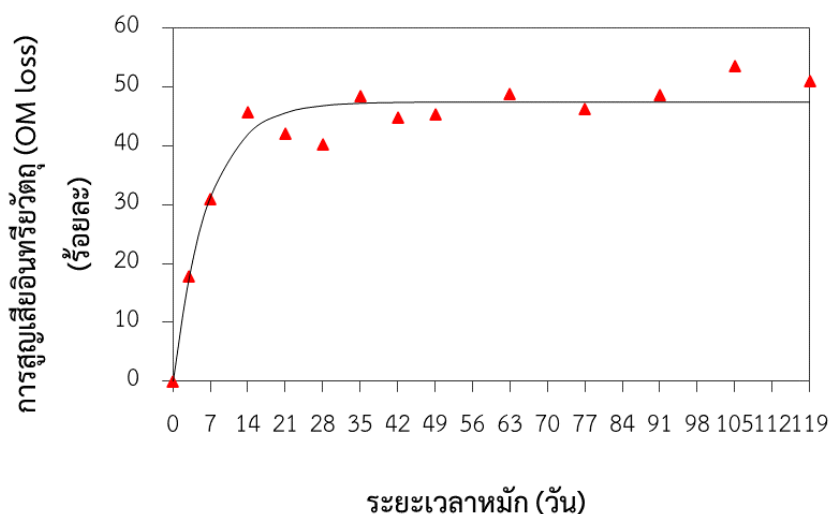
$$\text{Decomposition (\%)} = 47.5002 (\pm 1.115) (1 - e^{-0.154(\pm 0.22)t}) \quad (4.3)$$

$$\text{Residual mean square} = 11.4219, F = 235.1774, P < 0.01$$

โดย Decomposition คือ อัตราการย่อยสลาย (ร้อยละ)

t คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)

จากสมการพบว่าอัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิสูง 14 วันแรก โดยมีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุสูงที่สุดหลังวันที่ 14 เป็นต้นไป เฉลี่ยร้อยละ 47.5 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำกว่างานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้วัสดุจากพืชเป็นองค์ประกอบรวมด้วยที่มีค่าอยู่ในช่วง 54.5 – 78.94 (Bustamante et al., 2008; Dias et al., 2010) เพราะองค์ประกอบอินทรีย์วัตถุของปุ๋ยหมักที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำกว่าจะเกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าจากปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอและทำให้อัตราการย่อยสลายแบบอันดับหนึ่งมีค่า 0.154 ต่อวัน ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.0048 – 0.0711 จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่

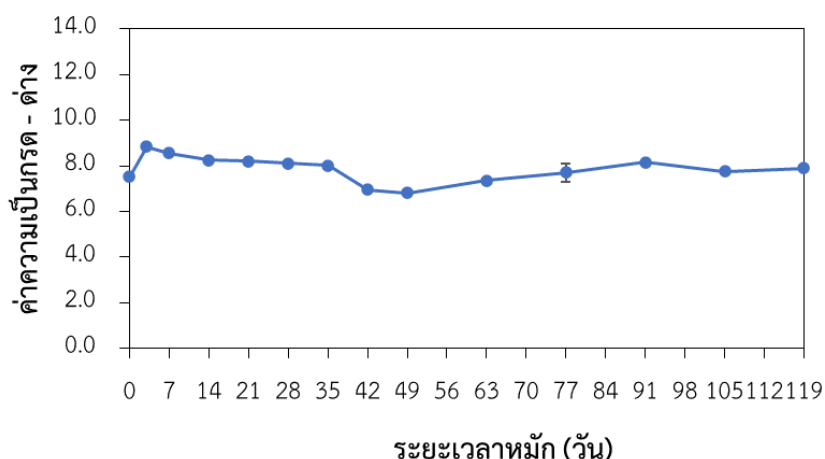


ภาพที่ 4.3 การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ (OM loss) ตลอดกระบวนการหมัก

สูงกว่าที่มาจากวัสดุจากพืช เช่น กากองุ่น ฟางข้าว เปลือกกาแฟ และขี้เลื่อย เป็นต้น (Bustamante et al., 2008; Dias et al., 2010)

4.1.2 ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด - ด่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อกิจกรรมและชนิดของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมัก โดยค่าระหว่าง 6.0 – 9.0 เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดี (Li et al., 2019) นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด - ด่างยังสามารถบ่งชี้รูปแบบของไนโตรเจนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะของกระบวนการหมัก โดยหากค่าความเป็นกรด - ด่างสูงมาก (> 8.5) แอมโมเนียในไนโตรเจนจะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียระเหยออกสู่บรรยากาศ และหากค่าความเป็นกรด - ด่างมีค่าต่ำ (< 5.0) จะส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์และอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุลดลง (Meng et al., 2020) จากการศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่างจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.535$, $p < 0.01$) โดยมีค่าสูงสุดในระยะอุณหภูมิสูงและจะลดลงจนเสถียรในระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่พร้อมนำไปใช้งาน ปุ๋ยหมักนี้มีค่าความเป็นกรด - ด่างอยู่ในช่วง 6.8 – 8.8 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดไว้เพื่อการจำหน่ายคือช่วง 5.5 – 8.5 จากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าในวันที่ 3 ของการหมักมีค่าสูงที่สุดถึง 8.8 ซึ่งอยู่ในระยะอุณหภูมิสูงที่อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ

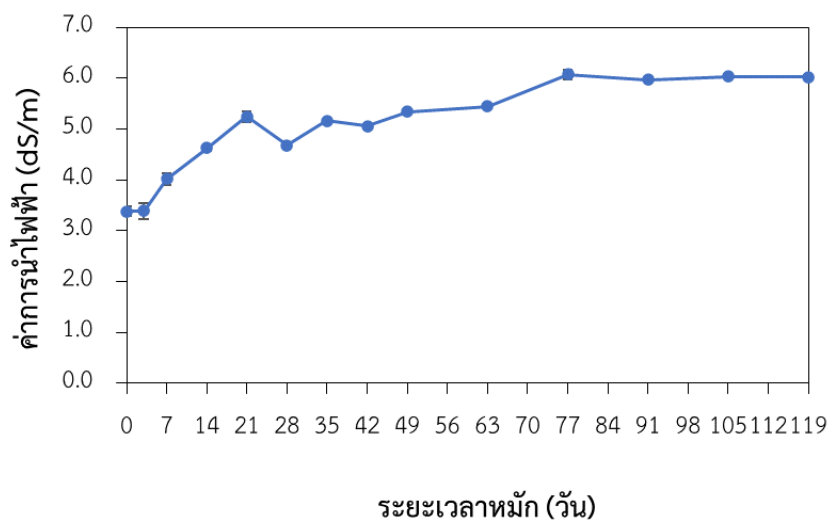


ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่างตลอดกระบวนการหมัก

ของจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แอมโมเนียมไนโตรเจนอาจเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สแอมโมเนียระเหยออกสู่บรรยากาศผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ทำให้ปุ๋ยหมักมีกลิ่นฉุนเกิดขึ้นในระยษนี้ และอาจส่งผลให้มีการสูญเสียไนโตรเจน (Nitrogen loss) เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก (Meng et al., 2020)

4.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)

ค่าการนำไฟฟ้าบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Li et al., 2019) หรือความเค็มของปุ๋ยหมักซึ่งอาจเกิดจากไอออนของเกลือโซเดียม คลอไรด์ โพแทสเซียม ไนเตรท ซัลเฟต และแอมโมเนียม จากการศึกษาศักยภาพการทำปุ๋ยหมักชีวมวลผสมแกลบและมูลโคของ Singh and Kalamdhad (2014) ระบุว่าค่าการนำไฟฟ้ายังเป็นปัจจัยซึ่งบ่งชี้ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักที่พืชต้องการซึ่งอยู่ในรูปของเกลือและสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เมื่อละลายน้ำ ในการศึกษาปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกร พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.884$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 4.5 โดยในช่วงแรกของการหมักค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจเป็นผลมาจากอินทรีย์วัตถุเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยเกลือแร่ เช่น ฟอสเฟต และแอมโมเนียมไอออนระหว่างกระบวนการย่อยสลาย (Singh & Kalamdhad, 2014) ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต์/เมตร มีเพียงช่วงท้ายของกระบวนการหมักในวันที่ 77, 105 และ 119 ที่มีค่าการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าตลอดกระบวนการหมักปุ๋ย

สูงกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ได้แก่ 6.07, 6.04 และ 6.02 เดซิซีเมนต์/เมตร ตามลำดับ ดังนั้นการนำปุ๋ยหมักไปใช้งานจึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากปุ๋ยหมักมีธาตุอาหารที่อุดมสมบูรณ์อย่างมากหากใช้ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาดินเค็มได้

4.1.4 ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

ปริมาณธาตุอาหารหลักเป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งได้จากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักและปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านี้ในรูปแบบและปริมาณที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดให้ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต้องมีมากกว่าร้อยละ 1.0, 0.5 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าปุ๋ยหมักนี้มีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 2.27 – 2.79 โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 1.10 – 2.26 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 1.47 – 2.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดไว้

4.1.5 ปริมาณหิน กรวด ทราย และโลหะหนัก

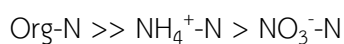
ปริมาณสิ่งปนเปื้อนในปุ๋ยหมักมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดไว้ โดยปริมาณหิน กรวด และทรายที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5

โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) สารหนู (As) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) มีปริมาณไม่เกิน 2, 5, 50, 300, 500 และ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และไม่พบพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ ปะปนอยู่ในปุ๋ยหมักเช่นเดียวกัน

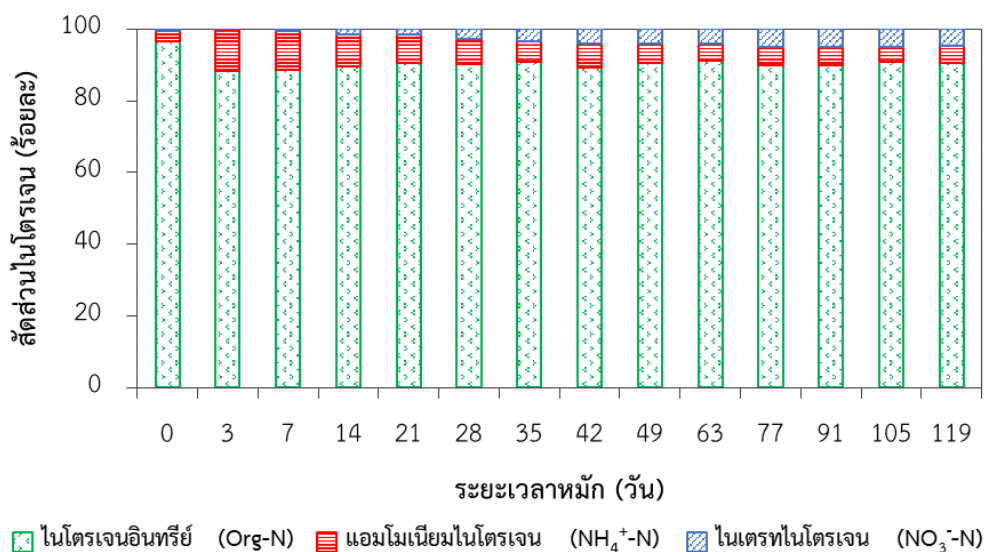
จากการประเมินคุณลักษณะของปุ๋ยหมักตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร ได้แก่ ความชื้น ค่าความเป็นกรด - ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม พบว่าปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป และมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มีเพียงค่าการนำไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานถึงวันที่ 63 หลังจากนั้นในวันที่ 77 - 119 ค่าการนำไฟฟ้าเกินเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อยอาจส่งผลให้ดินเค็มได้จึงควรใช้ปุ๋ยหมักในปริมาณน้อย

4.2 สัดส่วนไนโตรเจนตลอดกระบวนการหมัก

ไนโตรเจนในปุ๋ยหมักประกอบด้วยไนโตรเจนอินทรีย์และไนโตรเจนรูปแบบที่นำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน จากการศึกษาปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรนี้ พบว่าสัดส่วนไนโตรเจนอินทรีย์เป็นรูปแบบที่พบมากที่สุดตลอดกระบวนการหมักอยู่ในช่วงร้อยละ 88.26 - 96.54 และสัดส่วนรูปแบบไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์มีค่าอยู่ในช่วง 0.05 - 11.69 ซึ่งแบ่งเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจน โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 2.75 - 11.69 และไนเตรทไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05 - 4.96 ดังภาพที่ 4.6 มีสัดส่วนเฉลี่ยที่พบเรียงตามลำดับดังนี้



ร้อยละ 90.48 >> 6.52 > 3.00



ภาพที่ 4.6 สัดส่วนของไนโตรเจนทั้งหมด ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO₃⁻-N)

ซึ่งสัดส่วนไนโตรเจนอินทรีย์ที่พบมากนี้มักพบในการหมักปุ๋ยมูลสัตว์ เช่น การหมักปุ๋ยมูลโคผสมกับฟางข้าวของ Ren et al. (2019) ที่พบสัดส่วนไนโตรเจนอินทรีย์ตลอดกระบวนการหมักมากกว่าร้อยละ 80 และการหมักปุ๋ยมูลไก่ของ Pan et al. (2022) พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์สูงมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งมีอินทรีย์วัตถุที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญทำให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปุ๋ยหมักที่มีพืชเป็นองค์ประกอบ เช่น วัตถุดิบที่มาจากขี้เลื่อย ถ่านชีวภาพจากเปลือกไม้ ไม้ไผ่ และกากมะพร้าว ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูงมากกว่า 100 ขึ้นไป (Chen et al., 2017)

สัดส่วนที่พบรองลงมา ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจนพบปริมาณสัดส่วนสูงที่สุดในวันที่ 3 – 7 จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงขณะที่สัดส่วนของไนเตรทไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจนและปลดปล่อยปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนออกมามากในช่วงระยะอุณหภูมิสูงสอดคล้องกับการศึกษาของ Sun et al. (2019) ที่พบว่ามีปริมาณสัดส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนมากที่สุดในช่วงวันที่ 4 – 7 ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดเช่นกัน ขณะที่สัดส่วนของไนเตรทไนโตรเจนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของแอมโมเนียมไนโตรเจนค่อย ๆ ลดลงในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักด้วย

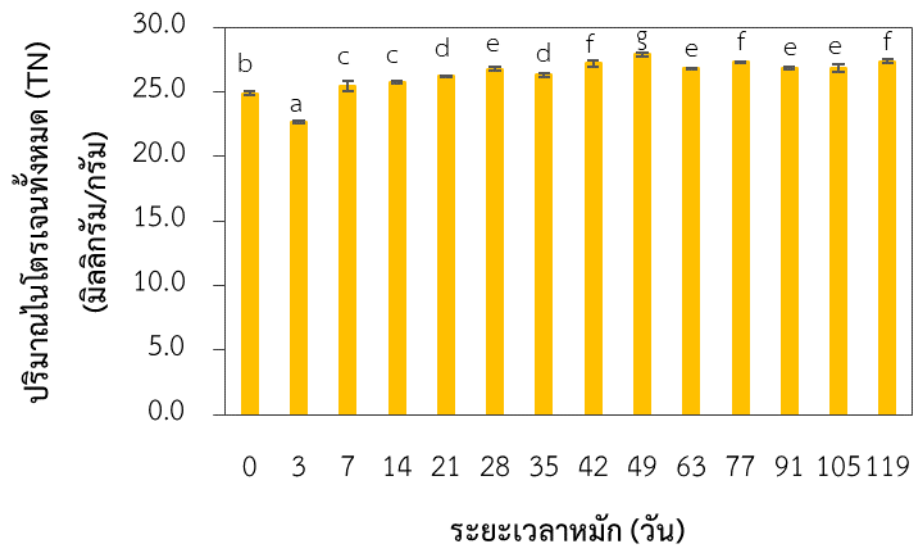
ดังนั้นไนโตรเจนอินทรีย์ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนมีการเปลี่ยนรูปซึ่งกันและกันในระหว่างกระบวนการหมัก ปริมาณรูปแบบที่พบและความสัมพันธ์เชิงปริมาณกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด – ด่าง ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของไนโตรเจนตลอดกระบวนการหมัก

ไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยหมักมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไนโตรเจนอินทรีย์ที่เป็นรูปแบบที่พืชไม่สามารถดูดซึมนำไปใช้งานได้ จึงต้องเปลี่ยนรูปเป็นไนโตรเจนอนินทรีย์รูปแบบที่เป็นประโยชน์ที่พืชสามารถนำไปใช้งานได้ก่อน โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์เปลี่ยนรูปไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนในที่สุด ซึ่งอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในแต่ละช่วงที่แตกต่างกันเป็นผลให้ไนโตรเจนทั้ง 3 รูปแบบเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีปริมาณแตกต่างกันในแต่ละช่วงระยะเวลาการหมัก โดยการศึกษาเพื่อประเมินรูปแบบของไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดจนศักยภาพที่จะปลดปล่อยรูปแบบที่พืชนำไปใช้ได้จะนำไปสู่การกำหนดระยะเวลาในการเลือกใช้ปุ๋ยและการเก็บรักษาที่ยังคงมีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพออันจะเป็นประโยชน์ในการจัดการปุ๋ยในเชิงคุณภาพในอนาคตได้ต่อไป มีรายละเอียดปริมาณและรูปแบบของไนโตรเจน ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ และไนโตรเจนอนินทรีย์ดังนี้

4.3.1 ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen; TN)

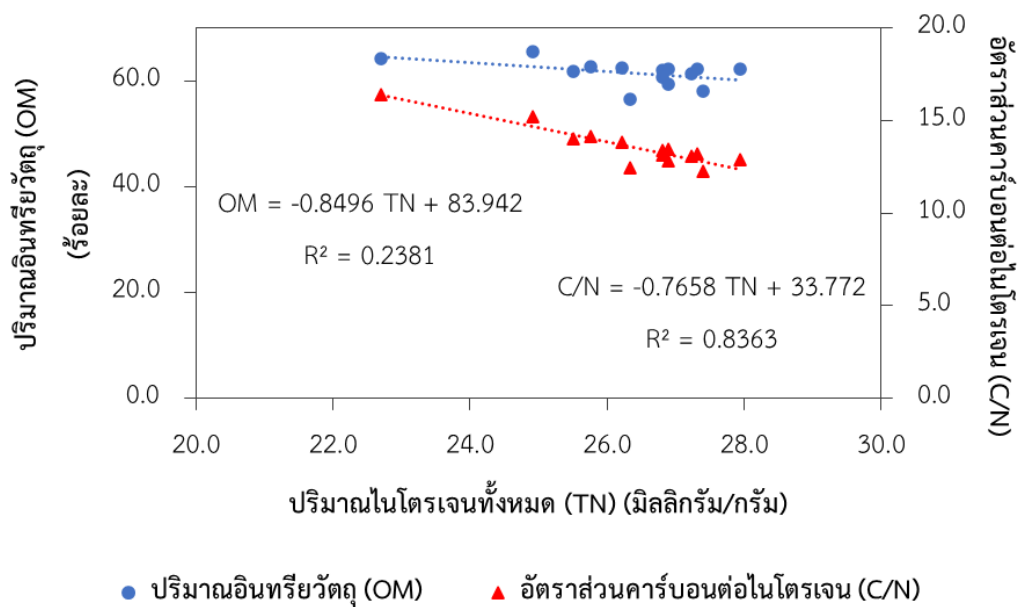
จากการศึกษาพบว่าตลอดกระบวนการหมักปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = 0.655$, $p < 0.01$) มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 22.71 – 27.95 มิลลิกรัม/กรัม โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปุ๋ยพัฒนาเต็มที่และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 49 เท่ากับ 27.95 มิลลิกรัม/กรัม (ภาพที่ 4.7) ซึ่งมีปริมาณที่ค่อนข้างสูงจากองค์ประกอบมูลสัตว์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Dias et al., 2010; Hwang et al., 2020; Zhang et al., 2016) ปริมาณที่มากเกินไปพอจะทำให้เกิดการย่อยอินทรีย์วัตถุอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($r = -0.435$ และ -0.894 , $p < 0.01$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ด้วยวิธี Duncan

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

หมายเหตุ. ค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และ

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.435$ และ -0.894 , $p < 0.01$ ตามลำดับ)

ในการจัดกลุ่มเชิงเปรียบเทียบปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Duncan จากภาพที่ 4.7 จะสามารถแบ่งกลุ่มเรียงลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้

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

จะเห็นว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดกลุ่มที่มีปริมาณน้อยจะได้แก่ช่วงแรกของการหมักที่เป็นระยะอนุภูมิภาคสูงวันที่ 0 – 14 โดยจัดอยู่ในกลุ่ม a – c และเมื่อปุ๋ยหมักเย็นตัวลงตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไปปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจะจัดอยู่ในกลุ่ม d – g ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณมากแสดงให้เห็นถึงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาในการหมักที่เพิ่มขึ้นดังกล่าว

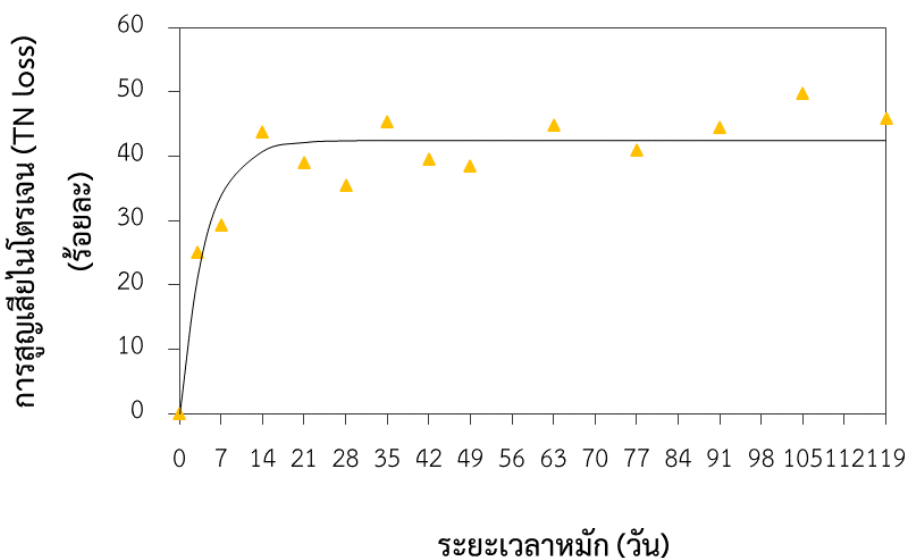
สำหรับการสูญเสียปริมาณไนโตรเจนเป็นไปตามสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งดังสมการที่ 4.4 โดยมีอัตราการย่อยสลายร้อยละ 0.230 ต่อวัน และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะอนุภูมิภาคสูงคือช่วง 14 วันแรกของการหมักเช่นกันดังภาพที่ 4.9 ซึ่งบางส่วนมาจากการสูญเสียในรูปแก๊สแอมโมเนีย โดยเฉพาะปุ๋ยที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างสูงกว่า 8 (Tong et al., 2019) ที่พบว่าค่าความเป็นกรด – ด่าง ช่วงแรกค่อนข้างสูงถึง 8.84 ในวันที่ 3 ของกระบวนการหมักจากนั้นค่าความเป็นกรด – ด่างจะมีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่า 8 ในวันที่ 42 อย่างไรก็ตามการสูญเสียไนโตรเจนสูงที่สุดเฉลี่ยตั้งแต่วันที่ 21 เป็นต้นไปมีค่าร้อยละ 42.6 ซึ่งน้อยกว่าการสูญเสียปริมาณอินทรีย์วัตถุในช่วงเวลาเดียวกันที่มีค่าสูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 47.5 (สมการที่ 4.3) แสดงให้เห็นถึงปริมาณไนโตรเจนคงเหลือที่เพียงพอ โดยยังคงเหลือปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักร้อยละ 57.4 เมื่อเทียบกับปริมาณตั้งต้น คิดเป็นปริมาณร้อยละ 2.6 – 2.8 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดให้ต้องมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 1.0 และในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่นี้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงและมีค่าอยู่ในช่วง 12.29 – 14.13 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดสารฮิวมิคที่เสถียร (Tan, 2003)

$$\text{TN loss (\%)} = 42.545 (\pm 1.312) (1 - e^{-0.230 (\pm 0.050)t}) \quad (4.4)$$

Residual mean square = 17.6914, F = 105.3234, P < 0.01

โดย TN loss คือ อัตราการสูญเสียไนโตรเจน (ร้อยละ)

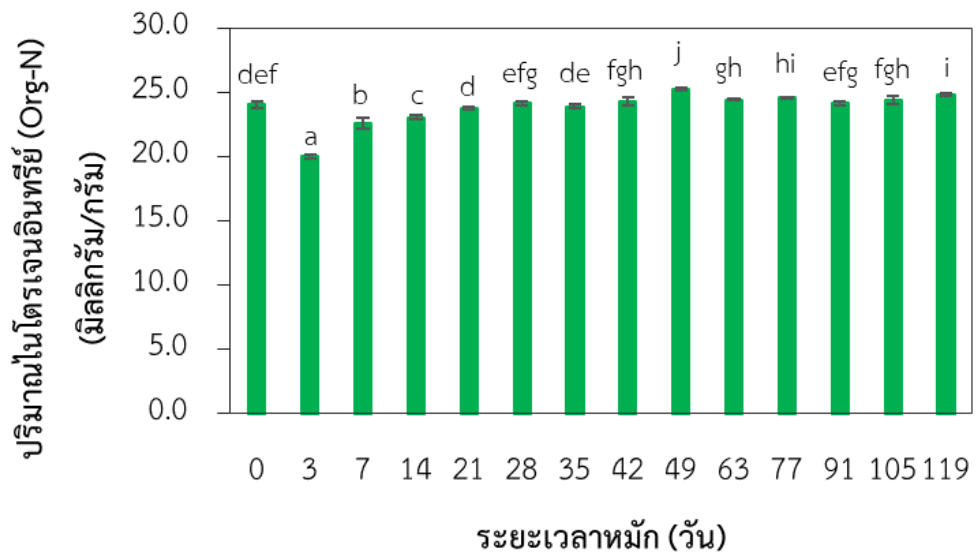
t คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)



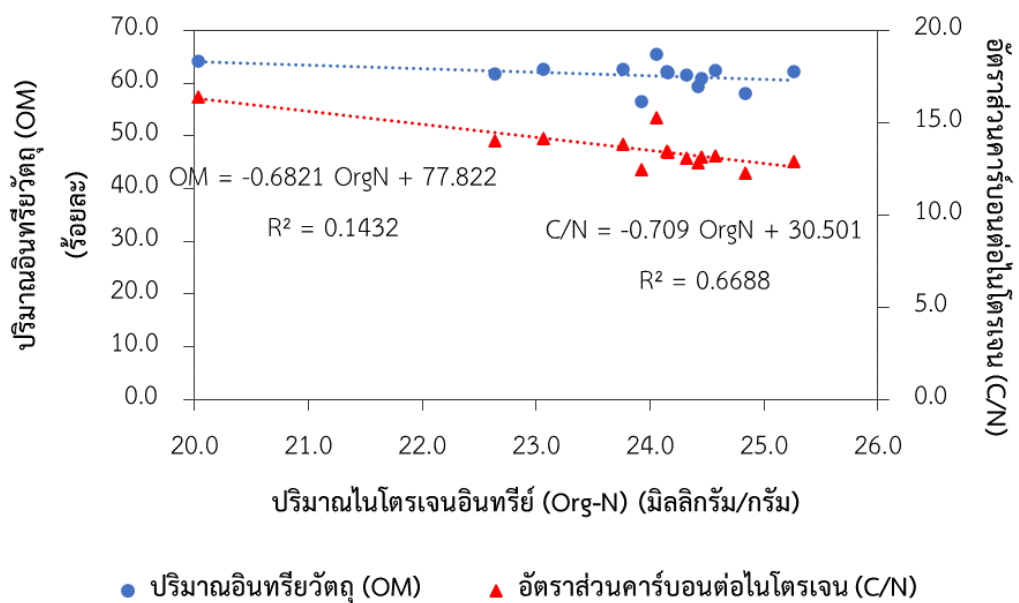
ภาพที่ 4.9 การสูญเสียไนโตรเจน (TN loss) ตลอดกระบวนการหมัก

4.3.2 ไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic nitrogen; Org-N)

ไนโตรเจนอินทรีย์เป็นรูปแบบที่พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักมากกว่าร้อยละ 88 ของไนโตรเจนทั้งหมดและมีบทบาทสำคัญในการกำหนดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยหมัก ซึ่งเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.577$, $p < 0.01$) โดยปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจะมีอิทธิพลต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.927$, $p < 0.01$) ซึ่งแนวโน้มของปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นนี้สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ($r = 0.577$, $p < 0.01$) โดยพบว่าตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 20.04 – 25.26 มิลลิกรัม/กรัม และมีปริมาณมากที่สุดในวันที่ 49 เท่ากับ 25.26 มิลลิกรัม/กรัม (ภาพที่ 4.10) จากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยากโดยจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักผ่านกระบวนการมิเนอราไลเซชันทำให้อินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายเปลี่ยนรูปเป็นไนโตรเจนอินทรีย์ (Johnson et al., 2005) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลง ($r = -0.333$, $p < 0.05$ และ -0.798 , $p < 0.01$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) ด้วยวิธี Duncan อักษร a, b, c, d, e, f, g, h, i และ j หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.333$, $p < 0.05$ และ -0.798 , $p < 0.01$ ตามลำดับ)

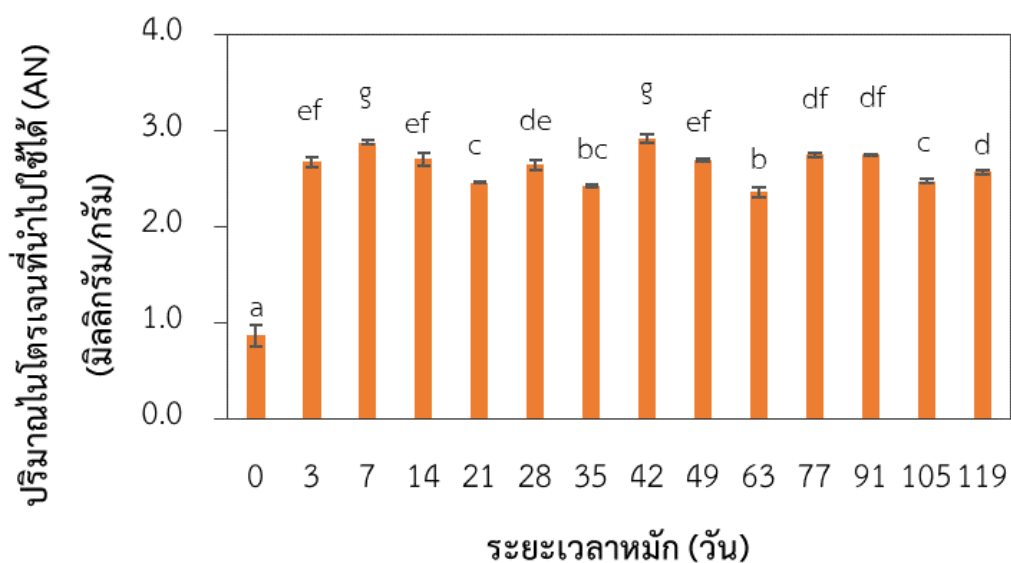
ในการจัดกลุ่มเปรียบเทียบไนโตรเจนอินทรีย์เชิงปริมาณด้วยวิธี Duncan จากภาพที่ 4.10 สามารถแบ่งเป็นกลุ่มเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้

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

จะเห็นได้ว่ากลุ่มที่มีปริมาณน้อยจะได้แก่ช่วงที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิสูงวันที่ 3 – 14 โดยอยู่ในกลุ่ม a – c และเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ช่วงที่พัฒนาเต็มที่ตั้งแต่ 28 เป็นต้นไป ปริมาณของอินทรีย์ไนโตรเจนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงที่สุดในวันที่ 49 ซึ่งสูงกว่าวันเริ่มผสม โดยช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่นี้จะอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณมากที่สุดตั้งแต่กลุ่ม e – j ซึ่งแม้พบว่าวัตถุดิบตั้งต้นในวันที่ 0 มีปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่ตรวจวัดได้อยู่ในกลุ่ม def แต่ยังไม่อยู่ในรูปที่พร้อมจะนำไปใช้ประโยชน์ต้องถูกย่อยสลายก่อนจึงจะนำไปใช้ได้

4.3.3 ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (Available nitrogen; AN)

ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ประกอบด้วยแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนเป็นรูปแบบที่พบน้อยที่สุดโดยมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 12 ของไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยหมักจึงไม่มีบทบาทที่สำคัญกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากนัก ($p > 0.05$) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.86 – 2.91 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่พบนี้ค่อนข้างแปรปรวนตลอดกระบวนการหมัก แม้จะมีแนวโน้มว่ากระบวนการย่อยสลายจะช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้โดยมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42 เท่ากับ 2.91 มิลลิกรัม/กรัม (ภาพที่ 4.12)

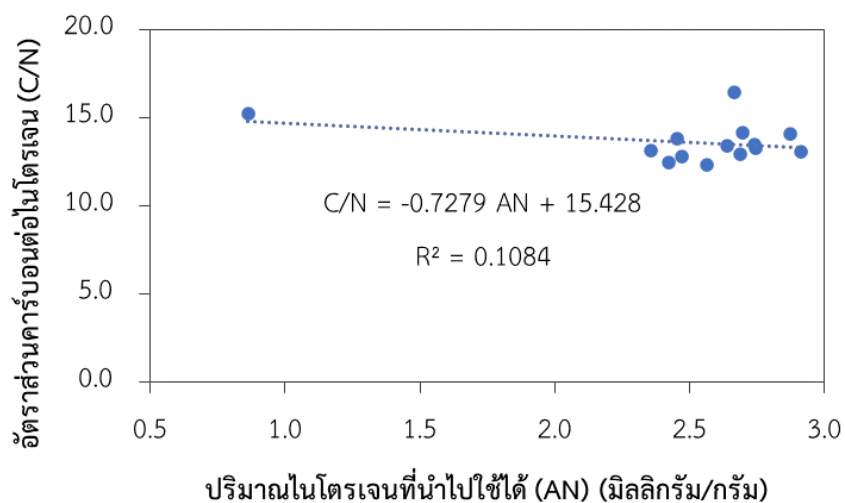


ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ด้วยวิธี Duncan

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

หมายเหตุ. ค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)

โดยไนโตรเจนอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้เพื่อเป็นอาหารและใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เรียกว่าอิมมوبิไลเซชัน (Immobilization) (สมการที่ 2.6 บทที่ 2) (Bao et al., 2021; Wong et al., 2017) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้รูปแอมโมเนียมไนโตรเจนบางส่วนจะหายไปจากการระเหยโดยเฉพาะในช่วงระยะอุณหภูมิสูง (Ma et al., 2022) และทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้มีความแปรปรวนดังกล่าว อย่างไรก็ตามการหมักยังส่งผลต่อปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ที่เพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.321$, $p < 0.05$) ดังภาพที่ 4.13 โดยปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้นี้ตั้งแต่ช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไปมีค่าอยู่ในช่วง 2.35 – 2.91 มิลลิกรัม/กรัม ที่สูงกว่าวันที่เริ่มผสม 2.7 – 3.4 เท่า นอกจากนี้ปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักยังสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ($r = 0.404$, $p < 0.01$) จากประจุของแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบ



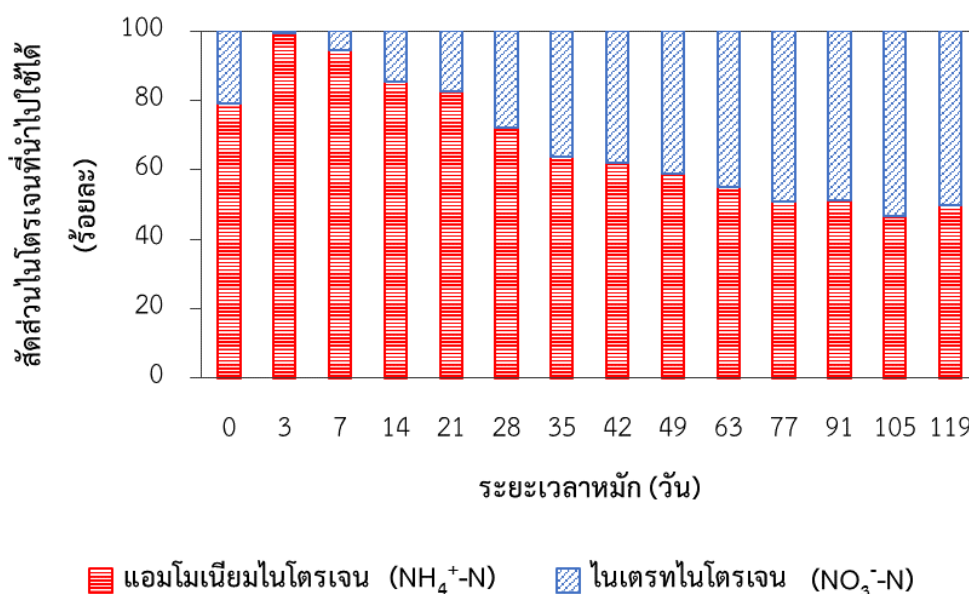
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = -0.321$, $p < 0.05$)

เมื่อจัดกลุ่มเรียงลำดับไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้เชิงปริมาณด้วยวิธี Duncan จากมากไปหาน้อย (ภาพที่ 4.12) ได้ดังนี้

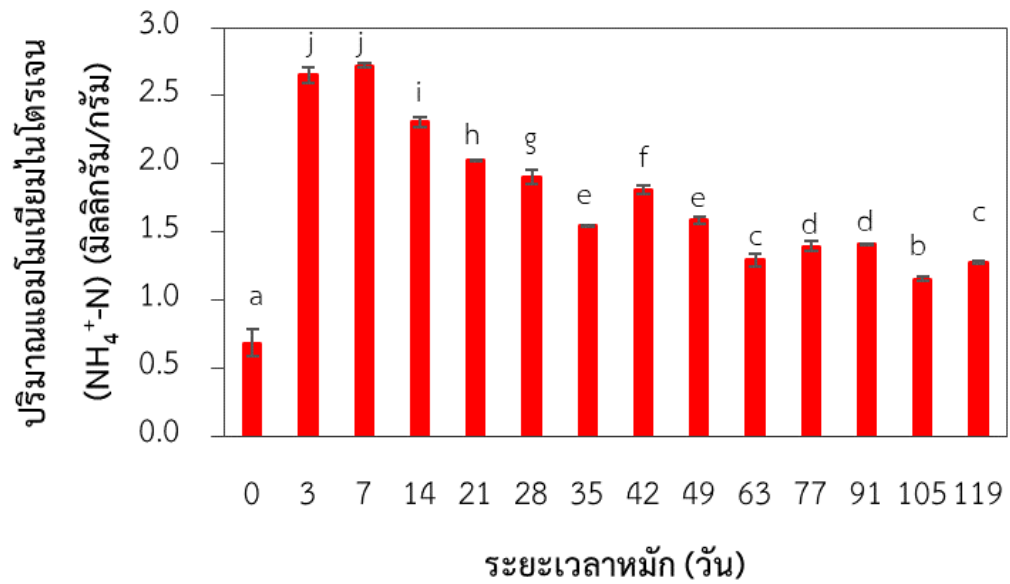
ปริมาณน้อยที่สุด	กลุ่ม a	วันที่ 0
	กลุ่ม b	วันที่ 35 และ 63
	กลุ่ม c	วันที่ 21, 35 และ 105
	กลุ่ม d	วันที่ 28 และ 119
	กลุ่ม e	วันที่ 3, 14, 28 และ 49
	กลุ่ม f	วันที่ 3, 14, 49, 77 และ 91
ปริมาณมากที่สุด	กลุ่ม g	วันที่ 7 และ 42

กลุ่มที่มีปริมาณน้อยที่สุดกลุ่ม a เป็นวันที่เริ่มผสมจากนั้นปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นโดยมีความแปรปรวนในเชิงปริมาณดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปุ๋ยที่ยังไม่พัฒนาเต็มที่และปุ๋ยที่พัฒนาเต็มที่ จะกระจายอยู่ในกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยเชิงปริมาณที่สูงขึ้น ได้แก่ กลุ่ม b – g และวันที่ 42 ซึ่งเป็นช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ที่มีปริมาณสูงที่สุด ซึ่งถึงแม้ในวันที่ 7 จะมีปริมาณสูงเช่นเดียวกันแต่ยังอยู่ในช่วงที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิสูงและยังไม่พัฒนาเต็มที่จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้

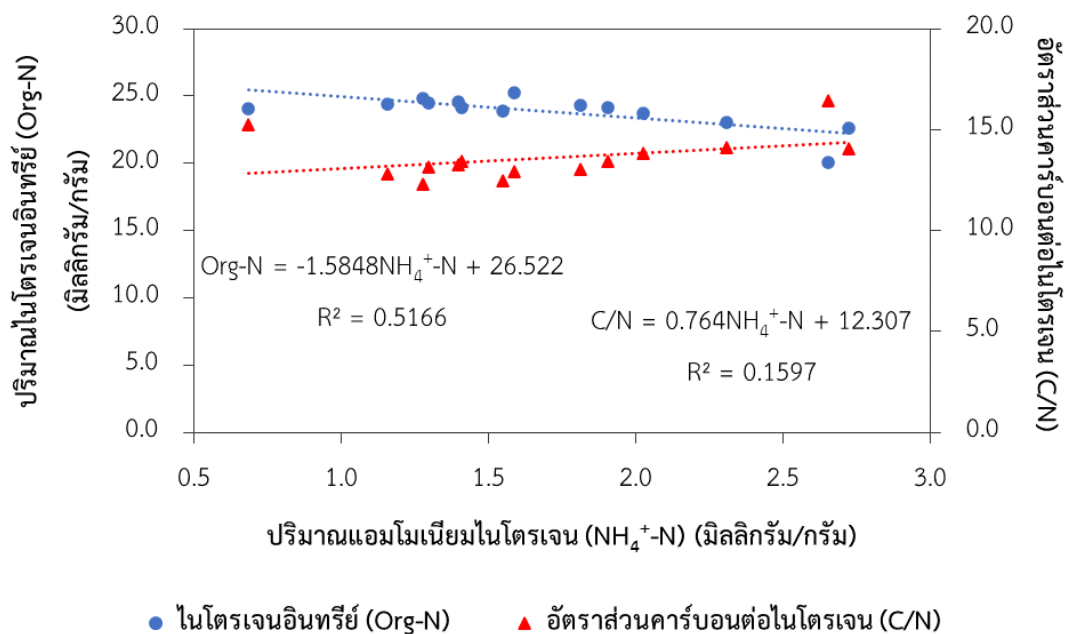
สำหรับสัดส่วนเชิงปริมาณของรูปแบบไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจน พบว่ามีสัดส่วนอยู่ในช่วงร้อยละ 46.79 – 99.54 และ 0.46 – 53.21 ของปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ตามลำดับ แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนดังภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะมีค่าสูงในวันเริ่มผสมถึงร้อยละ 79.3 จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นถึงร้อยละ 99.5 ในวันที่ 3 แสดงถึงแนวโน้มในการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนอินทรีย์เป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Chen et al., 2017) (สมการที่ 2.3 บทที่ 2) จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 105 มีค่าร้อยละ 46.8 ขณะที่ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนจะมีทิศทางตรงข้ามโดยมีปริมาณน้อยที่สุดในวันที่ 3 และมากที่สุดในวันที่ 105 ที่มีค่าร้อยละ 53.2 โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายต่อด้วยไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันและเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรทไนโตรเจน (สมการที่ 2.5 บทที่ 2) (Tong et al., 2019; Wong et al., 2017) และทำให้ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ลดลงนี้สัมพันธ์กับปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.945, p < 0.01$) ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.14 สัดส่วนของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO₃⁻-N)

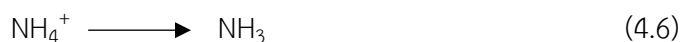


ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N) ด้วยวิธี Duncan อักษร a, b, c, d, e, f, g, h, i และ j หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (NH₄⁺-N) กับปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (r = -0.715 และ 0.394, p<0.01 ตามลำดับ)

อย่างไรก็ดีตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไปจะมีการลดลงของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนระหว่างกระบวนการหมัก ซึ่งเกิดจากการสูญเสียไนโตรเจนในรูปการระเหยของแก๊สแอมโมเนียออกสู่บรรยากาศซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด - ด่างสูงกว่า 8 (Tong et al., 2019) ดังสมการที่ 4.6



โดยปุ๋ยหมักมีค่าความเป็นกรด - ด่างสูงกว่า 8 ในช่วงอุณหภูมิสูงวันที่ 3 ไปจนถึงช่วงแรกของระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่วันที่ 35 จากนั้นค่าความเป็นกรด - ด่างจะลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างนี้สัมพันธ์กับปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.594, p < 0.01$) นอกจากนี้แอมโมเนียมไนโตรเจนยังเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการไนตริฟิเคชันที่จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรทไนโตรเจน ซึ่งมีผลให้ปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนลดลงโดยเฉพาะในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักได้ (สมการที่ 2.5 บทที่ 2 และภาพที่ 4.15) (Singh & Kalamdhad, 2014; Zhang et al., 2016) ดังนั้นการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุยังคงมีอิทธิพลสำคัญที่สัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียมไนโตรเจน โดยเมื่อปุ๋ยหมักเป็นระยะเวลาสั้นปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = 0.394, p < 0.01$) ดังภาพที่ 4.17

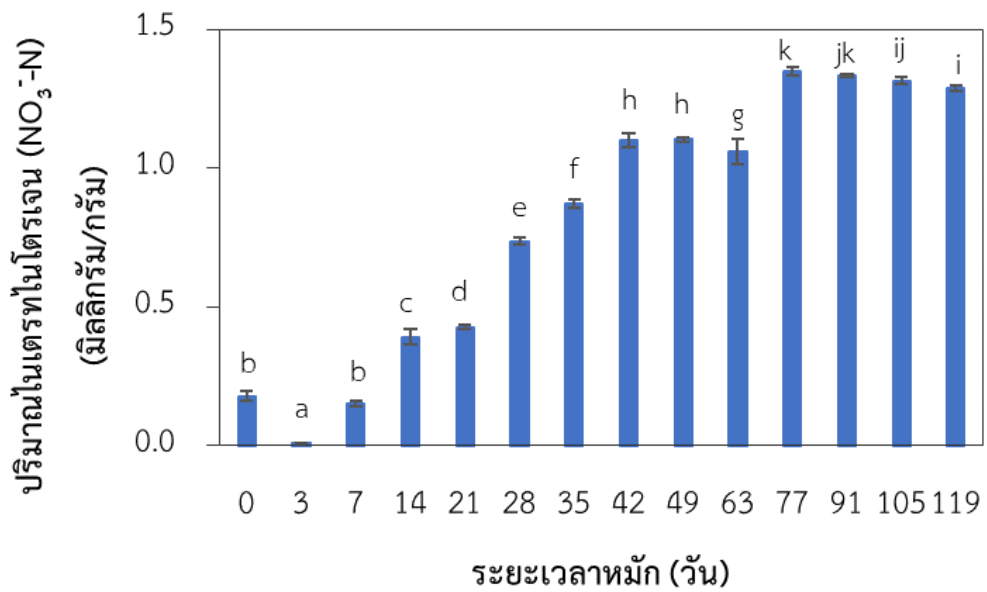
สำหรับการจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยวิธี Duncan จากภาพที่ 4.16 สามารถแบ่งกลุ่มเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้

ปริมาณน้อยที่สุด ↓ ปริมาณมากที่สุด	กลุ่ม a	วันที่ 0
	กลุ่ม b	วันที่ 105
	กลุ่ม c	วันที่ 63 และ 119
	กลุ่ม d	วันที่ 77 และ 91
	กลุ่ม e	วันที่ 35 และ 49
	กลุ่ม f	วันที่ 42
	กลุ่ม g	วันที่ 28
	กลุ่ม h	วันที่ 21
	กลุ่ม i	วันที่ 14
	กลุ่ม j	วันที่ 3 และ 7

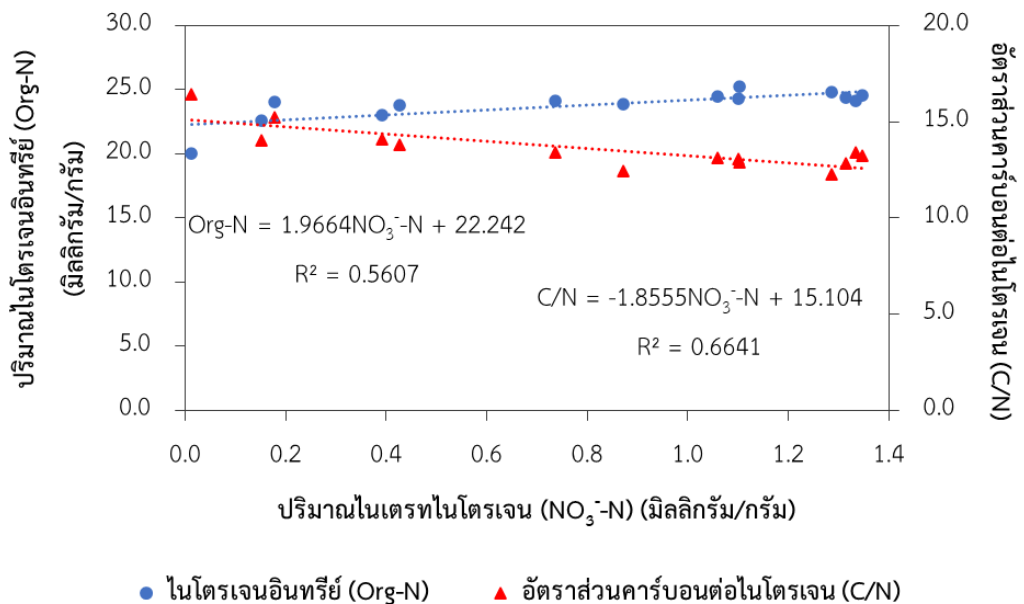
จะเห็นว่าแอมโมเนียมไนโตรเจนกลุ่มที่มีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วงวันที่ 3 – 7 ซึ่งอยู่ในกลุ่ม j และในช่วงวันที่ 14 – 21 เป็นกลุ่มที่มีค่าสูงรองลงมาซึ่งอยู่ในกลุ่ม g – h และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ หลังวันที่ 28 เป็นต้นไปโดยอยู่ในกลุ่ม b – f แสดงถึงการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมไนโตรเจนที่สัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณไนเตรทไนโตรเจนดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (ภาพที่ 4.15)

4.3.3.2 ไนเตรทไนโตรเจน (Nitrate nitrogen; NO_3^- -N)

ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 - 1.35 มิลลิกรัม/กรัม โดยกลุ่มที่มีค่าสูงจะพบตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป ซึ่งอยู่ในระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.3 – 1.4 มิลลิกรัม/กรัม (ภาพที่ 4.18) ปริมาณของไนเตรทไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นนี้สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.899$, $p < 0.01$) เมื่ออุณหภูมิของปุ๋ยหมักค่อย ๆ ลดลงหลังอุณหภูมิสูงและมีออกซิเจนที่เพียงพอจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟอิง ได้แก่ Nitrosomonas และ Nitrobacter จะทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนเตรทและไนเตรทไนโตรเจน ตามลำดับเรียกว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน (สมการที่ 2.4 และ 2.5 บทที่ 2) ซึ่งกระบวนการย่อยสลายนี้ทำให้ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนลดลงสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) (ภาพที่ 4.15) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนยังสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.921$, $p < 0.01$) แสดงถึงปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่เป็นไอออนประจุลบเพิ่มมากขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักสอดคล้องกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่บ่งบอกการย่อยสลายของปุ๋ยหมักที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญด้วย ($r = -0.801$, $p < 0.01$) นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนอินทรีย์จากกระบวนการหมักมีอิทธิพลต่อการเพิ่มปริมาณไนเตรทไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.740$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการย่อยสลายที่ช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรทไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้ไนที่สุด



ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) ด้วยวิธี Duncan อักษร a, b, c, d, e, f, g, h, i, j และ k หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อน หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD)



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) กับปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ($r = 0.740$ และ -0.801 , $p < 0.01$ ตามลำดับ)

สำหรับการจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณของไนเตรทไนโตรเจนด้วยวิธี Duncan จากภาพที่ 4.18 จะสามารถแบ่งกลุ่มเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้

ปริมาณน้อยที่สุด	กลุ่ม a	วันที่ 3
	กลุ่ม b	วันที่ 0 และ 7
	กลุ่ม c	วันที่ 14
	กลุ่ม d	วันที่ 21
	กลุ่ม e	วันที่ 28
	กลุ่ม f	วันที่ 35
	กลุ่ม g	วันที่ 63
	กลุ่ม h	วันที่ 42 และ 49
	กลุ่ม i	วันที่ 105 และ 119
	กลุ่ม j	วันที่ 91 และ 105
ปริมาณมากที่สุด	กลุ่ม k	วันที่ 77 และ 91

จะเห็นว่าไนเตรทไนโตรเจนกลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุดจัดอยู่ในกลุ่ม a – d อยู่ในช่วงวันที่ 3 – 21 ซึ่งเป็นระยะที่ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูง จากนั้นกลุ่ม e – g ที่มีค่าสูงปานกลางจะกระจายอยู่ในช่วงวันที่ 28 – 63 และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าสูง h – k ในช่วงวันที่ 42 – 119 โดยมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 77 – 105 ซึ่งเป็นช่วงที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่อุณหภูมิลดลงด้วยธาตุอาหารไนเตรทไนโตรเจนเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์

4.3.3.3 อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$)

อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนหรือดัชนีไนตริฟิเคชัน (Nitrification index) เป็นดัชนีที่สามารถใช้ในการประเมินการพัฒนาเต็มที่ของปุ๋ยหมักซึ่งเป็นการพิจารณาในเชิงปริมาณธาตุอาหารของพืช โดยอัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนมีค่าสูงกว่า 3 แสดงถึงปุ๋ยหมักยังไม่เสถียรหรือยังไม่พัฒนาเต็มที่ หากมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 3 แสดงถึงปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ และต่ำกว่า 0.5 ปุ๋ยหมักมีการพัฒนาเต็มที่และมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Zhang et al., 2016)

ในการศึกษานี้พบว่าช่วงแรกของการหมักซึ่งอยู่ในช่วงระยะอุณหภูมิสูง ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะมีปริมาณสูงชันอย่างรวดเร็วและลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ปริมาณ

ไนเตรทไนโตรเจนจะมีทิศทางตรงข้ามกันโดยมีปริมาณค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงในช่วงท้าย ๆ ของการหมักโดยบ่งชี้ว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีทำให้อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนลดลง โดยมีค่าต่ำกว่า 3 ตั้งแต่วันที่ 28 เป็นต้นไป ดังตารางที่ 4.2 แสดงถึงระยะนี้ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่และมีธาตุอาหารไนเตรทไนโตรเจนในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ปริมาณสูงเหมาะแก่การนำไปใช้

ตารางที่ 4.2

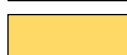
อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน (NH_4^+-N/NO_3^-N) ของปุ๋ยหมัก

วันที่	อัตราส่วนแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจน หรือดัชนีไนตริฟิเคชัน (Nitrification index)	
0	3.82	
3	214.50	
7	17.90	
14	5.90	
21	4.76	
28	2.58	
35	1.77	
42	1.65	
49	1.44	
63	1.22	
77	1.04	
91	1.05	
105	0.88	
119	0.99	

หมายเหตุ.



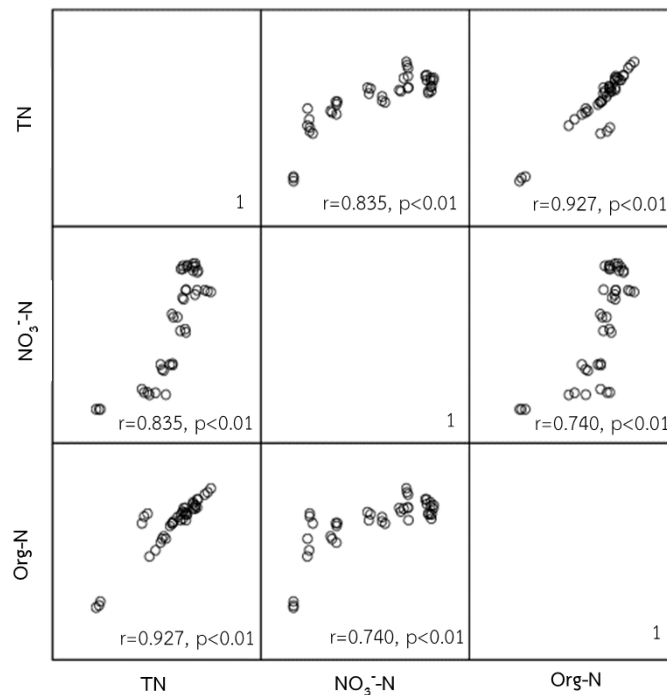
ดัชนีไนตริฟิเคชัน >3 ปุ๋ยหมักยังไม่พัฒนาเต็มที่



ดัชนีไนตริฟิเคชัน <3 ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่เหมาะแก่การนำไปใช้

4.4 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N)

ไนโตรเจนทั้งหมดเป็นดัชนีในที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักตามที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ซึ่งต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะปลดปล่อยให้แก่พืช ขณะที่ไนโตรเจนอินทรีย์จะบ่งบอกถึงกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก โดยกิจกรรมการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ที่เพียงพอต่อการที่จุลินทรีย์นำไปใช้และย่อยสลายเปลี่ยนเป็นไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นรูปแบบที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากการศึกษาพบว่าไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ และไนเตรทไนโตรเจนมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันโดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมัก ($p < 0.01$) และมีปริมาณสูงในช่วงท้าย ๆ ของการหมักซึ่งเป็นระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่พร้อมนำไปใช้งาน นอกจากนี้พบว่าไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ และไนเตรทไนโตรเจนยังมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันโดยไนโตรเจนอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายจะมีอิทธิพลต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น รวมถึงปริมาณไนเตรทไนโตรเจนซึ่งเป็นรูปแบบที่พืชนำไปใช้ได้จะถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นเช่นกันแสดงถึงความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N)

4.5 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการหมักต่อรูปแบบของไนโตรเจน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลในกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของไนโตรเจนในปุ๋ยหมักด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) โดยวิธี stepwise พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไนโตรเจนทั้งหมดและไนโตรเจนอินทรีย์ (สมการที่ 4.7 และ 4.8) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดลงในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและไนโตรเจนอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงอินทรีย์วัตถุถูกย่อยสลายและปลดปล่อยไนโตรเจนออกมา นอกจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแล้วปัจจัยทางกายภาพอื่น ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ความชื้นสามารถใช้พยากรณ์การเกิดรูปแบบต่าง ๆ ของไนโตรเจนได้เช่นกันดังสมการที่ 4.8 - 4.11 เช่นไนโตรเจนอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงและแอมโมเนียมไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง

$$\text{TN} = 40.713 - 1.057\text{C/N} \quad R^2 = 0.799 \quad (4.7)$$

$$\text{Org-N} = 35.578 - 0.075\text{Temp} - 0.796\text{pH} - 0.227\text{C/N} \quad R^2 = 0.904 \quad (4.8)$$

$$\text{AN} = 2.313 - 0.047\text{Moi} + 0.042\text{Temp} \quad R^2 = 0.669 \quad (4.9)$$

$$\text{NH}_4^+\text{-N} = 3.130 + 0.034\text{Temp} - 0.060\text{Moi} - 0.660\text{EC} + 0.291\text{pH} \quad R^2 = 0.752 \quad (4.10)$$

$$\text{NO}_3^-\text{-N} = 0.272 + 0.438\text{EC} - 0.212\text{pH} \quad R^2 = 0.903 \quad (4.11)$$

จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักสามารถใช้ทำนายปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและรูปแบบไนโตรเจนต่าง ๆ ได้ค่อนข้างดีโดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนสามารถทำนายได้ถูกต้องถึงร้อยละ 79.9, 90.4, 66.9, 75.2 และ 90.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักจากปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว อันจะเป็นประโยชน์ในการจัดการปุ๋ยหมักได้ในอนาคตต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจน ได้แก่ ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) และไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) และไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) รวมถึงอิทธิพลของรูปแบบดังกล่าวที่มีผลต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) โดยปุ๋ยหมักที่ศึกษาประกอบด้วยมูลสุกร มูลโค กากน้ำตาล รำละเอียด น้ำหมักปลา และมูลค่างควา ในสัดส่วนร้อยละ 53.89, 37.50, 3.43, 3.15, 1.14 และ 0.94 ตามลำดับ ทำการหมักเป็นระยะเวลา 4 เดือน เก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 จากนั้นนำมาศึกษาคุณลักษณะของปุ๋ยหมักที่ช่วงอายุต่าง ๆ เทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรเพื่อประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้หรือจำหน่าย รวมถึงปริมาณของธาตุอาหารไนโตรเจนที่พืชจะนำไปใช้ได้และระยะเวลาในการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่ปุ๋ยยังคงมีธาตุอาหารเพียงพอ

ปุ๋ยหมักแบ่งตามช่วงอุณหภูมิ (Temperature) ได้ 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) วันที่ 0 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) ช่วงวันที่ 1 – 13 และระยะที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ (Mature phase) ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป โดยกระบวนการหมักทำให้อุณหภูมิในกองปุ๋ยเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วถึง 62 องศาเซลเซียส ในระยะอุณหภูมิสูงนี้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยากเปลี่ยนเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความเสถียรมากขึ้น จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่เนื้อปุ๋ยจะมีลักษณะสีดำ นุ่ม ยุ่ย และมีกลิ่นด้วยอินทรีย์วัตถุที่เสถียร เช่น สารฮิวมิค ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) พบว่าจะค่อย ๆ ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายนดังกล่าวสอดคล้องกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.515, p < 0.01$) โดยมีการย่อยสลายสูงที่สุดตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป (ช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่) เฉลี่ยร้อยละ 47.5 ในอัตรา 0.154 ต่อวัน เช่นเดียวกับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.681, p < 0.01$) โดยเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ช่วงพัฒนาเต็มที่ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 58.06 – 62.75 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 12.29 – 14.13 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปุ๋ยเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพียงพอต่อการนำไปใช้

สำหรับการเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรในด้านอื่น ๆ ได้แก่ ความชื้น (Moisture) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณธาตุอาหารหลัก และปริมาณ หิน กรวด ทราย และโลหะหนัก พบว่าในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 – 63 ทุกดัชนีเชิงคุณภาพล้วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร (2557) อย่างไรก็ตามพบวันที่ 77, 105 และ 119 มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่ามาตรฐานจากการปลดปล่อย ปริมาณธาตุอาหารที่มีประจุ ดังนั้นการนำปุ๋ยไปใช้ในขณะนี้ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดินเค็ม

เมื่อพิจารณาสัดส่วนรูปแบบของไนโตรเจนที่พบในปุ๋ยหมัก พบว่าไนโตรเจนอินทรีย์เป็น สัดส่วนที่พบมากที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 90.48 ของไนโตรเจนทั้งหมด และมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นเชิง ปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดด้วย ($r = 0.927, p < 0.01$) ซึ่งกระบวนการหมักทำให้ปริมาณไนโตรเจน อินทรีย์ถูกปลดปล่อยออกมาสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.577, p < 0.01$) อย่างไรก็ตามกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนจากการย่อยสลายวัตถุอินทรีย์นี้บางส่วนอาจสูญเสียไป ในรูปแก๊สแอมโมเนียหรือการนำไปใช้โดยจุลินทรีย์มีอัตราการสูญเสียไนโตรเจนเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 0.230 ต่อวัน อย่างไรก็ตามในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ยังคงเหลือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 2.6 – 2.8 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้มีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 1.0

ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ ได้แก่ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนพบในอัตราส่วน ร้อยละ 6.52 และ 3.00 ของไนโตรเจนทั้งหมด ตามลำดับ โดยในระยะอุณหภูมิสูงกระบวนการหมัก จะย่อยสลายวัตถุอินทรีย์เกิดการปลดปล่อยแอมโมเนียมไนโตรเจนในระยะนี้ออกมามากมีค่าสูง ที่สุดในวันที่ 3 – 7 ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน จากนั้นปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนจะค่อย ๆ ลดลง ขณะที่ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักจาก กระบวนการไนตริฟิเคชันเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นไนเตรทไนโตรเจน ดังความสัมพันธ์เชิง ผกผันระหว่างรูปแบบทั้งสอง ($r = -0.945, p < 0.01$) โดยปริมาณไนเตรทไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้มี ค่าสูงที่สุดตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป มีค่าอยู่ในช่วง 1.3 – 1.4 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อพิจารณาดัชนี ไนตริฟิเคชัน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อไนเตรทไนโตรเจนที่ ใช้ในการประเมินการพัฒนาเต็มที่ของปุ๋ยหมักในเชิงปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนของพืช พบว่ามีค่า ต่ำกว่า 3 ตั้งแต่วันที่ 28 เป็นต้นไป แสดงถึงปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะที่พัฒนาเต็มที่ที่มีการปลดปล่อยไนเตรท ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

สำหรับอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการหมักต่อรูปแบบของไนโตรเจนโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธี stepwise พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานในการตรวจวัดของกรมวิชาการเกษตรสามารถใช้อธิบายไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ได้ดังนี้

$$\text{TN} = 40.713 - 1.057\text{C/N} \quad R^2 = 0.799$$

$$\text{Org-N} = 35.578 - 0.075\text{Temperature} - 0.796\text{pH} - 0.227\text{C/N} \quad R^2 = 0.904$$

$$\text{AN} = 2.313 - 0.047\text{Moisture} + 0.042\text{Temp} \quad R^2 = 0.669$$

$$\text{NH}_4^+\text{-N} = 3.130 + 0.034\text{Temperature} - 0.060\text{Moisture} - 0.660\text{EC} + 0.291\text{pH} \quad R^2 = 0.752$$

$$\text{NO}_3^-\text{-N} = 0.272 + 0.438\text{EC} - 0.212\text{pH} \quad R^2 = 0.903$$

โดยมีความถูกต้องในการอธิบายไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ แอมโมเนียมไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนถึงร้อยละ 79.9, 90.4, 66.9, 75.2 และ 90.3 ตามลำดับ จึงสามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการประเมินไนโตรเจนในปุ๋ยหมักจากพารามิเตอร์ดังกล่าวได้

สรุปได้ว่าในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 – 63 ซึ่งมีคุณลักษณะของปุ๋ยหมักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร จะมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนอินทรีย์ และไนเตรทไนโตรเจนที่มีค่าสูงในวันที่ 42 – 63 จากนั้นหากเก็บปุ๋ยหมักไว้นานกว่านี้ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานและอาจไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ในปริมาณมาก จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนโดยเฉพาะไนโตรเจนอินทรีย์ที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและไนเตรทไนโตรเจนในทิศทางเดียวกัน ($p < 0.01$) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ปุ๋ยหมักจะต้องควบคู่ไปกับการรู้เพราะหากเก็บปุ๋ยหมักนานกว่า 2 เดือน ปริมาณธาตุอาหารที่มีประจุจะยังคงถูกปลดปล่อยออกมาจากการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์กลุ่มอนุหมักปานกลางอย่างต่อเนื่อง และอาจทำให้เกิดปัญหาดินเค็มจากไอออนของธาตุอาหารดังกล่าวได้ ดังนั้นการจัดการที่ดีจึงต้องอาศัยองค์ความรู้ควบคู่ไปกับการตรวจพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

- Bao, Y., Feng, Y., Qiu, C., Zhang, J., Wang, Y., & Lin, X. (2021). Organic matter- and temperature-driven deterministic assembly processes govern bacterial community composition and functionality during manure composting. *Waste Manag*, 131, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.033>
- Bazrafshan, E., Zarei, a. a., Mostafapour, F., Poormollae, N., Mahmoodi, S., & Zazouli, M. (2016). Maturity and Stability Evaluation of Composted Municipal Solid Wastes. *Health Scope*, 5. <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-33202>
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Arrigo, N., & Palma, R. M. (2003). Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Biology and Fertility of Soils*, 37(3), 184-189. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0584-7>
- Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72(4), 551-557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.030>
- Chen, W., Liao, X., Wu, Y., Liang, J. B., Mi, J., Huang, J., Zhang, H., Wu, Y., Qiao, Z., Li, X., & Wang, Y. (2017). Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting. *Waste Management*, 61, 506-515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.014>
- Dias, B. O., Silva, C. A., Higashikawa, F. S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2010). Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*, 101(4), 1239-1246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.024>
- Do, T. T., Le, V. T., Ngo, C. C., Do, T. T. H., & Dang, T. H. P. (2021). Biological characteristics and classification of thermophilic actinomycetes showed extracellular hydrolytic enzymes producing ability isolated from compost

- [10.1051/e3sconf/202126504008]. *E3S Web Conf.*, 265. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126504008>
- Erickson, M. C., Liao, J., Ma, L., Jiang, X., & Doyle, M. P. (2014). Thermal and Nonthermal Factors Affecting Survival of Salmonella and Listeria monocytogenes in Animal Manure-Based Compost Mixtures. *Journal of Food Protection*, 77(9), 1512-1518. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-111>
- Ghaly, A., & Ramakrishnan, V. (2015). Nitrogen Sources and Cycling in the Ecosystem and its Role in Air, Water and Soil Pollution: A Critical Review. *Journal of Pollution Effects & Control*, 03. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000136>
- Hwang, H. Y., Kim, S. H., Kim, M. S., Park, S. J., & Lee, C. H. (2020). Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality. *Applied Biological Chemistry*, 63(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0483-8>
- Iwegbue, C. M. A., Egun, A. C., Emuh, F. N., & Isirimah, N. O. (2006). Compost Maturity Evaluation and its Significance to Agriculture. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9, 2933-2944. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2006.2933.2944>
- Jain, M. S., Jambhulkar, R., & Kalamdhad, A. S. (2018). Biochar amendment for batch composting of nitrogen rich organic waste: Effect on degradation kinetics, composting physics and nutritional properties. *Bioresource Technology*, 253, 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.038>
- Johnson, C., Albrecht, G., Ketterings, Q., Beckman, J., & Stockin, K. (2005). *Nitrogen Basics – The Nitrogen Cycle* <http://cceanondaga.org/resources/nitrogen-basics-the-nitrogen-cycle>
- Keena, M., Meehan, M., & Scherer, T. (2022). *Nitrogen Behavior in the Environment*. <https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/nitrogen-behavior-environment>
- Killpack, S. C., & Buchholz, D. (2020). *Nitrogen in the Environment: Nitrogen Fixation*. <https://extension.missouri.edu/publications/wq261>
- Kim, J., Diao, J., Shepherd Marion, W., Singh, R., Heringa Spencer, D., Gong, C., & Jiang, X. (2012). Validating Thermal Inactivation of Salmonella spp. in Fresh and Aged Chicken Litter. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(4), 1302-1307.

<https://doi.org/10.1128/AEM.06671-11>

- Latimer, G. W. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (19 ed.). AOAC International.
- Li, C., Li, H., Yao, T., Su, M., Ran, F., Han, B., Li, J., Lan, X., Zhang, Y., Yang, X., & Gun, S. (2019). Microbial inoculation influences bacterial community succession and physicochemical characteristics during pig manure composting with corn straw. *Bioresour. Technol.*, 289, 121653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121653>
- Los Alamos National Laboratory. (2016). *Periodic Table of the Elements*. <https://periodic.lanl.gov/7.shtml>
- Ma, Q., Li, Y., Xue, J., Cheng, D., & Li, Z. (2022). Effects of Turning Frequency on Ammonia Emission during the Composting of Chicken Manure and Soybean Straw. *Molecules*, 27(2).
- Meng, L., Li, W., Zhang, X., Zhao, Y., Chen, L., & Zhang, S. (2020). Influence of spent mushroom substrate and molasses amendment on nitrogen loss and humification in sewage sludge composting. *Heliyon*, 6(9), e04988. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04988>
- Ohyama, T. (2010). Nitrogen as a major essential element of plants. In (pp. 1-18).
- Pan, C., Zhang, G., Yang, Y., Chen, X., Wu, J., Wang, L., Wei, Z., & Kang, K. (2022). Identifying the role of fired clay minerals on reducing of nitrogen loss and immobilization of organic nitrogen during chicken manure composting. *Bioresour. Technol.*, 349, 126839. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126839>
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M. P., Sánchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biology and Fertility of Soils*, 32(3), 222-227. <https://doi.org/10.1007/s003740000239>
- Rastogi, M., Nandal, M., & Khosla, B. (2020). Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon*, 6(2), e03343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03343>
- Ren, X., Wang, Q., Awasthi, M. K., Zhao, J., Wang, J., Liu, T., Li, R., & Zhang, Z. (2019).

- Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission. *Bioresource Technology*, 286, 121377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121377>
- Seelig, B., & Nowatzki, J. (2017). *Water Quality and Nitrogen*.
- Singh, W. R., & Kalamdhad, A. S. (2014). Potential for composting of green phumdi biomass of Loktak lake. *Ecological Engineering*, 67, 119-126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.086>
- Sun, Y., Men, M., Xu, B., Meng, Q., Bello, A., Xu, X., & Huang, X. (2019). Assessing key microbial communities determining nitrogen transformation in composting of cow manure using illumina high-throughput sequencing. *Waste Management*, 92, 59-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.007>
- Tan, K. H. (2003). *Humic Matter in Soil and the Environment: Principle and Controversies*. Marcel Dekker.
- Tong, B., Wang, X., Wang, S., Ma, L., & Ma, W. (2019). Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods. *Bioresource Technology*, 293, 122046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122046>
- Trautmann, N., & Krasny, M. (2014). *Composting in the Classroom: Scientific Inquiry for High School Students*.
- Turner, C. (2002). The thermal inactivation of E. coli in straw and pig manure. *Bioresource Technology*, 84(1), 57-61. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00008-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00008-1)
- Walworth, J. (2013). *Nitrogen in Soil and the Environment* <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1591.pdf>
- Wong, J. W. C., Wang, X., & Selvam, A. (2017). 4 - Improving Compost Quality by Controlling Nitrogen Loss During Composting. In J. W. C. Wong, R. D. Tyagi, & A. Pandey (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 59-82). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00004-6>
- Yu, H., Xie, B., Khan, R., & Shen, G. (2019). The changes in carbon, nitrogen components

- and humic substances during organic-inorganic aerobic co-composting. *Bioresource Technology*, 271, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.088>
- Zhang, J., Chen, G., Sun, H., Zhou, S., & Zou, G. (2016). Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost. *Bioresource Technology*, 200, 876-883. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.016>
- Zhong, X. Z., Zeng, Y., Wang, S. P., Sun, Z. Y., Tang, Y. Q., & Kida, K. (2020). Insight into the microbiology of nitrogen cycle in the dairy manure composting process revealed by combining high-throughput sequencing and quantitative PCR. *Bioresource Technology*, 301, 122760. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122760>
- Zhou, J.-M. (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. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1233081>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). แนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่การออกแบบก่อสร้าง และการจัดการสถานที่จัดการขยะมูลฝอยโดยการหมักปุ๋ย (สารบำรุงดิน). บริษัท ธนสิริ ปรี้นต์ติ้ง จำกัด. <http://infofile.pcd.go.th/waste/Composting%20Edit%2062.pdf?CFID=1907185&CFTOKEN=22240574>
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2550). การผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้สารเร่งซูเปอร์ พด. 1 http://www.ldd.go.th/menu_Dataonline/G1/G1_13.pdf
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2551). การจัดการอินทรีย์วัตถุเพื่อปรับปรุงบำรุงดิน และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2563). การใช้ชุดตรวจสอบดินภาคสนาม (LDD Test Kit) วิเคราะห์ไนโตรเจน https://www.ddd.go.th/WEB_WorldSoilDay/Data/LDDtestkit.pdf
- กรมวิชาการเกษตร. (2557). ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. ๒๕๕๗ <https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2019/11/FEDOA11.pdf>
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์. (2547). ปุ๋ยหมัก ดินหมัก และปุ๋ยน้ำชีวภาพ: เพื่อการปรับปรุงดินโดยวิธีเกษตรธรรมชาติ. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ธงชัย มาลา. (2546). ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ : เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- นันทวัน ฤทธิเดช. (2556). ข้อควรพิจารณาก่อนทำปุ๋ยหมัก What Should We Consider Before Making Compost? วารสารวิทยาศาสตร์ มช., 41(3), 595-606.
- บัญชา รัตนีทุ. (2552). ปุ๋ยอินทรีย์ฟื้นฟูสภาพดิน. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 1(2). <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/53642>
- ปัทมา วิทยากร. (2559). Soil Fertility and Plant Nutrition ความอุดมสมบูรณ์ของดินและโภชนาการพืช. <https://ag2.kku.ac.th/eLearning/132351/Doc/132351%20Lec10%20N-59-1.pdf>
- ภัทรพร กังวานเจษฎา. (2555). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก ศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. (2560). ปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับปรับปรุง) *Organic fertilizer*. สำนักพิมพ์บ้านและสวน.
- สุพจน์ บุญแรง. (2562). วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกษตรอินทรีย์ เล่ม 1 ดิน จุลินทรีย์และชีวภัณฑ์. ส. การพิมพ์. <http://www.facagri.cmru.ac.th/2013/wp-content/uploads/2019/11/>
- โสฬส แซ่ลิ้ม. (2559). ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย Organic Fertilizer and Utilization in Thailand. http://www1.ldd.go.th/WEB_PSD/Employee%20Assessment/wean/pch/pch38/3.pdf
- อานัฐ ตันโซ. (2558). หลักการผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง ระดับอุตสาหกรรม. วารสารดินและปุ๋ย; Vol 37 No 1-4 (2558): มกราคม-ธันวาคม 2558. <https://kuojs.lib.ku.ac.th/index.php/tjsf/article/view/4410>



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ตารางที่ ก.1

ร้อยละของไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลา (วัน)	ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	ไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N)	ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้	
			แอมโมเนียม ไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)	ไนเตรท ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)
0	100.00	96.54	2.75	0.72
3	100.00	88.26	11.69	0.05
7	100.00	88.74	10.67	0.60
14	100.00	89.53	8.95	1.52
21	100.00	90.64	7.73	1.63
28	100.00	90.15	7.10	2.75
35	100.00	90.81	5.88	3.31
42	100.00	89.31	6.65	4.04
49	100.00	90.38	5.67	3.95
63	100.00	91.22	4.83	3.95
77	100.00	89.96	5.11	4.93
91	100.00	89.80	5.23	4.96
105	100.00	90.81	4.30	4.89
119	100.00	90.64	4.66	4.70

ตารางที่ ก.2

ปริมาณของไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลา (วัน)	ไนโตรเจน (มิลลิกรัม/กรัม ปุ๋ย) (dry weight)				สัดส่วน ไนโตรเจน ทั้งหมด/ น้ำหนักปุ๋ย (ร้อยละ)
	ไนโตรเจน อินทรีย์ (Org-N) ± ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	ไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้		รวมปริมาณ ไนโตรเจน ทั้งหมด (TN)	
		แอมโมเนียม ไนโตรเจน (NH_4^+ - N) ± ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	ไนเตรท ไนโตรเจน (NO_3^- - N) ± ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)		
0	24.05 ± 0.23	0.68 ± 0.10	0.18 ± 0.02	24.92	2.49
3	20.04 ± 0.14	2.65 ± 0.06	0.01 ± 0.00	22.71	2.27
7	22.64 ± 0.42	2.72 ± 0.02	0.15 ± 0.01	25.51	2.55
14	23.06 ± 0.15	2.31 ± 0.04	0.39 ± 0.03	25.76	2.58
21	23.76 ± 0.08	2.03 ± 0.01	0.43 ± 0.01	26.22	2.62
28	24.16 ± 0.20	1.90 ± 0.05	0.74 ± 0.01	26.80	2.68
35	23.92 ± 0.15	1.55 ± 0.00	0.87 ± 0.02	26.34	2.63
42	24.32 ± 0.33	1.81 ± 0.03	1.10 ± 0.02	27.23	2.72
49	25.26 ± 0.14	1.59 ± 0.02	1.10 ± 0.01	27.95	2.79
63	24.46 ± 0.10	1.29 ± 0.05	1.06 ± 0.04	26.81	2.68
77	24.57 ± 0.08	1.40 ± 0.04	1.35 ± 0.02	27.32	2.73
91	24.15 ± 0.12	1.41 ± 0.01	1.33 ± 0.01	26.89	2.69
105	24.42 ± 0.31	1.16 ± 0.01	1.31 ± 0.01	26.89	2.69
119	24.83 ± 0.12	1.28 ± 0.01	1.29 ± 0.01	27.40	2.74



ตารางที่ ข.1

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการหมักกับรูปแบบของ

ไนโตรเจน

		Day	Temp	pH	EC	Moisture	OM	TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	OrgN	AN	C/N
Day	Pearson Correlation	1	-.646**	-.289	.884**	-.730**	-.515**	.655**	-.534**	.899**	.577**	.254	-.681**
	Sig. (2-tailed)		.000	.063	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.105	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Temp	Pearson Correlation	-.646**	1	.535**	-.763**	.687**	.393*	-.858**	.640**	-.755**	-.889**	.008	.792**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.000	.010	.000	.000	.000	.000	.960	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
pH	Pearson Correlation	-.289	.535**	1	-.352*	.284	.080	-.658**	.594**	-.545**	-.741**	.159	.480**
	Sig. (2-tailed)	.063	.000		.022	.068	.613	.000	.000	.000	.000	.315	.001
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
EC	Pearson Correlation	.884**	-.763**	-.352*	1	-.916**	-.546**	.817**	-.422**	.921**	.686**	.404**	-.817**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.022		.000	.000	.000	.005	.000	.000	.008	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Moisture	Pearson Correlation	-.730**	.687**	.284	-.916**	1	.519**	-.760**	.168	-.809**	-.555**	-.589**	.770**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.068	.000		.000	.000	.287	.000	.000	.000	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
OM	Pearson Correlation	-.515**	.393*	.080	-.546**	.519**	1	-.435**	.164	-.503**	-.333*	-.298	.788**
	Sig. (2-tailed)	.000	.010	.613	.000	.000		.004	.299	.001	.031	.056	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
TN	Pearson Correlation	.655**	-.858**	-.658**	.817**	-.760**	-.435**	1	-.464**	.835**	.927**	.272	-.894**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000	.004		.002	.000	.000	.082	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
NH ₄ ⁺	Pearson Correlation	-.534**	.640**	.594**	-.422**	.168	.164	-.464**	1	-.569**	-.715**	.604**	.394**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.005	.287	.299	.002		.000	.000	.000	.010
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
NO ₃ ⁻	Pearson Correlation	.899**	-.755**	-.545**	.921**	-.809**	-.503**	.835**	-.569**	1	.740**	.312*	-.801**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000	.001	.000	.000		.000	.044	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
OrgN	Pearson Correlation	.577**	-.889**	-.741**	.686**	-.555**	-.333*	.927**	-.715**	.740**	1	-.109	-.798**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	.000	.000	.031	.000	.000	.000		.492	.000
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
AN	Pearson Correlation	.254	.008	.159	.404**	-.589**	-.298	.272	.604**	.312*	-.109	1	-.321*
	Sig. (2-tailed)	.105	.960	.315	.008	.000	.056	.082	.000	.044	.492		.038
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
C/N	Pearson Correlation	-.681**	.792**	.480**	-.817**	.770**	.788**	-.894**	.394**	-.801**	-.798**	-.321*	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.010	.000	.000	.038	
	N	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42

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

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

ตารางที่ ข.2

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของปุ๋ยหมัก

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
3	3	22.7052						
0	3		24.9157					
7	3			25.5128				
14	3			25.7597				
21	3				26.2159			
35	3				26.3410			
28	3					26.7984		
63	3					26.8090		
105	3					26.8875		
91	3					26.8877		
42	3						27.2295	
77	3						27.3181	
119	3						27.3966	
49	3							27.9471
Sig.		1.000	1.000	.114	.415	.596	.307	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.3

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Org-N) ของปุ๋ยหมัก

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
3	3	20.0386												
7	3		22.6395											
14	3			23.0619										
21	3				23.7633									
35	3				23.9205	23.9205								
0	3				24.0529	24.0529	24.0529							
91	3					24.1458	24.1458	24.1458						
28	3					24.1580	24.1580	24.1580						
42	3						24.3190	24.3190	24.3190					
105	3						24.4170	24.4170	24.4170					
63	3							24.4551	24.4551					
77	3								24.5745	24.5745				
119	3										24.8325			
49	3												25.2583	
Sig.		1.000	1.000	1.000	.116	.210	.062	.112	.178	.138				1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.4

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของปริมาณไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ (AN) ของปุ๋ยหมัก

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
0	3	.8628						
63	3		2.3539					
35	3		2.4205	2.4205				
21	3			2.4526				
105	3			2.4706				
119	3				2.5641			
28	3				2.6403	2.6403		
3	3					2.6666	2.6666	
49	3					2.6888	2.6888	
14	3					2.6979	2.6979	
91	3						2.7419	
77	3						2.7436	
7	3							2.8734
42	3							2.9105
Sig.		1.000	.101	.238	.062	.191	.088	.353

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.5

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (NH_4^+-N) ของปุ๋ยหมัก

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	3	.6843									
105	3		1.1560								
119	3			1.2775							
63	3			1.2941							
77	3				1.3955						
91	3				1.4074						
35	3					1.5481					
49	3					1.5854					
42	3						1.8109				
28	3							1.9033			
21	3								2.0265		
14	3									2.3061	
3	3										2.6542
7	3										2.7210
Sig.		1.000	1.000	.619	.722	.266	1.000	1.000	1.000	1.000	.052

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข.6

การจัดกลุ่มเปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยใช้ Duncan's Test ของปริมาณไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) ของปุ๋ยหมัก

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
3	3	.0124												
7	3		.1524											
0	3		.1785											
14	3			.3917										
21	3				.4261									
28	3					.7371								
35	3						.8724							
63	3							1.0599						
42	3								1.0995					
49	3								1.1034					
119	3									1.2865				
105	3									1.3146	1.3146			
91	3										1.3346	1.3346		
77	3												1.3480	
Sig.		1.000	.098	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.803	.076	.202	.384	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปิยกมล อาจจินดา
วัน เดือน ปี เกิด	15 ธันวาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต วิชาเอกเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2562 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอก วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	65 หมู่ 4 ตำบลตลาดจินดา อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม 73110
ผลงานตีพิมพ์	Obsuwan, K., Phuekvilai, P., Yookongkaew, N., Chaneam, S., Wanichacheva, N., Panishkan, K., Piachart, P., Artjinda, P., & Sanmanee, N. (2022). Nitrogen transformation during composting: A comparison of cow manure and mixed cow and pig manure. Science, Engineering and Health Studies, 16, 22030013.

