



การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม
อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR Spectroscopy) : เปรียบเทียบระหว่างมูลสุกร และมูลไก่



โดย
นางสาวศศิธร สายแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม
อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR Spectroscopy) : เปรียบเทียบระหว่างมูลสุกร และมูลไก่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY OF HUMIFICATION DEGREE USING FT-IR SPECTROSCOPY TECHNIQUE :
THE COMPARISON BETWEEN PORCINE AND CHICKEN COMPOSTS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
Master of Science Program in Environmental Science
Department of Environmental Science
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2015
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาระดับการเกิด
อิวมิกของปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR
Spectroscopy): การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลสุกรและมูลไก่” เสนอโดยนางสาวศศิธร สายแก้ว
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมนิ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

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

...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร)

...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมนิ)

...../...../.....



55311324 : สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ปุ๋ยหมัก/ระดับการเกิดฮิวมิค/ฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี/กรดฮิวมิค
ศศิธร สายแก้ว : การศึกษาการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม
อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR Spectroscopy) : การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลสุกรและมูลไก่
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.นันทิรา สรรพณี. 95 หน้า.

การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิคด้วยเทคนิค FT-IR ได้ดำเนินการในปุ๋ยหมักที่แตกต่างกัน
2 ชนิด คือ มูลสุกร และมูลไก่ ทั้งสองมูลถูกนำมาผสมกับของเสียทางการเกษตรและหมักเป็นเวลา 4
เดือน โดยเก็บตัวอย่างวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 เพื่อ
การศึกษาเชิงแสง

ปุ๋ยหมักถูกแบ่งตามอุณหภูมิออกเป็น 4 ระยะ: ระยะเริ่มผสม (0 วัน) ระยะอุณหภูมิสูง
(1-41 วันสำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกรและ 1-34 วัน สำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกร) ระยะสุดท้ายของการ
เกิดปฏิกิริยา (วันที่ 42 สำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกรและวันที่ 35 สำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกร) และระยะ
ที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (หลังจากวันที่ 42 เป็นต้นไปสำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกร และหลังจากวันที่ 35 เป็นต้นไป
สำหรับปุ๋ยหมักมูลสุกร)

แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของกรดฮิวมิคน้อยมากในช่วงระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่
แต่อินฟราเรดสเปกตรัมของปุ๋ยหมักทั้งสองชนิดกลับเพิ่มขึ้นอย่างโดดเด่น ซึ่งบ่งบอกถึงการสร้างของ
โครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น พันธะ C-H, C-O, C-N, O-H, C=O, C=C และ C=N โดยเฉพาะอย่างยิ่ง
พันธะ C≡C ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2144 เซนติเมตร⁻¹ ของปุ๋ยหมักมูลสุกร และที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น
2322 เซนติเมตร⁻¹ ของปุ๋ยหมักมูลสุกรซึ่งปรากฏอย่างชัดในวันที่ 42 จากนั้นอัตราส่วนเชิงแสง
ระหว่างโครงสร้างแอมไคดิกและโครงสร้างแอลิแพติกของปุ๋ยหมักมูลสุกรลดลงหลังจากวันที่ 77
สอดคล้องกับปริมาณของกรดฮิวมิค ($p < 0.5$) อย่างไรก็ตามมูลสุกรสร้างกรดฮิวมิคได้น้อยกว่า ซึ่งปริมาณ
กรดฮิวมิคนี้ก็ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วงที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ ดังนั้นจึงมีเพียง
FT-IR สเปกตรัมที่สามารถกำหนดคุณลักษณะกรดฮิวมิคของมูลสุกรได้ โดยระยะอุณหภูมิสูงมีพันธะที่
เสถียรน้อย เช่น C-H เกิดขึ้นมากกว่า ขณะที่เมื่อกระบวนการหมักเข้าใกล้ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ที่จะ
เพิ่มปริมาณพันธะที่เสถียรมากกว่า เช่น C=H, C≡C และ C=N แม้กระนั้นก็ตามหลังจากระยะที่ปุ๋ยหมัก
เจริญเต็มที่ในวันที่ 35 โครงสร้างทั้งหมดลดลงเล็กน้อยจากกระบวนการมีเนอราไลเซชัน ซึ่งจากผล
การศึกษาพบว่า การเก็บรักษาปุ๋ยหมักนานเกินไปอาจจะไม่ได้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติที่ดี
ที่สุด ดังนั้นเทคนิค FT-IR จึงไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือที่มีประโยชน์ที่จะช่วยในการกำหนดคุณภาพ
ปุ๋ยหมัก แต่ยังเป็นดัชนีเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้หรือเก็บรักษาปุ๋ยหมักอีกด้วย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

55311324 : MAJOR : ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD : COMPOST/HUMIFICATION DEGREE/FOURIER TRANSFORM INFARED SPECTROSCOPY/HUMIC ACID

SASITHORN SAIKAEW: STUDY OF HUMIFICATION DEGREE USING FT-IR SPECTROSCOPY TECHNIQUE: THE COMPARISON BETWEEN PORCINE AND CHICKEN COMPOSTS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NATDHERA SANMANEE, Ph.D. 95 pp.

Study of humification degree using FT-IR technique was conducted on two different composts, porcine manure and chicken manure. Both were mixed with agricultural wastes and fermented for 4 months. Samples were collected at day 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 and 119 and then, prepared for optical study.

The composts were divided after temperature into 4 stages: initial phase (day 0), thermophilic phase (1-41 for chicken compost and 1-34 for porcine compost), end of active phase (day 42 for chicken compost and 35 for porcine compost), and mature phase (after day 42 for chicken compost and 35 for porcine compost).

Despite the minimal quantitative changes of humic acid during mature stages, the increasing IR spectrum of both composts was outstanding. This indicated the forming of complicated structures such as C-H, C-O, C-N, OH, C=O, C=C and C=N, especially C≡C bonds at wave number 2144 cm^{-1} of chicken compost and 2322 cm^{-1} of porcine compost that had just appeared noticeably on day 42. Later, optical ratios between aromatic and aliphatic structures of chicken manure gradually declined after day 77 corresponding to the amounts of humic acid ($p < 0.5$). However, porcine manure produced less amounts of humic acid which were not significantly changed during mature stage. So, only FT-IR spectrum could help to determine its characteristics. The thermophilic stage showed more of less stable bonds such as C-H while moving towards mature stage the more stable bonds such as C=H, C≡C and C≡N increased. Nevertheless, after the mature stage had been reached at day 35, all of the structures slightly declined according to mineralization process. As a result, keeping the composts too long might not be an appropriate way for the best practice. Therefore, FT-IR technique was not only the useful tool to help in determining the composts' quality but also and indices to select the proper time to use or keep the compost as well.

Department of Environmental Science

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือให้ ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ ขอขอบคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และรองศาสตราจารย์ ดร. กนกพร สว่างแจ้ง เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนคุณ แต่คุณแม่ώρα สายแก้ว และคุณพ่อบุญชู สายแก้ว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ถือว่าเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาแก่ผู้วิจัย

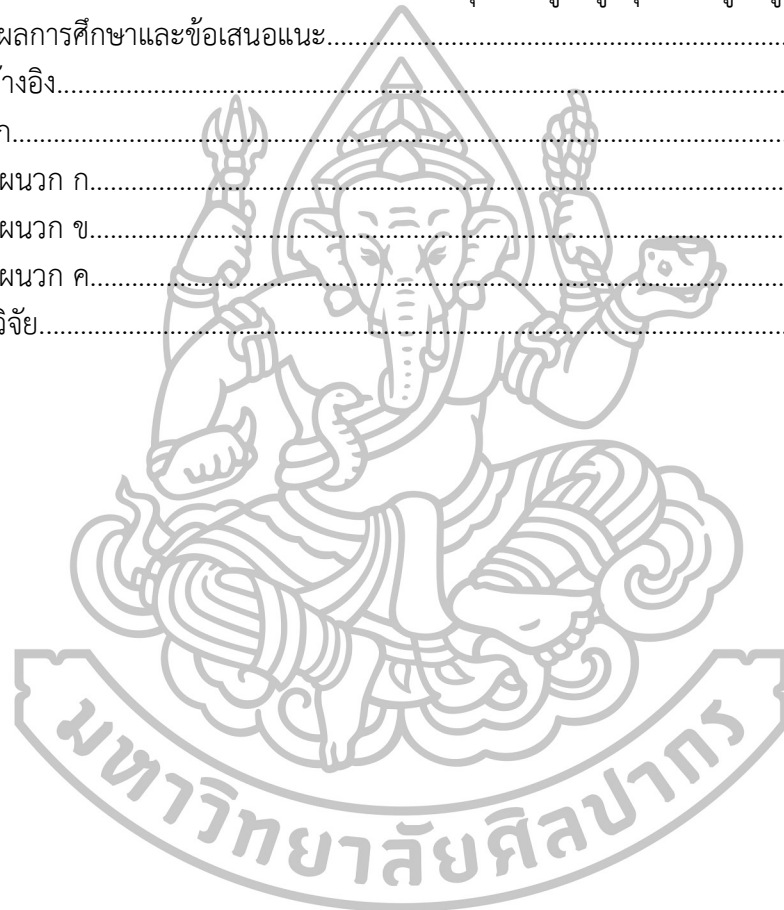


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ขั้นตอนการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 บทตรวจเอกสาร.....	4
ปุ๋ยหมัก.....	4
กระบวนการทำปุ๋ยหมัก.....	4
วัสดุที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก.....	5
ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก.....	6
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	6
ประโยชน์ในด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช.....	7
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม.....	8
สารฮิวมิก.....	8
กระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	8
การจัดจำแนกและโครงสร้างของสารฮิวมิก.....	10
กรดฮิวมิก.....	10
กรดฟัลวิก.....	11
ฮิวมิน.....	12
การประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก.....	12
คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามลักษณะการเปลี่ยนแปลง	
อุณหภูมิจ.....	13
ระยะเริ่มผสม.....	13
ระยะอุณหภูมิสูง.....	13

บทที่	หน้า
ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา.....	14
ระยะการเจริญเต็มที่.....	14
มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์.....	14
การประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	15
ปริมาตรกรดฮิวมิก.....	15
ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก.....	16
อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ.....	18
การติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารฮิวมิก.....	19
การประยุกต์ใช้ฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	19
ในการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก.....	20
หลักการและทฤษฎี.....	20
การประยุกต์ใช้ FT-IR ในการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก.....	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักด้วยเทคนิค	26
FT-IR.....	26
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
สารเคมีและรีเอเจนต์.....	32
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	34
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	35
การเตรียมส่วนผสมปุ๋ยหมัก.....	35
ขั้นตอนการหมักปุ๋ย.....	36
การเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก.....	37
การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อการวิเคราะห์.....	37
การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
การวิเคราะห์หาความชื้น (Moisture content).....	38
การวิเคราะห์หาความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	38
การวิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature).....	39
การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....	39
การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter).....	39
การสกัดแยกกรดฮิวมิกบริสุทธิ์.....	39
การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิค FT-IR.....	40
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	40
4 ผลการศึกษา.....	41
คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามลักษณะการเปลี่ยนแปลง	41
อุณหภูมิ.....	41

บทที่	หน้า
คุณภาพของปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการ เกษตรเพื่อการจำหน่าย.....	41
การเปลี่ยนแปลงปริมาณและโครงสร้างกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักของ ปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร.....	51
ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	51
ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	58
การเปรียบเทียบโครงสร้างกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่.....	68
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	82
ภาคผนวก ค.....	89
ประวัติผู้วิจัย.....	95



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ปริมาณธาตุอาหารพืชที่มีในมูลสัตว์แต่ละชนิด.....	6
2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุไนโตรเจนในวัสดุชนิดต่าง.....	6
3 คุณสมบัติบางประการและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก.....	12
4 คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548..	14
5 ปริมาณกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ย.....	16
6 ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ของกรดฮิวมิก ในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน.....	17
7 อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจาก วัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน.....	19
8 แถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดหลักๆของสารฮิวมิก.....	24
9 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงในกรดฮิวมิก.....	25
10 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้าง แอมโรแมติกต่อโครงสร้างแอลิแพติกของกรดฮิวมิก.....	30
11 วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Methodologies and instruments)	31
12 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS No. และบริษัทผู้ผลิต.....	34
13 ส่วนผสม แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก.....	36
14 คุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักซึ่งแบ่งช่วงอายุปุ๋ยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในระหว่างการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่.....	42
15 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเปรียบเทียบกับเกณฑ์ มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548.....	46
16 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548.....	48
17 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ความชื้น ค่าอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ในปุ๋ยหมัก สูตรมูลสุกร.....	50
18 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ความชื้น ค่าอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ในปุ๋ยหมัก สูตรมูลไก่.....	50
19 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของพันธะภายในโครงสร้าง กรดฮิวมิกตลอดกระบวนการหมัก.....	54
20 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก ของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	57

ตารางที่	หน้า
21 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของพันธะภายในโครงสร้างกรดฮิวมิก ตลอดกระบวนการหมัก.....	63
22 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก ของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	66
23 ปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	81
24 ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่างๆ.....	85
25 ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่างๆ.....	87
26 อัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูล สุกรและมูลไก่ที่ระยะเวลาการหมักต่างๆ.....	88
27 การจัดกลุ่มปุ๋ยเปรียบเทียบเชิงปริมาณกรดฮิวมิกระหว่างวันต่างๆ ของปุ๋ยสูตรมูล.....	90
28 การจัดกลุ่มปุ๋ยเปรียบเทียบเชิงปริมาณกรดฮิวมิกระหว่างวันต่างๆ ของปุ๋ยสูตรมูลไก่....	91
29 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	92
30 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	92
31 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก สูตรมูลสุกร.....	93
32 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.	93
33 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 1632/2924 ต่อระยะเวลา การหมักปุ๋ย ค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไฮโดรเจนและปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	94
34 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 1632/1335 และ 1516/1335 ต่อระยะเวลาการหมักปุ๋ย ค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน ค่าอัตราส่วน คาร์บอนต่อไฮโดรเจนและปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	94

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ปุ๋ยหมักจากมูลหมูที่ย่อยสลายสมบูรณ์ซึ่งจะมีลักษณะนุ่ม ยุ่ย และมีสีน้ำตาลถึงสีดำ....	4
2 การสร้างพันธะของกรดฮิวมิกกับน้ำในดิน.....	7
3 แผนภาพขั้นตอนทฤษฎีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	9
4 การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิกในดิน.....	10
5 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid).....	11
6 โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic).....	11
7 แผนภาพแสดงการเกิดอัตรากิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง.....	20
8 การสันของโมเลกุลแบบต่างๆ.....	21
9 FTIR สเปกตรัมขององค์ประกอบฟัลวิกซึ่งสกัดมาจากปุ๋ยหมักจากกากตะกอนภายหลัง กระบวนการหมัก 135 วัน.....	22
10 ตัวอย่างของอินฟราเรดสเปกตรัม (เบนซิลแอลกอฮอล์).....	23
11 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกที่สกัดมาจากปุ๋ยก่อนและหลังกระบวนการหมัก.....	27
12 อินฟราเรดสเปกตรัมของปุ๋ยหมักหลังจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ที่ได้ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการหมัก.....	28
13 การเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2920 และ 1640 พร้อมทั้งค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 2920/1640 ที่อายุของหลุมฝังกลบ ต่างกัน.....	29
14 แผนผังการดำเนินการทดลองโดยรวมของการศึกษา.....	33
15 ส่วนผสมในการทำปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	35
16 การผสมปุ๋ยหมัก.....	37
17 การวัดอุณหภูมิก่อนการเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน.....	37
18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมัก สูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่.....	44
19 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ที่ระยะเวลาการหมัก ต่างกัน.....	52
20 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน....	53
21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอมโรแมติกต่อแอลิแฟติก ที่ 1632/1335 และที่ 1516/1335 กับปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก สูตรมูลไก่.....	55
22 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้าง แอมโรแมติกต่อโครงสร้างแอลิแฟติกที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน.....	56

ภาพที่	หน้า
23 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	58
24 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	60
25 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 725 เซนติเมตร ⁻¹ และพันธะ C=H ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 667 เซนติเมตร ⁻¹ ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	61
26 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2920 เซนติเมตร ⁻¹ และ 2932 เซนติเมตร ⁻¹ ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	62
27 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C=C และ C≡N ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2322 cm ⁻¹ ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	63
28 การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอมโรแมติกต่อแอลิแพติก (1632/2920) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	64
29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ 1632/2920 ต่ออุณหภูมิ.....	65
30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบต่อระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร.....	67
31 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในวันที่ 0, 35, 42 และ 119 เปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่.....	69
32 แถบอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน.....	83
33 แถบอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน.....	84

บทที่ 1 บทนำ

1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยหมัก (Compost) เป็นปุ๋ยที่ได้มาจากการนำเอาวัสดุอินทรีย์มาผ่านกระบวนการหมักอย่างสมบูรณ์จนกระทั่งได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีลักษณะนุ่ม ยุ่ย มีสีน้ำตาลปนดำ ไม่มีกลิ่นและสลายตัวช้า (รสสุคนธ์, 2549) ซึ่งสารสีคล้ำที่เกิดจากกระบวนการหมักที่เรียกว่าสารฮิวมิกมีคุณสมบัติช่วยในการปรับปรุงดินให้ดีขึ้นทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยสารฮิวมิกจะช่วยให้ดินร่วนซุย ไม่อัดแน่นกันเป็นก้อน เนื่องจากคุณสมบัติทางโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถสร้างพันธะกับอนุภาคประจุบวกในดินและทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกและประจุลบออกจากกัน (ชวีสรร, 2554) จึงส่งผลให้ชั้นดินโปร่งขึ้น น้ำ และอากาศหมุนเวียนถ่ายเทได้สะดวก

กระบวนการหมักปุ๋ยเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพและเจริญเต็มที่ เกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อนำไปใช้ในทางการเกษตร จำเป็นต้องมีการตรวจติดตามคุณภาพของปุ๋ยหมัก ทั้งนี้ Inbar et al. (1990) พบว่าการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักมีความสัมพันธ์กับระดับของสารฮิวมิกที่สร้างขึ้นช่วงระยะสุดท้ายของกระบวนการหมักปุ๋ย โดยโครงสร้างแอโรแมติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่เสถียรจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้สารฮิวมิกสามารถคงทนอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลาเวลานาน ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดินและค่อยๆ ย่อยสลายและปล่อยสารอาหารให้แก่ดินและพืชทีละน้อย จึงส่งผลให้คุณภาพของสารฮิวมิกเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างเหล่านี้มีมากขึ้นด้วย โดยระดับการเกิดฮิวมิก หรือ Humification degree นั้นสามารถตรวจวัดจากปริมาณและอัตราส่วนของโครงสร้างเหล่านี้ได้ เช่น วงแหวนแอโรแมติก หมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ฟีนอลิก (-C₆H₅OH) แอลกอฮอล์ิก (-OH) อินอลิก (-CH=C-OH) และคาร์บอนิล (=C=O) (Stevenson, 1994) อัตราส่วนของโครงสร้างแอลิแพติกต่อแอโรแมติก อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน เป็นต้น (อัญชลี, 2552)

โครงสร้างของสารฮิวมิกที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันมากมายดังที่กล่าวมาแล้ว มีคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ได้ดังนั้นจึงมีการนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เพื่อกำหนดอายุของปุ๋ยและหาคุณภาพที่ดีที่สุดของปุ๋ยหมัก (Tan, 2003) โดย Fourier transform infrared

ฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) เป็นสเปกโทรสโกปีเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในกระบวนการเกิดฮิวมิก โดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะบริเวณหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของฮิวมิก ซึ่งจะอธิบายระดับการเกิดฮิวมิกรวมถึงบ่งบอกคุณสมบัติเสถียรภาพของโครงสร้างของสารฮิวมิกได้อีกด้วย

เพื่อศึกษากระบวนการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมักเพื่อให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่เจริญเต็มที่และประกอบไปด้วยสารฮิวมิคที่เสถียรจึงได้นำแนวทางการศึกษาระดับการเกิดฮิวมิคของอินทรีย์วัตถุในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมัก 2 สูตร ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค FT-IR ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิคตลอดกระบวนการหมักปุ๋ย โดยจะศึกษาระยะเวลาการหมักและชนิดของปุ๋ยหมัก 2 สูตรได้แก่ ปุ๋ยหมักจากมูลสุกรและมูลไก่ถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโครงสร้างและเสถียรภาพตลอดกระบวนการหมักปุ๋ยของกรดฮิวมิค ซึ่งสามารถบ่งบอกเสถียรภาพของโครงสร้างกรดฮิวมิค ระดับการเกิดฮิวมิค การเจริญเต็มที่ อันสะท้อนถึงคุณภาพของปุ๋ยหมัก และนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานระยะเวลาการหมักเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพสูงสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์แก่เกษตรกรต่อไป

2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1 เพื่อศึกษาระดับการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมัก 2 สูตรที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปีร่วมกับข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก

2.2 สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปใช้เป็นฐานข้อมูล กำหนดมาตรฐานระยะเวลาการหมักปุ๋ยจากมูลสัตว์ทั้งสองเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่ที่มีคุณภาพสูง เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเกษตรกรต่อไป

3. สมมติฐานของการศึกษา (Hypothesis to be tested)

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยมีผลต่อระดับการเกิดฮิวมิคโดยปุ๋ยหมักสองสูตรที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันจะมีระดับการเกิดฮิวมิคที่แตกต่างกัน

4. ขอบเขตการศึกษา

ตัวอย่างปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษา ได้จากการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักจากโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาระดับการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีของกระบวนการเกิดฮิวมิคและเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และผลกระทบในลักษณะเป็นคีเลตต่อประสิทธิภาพในการปลดปล่อยหรือตรึงจุลธาตุอาหารต่อพืชบางชนิด: การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยมูลไก่และมูลสุกรของนัทรียาและคณะ ซึ่งเป็นปุ๋ยหมักจากส่วนผสมที่สามารถหาได้โดยทั่วไปในท้องถิ่นของจังหวัดนครปฐมได้แก่ มูลสุกรและมูลไก่ โดยจะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ย เมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ และทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโครงสร้างของกรดฮิวมิคที่สกัดได้จากปุ๋ยหมัก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ ลักษณะโครงสร้าง และเสถียรภาพของกรดฮิวมิค ตลอดกระบวนการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร โดยใช้เทคนิค FT-IR ร่วมกับข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก เช่น สี กลิ่น ลักษณะเนื้อปุ๋ย ค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น

5. ขั้นตอนการศึกษา

- 5.1 สืบค้นข้อมูลและทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 5.2 วางแผนการทดลอง
- 5.3 เขียนโครงร่างการวิจัยและเสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์
- 5.4 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 5.5 รวบรวมและสรุปผลการทดลอง
- 5.6 ค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม
- 5.7 เขียนวิทยานิพนธ์และเสนอวิทยานิพนธ์

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

6.1 ทำให้ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย และเข้าใจกระบวนการเกิดฮิวมิกและระดับการเกิดฮิวมิกในปุ๋ยหมักมากยิ่งขึ้น

6.2 ทำให้ทราบถึงระยะเวลาการหมักปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับปุ๋ยหมักที่ศึกษาสองสูตร คือ สูตรมูลสุกร และสูตรมูลไก่ โดยใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การเจริญเต็มที่และเสถียรภาพของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก

6.3 สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปใช้เป็นฐานข้อมูล กำหนดมาตรฐานระยะเวลาการหมักปุ๋ยจากมูลสัตว์ทั้งสองสูตร และนำความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดั้งเดิมที่เกษตรกรและกรมวิชาการเกษตรใช้และข้อมูลทางโครงสร้างที่ได้จากการศึกษาโดยเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี มาอธิบายคุณภาพปุ๋ยหมักในกองปุ๋ยหมักใหม่ที่คล้ายกัน เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่ที่มีคุณภาพสูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเกษตรกรต่อไป



บทที่ 2 บทตรวจเอกสาร

2.1 ปุ๋ยหมัก (Compost)

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้มาจากการนำเอาวัสดุอินทรีย์ เช่น เศษซากพืช ซากสัตว์ มูลสัตว์ ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนขยะมูลฝอยตามบ้านเรือน มาผ่านกระบวนการหมัก โดยอาศัยการย่อยสลายของจุลินทรีย์หลายชนิดในธรรมชาติภายใต้สภาพที่เหมาะสมในด้านความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (เกียรติชัย, 2547) เมื่อกระบวนการย่อยสลายวัสดุเสร็จสมบูรณ์จะได้ปุ๋ยหมักดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่ม ยุ่ย และขาดออกจากกันได้ง่าย ไม่มีกลิ่นเหม็นหรือมีกลิ่นคล้ายดินธรรมชาติ มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ (เพ็ญปภา, 2553; ไพศาล, 2555) เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินและเป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่พืช



ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักจากมูลหมูที่ย่อยสลายสมบูรณ์ซึ่งจะมีลักษณะนุ่ม ยุ่ย และมีสีน้ำตาลถึงสีดำ
ที่มา: จุฑาวรรณ (2557)

2.1.1 กระบวนการทำปุ๋ยหมัก

กระบวนการทำปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ควบคุมให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์มากที่สุด จนกระทั่งได้ผลผลิตที่มีความคงตัว ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ประยูร, 2547) กระบวนการทำปุ๋ยหมักมีหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบนั้นจะมีจุลินทรีย์เข้ามามีกิจกรรมด้วย ดังนั้น ถ้าแบ่งวิธีการหมักตามชนิดของจุลินทรีย์แล้วสามารถแบ่งเป็น 2 อย่าง (สุทธิ, 2552) คือ การหมักปุ๋ยสภาพที่มีออกซิเจน (Aerobic process) ซึ่งเป็นการย่อยสลายวัสดุที่ย่อยสลายได้

จำพวก โปรตีน กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เซลลูโลส และลิกนิน ฯลฯ โดยจุลินทรีย์ในสภาวะที่มีออกซิเจน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงตัว น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่นๆ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สแอมโมเนีย การหมักโดยวิธีนี้จะมีข้อดีคือ ไม่มีกลิ่นเหม็น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักนั้นค่อนข้างสูงพอที่จะฆ่าเชื้อโรคที่อาจทำให้เกิดอันตรายต่อคนได้ ส่วนการหมักปุ๋ยสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic process) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือวัตถุของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในอากาศ โดยการย่อยสลายแบบไร้อากาศนี้ อุณหภูมิจะต่ำและไม่มีกลิ่นเหม็นเกิดขึ้นเนื่องจากการสร้างแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแก๊สแอมโมเนีย อัตราการสลายตัวจะเป็นไปอย่างช้าๆ และใช้เวลาในการหมักนานกว่าการหมักแบบใช้ออกซิเจน

2.1.2 วัสดุที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักสามารถทำจากวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล กากสับปะรดจากโรงงานสับปะรดกระป๋อง วัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูก ซึ่งเป็นแหล่งของอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ทั่วไปและสามารถหาได้ง่าย เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด และของเสียจากชุมชนซึ่งโดยทั่วไปจะมาจากโรงแรม โรงอาหาร สวนสาธารณะ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย และอื่นๆ โดยอินทรีย์วัตถุเหล่านี้เป็นแหล่งไนโตรเจนของพืช ตัวอย่างเช่น กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียซึ่งจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักในการเจริญเติบโตของพืช (เกียรติชัย, 2547)

ทั้งนี้ในการทำปุ๋ยหมักนั้น วัสดุสัตว์ต่างๆ อาทิเช่น มูลวัว มูลหมู มูลเป็ด มูลไก่ ฯลฯ สามารถนำมาใช้ผสมกับเศษพืชทำเป็นปุ๋ยหมักได้ วัสดุสัตว์จะส่งผลดีในด้านกระบวนการย่อยสลายและคุณภาพของปุ๋ยหมัก (เจนวิทย์, 2544) เนื่องจากมูลสัตว์มีสารประกอบและแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์อยู่มากมาย (ตารางที่ 1) ดังนั้นการใส่มูลสัตว์จึงเป็นการเร่งทำให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายเศษพืชได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งในมูลสัตว์ที่ใส่ลงไปยังมีจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีความสามารถย่อยสลายเศษพืชได้ดีอยู่มากมาย การใส่มูลสัตว์จึงเป็นการใส่เชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากลงไปในกองปุ๋ยนั้นเองและจุลินทรีย์เหล่านี้จะไปสมทบกับจุลินทรีย์ที่ติดมากับเศษพืช ช่วยย่อยสลายและแปรสภาพเศษพืชให้กลายเป็นปุ๋ยหมักได้เร็วยิ่งขึ้น (ชัชฎาพร, 2550) ทั้งนี้เศษวัสดุที่ย่อยสลายตัวได้ยาก เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย ชี้อ้อย ขุยมะพร้าว ฯลฯ ซึ่งปกติจะมีธาตุอาหารบางชนิดอยู่น้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุไนโตรเจน ดังนั้นจึงมีการเติมมูลสัตว์หรือวัสดุอื่นที่มีแร่ธาตุอาหารมาก เช่น ผักตบชวา หรือเศษหญ้าสด เป็นต้น มาใช้ทดแทนธาตุไนโตรเจน (ตารางที่ 2) เพื่อให้เศษพืชเหล่านั้นสลายตัวได้รวดเร็วขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุอาหารพืชที่มีในมูลสัตว์แต่ละชนิด

วัสดุ	ไนโตรเจน (%)	ฟอสฟอรัส (%)	โปแตสเซียม (%)
มูลวัว	1.73*	0.49*	0.30*
	1.95**	1.76**	0.43**
เฉลี่ย	1.84	1.13	0.37
มูลหมู	2.83*	16.25*	0.11*
	2.83**	16.25**	0.11**
เฉลี่ย	2.83	16.25	0.11
มูลไก่	2.09*	6.07*	0.42*
	2.28**	5.91**	3.02**
เฉลี่ย	2.19	5.99	1.72

ที่มา: *บุญส่ง (2553), **ทรายแก้ว และคณะ (2556)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุไนโตรเจนในวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิดของวัสดุ	ปริมาณธาตุไนโตรเจน (กิโลกรัม ต่อ วัสดุแห้ง 100 กิโลกรัม)
มูลเป็ด - มูลไก่	3.5 - 5.0
มูลสุกร	3.0
มูลม้า	2.0
มูลวัว - มูลควาย	1.2 - 2.0
ผักตบชวา	2.2 - 2.5
ต้นถั่วต่างๆ	2.0 - 3.0
เปลือกถั่วลิสง	1.6 - 1.8
ต้นฝ้าย	1.0 - 1.5

ที่มา: ชัชฎาพร (2550)

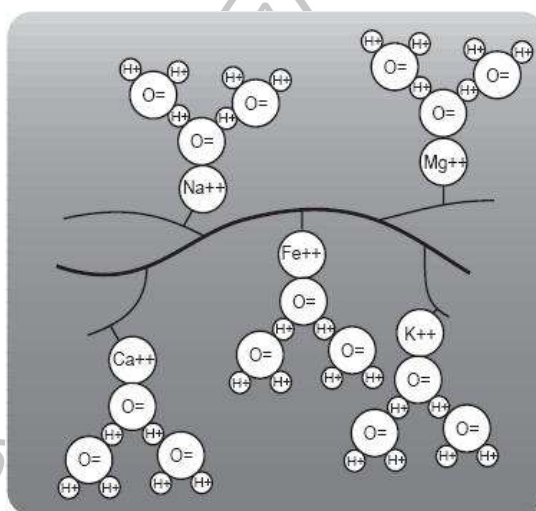
2.1.3 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ประโยชน์ด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช และประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

1. ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ปุ๋ยหมักมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมต่อการทำการเกษตร โดยเฉพาะดินเหนียวซึ่งอนุภาคของดินจะมีความละเอียดและมีความหนาแน่นมาก ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อระบบรากของพืชที่จะดูดซึมน้ำและธาตุอาหารและน้ำ ปุ๋ยหมักจะช่วยปรับปรุงดินที่มีความเป็นดินเหนียวสูง มีก้อนเนื้อดินละเอียดและหนาแน่น เนื่องจากมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวอยู่มาก โดยอาศัยคุณสมบัติโครงสร้างโมเลกุลของกรดฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในปุ๋ยหมักที่ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิลที่สามารถสร้างพันธะกับอนุภาคประจุบวกในดินที่มีความเป็น

ดินเหนียวสูงได้ และทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกและประจุลบของดินเหนียวให้ออกจากกัน ซึ่งจะทำให้ ชั้นดินมีความโปร่งขึ้น ส่งผลให้น้ำและอากาศหมุนเวียนและถ่ายเทได้สะดวก รากพืชสามารถซอนไชแตกแขนงและมีระบบรากที่สมบูรณ์ได้ นอกจากนี้กรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักยังช่วยลดการระเหยของน้ำไปจากดินซึ่งมีความเป็นดินเหนียวต่ำ ดินทรายและดินในพื้นที่แห้งแล้งที่ไม่สามารถดูดซับน้ำไว้ได้อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อมีน้ำผ่านเข้ามาในดินที่มีลักษณะดังกล่าว ประจุบวกซึ่งกรดฮิวมิกได้ดูดซับไว้จะสร้างพันธะกับประจุลบของน้ำ นั่นคือ ออกซิเจน ส่วนประจุบวกที่เหลืออยู่ของน้ำคือ ไฮโดรเจนก็จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมของออกซิเจนในน้ำโมเลกุลอื่นๆต่อไป ดังภาพที่ 2 ทำให้น้ำระเหยออกจากดินน้อยลงหรือดินสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นนั่นเอง (ยงยุทธ, 2546)



ภาพที่ 2 การสร้างพันธะของกรดฮิวมิกกับน้ำในดิน

ที่มา : Bio Ag Technologies International (1999)

2. ประโยชน์ในด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช

ปุ๋ยหมักช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร โดยเฉพาะธาตุอาหารหลักอย่าง ไนโตรเจน ซึ่งมีทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 2.5 ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อพืชประมาณ ร้อยละ 0.2 ถึง 2.5 และโพแทสเซียมในรูปละลายน้ำประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.8 ทั้งนี้ในปุ๋ยหมักยังมีธาตุอาหารรองที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม (อัญชลี, 2552) อีกด้วย ปุ๋ยหมักมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารไว้ในดินไม่ให้ถูกชะล้างไป เนื่องจากปุ๋ยหมักมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างสูงกว่าดิน ส่งผลให้สามารถดูดซับธาตุอาหารเพื่อให้พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยธาตุอาหารเหล่านี้จะถูกปล่อยออกมาอย่างช้าๆ ให้แก่พืชได้ใช้ตลอดเวลาในการเจริญเติบโต ซึ่งจะต่างจากการใช้ปุ๋ยเคมีซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารหลัก ที่มาก พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างรวดเร็ว (สายชลและคณะ, 2555) ส่งผลให้ต้องมีการเติมปุ๋ยเคมีตลอดเวลา

ปุ๋ยหมักนอกจากเป็นแหล่งธาตุอาหารที่สำคัญแก่พืชแล้ว ยังเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ในดินด้วย เช่น เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส โบรอน และ โมลิบดีนัม ซึ่งทำให้มีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในดิน เป็นผลทำให้กิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์ เช่น การแปรสภาพธาตุอาหารพืชในดินเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ กิจกรรมการตรึงไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น และลดความรุนแรงของโรคพืชที่เกิดจากไส้เดือนฝอย ทั้งนี้เพราะเมื่อปุ๋ยหมักสลายตัวแล้วจะเกิดสารอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มที่มีธาตุไนโตรเจนอยู่ภายในโมเลกุลในรูปของเอมีน เอมีนออกไซด์เป็นต้น หรือกรดไขมันซึ่งเป็นพืชต่อไส้เดือนฝอยเป็นต้น (ธันวดี, 2547)

3. ประโยชน์ด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

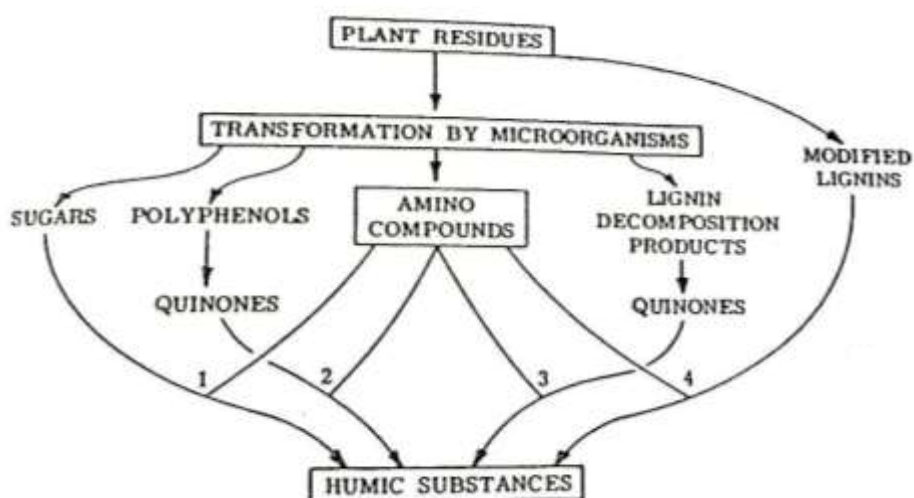
ประโยชน์ของปุ๋ยหมักในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อมนั้นมีหลายประการ อาทิ เช่น ช่วยรักษาสภาพแวดล้อมโดยการนำเศษวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรและครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอย ทำให้ที่อยู่อาศัยดูสะอาดตา ลดมลพิษทางอากาศซึ่งอาจมาจากการเผาเศษหญ้าหรือเศษขยะ และลดมลพิษสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจเกิดมาจากการใช้ปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะการใช้ ไนโตรเจน และฟอสเฟตในปริมาณมากเกินไป ซึ่งอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำส่งผลให้สภาพแวดล้อมในน้ำเปลี่ยนแปลงและเกิดการสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ตามมา

2.2 สารฮิวมิก (Humic Substances)

สารฮิวมิกเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารอินทรีย์ในธรรมชาติทั้งในน้ำ ดิน ตะกอนดิน ถ่านหิน และหรือแม้กระทั่งในปุ๋ยหมัก (Enev, 2014) สารฮิวมิกเป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อน มีโครงสร้างเป็นแบบอสัญฐานและไม่มีรูปร่างที่แน่นอน (จักรพันธ์, 2555) มีคุณสมบัติช่วยในการปรับปรุงดินให้ดีขึ้นทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ อีกทั้งยังเป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารให้แก่พืช โดยถูกรวบรวมมาจากวัสดุต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพและเคมีในระหว่างเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปของเศษซากพืชซากสัตว์และชีวมวล กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Humification process) (อัญชลี, 2552)

2.2.1 กระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Humification process)

กระบวนการเกิดสารฮิวมิก คือ กระบวนการทางธรรมชาติที่มีการแปรสภาพของสารอินทรีย์ไปเป็นสารฮิวมิกโดยอาศัยกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ กระบวนการนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ทั้งจากในพืชและสัตว์ปรากฏขึ้นในวงจรชีวิตของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดิน ซึ่งจะประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน และสามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สภาพแวดล้อมและจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง (วชิรธร, 2554) ทั้งนี้กลไกการเกิดสารฮิวมิกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงวิธีการเกิดสารฮิวมิกได้ทั้งหมดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 แผนภาพขั้นตอนทฤษฎีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก
 หมายเหตุ: 1) ทฤษฎีซูการ์ - เอมีน 2) ทฤษฎี โพลีฟีนอล 3) และ 4) ทฤษฎีลิกนิน - โปรตีน
 ที่มา : Stevenson (1994)

1. ทฤษฎีซูการ์ - เอมีน

ทฤษฎีซูการ์ - เอมีน เป็นแนวคิดหรือทฤษฎีในการเกิดสารฮิวมิกซึ่งเกิดจากน้ำตาลและอะมีนที่เป็นองค์ประกอบตั้งต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันด้วยการสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) เชื่อมต่อกันจนกลายเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ โครงสร้างใหญ่และมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ นั่นคือ สารฮิวมิก ดังแสดงในวิถีที่ 1

2. ทฤษฎีโพลีฟีนอล

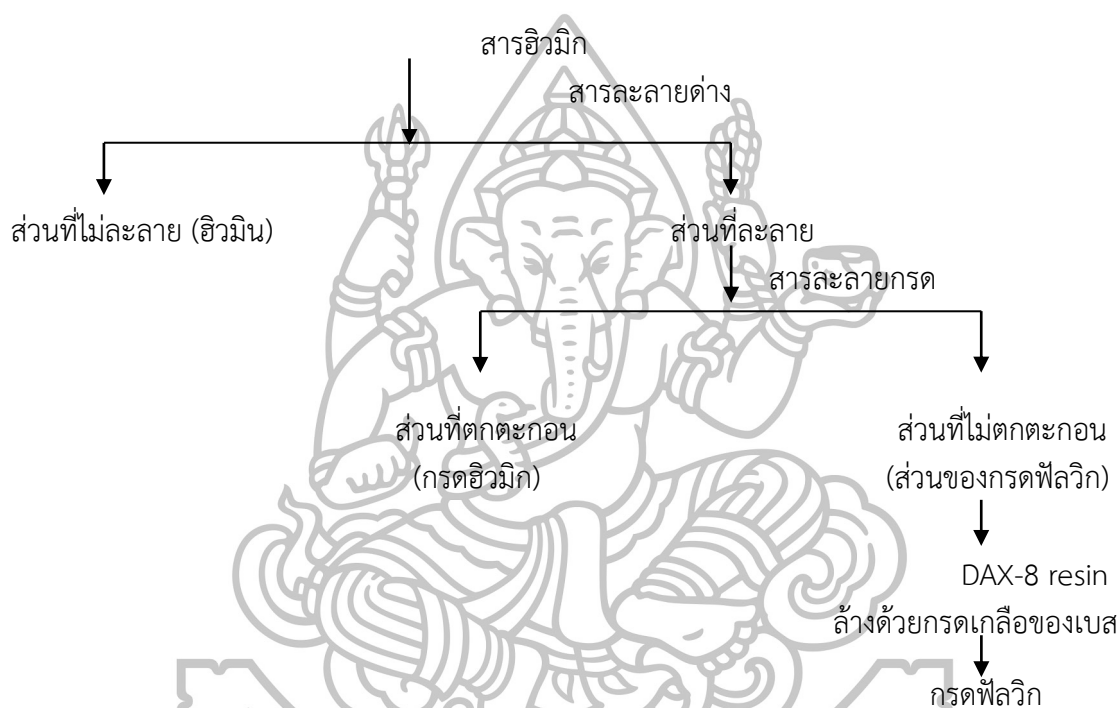
ทฤษฎีโพลีฟีนอลเป็นกระบวนการเกิดสารฮิวมิก โดยผ่านการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ฟีนอลอัลดีไฮด์ (เวซอร์ธ, 2554) แล้วได้ผลิตภัณฑ์ คือ โพลีฟีนอล (Polyphenol) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ด้วยเอนไซม์ สลายตัวไปเป็นควิโนน (Quinone) แล้วเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นสารฮิวมิก (Mema, 2006) ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น ดังวิถีที่ 2

3. ทฤษฎีลิกนิน - โปรตีน

ทฤษฎีลิกนิน - โปรตีน คือ กระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์แล้วได้ผลิตภัณฑ์จำพวกลิกนินหรือฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ด้วยเอนไซม์และสลายตัวไปเป็นควิโนน (Quinone) แล้วจึงเกิดการรวมตัวกับโปรตีนกลายเป็นสารฮิวมิก ดังวิถีที่ 3 หรือสารฮิวมิกอาจเกิดมาจากการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะที่หลีกเลี่ยงการย่อยสลายจำพวกเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ จะถูกออกซิเดชันในบริเวณหมู่เมทอกซิลหรือแอลกอฮอล์ในลิกนิน หรือเกิดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ ทำให้เกิดสารกลุ่มฟีนอลิก ควิโนน คีโตน และคาร์บอกซิลิกขึ้น และรวมตัวกลายเป็นสารฮิวมิก ดังวิถีที่ 4 (สุภาวดี, 2555)

2.2.2 การจัดจำแนกและโครงสร้างของสารฮิวมิก

สารฮิวมิกสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท โดยพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุลและคุณสมบัติในการละลาย (ยงยุทธ, 2546) ทั้งนี้ถ้านำสารอินทรีย์วัตถุในดินมาละลายในสารละลายต่าง ๆ จะได้ตะกอนเกิดขึ้น เรียกตะกอนนั้นว่า ฮิวมิน (Humin) ส่วนสารละลายที่ได้นั้นจะนำมาตกตะกอนต่อกับสารละลายกรดที่มีค่า pH = 1 จะได้ตะกอนใหม่เกิดขึ้นซึ่งเรียกว่า กรดฮิวมิก (Humic acid) ส่วนสารละลายที่ไม่ตกตะกอนจะเป็นส่วนของกรดฟัลวิก (Fulvic acid) ซึ่งในส่วนนี้จะต้องปรับสภาพโดยการผ่านเรซิน DAX-8 ก่อนถึงจะได้เป็นกรดฟัลวิก ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิกในดิน

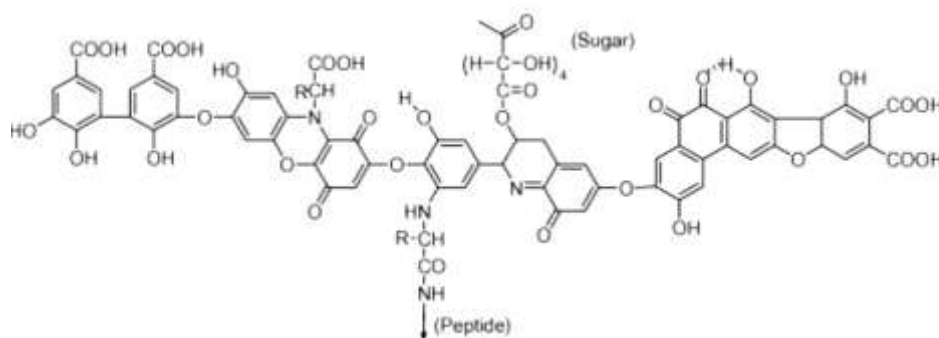
ที่มา: ตัดแปลงจาก Stevenson (1994)

จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสารฮิวมิกทั้งสามชนิดมีคุณสมบัติการละลายที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติในการละลายของสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ดังนั้นกรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน จึงมีโครงสร้างที่แตกต่างซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงต่อไปนี้

1. กรดฮิวมิก (Humic acid)

กรดฮิวมิกมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงเข้มสุด สามารถละลายได้ดีในสารละลายต่างแต่ตกตะกอนในสารละลายกรด ละลายน้ำได้บ้าง สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยของกรดฮิวมิกจะเป็น $C_{10}H_{12}O_5N$ และมีมวลโมเลกุลสูงอยู่ในช่วง 100 - หลายล้านดอลตัน (Tan, 2003) ในโครงสร้างของกรดฮิวมิกจะมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์มากกว่ากรดฟัลวิก ส่วนธาตุไฮโดรเจนนั้นจะมีปริมาณใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 3 กรดฮิวมิกจะไม่มีกลิ่นและค่อนข้างเสถียรเมื่ออยู่ในธรรมชาติ เนื่องจากบริเวณโครงสร้างหลักของกรดฮิวมิกจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน

จำพวกวงแหวนแอโรแมติกที่อยู่ชิดกัน และแอลิแพติกจำนวนมาก ดังภาพที่ 5 ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง และไม่มีขั้ว ส่งผลให้สามารถคงทนอยู่ในดินได้และละลายน้ำได้น้อย การถูกชะล้างก็เป็นไปได้ยาก ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้กรดฮิวมิกยังประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันซึ่งส่วนใหญ่เป็นหมู่ฟีนอลิก ซึ่งสามารถยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะอื่นๆได้อีกด้วย (วชิรธร, 2554)

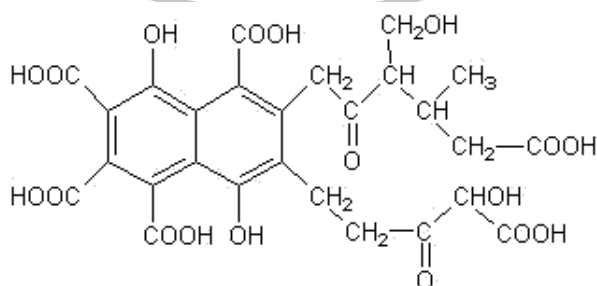


ภาพที่ 5 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid)

ที่มา : Stevenson (1994)

2. กรดฟัลวิก (Fulvic acid)

กรดฟัลวิกเป็นสารฮิวมิกสีเหลืองถึงน้ำตาล สามารถละลายได้ทั้งในต่าง กรด และ น้ำ สูตรโพลิเมอร์โดยเฉลี่ยจะเป็น $C_{12}H_{12}O_9$ กรดฟัลวิกจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับ สารฮิวมิกชนิดอื่นๆ โดยมีมวลโมเลกุลน้อยกว่าหลักร้อยถึงหลักพัน ประมาณ 175 ถึง 3,570 ดอลตัน (Tan, 2003) ภายในโครงสร้างของกรดฟัลวิกเมื่อเทียบกับกรดฮิวมิกจะมีปริมาณธาตุออกซิเจน มากกว่ากรดฮิวมิกคือประมาณร้อยละ 44 - 50 ส่วนปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ จะ น้อยกว่าคือมีประมาณร้อยละ 40 - 50, น้อยกว่าร้อยละ 1 - 3 และร้อยละ 0 - 2 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ในธรรมชาติกรดฟัลวิกจะมีความเสถียรน้อยกว่ากรดฮิวมิก เนื่องจากสามารถ ละลายน้ำได้ ถึงอย่างไรก็ตามกรดฟัลวิกจะมีความไวปฏิกิริยา (Reactivity) สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายแอลิแพติกและประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลเป็นส่วนใหญ่ (ภาควิชาปฐพีวิทยา 2541) ส่งผลให้สามารถยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารและโลหะ ได้เป็นอย่างดี ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic acid)

ที่มา : Stevenson (1994)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติบางประการและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

คุณสมบัติ	กรดฮิวมิก	กรดฟัลวิก
องค์ประกอบโดยน้ำหนัก (% by weight)		
C	50 - 60	40 - 50
H	4 - 6	4 - 6
O	30 - 35	44 - 50
N	2 - 4	< 1 - 3
S	1 - 2	0 - 2
ละลายในกรดแก่ (pH 1)	ไม่ละลาย	ละลาย
น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง	ประมาณ 100 - หลายล้าน	180 - 10,000
หมู่ฟังก์ชัน (ปริมาณออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชัน)		
คาร์บอกซิลิก	14 - 45	58 - 65
ฟีนอลิก	10 - 38	9 - 19
แอลกอฮอล์	13 - 15	11 - 16
คาร์บอนิล	4 - 23	4 - 11
เมทอกซิล	1 - 5	1 - 2

ที่มา : นัทธีรา (2541) อ้างจาก Schnitzer and Khan (1972)

3. ฮิวมิน (Humin)

ฮิวมินเป็นสารฮิวมิกชนิดหนึ่งซึ่งมักจะมีสีดำ ไม่สามารถละลายได้เลยทั้งในน้ำและสารละลายไม่ว่าที่ pH ใดๆ ก็ตาม โครงสร้างจะมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับกรดฮิวมิก แต่จะมีวงแหวนแอโรแมติกน้อยกว่า ภายในโครงสร้างมีองค์ประกอบเป็นพวกเอสเทอร์ และกรดต่างๆ อีกทั้งสายไฮโดรคาร์บอนที่ยาวต่อกันเรื่อยๆ ฮิวมินมีความคงทนมาก ยากต่อการย่อยสลายเมื่ออยู่ในธรรมชาติ และไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือมีบทบาทในดินมากนัก ดังนั้นจึงไม่นิยมกล่าวถึงฮิวมิน

2.3 การประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้ภายหลังกระบวนการหมักด้วย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่อการใช้งานด้านเกษตรและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้การนำปุ๋ยหมักที่ไม่เจริญเต็มที่และไม่เสถียรไปใช้สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืชและสิ่งแวดล้อมได้ (Wu et al., 2000) เช่นในช่วงของการเก็บรักษา ปุ๋ยหมักที่ได้ อาจก่อให้เกิดการพัฒนาของพวกจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเกิดแก๊ส ซึ่งสามารถติดไฟได้ และก่อให้เกิดการระเบิดของถุงที่ใช้บรรจุตามมา นอกจากนี้ การใช้ปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสถียรหรือกระบวนการหมักยังไม่เสร็จสมบูรณ์ อาจก่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสถียรนี้ต่อโดยจุลินทรีย์เมื่อใส่ปุ๋ยหมักลงไปในดิน ซึ่งปลดปล่อย

แก๊สแอมโมเนียอิสระหรือกรดอินทรีย์บางชนิด สามารถสร้างผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ โดยจำกัดการงอกของเมล็ดและการพัฒนาของราก (Bernal et al., 2009) ทั้งนี้ปุ๋ยหมักที่ผ่านกระบวนการหมักปุ๋ยนานเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณคาร์บอนในกรดฮิวมิก ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นเริ่มลดน้อยลง จึงเกิดการย่อยสลายและใช้พลังงานจากสารฮิวมิก ส่งผลทำให้ปริมาณและเสถียรภาพของกรดฮิวมิกลดลงนั้นก็หมายถึงคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ลดลงด้วย

การตรวจสอบคุณภาพและการเจริญเติบโตของปุ๋ยหมักนั้นสามารถใช้วิธีสังเกตคุณลักษณะทางกายภาพอย่างง่ายที่วัดได้ในภาคสนามเช่น สี กลิ่น อุณหภูมิ ลักษณะของเนื้อปุ๋ย และทางเคมีที่วัดได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสารอินทรีย์วัตถุในระหว่างการหมักปุ๋ยโดยพิจารณาผ่านดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่น่าสนใจในการศึกษาความพร้อมของปุ๋ยหมัก (Huang et al., 2006)

2.3.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

คุณลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักซึ่งเป็นวิธีที่ชาวบ้านนิยมใช้กัน โดยสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงง่ายๆ ได้จาก สี และกลิ่นของปุ๋ยหมัก โดยปุ๋ยหมักซึ่งหมักได้ที่แล้วจะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ไม่มีกลิ่นฉุน แต่อาจมีกลิ่นคล้ายกลิ่นของดินตามธรรมชาติ ปุ๋ยหมักมีลักษณะอ่อนนุ่ม ร่วนซุย ชาติออกจากกันได้ง่ายและไม่แข็งกระด้าง และอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักซึ่งโดยปกติในระหว่างกระบวนการหมักจะเกิดความร้อนอันเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ แต่ในระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักเริ่มจะได้ที่นั้น อุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งคงที่และมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก นั่นจะถือว่าปุ๋ยหมักได้ที่หรือสมบูรณ์แล้ว (Fialho et al., 2010; Fels et al., 2014) ทั้งนี้กระบวนการหมักปุ๋ยนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ระยะ ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ คือ

1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสมเป็นช่วงแรกของการเริ่มหมักปุ๋ย อุณหภูมิของปุ๋ยหมักมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศภายนอก เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ภายในกองปุ๋ยจะต้องใช้ระยะเวลาระยะหนึ่งในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในกองปุ๋ย โดยยังไม่เกิดกิจกรรมการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ดังนั้นสารอินทรีย์วัตถุที่นำมาทำปุ๋ยหมักจึงยังมีสภาพเดิม

2. ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงเป็นระยะที่จุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิของกองหมักเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส (ณัฐพร, 2552) แต่ทั้งนี้ระดับอุณหภูมิในกองปุ๋ยจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ชนิดและลักษณะของวัสดุที่เหลือทิ้งและขนาดของกองปุ๋ยหมักด้วย โดยวัสดุที่เป็นเส้นขนาดใหญ่ ได้แก่ ฟางข้าว และผักตบชวา จะมีอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงระหว่าง 45 - 50 องศาเซลเซียส ขณะที่วัสดุที่มีขนาดเล็ก ได้แก่ กากอ้อย แกลบ และเศษปอ จะมีอุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส (เกียรติชัย, 2547)

3. ระยะเวลาสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase)

ระยะนี้เป็นระยะที่อุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอกของปุ๋ยหมัก ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งอาหารของพวกจุลินทรีย์เหลือน้อยส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เริ่มลดน้อยลงด้วย ปุ๋ยหมักที่อยู่ในระยะนี้ยังใช้ไม่ได้ เนื่องจากยังคงมีระดับกรดอินทรีย์ที่สูงและอัตราส่วน C/N ของปุ๋ยหมักก็จะมีค่าสูง อีกทั้งมีค่า pH ที่รุนแรงหรือปริมาณของเกลือสูงซึ่งจะเป็นอันตรายต่อพืชหรืออาจทำให้พืชตายได้ (อัญชลี, 2552)

4. ระยะการเจริญเต็มที่ (Mature phase)

ระยะการเจริญเต็มที่นี้เป็นระยะที่อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังจากระยะอุณหภูมิสูง อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะลดลงจนอยู่ในช่วง Mesophilic Phase (เจนวิทย์, 2544) ซึ่งจุลินทรีย์พวก Mesophilic Microorganism จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์สารเพื่อเปลี่ยนอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นสารประกอบที่มีลักษณะคงทนที่เรียกว่า สารฮิวมิก จากนั้นอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะลดลงจนใกล้เคียงอุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ ซึ่งแสดงได้ว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (บุญส่ง, 2553; ภัทรพร, 2555)

2.3.2 มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์

กรมวิชาการเกษตรได้ออกประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการค้า พ.ศ. 2548 เพื่อควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตเพื่อจำหน่ายและรักษาผลประโยชน์ของเกษตรกร โดยกำหนดควบคุมคุณภาพปุ๋ยหมักทางกายภาพและทางเคมี ตลอดจนธาตุอาหารหลักและสารพิษบางประการ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5 × 12.5 มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกินร้อยละ 35
ปริมาณหินและกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 5
พลาสติก แก้ว วัสดุเคมีและโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30
ค่าพีเอช (pH)	5.5 – 8.5
คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20 : 1
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity: EC)	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร
ปริมาณธาตุอาหารหลัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
- ไนโตรเจน (total N)	ไม่น้อยกว่า 1.0
- ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅)	ไม่น้อยกว่า 0.5
- โพแทสเซียม (total K ₂ O)	ไม่น้อยกว่า 0.5

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 (ต่อ)

การเจริญเต็มที่ (maturation)	มากกว่าร้อยละ 80
สารหนู (Arsenic)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
โครเมียม (Chromium)	ไม่เกิน 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ทองแดง (Copper)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ตะกั่ว (Lead)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ที่มา : ราชกิจจานุเบกษา (2548)

อย่างไรก็ตามการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการค้าของกรมวิชาการเกษตรไม่เพียงพอสำหรับการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมัก เนื่องจากสามารถบ่งบอกเพียงคุณภาพและความปลอดภัยของปุ๋ยอินทรีย์ในระดับเบื้องต้นเท่านั้น แต่ไม่สามารถบอกได้ถึงระดับการเกิดฮิวมิก (Humification degree) เสถียรภาพ และปริมาณหมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิกในปุ๋ยหมัก ซึ่งมีความสำคัญและสัมพันธ์กับการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก อันนำไปสู่คุณภาพของปุ๋ยที่ได้ภายหลังจากกระบวนการหมักปุ๋ยด้วย

2.3.3 การประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

สารฮิวมิกเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญต่อการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมัก โดย Zbytniewski and Buszewski (2005) กล่าวว่าผลรวมและองค์ประกอบของสารฮิวมิก (กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน) สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักได้ โดยการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสารอินทรีย์มีระดับการเกิดฮิวมิกสูง (Jouraiphy et al., 2008) ดังนั้นการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักและความพร้อมของปุ๋ยหมักสามารถพิจารณาผ่านดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมัก ซึ่งจะมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณกรดฮิวมิก

กรดฮิวมิกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในสารฮิวมิก เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรคงทนต่อการย่อยสลายและสามารถคงตัวในสิ่งแวดล้อมได้นาน อีกทั้งมีบทบาทที่สำคัญช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดิน ช่วยเพิ่มการดูดซึมธาตุอาหารอันเป็นประโยชน์ต่อพืชและจุลินทรีย์ (วชิรธร, 2554) กรดฮิวมิกถูกนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก ดังการศึกษาของ Spaccini และ Piccolo (2009), Fels et al. (2014) ซึ่งได้ศึกษากระบวนการหมักปุ๋ย พบว่าปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักมีปริมาณเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย ซึ่งโดยส่วนใหญ่กรดฮิวมิกจะถูกสร้างขึ้นในระยะเจริญเต็มที่ของกระบวนการหมักปุ๋ย (Castaldi et al., 2005) ดังตารางที่ 5 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานเกินไปปริมาณกรดฮิวมิกจะมีแนวโน้มลดลง ดังการศึกษาของ Benito et al. (2003) และ Domeizel et al. (2004) ที่พบว่าระดับปริมาณคาร์บอนในกรดฮิวมิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น อธิบายได้ว่าเนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นเริ่มลดลงน้อยลง กระบวนการสร้างสารฮิวมิกเกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการสลาย

(mineralization process) (Sellami et al., 2008) ดังนั้นจึงเกิดการย่อยสลายกรดฮิวมิกเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงดังกล่าว

ตารางที่ 5 ปริมาณกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ย

แหล่งที่มา	อายุของปุ๋ยหมัก (วัน)	ปริมาณกรดฮิวมิก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Bennito et al. (2003)	0	1.81±0.42
	9	1.66±0.44
	23	1.42±0.21
	33	2.56±0.24
	81	2.44±0.22
	120	2.14±0.76
	145	2.84±0.64
	169	1.74±0.26
	190	1.88±0.19
Domeizel et al. (2004)	2	0.88*
	21	1.35*
	30	1.50*
	50	1.63*
	120	0.69*
Spaccini และ Piccolo (2009)	60	6.26
	90	9.74
	150	10.10
Fels et al. (2014)	0	0.84
	180	1.84

หมายเหตุ: * ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนในองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

2. ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

การประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นสามารถประเมินได้จากสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น โดยการพิจารณาการเกิดสารฮิวมิกนั้นอาจพิจารณาได้จากปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยตรง เช่น ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งจากหัวข้อที่ 2.2.2 พบว่ากรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกจะมีธาตุองค์ประกอบที่เหมือนกันแต่ในปริมาณที่ต่างกัน นั่นเป็นเพราะระดับการเกิดสารทั้งสองชนิดหรือระดับการย่อยสลายไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกในระหว่างการหมักปุ๋ยที่เวลาต่างๆ ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเกิดกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

จึงถูกใช้เป็นตัวกำหนดอายุและคุณภาพของปุ๋ยหมัก (อัญชลี, 2554; Zbytniewski and Buszewski, 2005)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก (ตารางที่ 6) ของ Huang et al. (2006), Wei et al. (2007), Droussi et al. (2009) และ Amir et al. (2010) พบว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้น ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนจะลดลงส่วนปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นยกเว้นการศึกษาของ Wei et al. (2007) ที่พบว่าไนโตรเจนมีปริมาณคงที่ ทั้งนี้การที่ปริมาณคาร์บอนลดลงอาจเป็นเพราะเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างหมักปุ๋ยและจุลินทรีย์มีการใช้คาร์บอน เพื่อการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนนี้ลดลง (อันวดี, 2547) ส่วนปริมาณไฮโดรเจนที่ลดลงจะชี้ให้เห็นถึงการถูกแทนที่หรือแตกออกของสายโซ่แอลิแฟติกเพื่อจะรวมเป็นกลุ่มแอโรแมติก ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเกิดการรวมตัวกันของลิควินและโปรตีนในโครงสร้างกรดฮิวมิก และการที่ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้เห็นว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากขึ้น เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) (Fuented et al., 2007)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฟัลวิก พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนจะลดลงส่วนปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยยกเว้นจากการศึกษาของ Baddi et al. (2004) ที่พบว่าปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นมีอินทรีย์คาร์บอนสูงและย่อยสลายยาก ส่งผลให้สารฮิวมิกที่ได้มีความเป็นแอลิแฟติกสูงเสถียรภาพต่ำลง (จุฑาวรรณ, 2557)

ตารางที่ 6 ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน

ชนิดของปุ๋ยหมัก	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)			
		C	H	O	N
กรดฮิวมิก					
มูลหมูผสมขี้เลื่อย ¹	0	52.70	6.23	34.70	4.88
	63	47.90	5.50	40.00	5.28
ขยะมูลฝอยเทศบาล ²	0	48.40	6.40	38.40	2.80
	63	45.30	5.80	42.10	2.70
ของเสียจากกากมะกอก ³	3	70.00	10.29	17.69	1.05
	267	57.81	6.15	26.22	5.35
กากปฏิกูลผสมของเสียสีเขียว ⁴	0	47.90	6.90	37.60	6.80
	135	47.50	6.55	37.50	7.30
กรดฟัลวิก					
ของเสียจากโรงงานมะกอกผสมฟางข้าว ⁵	30	48.20	6.94	41.75	1.61
	360	50.23	7.18	36.39	4.21

ตารางที่ 6 ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน (ต่อ)

มูลหมูผสมขี้เลื่อย ¹	0	45.2	8.72	43.6	1.39
	63	42.5	7.95	47.3	1.24
กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียผสมเศษพืช ⁶	30	34.61	5.21	39.00	4.28
	135	31.21	4.55	44.30	4.21

ที่มา: ¹ Huang et al. (2006), ² Wei et al. (2007), ³ Droussi et al. (2009), ⁴ Amir et al. (2010), ⁵ Baddi et al. (2004), ⁶ Jouraiphy et al. (2008)

3. อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ

- อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio)

อัตราส่วนระหว่างธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) เป็นตัวบ่งชี้ถึงหมู่ O-alkyl และหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนในองค์ประกอบ นั่นก็คือ หมู่คาร์บอกซิลิกและฟีนอลิกในสารฮิวมิก หากอัตราส่วน O/C มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าโครงสร้างของสารฮิวมิกมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fuentes et al. (2007) และ Jouraiphy et al. (2008) พบว่าอัตราส่วน O/C นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยผ่านไป (ตารางที่ 7) เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนซึ่งอุดมไปด้วยออกซิเจน เช่น โพลีแซคคาไรด์ และเกิดเป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Amir et al., 2010)

ทั้งนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนนี้ยังไม่แน่นอน เนื่องจากการศึกษาของ Baddi et al. (2004) และ Wei et al. (2007) พบว่าอัตราส่วน O/C มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยผ่านไป สารอินทรีย์คาร์บอนได้ถูกย่อยสลายเกิดเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่ซับซ้อนมากขึ้น หรือมีหมู่ O-alkyl ลดลงนั่นเอง

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H ratio)

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) มีความสำคัญมากในการบ่งชี้ถึงอัตราการเกิดโครงสร้างแอโรแมติกและการเกิดสารฮิวมิก โดยเมื่ออัตราส่วน C/H เพิ่มขึ้นจะบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างแอโรแมติกในระหว่างการหมักปุ๋ย เนื่องจากสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต โพลีแซคคาไรด์ หรือกรดไขมัน ได้ถูกย่อยสลาย และเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว (โครงสร้างแอโรแมติก) เพิ่มมากขึ้นมากกว่าโครงสร้างอิ่มตัว (Fuentes et al., 2007; Droussi et al., 2009)

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) แสดงถึงปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนภายในโครงสร้างของสารฮิวมิก เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักจะทำให้คาร์บอนและไนโตรเจนเปลี่ยนรูปไป โดยส่วนหนึ่งของคาร์บอนและไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกรวมเข้าไปในโมเลกุลของสารฮิวมิก ดังนั้นเมื่อเกิดสารฮิวมิกมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนนี้ลดลง (อัญชลี, 2552) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Baddi et al. (2004),

Fuentes et al. (2007), Wei et al. (2007) และ Jouraiphy et al. (2008) ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วน C/N มีแนวโน้มลดลง แสดงว่าสารอินทรีย์ในโตรเจนซึ่งมีความคงทนต่อการย่อยสลาย ได้ถูกรวมเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของกรดฮิวมิก ซึ่งบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการเกิดสารฮิวมิกนั่นเอง (Hargitai, 1994)

ตารางที่ 7 อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยจากวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกัน

วัตถุดิบตั้งต้น	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ (%)		
		O/C	C/H	C/N
ของเสียจากโรงงานมะกอก	30	0.65	0.58	34.92
ผสมฟางข้าว ¹	360	0.54	0.58	13.95
มูลแกะ ²	0	1.04	0.90	78.00
	120	1.32	0.94	10.60
ขยะมูลฝอยเทศบาล ³	0	1.04	0.63	32.60
	63	0.78	1.04	6.80
กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียผสมเศษพืช ⁴	30	0.85	0.55	9.43
	135	1.06	0.57	8.65

ที่มา: ¹Baddi et al. (2004), ²Fuentes et al. (2007), ³Wei et al. (2007), ⁴Jouraiphy et al. (2008)

4. การติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารฮิวมิก

จากโครงสร้างของสารฮิวมิกที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันมากมาย ดังนั้นการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิกจึงสามารถติดตามได้จากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ ซึ่งนอกจากจะวิเคราะห์ได้โดยตรงแล้ว ยังมีคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้ในการติดตามตรวจสอบดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมักปุ๋ย เพื่อกำหนดอายุของปุ๋ยหมักและหาคุณภาพของสารฮิวมิกที่ดีและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด โดยเทคนิคหนึ่งที่สำคัญและนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการติดตามตรวจสอบคุณภาพภาพของปุ๋ยหมักจากลักษณะทางโครงสร้างคือ ฟิวรีเออร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) (He et al., 2013; Zhou et al., 2014; Higashikawa et al., 2014)

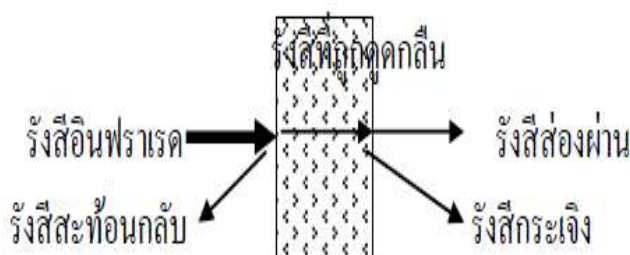
2.4 การประยุกต์ใช้ฟิวรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) ในการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก

เทคนิคฟิวรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) เป็นเทคนิคหนึ่งที่สำคัญและนิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสาร โดยอาศัยหลักการของคุณสมบัติการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของสารกับพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่ารังสีอินฟราเรด โดยสารโมเลกุลหนึ่งที่ต่างชนิด

กันจะสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ช่วงคลื่นแตกต่างกันและให้สเปกตรัมแตกต่างกันได้ และโดยทั่วไปแล้วจะไม่พบว่าสารคู่ใดที่มีสเปกตรัมเหมือนกันเกือบทุกประการ ยกเว้นกรณีที่เป็นคู่อิแซนชิโอเมอร์ (อีริทอร์และเวอรอร์ม, 2548) อย่างไรก็ตามสารที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทเดียวกัน มักจะให้พีคลักษณะคล้ายกันที่ตำแหน่งจำนวนคลื่นใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีความแตกต่างของส่วนอื่นในโมเลกุลบ้าง ดังนั้นอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงถูกใช้ในการบอกหมู่ฟังก์ชันสำคัญๆ ในโมเลกุลของสารที่สนใจ โดยจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นของพันธะในโมเลกุลอันจะนำไปสู่การหาหมู่ฟังก์ชันของสารนั้น และเป็นประโยชน์ในการหาสูตรโครงสร้างของสารต่อไป

2.4.1 หลักการและทฤษฎี

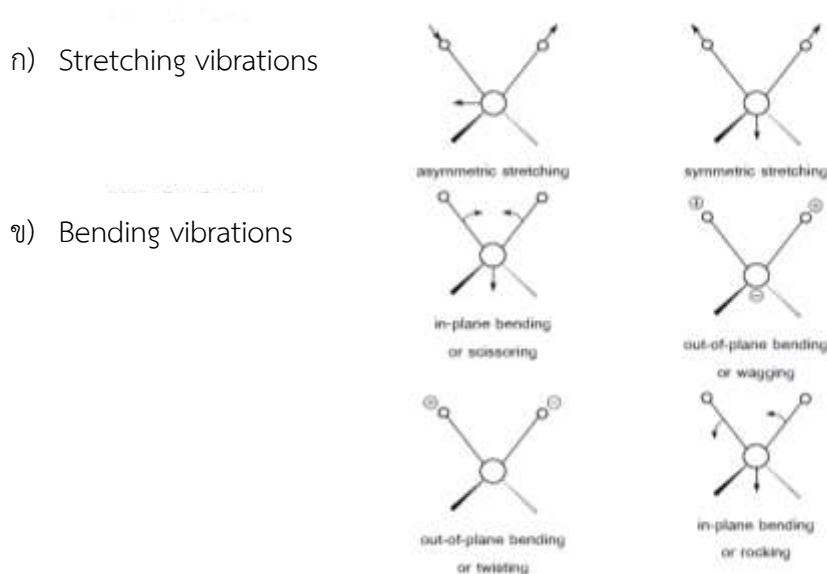
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้หาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ โดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเลขคลื่น $4,000 - 400$ เซนติเมตร⁻¹ (cm^{-1}) (Wave number) หรือ ความยาวคลื่น $2.5 - 1.5$ ไมโครเมตร (μm) (Wavelength) ซึ่งมีประโยชน์ในการหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ อันเป็นข้อมูลหนึ่งในการหาสูตรโครงสร้างของสาร (เสาวรส, 2537) กล่าวคือเมื่อฉายรังสีอินฟราเรดไปยังโมเลกุลของสาร ซึ่งจะเกิดอัตรกิริยาของสาร และทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานโดยจะพบว่าบางส่วนของรังสีจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนอาจเกิดการกระเจิง (Scattered) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดขึ้นอย่างพร้อมๆ กัน และบางส่วนอาจเกิดการส่องผ่านออกมา (Transmit) ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งจะถูกวัดและปรากฏเป็นสเปกตรัม



ภาพที่ 7 แผนภาพแสดงการเกิดอัตรกิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง
ที่มา : สุภาวดี (2555)

ทั้งนี้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลสารจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล (ปกติจะใช้พลังงานตั้งแต่ $2 - 10$ Kcal/mol) เท่านั้น โมเลกุลจะเกิดการสั่นขึ้น ซึ่งการสั่นของโมเลกุลแบบพื้นฐาน (Fundamental vibration) จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ การสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ซึ่งเป็นการสั่นที่เกิดขึ้นที่พันธะระหว่างอะตอม 2 อะตอมใดๆในโมเลกุล โดยอะตอมที่สร้างพันธะกันจะสั่นในแนวแกนของพันธะ ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปโดยอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง การสั่นแบบนี้อาจจะเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) หรือไม่สมมาตร (Asymmetry) ก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 8 ก) และการสั่นแบบงอ (Bending vibration หรือ bond bending) ซึ่งจะเป็นการงอของพันธะออกจาก bond axis การสั่นแบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะ (Bond length) น้อย แต่จะทำให้มุมระหว่างพันธะ (Bond angle) กว้างออกไปหรือลดลง การสั่น

แบบนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 4 แบบ คือ Scissoring ซึ่งเกิดจากสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลาง เคลื่อนที่เข้าหากันหรือออกจากกันในระนาบของโมเลกุล, Rocking เกิดจากสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางแกว่งไปด้านข้างในระนาบของโมเลกุล, Twisting เกิดจากสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางหมุนรอบพันธะนอกระนาบของโมเลกุล และ Wagging เกิดจากสองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางแกว่งไปข้างหลังและข้างหน้านอกระนาบของโมเลกุล ดังภาพที่ 8 ข)



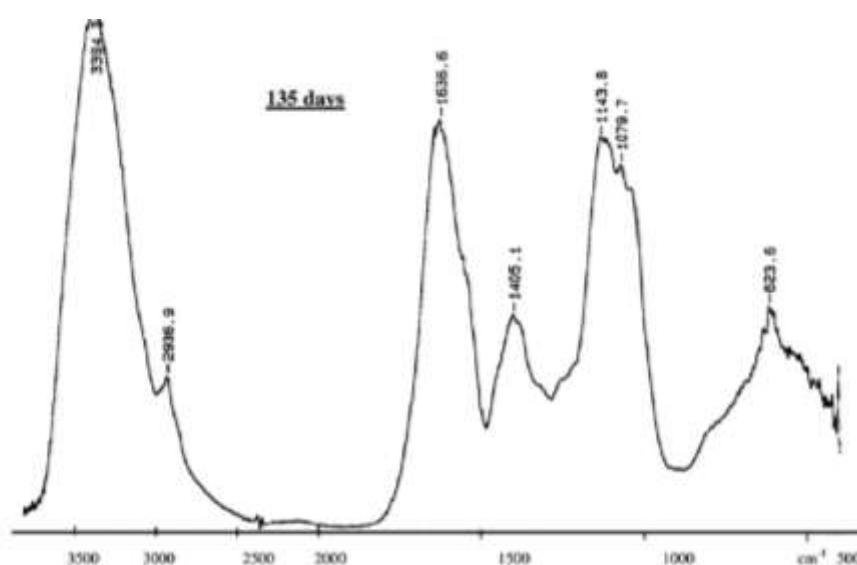
ภาพที่ 8 การสั่นของโมเลกุลแบบต่างๆ

- ก) การสั่นของโมเลกุลแบบยืด: Asymmetric stretching และ Symmetric Stretching
 ข) การสั่นแบบงอในระนาบ (in-plane bending) และการสั่นแบบงอนอกระนาบ (out-of-plane bending) ทั้ง 4 แบบ

ที่มา : อีริยทและวรวรรณ (2548)

อย่างไรก็ตาม การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลมิใช่ทุกโมเลกุลของสารจะดูดกลืนได้หมด แต่จะต้องมีลักษณะเฉพาะและอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมด้วย คือ คลื่นแสงอินฟราเรดนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะและพอดี (Quantize) ที่จะทำให้เกิดแทรนซิชันและต้องเกิดการควบคู่ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารทดสอบ เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป ดังนั้น เมื่อใช้รังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้ เรียกสารนั้นว่า IR active หรือถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (สังวาลย์, 2550) จึงไม่เห็นยอดแหลมหรือพีคในสเปกตรัมอินฟราเรด ตัวอย่างเช่น โมเลกุลที่เป็น Symmetric bond (H_2 , Cl_2 , O_2) และ Symmetric alkenes ($C=C$) เป็นต้น ทั้งนี้ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สูง ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยก็แสดงการดูดกลืนรังสีแบบอ่อน (อัคกะบัทคาน, 2543)

การแสดงผลการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของโมเลกุลจะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัมหรือแถบการดูดกลืน เมื่อปรากฏบนกระดาษสเปกตรัม จะมีลักษณะเป็นพีก (Peak) หรือแถบ (Band) ซึ่งเกิดจากการพล็อตระหว่างปริมาณรังสีที่ส่องผ่าน (transmittance) หรือปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความยาวคลื่น (Wavelength) ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งเป็นตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมขององค์ประกอบฟัลลิก ซึ่งสกัดมาจากปุ๋ยหมักจากกากตะกอนภายหลังจากกระบวนการหมัก 135 วัน



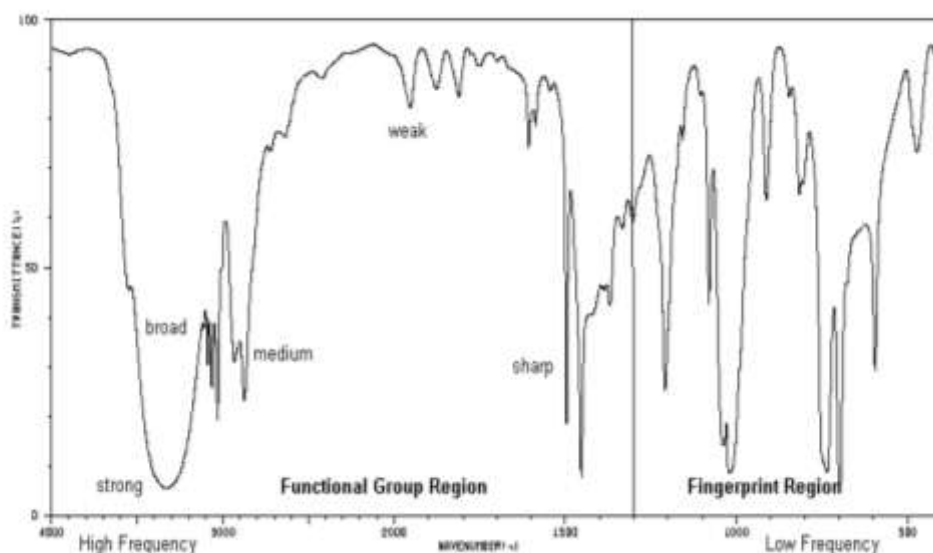
ภาพที่ 9 FTIR สเปกตรัมขององค์ประกอบฟัลลิกซึ่งสกัดมาจากปุ๋ยหมักจากกากตะกอนภายหลังจากกระบวนการหมัก 135 วัน

ที่มา : Jouraiphy et al. (2008)

สำหรับการแปลความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัม จะต้องพิจารณาช่วงของการดูดกลืนแสงที่สำคัญ 2 ช่วงคือ ช่วงบริเวณหมู่ฟังก์ชัน (Functional group region) ตั้งแต่ 4000 - 1300 เซนติเมตร⁻¹ โดยจะเป็นช่วงที่พบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ เช่น O-H, N-H และ C=O เป็นต้น และช่วงบริเวณลายนิ้วมือ (Fingerprint region) ตั้งแต่ 1300 - 900 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นช่วงที่แถบการดูดกลืนที่ได้จะซับซ้อน แต่จะมีประโยชน์มากเมื่อใช้เปรียบเทียบกับสารเดียวกันกับสารอ้างอิงหรือไม่ โดยสามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะของสารแต่ละสารที่ไม่เหมือนกันได้ (สุภาวดี, 2555)

การแปลผลแถบอินฟราเรดสเปกตรัม นอกจากจะต้องพิจารณาดำแหน่งของพีกแต่ละพีกว่าอยู่ที่ความถี่ใดแล้ว ในอินฟราเรดสเปกตรัมจะต้องบอกด้วยว่าลักษณะของพีกนั้นๆ เป็นอย่างไร เช่น ถ้าพีกนั้นมีลักษณะเรียวแหลม เรียกว่า ชาร์ป (Sharp) ถ้าพีกนั้นมีลักษณะของการดูดกลืนกว้างเราจะเรียกว่า บรอร์ด (Broad) ทั้งนี้ความเข้มของแต่ละพีกเมื่อเปรียบเทียบกับก็มี

ความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยจะต้องระบุด้วยว่าพีกนั้นเข้มมาก (Strong, s) เข้มปานกลาง (Medium, m) ความเข้มน้อย (Weak, w) หรือเป็นไหล่ (Shoulder) ดังในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตัวอย่างของอินฟราเรดสเปกตรัม (เบนซิลแอลกอฮอล์)

ที่มา : อีรยุทธและวรวรรณ (2548)

อย่างไรก็ดี ในกรณีของสารอินทรีย์ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีทั้งสายตรง และวงแหวนตลอดจนมีหมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะไม่อิ่มตัวมาก ดังภาพที่ 5 ทำให้เกิดแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่าง ๆ หลายตำแหน่ง และบ้างก็ซ้อนทับกัน การใช้คุณลักษณะของการดูดกลืนแสงด้วย FT-IR มาอธิบายเพื่อเทียบการอ้างอิงของสารอินทรีย์ที่มาจากหลายแหล่งย่อมเป็นไปได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถระบุให้ชัดเจนได้ว่าที่ตำแหน่งจำนวนคลื่นนั้นๆ ได้รับอิทธิพลจากโครงสร้างใดบ้าง แต่การดูดกลืนแสงด้วย FT-IR ก็ยังคงเป็นประโยชน์อย่างมากในการเปรียบเทียบสารอินทรีย์ที่มาจากแหล่งเดียวกัน (Stevenson, 1994) โดยวิวัฒนาการของพีกที่ตำแหน่งเดียวกัน จะได้รับอิทธิพลมาจากโครงสร้างอื่น ๆ ในทำนองเดียวกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของพีก ณ ตำแหน่งนั้นขึ้นกับปัจจัยที่ได้รับอิทธิพลเฉพาะกับสารอินทรีย์นั้น ๆ เช่น กรณีการหมักปุ๋ย ที่การเปลี่ยนแปลงของพีกขึ้นกับระยะเวลาและกระบวนการหมัก เป็นต้น

2.4.2 การประยุกต์ใช้ FT-IR ในการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก

เทคนิค FT-IR ถูกนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาการตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในกระบวนการเกิดฮิวมิค โดยสามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันได้ ซึ่งจะอธิบายระดับการเกิดฮิวมิค รวมถึงบ่งบอกคุณสมบัติเสถียรภาพของโครงสร้างได้อีกด้วย (Zhou et al., 2014) ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Jouraiphyetal., (2008) ได้ศึกษาโครงสร้างของกรดฟัลวิกในช่วงกระบวนการหมักปุ๋ยของกากตะกอนของเสียผสมชีวมวล แสดงให้เห็นว่าในช่วงท้ายของกระบวนการหมักปุ๋ย โครงสร้างของกรดฟัลวิกมีการเพิ่มขึ้นและสามารถติดตามได้จากการเกิดการสร้างพันธะอีเทอร์และเอสเทอร์ในช่วงกระบวนการเกิดฮิวมิค ในขณะที่ Huang et al.

(2006) ได้ศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักจากมูลสุกรผสมแกลบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอินฟราเรดสเปกตรัมบ่งชี้ถึงอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่าย เช่น สายโซ่แอลิแฟติก โพลีแซคคาไรด์ และแอลกอฮอล์นั้นถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์หรือทางเคมี ได้เป็นปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่ อุดมไปด้วยโครงสร้างแอโรแมติกที่เสถียร เมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น โดยได้แสดงตัวอย่างแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดหลักๆ ของสารฮิวมิก ไว้ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดหลักๆของสารฮิวมิก

ตำแหน่งจำนวนคลื่น (เซนติเมตร ⁻¹)	พันธะ	อ้างอิง
3550 - 3200	การสั่นของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลของแอลกอฮอล์ ฟีนอลและกรดอินทรีย์	Zhou et al. (2014) Silverstein et al. (1991)
2920 2930	พันธะ C-H ภายในโครงสร้างแอลิแฟติก พันธะ C-H ภายในโครงสร้างแอโรแมติก	Wei et al. (2007) Silverstein et al. (1991)
2000 - 2500 2100 - 2260	พันธะ C=C และ C≡N พันธะ C≡C	เย็นฤทัย (2547)
1640 - 1620	พันธะ C=C และ C=O ภายในโครงสร้างของควิโนน คีโตน และหมู่แอมไนด์ (แอมไนด์ปฐมภูมิ)	Fuentes et al. (2007)
1540 - 1507	พันธะ C=N ในแอมไนด์ (แอมไนด์ทุติยภูมิ)	Droussi et al. (2009)
1450 - 1410	พันธะ C-O, O-H และ C-O-H ของหมู่ คาร์บอกซิล และหมู่คาร์บอกซิเลต	Fialho et al. (2010)
1460 - 1360	หมู่ CH ₂ และ CH ₃ ภายในโครงสร้างแอลิแฟติก	Silva et al. (2014)
1260 - 1200	พันธะ C-O ของกรดอินทรีย์ และ C-O-C ของแอโรแมติกอีเทอร์	Silva et al. (2014)
1170 - 950	พันธะ C-O ภายในโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต โพลีแซคคาไรด์	Fialho et al. (2010)
ใกล้เคียง 720	หมู่ CH ₂ มากกว่า 3 หมู่ขึ้นไปมาเรียงเป็นเส้นตรง	เย็นฤทัย (2547)
667	พันธะ =CH ภายในโครงสร้างแอโรแมติก	เย็นฤทัย (2547)

นอกจากการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง เพื่อติดตามการพัฒนาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกแล้ว ยังสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของฟีกที่มีการเปลี่ยนแปลงเด่นชัดและสำคัญของปุ๋ยหมักต่างชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9 เพื่อใช้ประกอบการอธิบายแนวโน้มการพัฒนาโครงสร้างกรดฮิวมิกและช่วยยืนยันคุณภาพของปุ๋ยหมักให้ชัดเจนขึ้น โดยอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงระหว่างแอรแมติกต่อแอลิแพติก ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ระดับการเกิดฮิวมิก การเจริญเต็มที่และเสถียรภาพของปุ๋ยหมักได้ โดยแอรแมติกเป็นตัวแทนโครงสร้างหลักของกรดฮิวมิก และแอลิแพติกเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ตั้งต้นในการสร้างกรดฮิวมิก ปุ๋ยหมักคุณภาพดีควรจะประกอบด้วยโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่มีเสถียรภาพสูง โดยโพลีแซคคาไรด์และแอลิแพติกจะต้องถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแอรแมติก ดังนั้นหากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างโครงสร้างแอรแมติกต่อแอลิแพติกมีค่าสูง แสดงว่าโครงสร้างกรดฮิวมิกนั้นเจริญเต็มที่และมีเสถียรภาพสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsu and Lo (1999) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนรูปของอินทรีย์วัตถุในช่วงกระบวนการหมักปุ๋ยของมูลหมู พบว่าเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นค่าอัตราส่วน 1650/2939, 1650/2850, 1650/1560 และ 1650/1050 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่ายเช่น โครงสร้างแอลิแพติก สารประกอบแอมด์ โพลีแซคคาไรด์ และแอลกอฮอล์ ถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์หรือทางเคมี ได้เป็นปุ๋ยหมักที่เจริญเต็มที่ซึ่งอุดมไปด้วยโครงสร้างแอรแมติกที่เสถียรมากขึ้น

ตารางที่ 9 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงในกรดฮิวมิก

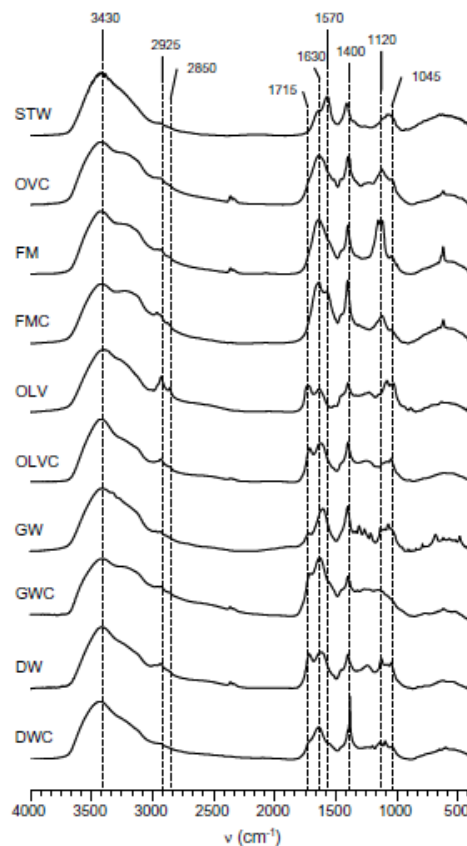
ชนิดของปุ๋ยหมัก	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกรดฮิวมิก	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง
ปุ๋ยหมักจากมูลหมู ¹	<u>แอรแมติก/แอลิแพติก</u>	↑
	1650/2930	
	1650/2850	
	1650/1560	
กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ²	<u>แอรแมติก/แอมด์</u>	↑
	1652/1543	
	<u>แอรแมติก/พันธะ C-O</u>	↑
	1652/1384	
ปุ๋ยหมักจากเศษเหลือทิ้งจากปาล์มผสมหญ้าสับ ³	<u>พันธะ C-O ต่อ แอลิแพติก</u>	↑
	1034/2925	
	<u>แอรแมติก/แอลิแพติก</u>	↑
	1650/2925	
จากปาล์มผสมหญ้าสับ ³	1650/2845	
	<u>แอมด์/แอลิแพติก</u>	↑
	1525/2925	

หมายเหตุ: ¹ Hsu and Lo (1999); ² Amir et al. (2010); ³ Ouagoudi et al. (2015)

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักด้วยเทคนิค FT-IR

สุภาวดี สีสาย (2555) ศึกษาติดตามระดับการเกิดฮิวมิค (Humification degree) ระหว่างการหมักของปุ๋ยหมักโดยใช้หมูฟังก์ชันที่เป็นกรดร่วมกับเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปีโดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโครงสร้างและเสถียรภาพตลอดกระบวนการหมักปุ๋ยของกรดฮิวมิค เพื่อกำหนดอายุหรือระยะเวลาการหมักและเก็บรักษาปุ๋ยหมักให้ได้คุณภาพ พบว่าการศึกษาเชิงปริมาณเพียงอย่างเดียวอาจไม่บ่งบอกข้อมูลอะไรมากนัก แต่เมื่อเพิ่มการศึกษาในเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค FT-IR จะช่วยให้มองเห็นการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกรดฮิวมิคที่สะท้อนต่อคุณภาพปุ๋ยหมัก ดังเห็นได้จากการศึกษาหมูฟังก์ชันที่เป็นกรดซึ่งพบว่าปริมาณหมูฟังก์ชันที่เป็นกรดที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดฮิวมิค มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการศึกษากรดฮิวมิคด้วยเทคนิค FT-IR กลับพบว่าคุณภาพปุ๋ยหมักมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยมากขึ้น โดยจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอมไดกต่อแอลิแพติกที่ 1650/2930, 1650/1450 และ 1650/1380 กับระยะเวลาการหมักปุ๋ย พบว่าปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพและเสถียรภาพ คือ ตั้งแต่วันที่ 35 - 49 (2 สัปดาห์) แต่หลังจากวันที่ 49 จะพบว่าค่า 1650/2930, 1650/1450 และ 1650/1380 เริ่มมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าระดับการเกิดกรดฮิวมิคมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ตั้งต้นในการสร้างกรดฮิวมิคเหลือน้อยทำให้กระบวนการสร้างสารฮิวมิคเกิดได้น้อย ในขณะที่กระบวนการนำกรดฮิวมิคไปใช้โดยจุลินทรีย์ยังคงดำเนินต่อไป ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดต่ำลง

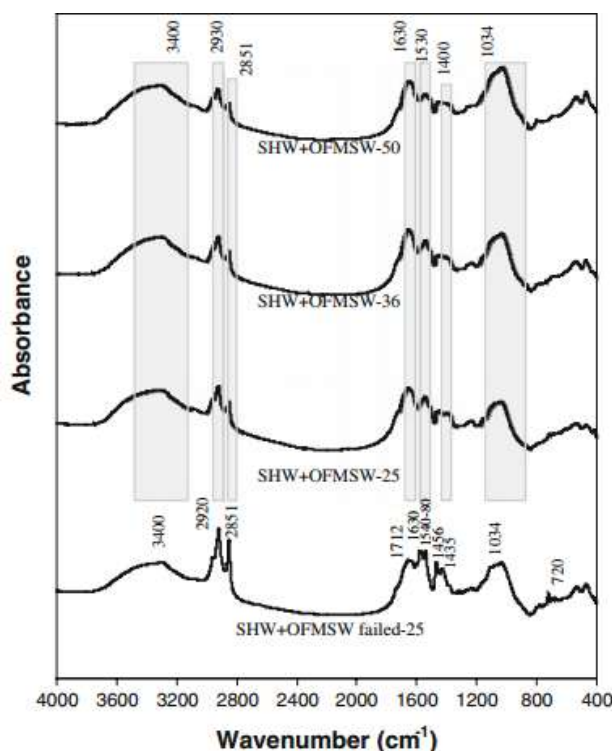
Fuentes et al. (2007) ศึกษาการใช้เทคนิค FT-IR ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิคในปุ๋ยหมักจากวัตถุดิบตั้งต้นที่มีแหล่งกำเนิดแตกต่างกัน (มูลแกะ, มูลสัตว์, วัสดุเหลือทิ้งจากต้นมะกอก, วัสดุเหลือทิ้งโรงงานทำไวน์ และวัสดุเหลือทิ้งจากบ้านเรือน) พบว่ากรดฮิวมิคของปุ๋ยหมักทุกสูตรแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันต่างกันเพียงแค่ว่าความเข้มในการดูดกลืนแสง ดังภาพที่ 11 โดยจากการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย พบการเปลี่ยนแปลงที่เห็นเด่นชัดของการดูดกลืนแสงในช่วงตำแหน่งจำนวนคลื่น 2925 - 2850 เซนติเมตร⁻¹ และที่ 1040 เซนติเมตร⁻¹ ที่มีแนวโน้มลดลง ขณะที่การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1715 เซนติเมตร⁻¹, 1640 เซนติเมตร⁻¹, 1460 เซนติเมตร⁻¹ และ 1400 เซนติเมตร⁻¹ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเหล่านี้ ซึ่งอาจเกิดมาจากการเพิ่มขึ้นของหมู่คาร์บอนิล (COOH, คีโตน, อัลดีไฮด์, อีเทอร์) ภายในโครงสร้างแอมไดก ฟีนอลิก และควิโนน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้จากเทคนิค FT-IR บ่งชี้ได้ว่าโครงสร้างแอลิแพติก และโพลีแซคคาไรด์มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงกระบวนการหมัก ขณะที่สารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวกันของโครงสร้างแอมไดกกลับมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีค่าสอดคล้องกับผลการศึกษากรดฮิวมิคด้วยเทคนิค ¹³C NMR



ภาพที่ 11 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกที่สกัดมาจากปุ๋ยก่อนและหลังกระบวนการหมัก: DW และ DWC ก่อนและหลังกระบวนการหมักของปุ๋ยจากวัสดุเหลือทิ้งจากบ้านเรือน, GW และ GWC ก่อนและหลังกระบวนการหมักของปุ๋ยจากวัสดุเหลือทิ้งโรงงานทำไวน์, OLV และ OLVC ก่อนและหลังกระบวนการหมักของปุ๋ยจากวัสดุเหลือทิ้งจากต้นมะกอก, FW และ FMC ก่อนและหลังกระบวนการหมักของปุ๋ยจากมูลสัตว์ และ OVC และ STW ก่อนและหลังกระบวนการหมักของปุ๋ยจากมูลแกะผสมฟางข้าว

ที่มา: Fuentes et al. (2007)

Cueto et al. (2010) ศึกษาปุ๋ยหมักจากของเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ผสมกับขยะมูลฝอยเทศบาลที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าสารอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนก่อให้เกิดการเพิ่มของโครงสร้างแอโรแมติกและการลดลงของโครงสร้างแอลิฟาติก โดยจะสังเกตเห็นแถบการดูดกลืนของโครงสร้างแอโรแมติกที่ช่วงตำแหน่งจำนวนคลื่น 1630 - 1650 เซนติเมตร⁻¹ (C=C, C=O) และ 1580 เซนติเมตร⁻¹ (C=C, C=N) ซึ่งมีการดูดกลืนคลื่นแสงเพียงเล็กน้อยในช่วงแรกและค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเวลาการหมักปุ๋ยผ่านไป ขณะที่การดูดกลืนคลื่นที่ตำแหน่ง 2920 เซนติเมตร⁻¹ และ 1400 เซนติเมตร⁻¹ อันแสดงถึงโครงสร้างแอลิฟาติกและหมู่คาร์บอกซิเลตหรือหมู่ CH₃ ที่ลดลงด้วย (ภาพที่ 12)



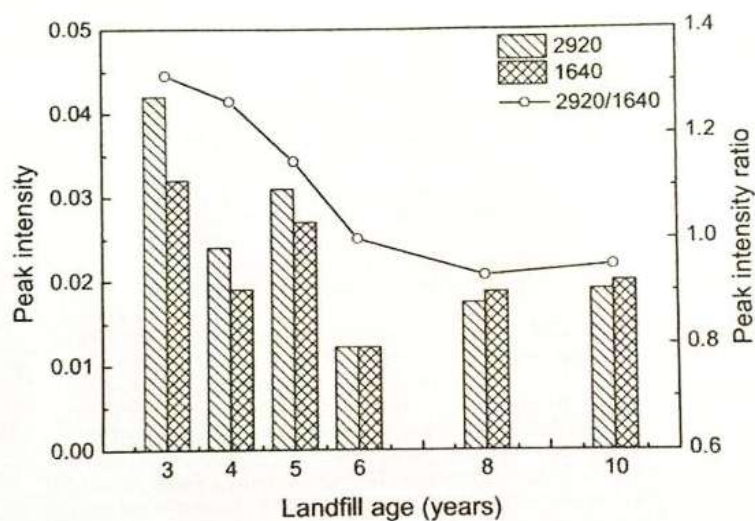
ภาพที่ 12 อินฟราเรดสเปกตรัมของปุ๋ยหมักภายหลังจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ได้ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการหมัก

ที่มา: Cueto et al. (2010)

เมื่อศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างแอมไครนต่อแอลิแพติกที่ 1630/2930, 1630/2851 และ 1530/2930 ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าดัชนีบ่งบอกถึงเสถียรภาพได้ โดยแสดงถึงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโครงสร้างของอินทรีย์วัตถุ พบว่าค่าอัตราส่วนเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันแสดงว่าอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่าย เช่น สารประกอบแอลิแพติกและแอลกอฮอล์ได้ถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์ ส่งผลให้สารระเหยภายในวัสดุที่ใช้ในการหมักนั้นลดลง ขณะที่ระดับความเป็นแอมไครนเพิ่มขึ้น.

Wu et al. (2011) ได้ศึกษาการประเมินเสถียรภาพของกรดฮิวมิกจากขยะมูลฝอยเทศบาลในหลุมฝังกลบที่อายุต่างๆ กัน (1 - 10 ปี) ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการดูดกลืนแสงของหมู่เมทิลีนภายในโครงสร้างแอลิแพติกที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2920 เซนติเมตร⁻¹ และ 2850 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการย่อยสลายได้ พบว่ามีค่าลดลง ขณะที่ค่าดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1640 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งอาจเกิดมาจากพันธะ C=C ภายในโครงสร้างของหมู่แอมไครนและแอมไครนอีเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของโครงสร้างแอลิแพติกที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างแอมไครนนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงที่เกิดกระบวนการย่อยสลายของวัสดุเหลือทิ้ง

อย่างไรก็ตาม ขยะมูลฝอยเทศบาลในหลุมฝังกลบที่อายุต่างๆ มีปริมาณไม่เท่ากัน การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมซึ่งกันและกันจึงเป็นเรื่องยาก ดังนั้นการศึกษาค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงจึงสามารถช่วยในการแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างขยะมูลฝอยเทศบาลในหลุมฝังกลบที่อายุต่างๆ กัน และจากการศึกษาค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 2920/1640 พบว่ามีค่าจัดอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 1.31 โดยค่าอัตราส่วนนี้ได้ลดลงตามอายุของหลุมฝังกลบ (ภาพที่ 13) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดกระบวนการสร้างโครงสร้างที่เป็นแอมโรแมติก เช่น กรดฟัลวิกหรือกรดฮิวมิก และในขณะเดียวกันก็เกิดกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่าย เช่น สารประกอบแอลิแพติก โพลีแซคคาไรด์ และแอลกอฮอล์ เป็นต้น



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2920 และ 1640 พร้อมทั้งค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 2920/1640 ที่อายุอายุของหลุมฝังกลบต่างกัน
ที่มา: Wu et al. (2011)

Ouaqoudi et al. (2015) ซึ่งศึกษาการเจริญเต็มที่และเสถียรภาพของปุ๋ยหมักจากเศษเหลือทิ้งจากใบปาล์ม (50%) ผสมลำต้นปาล์ม (50%) (ปุ๋ยหมักสูตร DPW) และปุ๋ยหมักจากเศษเหลือทิ้งจากปาล์ม (50%) ผสมหญ้าสับ (50%) (ปุ๋ยหมักสูตร DPGC) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอมโรแมติกต่อแอลิแพติกที่ 1650/2925 และ 1525/2925 เป็นอีกดัชนีหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ระดับการเกิดฮิวมิก การเจริญเต็มที่และเสถียรภาพของปุ๋ยหมักได้ การศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงของกระบวนการหมักปุ๋ยเกิดโครงสร้างแอมโรแมติกและคาร์บอนซิลิเลตเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณโพลีแซคคาไรด์ลดลง อย่างไรก็ตามยังสังเกตเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 1525/2925 ของปุ๋ยหมักสูตร DPW มีค่าลดลงในช่วง 3 - 6 เดือนของกระบวนการหมัก (ตารางที่ 10) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดกระบวนการย่อยสลายของคาร์บอนภายในโครงสร้างแอมโรแมติกและคาร์บอนภายในโครงสร้างแอลิแพติกพร้อมๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสในสารตั้งต้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่ปุ๋ยหมัก

เจริญเต็มที่แตกต่างกันได้ โดยปุ๋ยหมัก DPW จึงเจริญเต็มทีน้อยกว่าเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่
ย่อยสลายยากสูงจึงส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนานกว่าเมื่อปุ๋ยหมัก DPGC

ตารางที่ 10 สรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแอมโรแมติก
ต่อโครงสร้างแอลิแพติกของกรดฮิวมิก

ปุ๋ยหมัก	อัตราส่วน	ระยะเวลาการหมักปุ๋ย (เดือน)			
		0	3	6	14
DPW	1650/2925	1.00	1.34	1.85	3.08
	1525/2925	0.70	0.63	0.63	1.00
DPGC	1650/2925	1.23	2.00	2.10	4.40
	1525/2925	0.40	0.40	0.80	1.10

ที่มา: Ouaquodi et al. (2015)



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แบ่งกระบวนการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การผลิตปุ๋ยหมัก เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก และเตรียมตัวอย่างปุ๋ย ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน เปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรและพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ และขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยแสดงแผนผังการดำเนินการทดลองโดยรวมของการศึกษาครั้งนี้ และพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา วิธีการทดลองรวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในตารางที่ 11 และภาพที่ 14

ตารางที่ 11 วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Methodologies and instruments)

พารามิเตอร์หรือการทดลอง	วิธีการทดลอง	เครื่องมือที่ใช้
พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของปุ๋ยหมัก		
สี	วัดค่าสี	ชุดทดสอบสีดิน
กลิ่น ลักษณะของปุ๋ยหมัก	การสังเกต	
อุณหภูมิ	วัดอุณหภูมิ	เครื่องวัดอุณหภูมิ
ความชื้น (Moiture)	อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C	ตู้อบ
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	วิธีโพเทนชิโอเมตรี (Potentiometry)	เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) *	วัดสภาพการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	คำนวณจากค่า TOC	เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	คำนวณระหว่างค่า TC และ TN **	เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด และเครื่องกลั่นไนโตรเจน
ปริมาณธาตุอาหารหลัก - ไนโตรเจน (Total N) ** - ฟอสฟอรัส (P2O5) * - โพแทสเซียม (K2O) *	วิธี Kjeldahl Method วิธี Digestion with perchloric acid วิธี Atomic Absorption Spectrophotometer	เครื่องกลั่นไนโตรเจน เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิธีเบลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องเฟลมโฟโตมิเตอร์

หมายเหตุ : * ข้อมูลจากงานวิจัยของ ผศ.ดร.นันทิรา และคณะ (2558)

** ข้อมูลจากงานวิจัยของภัทรพร (2555)

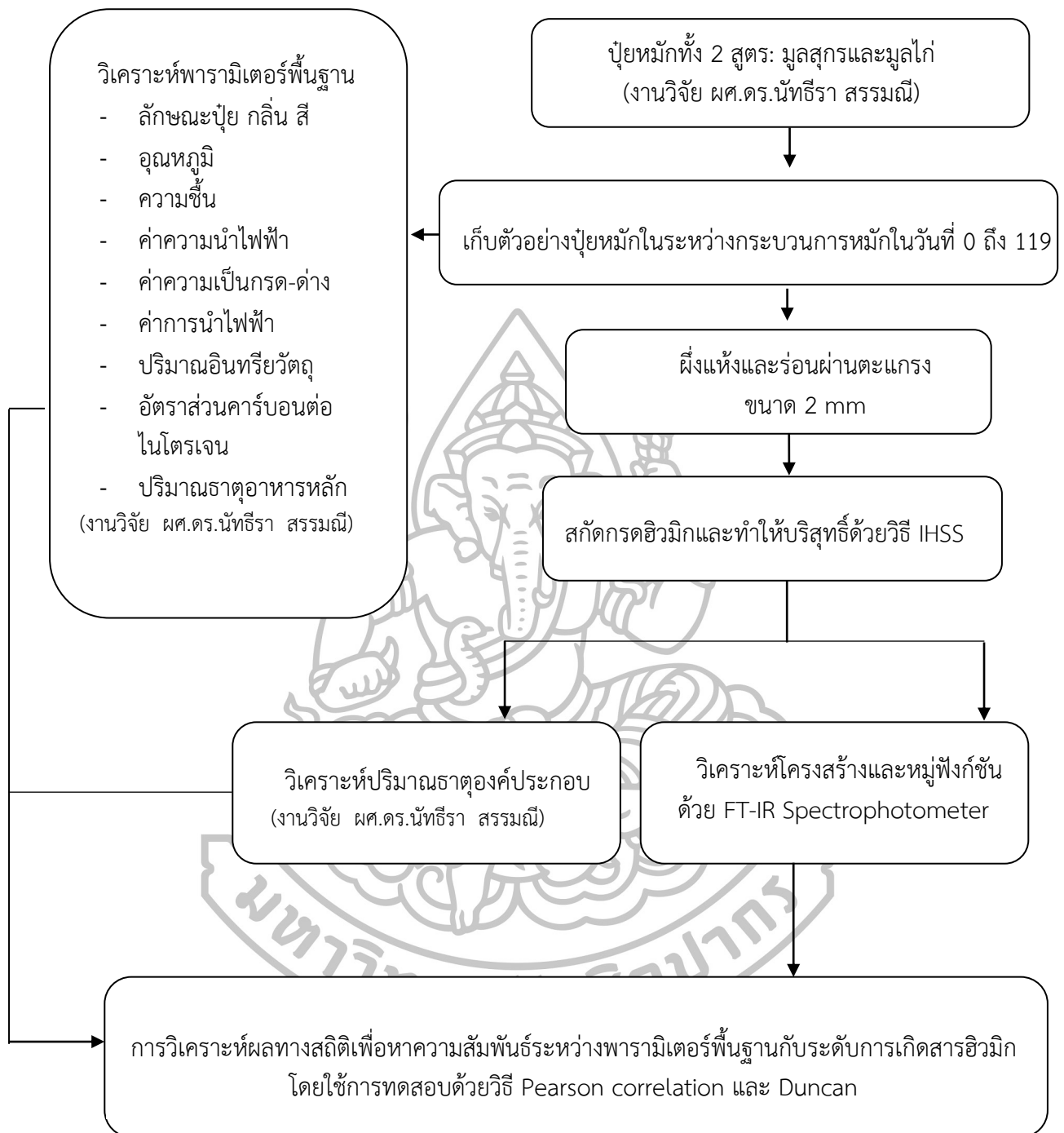
ตารางที่ 11 วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Methodologies and instruments) (ต่อ)

พารามิเตอร์หรือการทดลอง	วิธีการทดลอง	เครื่องมือที่ใช้
พารามิเตอร์ทางการเกิดสารฮิวมิก		
การสกัดแยกกรดฮิวมิก *	วิธีมาตรฐานของ IHSS	เครื่องเขย่า และเครื่องหมุนเหวี่ยง
ปริมาณธาตุองค์ประกอบ C H O N *	วิเคราะห์ธาตุ	เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN Analyzer)
พารามิเตอร์ทางการเกิดสารฮิวมิก		
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน	วิธีสเปกโทรสโกปี	เครื่อง FT-IR เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

หมายเหตุ : * ข้อมูลจากงานวิจัยของ ผศ.ดร.นันทิรา และคณะ (2558)

** ข้อมูลจากงานวิจัยของภัทราพร (2555)





ภาพที่ 14 แผนผังการดำเนินการทดลองโดยรวมของการศึกษา

3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์ (Chemical and reagents)

รายการสารเคมีและรีเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งระบุถึงบริษัทผู้ผลิต และ Chemical Abstracts Service number (CAS No.) ของสารเคมีแต่ละชนิดดังแสดงไว้ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS No. และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS No.	บริษัทผู้ผลิต
กรดไฮดรอกไซด์		
Sodium hydroxide pellets	1310-73-2	Merck
Hydrochloric acid fuming 37%	7647-01-0	Merck
Hydrofluoric acid	7664-39-3	Univar

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB 204 ของบริษัท Mettler Toledo

3.2.2 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น Professional Meter PP-50 ของบริษัท Sartorius AG
Gottingen Germany

3.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter)

เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง รุ่น 713 ปรับเทียบโดยใช้ buffer pH 4.0 และ buffer pH 7.0 ของบริษัท Metroh

3.2.4 ตู้อบ (Dry Oven)

ตู้อบยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtung Gmbh MMM-group ของบริษัท Medcenter

3.2.5 ตู้เย็น (Refrigerator)

ตู้เย็นสำหรับเก็บรักษาสารเคมีและตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของสารเคมี

3.2.6 ตะแกรงร่อนแยกขนาด (Sieve)

ตะแกรงร่อนแยกขนาดรู 2 มิลลิเมตร ของบริษัท ELE International

3.2.7 เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer)

เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด รุ่น Phoenix 8000 ของบริษัท แสงวิทย์ 2000 จำกัด

3.2.8 เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR Spectrophotometer)

เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น IRPrestge-21 ของบริษัท พาราไซแอนติฟิค

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1. การเตรียมส่วนผสมปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มาจากโครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาระดับการเกิดอิทธิพลของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีของกระบวนการเกิดอิทธิพลและเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการปลดปล่อยหรือตรึงจุลธาตุอาหารต่อพืชบางชนิด : การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยมูลไก่และมูลสุกร ของ นันทิราและคณะ (2558) โดยวัตถุดิบที่ใช้หมักปุ๋ยนำมาจากวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้โดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐมและจังหวัดราชบุรี (ตารางที่ 13) และสามารถแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ชุด (ภาพที่ 15) ดังนี้

ชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก

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

ชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้ง

- รำละเอียด	จำนวน	0.90%
- กระจุกวัวปน	จำนวน	1.50%
- มูลค่างคาว	จำนวน	0.60%
- ธาตุอาหารรอง	จำนวน	0.60%
- โดโลไมท์	จำนวน	0.30%



ภาพที่ 15 ส่วนผสมในการทำปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร
ที่มา : จุฬารวรรณ (2557)

ตารางที่ 13 ส่วนผสม แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม	แหล่งที่มา	อายุของส่วนผสม
ส่วนผสมน้ำหมัก		
- ปลายน้ำจืด - กากน้ำตาล - สับประรด - สารเร่งพด. 2 - รำละเอียด	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ตำบลบางช้าง อำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
ส่วนผสมของแห้ง		
- รำละเอียด - กระดูกวัวป่น - มูลค่างควา - ธาตุอาหารรอง (Mg,Ca, Fe) - โดโลไมท์	กลุ่มเกษตรอินทรีย์ตำบลบางช้าง อำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
มูลสุกร	อำเภโพนาราม จังหวัดราชบุรี	2 เดือน
มูลไก่	ตำบลไร่ขิง อำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม	1 เดือน
ซีเมนต์นาเกลือ	นาเกลือ จังหวัดสมุทรสาคร	2 เดือน

สำหรับการศึกษาคั้งนี้ได้ทำปุ๋ยหมักสองสูตร ได้แก่ สูตรมูลสุกร และสูตรมูลไก่ ปุ๋ยทั้งสองสูตรจะใช้ส่วนผสมทั้ง 2 ชุดตามปริมาณที่ระบุไว้ข้างต้น โดยปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร จะมีวัตถุดิบหลักเพิ่มเป็นมูลสุกร จำนวน 76.63% (13 กระสอบ) และปุ๋ยสูตรมูลไก่ จะเป็นมูลไก่จำนวน 76.63% (13 กระสอบ) ทั้งนี้ยังได้มีการเติมซีเมนต์นาเกลือจำนวน 5.69% เพิ่มเข้าไปในปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรด้วย

3.3.2 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

ขั้นตอนการหมักปุ๋ยสูตรมูลสุกร จะเริ่มจากการนำเอามูลสุกรที่เตรียมไว้มาใส่ในเครื่องบดผสม และเติมน้ำลงไปเพื่อให้มูลสุกรแยกออกจากกัน โดยรักษาระดับความชื้นอยู่ที่ประมาณ 60% จากนั้นใส่ซีเมนต์นาเกลือ ส่วนผสมน้ำหมักชุดที่ 1 ประมาณ 10 ลิตร และส่วนผสมของแห้งชุดที่ 2 ตามปริมาณที่ระบุไว้ข้างต้น ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (ภาพที่ 16) จากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ได้บรรจุใส่กระสอบปุ๋ย กระสอบละ 15 กิโลกรัม จำนวน 10 กระสอบ ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบและจัดตั้งเรียงกันโดยไม่ให้ชิดกันมากจนเกินไป เพื่อให้อากาศระบายได้ดี สำหรับขั้นตอนการหมักปุ๋ยสูตรที่ 2 คือปุ๋ยสูตรมูลไก่จะมีวิธีการเดียวกันกับการหมักปุ๋ยสูตรมูลสุกร ดังที่กล่าวไปแล้ว



ภาพที่ 16 การผสมปุ๋ยหมัก

ที่มา : จุฑาวรรณ (2557)

3.3.3 การเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก

การเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรจะเป็นแบบสุ่มตัวอย่าง โดยจะเก็บตัวอย่าง ณ กึ่งกลางของกระสอบให้ได้ประมาณ 2 กิโลกรัม จากกระสอบทั้งหมดจำนวน 10 กระสอบ เพื่อเป็นตัวแทนของกองปุ๋ยทั้งหมดในแต่ละสูตร และจะเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้ก่อนเก็บตัวอย่างจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิและบันทึกลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักด้วยทุกครั้ง เช่น สี กลิ่น และลักษณะของวัสดุหมัก เป็นต้น (ภาพที่ 17)



ก) ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ข) ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ภาพที่ 17 การวัดอุณหภูมิก่อนการเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน

ก) ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ข) ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อการวิเคราะห์

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมดแล้ว นำตัวอย่างมาผึ่งให้แห้งในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 โดยจะคัดแยก แก้ว พลาสติก วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ ออกจากตัวอย่างปุ๋ยหมัก และทำการคัดแยกขนาดอนุภาคปุ๋ยผ่านการร่อนด้วยตะแกรง ขนาด 2.0 มิลลิเมตร ปุ๋ยหมักที่ได้ส่วนหนึ่งนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร และอีกส่วนหนึ่งนำไปสกัดแยกกรดฮิวมิกเพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบและวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy ต่อไป

3.3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่วิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การหาค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ การสกัดแยกกรดฮิวมิก การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดฮิวมิกโดยใช้เทคนิค FT-IR ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture content)

การวัดความชื้นอาศัยหลักการหาความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่างนั่นเอง โดยชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน (Ecozell) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาผึ่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังอบ ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่าปุ๋ยหมักจะมีน้ำหนักคงที่กล่าวคือน้ำหนักหลังอบมีความแตกต่างจากน้ำหนักที่ชั่งในครั้งก่อนไม่เกินร้อยละ 4 หากเกินกว่านี้ควรทำซ้ำใหม่ แล้วจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความชื้นดังสมการ

สูตรการคำนวณหาร้อยละความชื้น

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

2. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง อาศัยหลักการของโพเทนชิโอเมตรี (potentiometry) ซึ่งจะใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์ จุ่มลงไปในสารละลายที่ต้องการทดสอบ โดยทำการชั่งตัวอย่างปุ๋ยที่ต้องการวิเคราะห์ 2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์และเติมน้ำปราศจากไอออน (น้ำ DI) 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที เพื่อให้ปุ๋ยตกตะกอน หลังจากนั้นทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในส่วนของสารละลายด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

3. อุณหภูมิ (Temperature)

การวัดค่าอุณหภูมิจะทำทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก ด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์ โดยวัดอุณหภูมิที่กลางกระสอบของปุ๋ยหมัก และก่อนวัดอุณหภูมิจะต้องมีการพลิกกลับกระสอบปุ๋ยก่อนทุกครั้งเพื่อให้ปุ๋ยในกระสอบผสมกัน

4. การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon) หาดด้วยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen) การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมดจะใช้เทคนิคเผาไหม้แห้ง (Dry combustion) โดยวิธี Medium-Temperature Resistance Furnace Method สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะใช้วิธี Kjeldahl Method ของ AOAC Official Method 955.04

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

5. การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาจากปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ เนื่องจากคาร์บอนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ โดยนำค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ คูณกับ “Van Bemmelen factor” ซึ่งเท่ากับ 1.724 ดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณอินทรีย์วัตถุ} = \text{ร้อยละของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์} \times 1.724$$

6. การสกัดแยกกรดฮิวมิกบริสุทธิ์

การสกัดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักเพื่อแยกชนิดของกรดฮิวมิก (humic acid; HA), กรดฟัลวิก (fulvic acid; FA) และฮิวมิน (humins) ด้วยเทคนิค Isolation of IHSS Soil Fulvic and Humic Acid ของ Methods of Soil Analysis, Part3 Chemical methods (Sparks et al., 1996) อาศัยหลักการความสามารถของการละลายในค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4 โดยชั่งตัวอย่างปุ๋ยหมักแห้งที่ผ่านการร่อนแล้ว 10.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าแนวระนาบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,400 รอบต่อ 34 นาที เป็นเวลา 25 นาที แยกเอาเฉพาะสารละลายใสด้านบนมาตกตะกอนกรดฮิวมิกด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 6 โมล ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,400 รอบต่อ นาที เวลานาน 25 นาที เพื่อแยกสารละลายใสที่เป็นกรดฟัลวิกออกมา จากนั้นทำการสกัดให้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์อีกครั้ง (redissolve the humic acid fraction) โดยการล้างตะกอนกรดฮิวมิกด้วยสารละลายผสม 1:1 ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมล กับ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เข้มข้น 0.3 โมล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ที่ทำด้วยเทฟลอน เขย่าสารละลายนาน 24 ชั่วโมง และนำมาปั่นเหวี่ยง ก็จะได้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์ บันทึกค่าน้ำหนักเปียกของกรดฮิวมิก

(wet weight) จากนั้นนำไปทำให้แห้งเยือกแข็ง (freez drying หรือ lyophilisation) แล้วจึงบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง (dry weight)

7. การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดฮิวมิกโดยใช้เทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy)

การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิค FT-IR จะอาศัยหลักการสั่นหรือหมุนของพันธะเคมีภายในโมเลกุลสารซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นอินฟราเรดได้ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ช่วยให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างขององค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของสารฮิวมิกจากแหล่งกำเนิดเดียวกันผ่านการศึกษาวิวัฒนาการของพืชที่ตำแหน่งเดียวกันตลอดกระบวนการการหมักปุ๋ย เช่น การติดตามการพัฒนาโครงสร้างจากแอลิแพติกไปเป็นแอโรแมติกของกรดฮิวมิก เป็นต้น

สำหรับขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR คือ นำตัวอย่างกรดฮิวมิกบริสุทธิ์ที่สกัดได้จากปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร มาบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของบริษัท พาราไซแอนติฟิค รุ่น IRPrestge-21 ในช่วงจำนวนคลื่น 400 - 4000 เซนติเมตร¹

3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ มาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร โดยใช้การทดสอบด้วยวิธี Pearson correlation และหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและเคมีที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของสารฮิวมิก อีกทั้งทดสอบความแตกต่างในเชิงปริมาณ โดยการจัดกลุ่มด้วยวิธีของ Duncan ของพารามิเตอร์ที่สนใจ เช่น ปริมาณกรดฮิวมิก เพื่อประกอบการอธิบายคุณภาพปุ๋ยหมัก และใช้เป็นข้อมูลกำหนดอายุปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษานี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบปุ๋ยหมัก 2 สูตรที่มีวัตถุดิบหลักตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ มูลสุกรและมูลไก่ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักปุ๋ยสามารถหาได้โดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐมและจังหวัดราชบุรี ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน เก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์คุณภาพปุ๋ยหมักและกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้น เพื่อประเมินเสถียรภาพของกรดฮิวมิกจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ และลักษณะโครงสร้างของกรดฮิวมิกโดยใช้เทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี ร่วมกับคุณสมบัติต่างๆ ของปุ๋ยหมักที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการหมัก

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากโครงการวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทธีรา สรรพณี และคณะ (2558) มีสี กลิ่น และลักษณะของปุ๋ยแบ่งเป็น 4 ระยะ ดังตารางที่ 14 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสม คือ วันแรกของการหมักปุ๋ย (0 วัน) อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักทั้งสองใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอก คือ 32.7 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักจะมีสีน้ำตาล มีกลิ่นของส่วนผสมต่างๆ ที่คลุกเคล้ากันอยู่ และสามารถมองเห็นลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการหมักชัดเจน

2. ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงเป็นระยะที่มีกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลิก เช่น *Aspergillus fumigates.*, *Bacillus subtilis.*, *Micropolyspora sp.* และ *Streptomyces sp.* (Beff et al., 1996; กาญจนา, 2557) เป็นต้น ซึ่งย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยาก (Lignocellulose) ก่อให้เกิดความร้อนสูงขึ้นภายในกองปุ๋ยหมัก พบว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ในวันที่ 1 - 34 อุณหภูมิจะสูงอยู่ในช่วง 30.0 - 49.7 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล ส่วนอุณหภูมิของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ในวันที่ 1 - 41 จะมีช่วงของอุณหภูมิที่สูงกว่าอยู่ในช่วง 35.0 - 53.7 องศาเซลเซียส และปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม ในระยะนี้ลักษณะของเนื้อปุ๋ยทั้งสองชนิดจะเริ่มไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้น เนื้อของปุ๋ยเริ่มแห้งเกาะตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็ก มีกลิ่นแก๊สแอมโมเนียรุนแรงถึงปานกลางและไม่พบการเจริญของพืชบนกองปุ๋ยหมัก โดยลักษณะของแกลบที่ย่อยสลายยากกว่าในมูลไก่ส่งผลให้ระยะนี้นานกว่ามูลสุกร เช่นเดียวกับการวิจัยของ Bustamante et al. (2008) ซึ่งพบว่าปุ๋ยหมักสูตรกากองุ่นผสมมูลไก่ถึงช่วงระยะอุณหภูมินานกว่าปุ๋ยหมักสูตรกากองุ่นผสมมูลวัว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการหมักปุ๋ยทั้งสองสูตรประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุที่ทนต่อการย่อยสลายของพวกจุลินทรีย์แตกต่างกัน

ตารางที่ 14 คุณลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักซึ่งแบ่งช่วงอายุปุ๋ยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่

การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ	สูตรปุ๋ยหมัก					
	ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร			ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่		
	อุณหภูมิ (°C)	สี	ลักษณะของวัสดุหมัก	อุณหภูมิ (°C)	สี	ลักษณะของวัสดุหมัก
ระยะเริ่มผสม	32.7	สีน้ำตาล	ส่วนผสมของวัสดุหมักมองเห็นได้ชัดเจน มีความชื้นและมีกลิ่นของวัสดุหมักอย่างชัดเจน	32.7	สีน้ำตาล	วัสดุหมักแต่ละส่วนมองเห็นได้อย่างชัดเจน มีความชื้นและกลิ่นของวัสดุหมัก
ระยะอุณหภูมิสูง	30.0-49.7	สีน้ำตาล	ปุ๋ยหมักเริ่มรวมแห้งและเกาะกันเป็นก้อน มีกลิ่นของแอมโมเนียรุนแรงถึงปานกลาง	35.0-53.7	สีน้ำตาล - สีน้ำตาลเข้ม	ปุ๋ยหมักเริ่มแห้งและเกาะกันเป็นก้อนและปรากฏกลิ่นของแอมโมเนียรุนแรงถึงปานกลาง
ระยะสุดท้ายของ การเกิดปฏิกิริยา	30.0	สีน้ำตาลเทา	ปุ๋ยหมักเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กและมีกลิ่นของแอมโมเนียเพียงเล็กน้อย	30.3	สีน้ำตาลเข้ม	ปุ๋ยหมักแห้งเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กมีกลิ่นของแอมโมเนียปานกลาง
ระยะที่ปุ๋ยเจริญ เต็มที่	27.0-30.0	สีน้ำตาลเทา	ปุ๋ยหมักแห้งและเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็ก และไม่มีลักษณะขอส่วนผสมตั้งต้นเหลืออยู่ มีกลิ่นแอมโมเนียเล็กน้อยจนถึงไม่มีอยู่เลย	27.0-30.3	สีน้ำตาลเข้ม	ปุ๋ยหมักแห้งและเกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็ก ไม่เห็นส่วนผสมตั้งต้น อื่นๆกเว้นแกลบที่ยังเหลือปะปนให้เห็นอยู่ มีกลิ่นของแอมโมเนียปานกลางจนถึงเล็กน้อย

3. ระยะเวลาสุดท้ายของการเกิดปฏิกริยา (End of active phase)

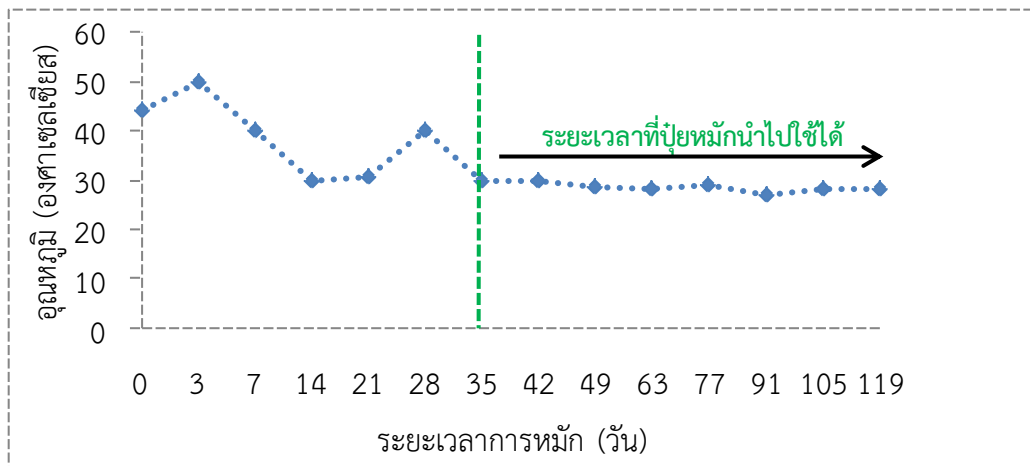
ระยะเวลาสุดท้ายของการเกิดปฏิกริยา คือ ระยะเวลาที่อุณหภูมิเริ่มลดลงใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอกของปุ๋ยหมัก ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งอาหารของพวกจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงเหลือน้อยลงส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงนี้เริ่มลดน้อยลงด้วย โดยปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ระยะเวลานี้อยู่ในช่วงวันที่ 35 ของการหมักปุ๋ย วัดอุณหภูมิได้ 30.0 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลเทา เกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กและมีกลิ่นของแอมโมเนียเพียงเล็กน้อย ส่วนปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ในระยะนี้จะอยู่ในช่วงวันที่ 42 ของการหมักปุ๋ยและมีอุณหภูมิ 30.3 องศาเซลเซียส ปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นของแอมโมเนียปานกลาง ลักษณะของส่วนผสมมีขนาดเล็กและเป็นก้อนผสมปนกับแกลบ

4. ระยะเวลาเจริญเต็มที่ (Mature phase)

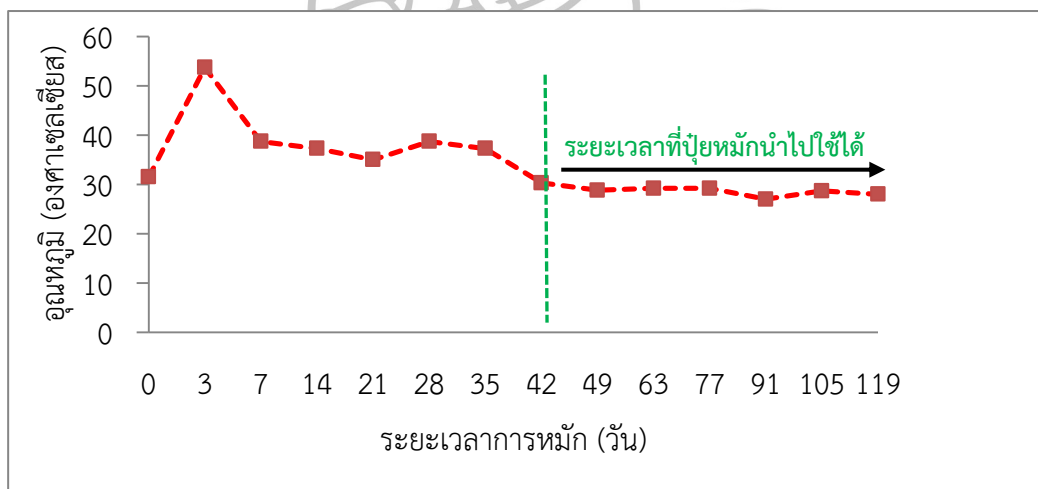
ระยะเวลาเจริญเต็มที่ คือ ระยะเวลาสุดท้ายของการหมักปุ๋ยซึ่งอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักจะคงที่และมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก โดยระยะนี้ของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเริ่มตั้งแต่วันที่ 35 ของการหมักปุ๋ย มีอุณหภูมิ 27.0 - 30.0 องศาเซลเซียส ปุ๋ยมีสีน้ำตาลเทา เกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กและมีกลิ่นแอมโมเนียเล็กน้อยจนถึงไม่มีกลิ่น ส่วนปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่เริ่มตั้งแต่วันที่ 42 ของการหมักปุ๋ย อุณหภูมิวัดได้ 27.0 - 30.3 องศาเซลเซียส ปุ๋ยมีสีน้ำตาลเข้ม เกาะกันเป็นก้อนขนาดเล็กและมีกลิ่นแอมโมเนียปานกลางถึงเล็กน้อย ปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรเมื่อเจริญเต็มที่แล้วจะไม่มีลักษณะของส่วนผสมตั้งต้นเหลืออยู่ เนื่องจากถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างเสถียร ยกเว้นกรณีของปุ๋ยหมักจากมูลไก่อังซึ่งยังมีแกลบเหลือปะปนให้เห็นอยู่



จากการประเมินระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ได้ โดยพิจารณาตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ระยะเวลาที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ กองปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก (Fialho et al., 2010; Fels et al., 2014) พบว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่ คือเวลาหลังจากการหมัก 35 และ 42 วันเป็นต้นไป ตามลำดับ (ภาพที่ 18)



ก) ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร



ข) ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่

ก) ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ข) ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

4.2 คุณภาพของปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรเพื่อการจำหน่าย

ปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2548) สำหรับปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นเพื่อการจำหน่าย ที่ประกอบไปด้วยขนาดเม็ดปุ๋ย ปริมาณหินและกรวด พลาสติก ออณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ตลอดจนปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) แสดงในตารางที่ 15 และ 16 พบว่าคุณสมบัติของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรตั้งแต่วันที่ 28 - 119 ขณะที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่วันที่ 21 - 119 ทั้งนี้ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่ถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและปริมาณธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงกว่ามาตรฐาน โดยปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ สูงกว่าค่ามาตรฐาน 1.3 - 2.0 เท่า และปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม สูงกว่าค่ามาตรฐาน 2.4 - 2.6 เท่า, 28.4 - 52.0 เท่า และ 5.0 - 6.0 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ สูงกว่าค่ามาตรฐาน 1.4 - 2.5 เท่า และปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม สูงกว่าค่ามาตรฐาน 2.8 - 3.3 เท่า, 12.6 - 22.2 เท่า และ 14.6 - 19.8 เท่า ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นการนำปุ๋ยหมักนี้ไปใช้ จึงอาจใช้เพียงปริมาณน้อย เพื่อป้องกันการเกิดดินเค็มหรือธาตุอาหารเกิน นอกจากนี้ การเติมขี้เถ้าดินเกลือลงในส่วนผสมก็อาจมีผลทำให้ปุ๋ยมีค่าการนำไฟฟ้าสูงได้ จึงอาจพิจารณานำส่วนผสมนี้แยกออกไปเพื่อลดค่าการนำไฟฟ้าลงในการหมักปุ๋ยครั้งต่อไป



ตารางที่ 15 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ปริมาณหินและกรวด	ขนาด 5 มม. $\leq 5\%$ โดยน้ำหนัก	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	3.5	2.5	3.0	3.5	5.0	3.0	4.5
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	$\geq 30\%$ โดยน้ำหนัก	60.9	46.6	41.0	43.1	42.8	41.0	45.4	42.4	43.2	53.1	38.0	37.2	36.1	38.0
ปริมาณความชื้น	$\leq 35\%$ โดยน้ำหนัก	108.7	84.7	62.0	55.4	46.6	33.8	31.7	32.4	28.2	23.8	18.8	20.2	17.2	14.9
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม่มี	44.3	49.7	40.0	30.0	30.7	40.0	30.0	29.7	28.7	28.2	29.0	27.0	28.0	28.3
C/N Ratio โดยน้ำหนัก อะตอม	$\leq 20:1$	19.5:1	25.0:1	11.3:1	11.3:1	11.6:1	11.0:1	11.7:1	11.4:1	11.7:1	14.0:1	9.8:1	9.3:1	9.8:1	9.9:1
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5 – 8.5	7.0	7.6	7.3	7.2	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.2	7.1

ตารางที่ 15 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
การนำไฟฟ้า (EC)	≤ 6 dS/m	8.8	9.9	10.2	6.9	8.5	8.7	10.9	10.8	10.6	10.2	11.6	10.1	8.8	7.2
ปริมาณธาตุอาหารหลัก															
- ไนโตรเจน (total N)	≥ 1.0% โดยน้ำหนัก	2.4	1.3	2.5	2.5	2.4	2.5	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.4	2.5
- ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	15.7	16.0	26.0	21.3	21.4	18.3	20.5	21.9	19.1	24.6	14.2	17.9	14.9	18.9
- โพแทสเซียม (K ₂ O)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	2.5	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.9	2.8	2.7	2.8	2.8	2.7	2.9	2.7

*หมายเหตุ 1. ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท (Mercury) พบว่ามีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร คือ มีค่าไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

2. ปุ๋ยหมักอายุ 0 – 119 วัน มีขนาดของเม็ดปุ๋ยผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร คือ ≤ 12.5×12.5 มิลลิเมตร

3. ปุ๋ยหมักอายุ 0 – 119 วัน ไม่พบเศษพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น



ผ่านค่ามาตรฐานกรมวิชาการ



ไม่ผ่านค่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

ตารางที่ 16 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ปริมาณหินและกรวด	ขนาด 5 มม. $\leq 5\%$ โดยน้ำหนัก	1.0	1.0	1.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.5	2.0
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	$\geq 30\%$ โดยน้ำหนัก	74.8	57.3	52.3	44.6	51.3	47.3	49.6	47.6	47.0	47.4	45.7	41.8	41.7	43.5
ปริมาณความชื้น	$\leq 35\%$ โดยน้ำหนัก	90.0	54.8	47.0	37.5	32.1	33.1	23.6	19.4	18.8	18.7	17.0	16.0	16.7	14.4
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไม่มี	31.5	53.7	38.7	37.3	35.0	38.7	37.3	30.3	28.8	29.2	29.2	27.0	28.7	28.0
C/N Ratio โดยน้ำหนัก อะตอม	$\leq 20:1$	15.1:1	13.0:1	11.0:1	10.4:1	10.5:1	9.2:1	9.9:1	9.4:1	10.7:1	9.5:1	10.3:1	9.3:1	9.6:1	9.3:1
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5 – 8.5	7.1	8.3	8.3	7.9	7.7	7.8	7.6	7.1	7.6	7.5	7.4	7.2	7.3	7.3

ตารางที่ 16 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
การนำไฟฟ้า (EC)	≤ 6 dS/m	13.4	18.5	17.8	12.3	14.7	14.3	17.3	17.7	17.2	16.9	17.3	16.6	15.4	15.6
ปริมาณธาตุอาหารหลัก															
- ไนโตรเจน (total N)	≥ 1.0% โดยน้ำหนัก	3.3	2.9	3.1	2.8	3.1	3.3	3.2	3.2	2.8	3.1	2.8	2.9	2.8	3.0
- ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	11.1	8.2	11.8	11.1	9.9	9.9	12.0	11.0	11.1	7.2	6.3	10.4	7.1	10.1
- โพแทสเซียม (K ₂ O)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	8.5	8.5	9.7	9.1	9.9	8.0	8.5	8.3	8.7	8.7	8.8	7.8	7.3	7.9

*หมายเหตุ 1. ปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท (Mercury) พบว่ามีค่าผ่านเกณฑ์

มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร คือ มีค่าไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

2. ปุ๋ยหมักอายุ 0 – 119 วัน มีขนาดของเม็ดปุ๋ยผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร คือ ≤ 12.5×12.5 มิลลิเมตร
3. ปุ๋ยหมักอายุ 0 – 119 วัน ไม่พบเศษพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ



ผ่านค่ามาตรฐานกรมวิชาการ



ไม่ผ่านค่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

เมื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการหมักปุ๋ยและคุณลักษณะทางกายภาพ และเคมีบางประการของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร โดยวิธีของ Pearson correlation ดังตารางที่ 17 และ 18 พบว่าระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอุณหภูมิ (ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร $r = -0.702$, $p < 0.01$; ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ $r = -0.683$, $p < 0.01$) ความชื้น (ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร $r = -0.813$, $p < 0.01$; ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ $r = -0.745$, $p < 0.01$) ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร $r = -0.574$, $p < 0.05$; ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ $r = -0.618$, $p < 0.05$) และค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร $r = -0.566$, $p < 0.05$; ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ $r = -0.670$, $p < 0.01$) ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิ ความชื้น ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลง ซึ่งหมายถึงในกระบวนการหมักปุ๋ยได้เกิดกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และผลิตภัณฑ์ที่เสถียรมากขึ้น เช่น สารฮิวมิก (Bustamante et al., 2008; Liu et al., 2011; Zhang et al., 2011)

ตารางที่ 17 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ความชื้น ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ตัวแปร	ระยะเวลาการหมัก	อุณหภูมิ	ความชื้น	C/N ratio	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
ระยะเวลาการหมัก	1	-.702**	-.813**	-.574*	-.566*
อุณหภูมิ		1	.837**	.811**	.466
ความชื้น			1	.790**	.696**
C/N ratio				1	.667**
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ					1

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

ตารางที่ 18 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิ ความชื้น ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ในปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ตัวแปร	ระยะเวลาการหมัก	อุณหภูมิ	ความชื้น	C/N ratio	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
ระยะเวลาการหมัก	1	-.683**	-.745**	-.618*	-.670**
อุณหภูมิ		1	.472	.394	.332
ความชื้น			1	.919**	.931**
C/N ratio				1	.928**
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ					1

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

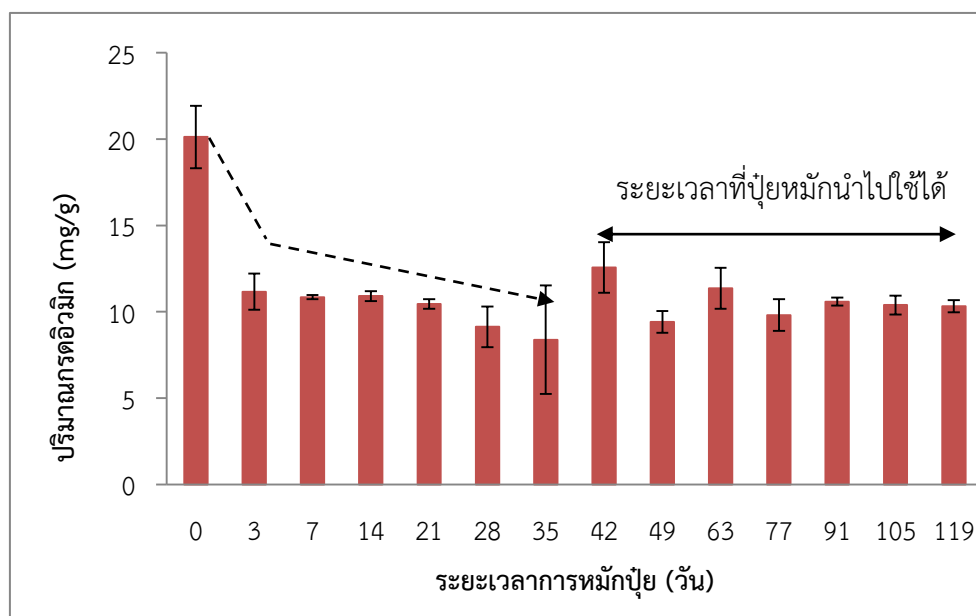
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

อย่างไรก็ดี พบว่าหลังจากที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ปริมาณกรดฮิวมิกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุตั้งต้นในปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรลดลงจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ในช่วงอุณหภูมิสูง โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุของมูลสุกรตั้งแต่วันที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่เริ่มต้นไป (ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 59.3 - 87.2 ของปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งต้น ขณะที่ในปุ๋ยหมักมูลไก่ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไปมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55.7 - 66.3 ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงของปุ๋ยหมักในช่วงนี้ แม้เท่ากับอุณหภูมิภายนอกแต่จุลินทรีย์บางกลุ่ม เช่น แอคติโนมัยซีตกลับเจริญเติบโตได้ดีซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความโดดเด่นในการย่อยสลายโครงสร้างยากๆ (จามจรี และคณะ, 2555; Alexander, 1977) ทำหน้าที่ย่อยสลายกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นและอาจเป็นผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลง ทั้งนี้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและโครงสร้างกรดฮิวมิกจะได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณและโครงสร้างกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร

4.3.1 ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

เนื่องจากปริมาณกรดฮิวมิกเป็นดัชนีกระบวนการสร้างสารฮิวมิกและการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก (Huang et al., 2006; Jouraiphy et al., 2008) (ภาพที่ 19) ทำให้ปริมาณกรดฮิวมิกมีความสำคัญในการพิจารณาคคุณภาพปุ๋ยหมักร่วมกับดัชนีเชิงคุณภาพด้านอื่นๆ จากการศึกษาพบว่า ณ วันที่ผสมปุ๋ยหมัก (วันที่ 0) มีปริมาณกรดฮิวมิกสูงที่สุด 20.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นสารฮิวมิกที่สกัดได้จากวัตถุดิบตั้งต้น เช่น มูลค่างควา อันเป็นส่วนผสมหลักที่สำคัญสำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ขณะที่วัตถุดิบอินทรีย์หลัก เช่น มูลไก่และแกลบที่ปะปนมาจากการใช้แกลบปูพื้นทรงเลี้ยงไก่ เมื่อยังไม่ถูกย่อยสลายจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และถูกคัดออกด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรู 2 มิลลิเมตร จึงทำให้สารฮิวมิกที่ได้ในวันที่ 0 นี้ ส่วนใหญ่มาจากมูลค่างควาที่อนุภาคขนาดเล็กลอดผ่านตะแกรงกรองได้อย่างดี แต่เมื่อกระบวนการหมักเริ่มขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิสูง (วันที่ 1 - 41) ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือเพียง 11.2 มิลลิกรัมต่อกรัมในวันที่ 3 และมีค่าต่ำที่สุด 8.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 35 จนกระทั่งถึงระยะที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ (วันที่ 42) ปริมาณกรดฮิวมิกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเป็น 12.6 มิลลิกรัมต่อกรัมจากกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกด้วยการย่อยสลายวัตถุดิบอินทรีย์ขนาดใหญ่ดังกล่าว แต่เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นหมดไปอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเท่ากับอุณหภูมิภายนอกทำให้กรดฮิวมิกกลายเป็นอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์แทน (อัญชลี, 2552; สุภาวดี, 2555; Alexander, 1977; Gondar et al., 2005) ดังนั้นตั้งแต่วันที่ 49 เป็นต้นไปปริมาณกรดฮิวมิก จึงลดลงอีกครั้งหนึ่ง ในช่วงระยะเวลานี้กรดฮิวมิกจะมีปริมาณค่อนข้างคงที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.3 มิลลิกรัมต่อกรัม



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแบ่งเป็น 4 กลุ่มเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้

กลุ่ม d วันที่ 0

กลุ่ม c ตั้งแต่วันที่ 3 - 21, 42, 63 และ 91 - 119

กลุ่ม b ตั้งแต่วันที่ 3 - 28 และ 49 - 119

กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 21 - 35, 49 และ 77 - 119

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดฮิวมิกนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของอินฟราเรดสเปกตรัม (ภาพที่ 20) โดยในวันแรกของกระบวนการหมัก (วันที่ 0) อินฟราเรดสเปกตรัมของสารฮิวมิกที่ส่วนใหญ่ได้จากมูลค่างควา จะพบการดูดกลืนแสงทุกช่วงตำแหน่งจำนวนคลื่นมากกว่าระยะที่ปุ๋ยหมักอุณหภูมิสูง (ดังตัวอย่างอินฟราเรดสเปกตรัมวันที่ 14 และ 35) โดยในช่วงระยะอุณหภูมิสูงอินฟราเรดสเปกตรัมจะมาจากกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นใหม่จากกระบวนการย่อยสลายวัตถุดิบตั้งต้นเป็นผลให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่ากรดฮิวมิกจากมูลค่างควาสอดคล้องกับปริมาณกรดฮิวมิกที่มีค่าต่ำกว่าด้วย โดยในวันที่ 35 มีการดูดกลืนแสงต่ำที่สุดสอดคล้องกับปริมาณกรดฮิวมิกที่มีค่าต่ำที่สุดด้วยเช่นกัน (ภาพที่ 18)

ช่วงที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 42 เป็นต้นไป) มีปริมาณกรดฮิวมิกมากที่สุดในวันที่ 42 ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงทุกความยาวคลื่นที่มีค่ามากกว่าวันอื่นๆ แสดงให้เห็นถึงการเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของกรดฮิวมิก โดยเฉพาะการเกิดพันธะสามในช่วงจำนวนคลื่น 2100 - 2260 เซนติเมตร⁻¹ ที่ไม่พบในช่วงอุณหภูมิสูง จากนั้นกระบวนการสลายกรดฮิวมิก (mineralization process) จะเกิดมากขึ้นกว่ากระบวนการสร้างเนื่องจากสารตั้งต้นหมดไป การดูดกลืนแสงจะค่อยๆ ลดลงและมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 119 เช่นเดียวกับปริมาณกรดฮิวมิกที่ลดลงในช่วงดังกล่าว

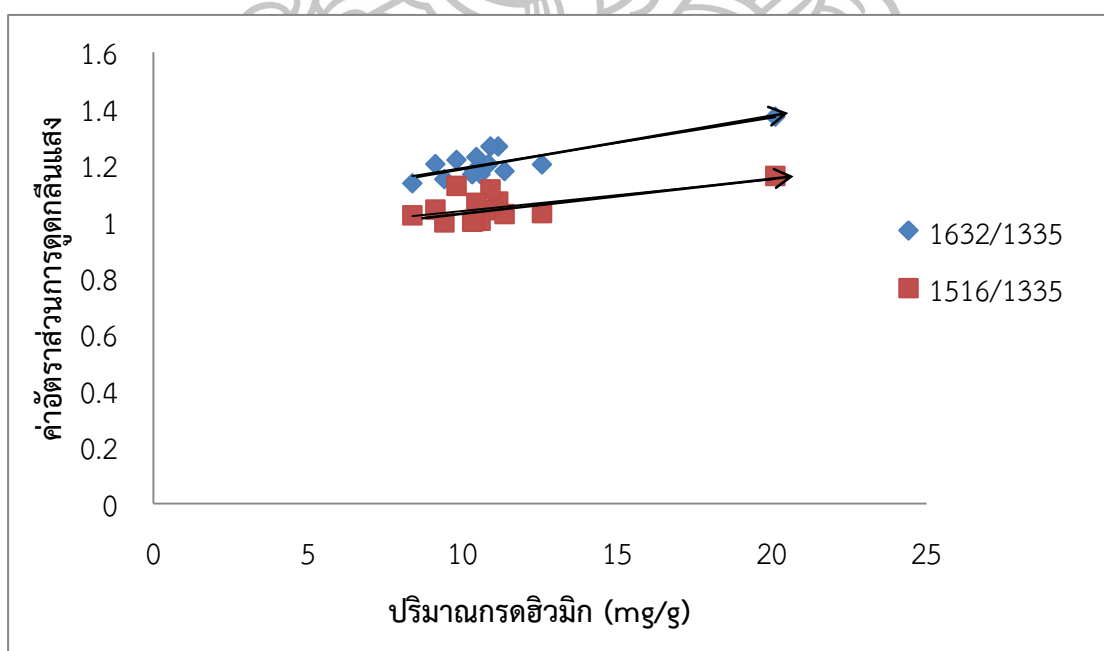
ดังนั้นการดูดกลืนแสงในกลุ่มการยืดของพันธะชนิดต่างๆ จึงแปรผันตามกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 19 โดยวันที่มีการดูดกลืนแสงมากที่สุด (วันที่ 42) จะมีการดูดกลืนแสงทุกตำแหน่งจำนวนคลื่นสูงทุกกลุ่มการยืดของพันธะ ขณะที่วันอื่นๆ ที่มีการดูดกลืนแสงน้อยกว่าเป็นลำดับก็จะมี การดูดกลืนแสงทุกตำแหน่งจำนวนคลื่นน้อยกว่าเป็นลำดับด้วยเช่นกัน ทำให้เมื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งจำนวนคลื่นที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมัก จึงเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญดังกล่าว

ตารางที่ 19 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของพันธะภายในโครงสร้างกรดฮิวมิกตลอดกระบวนการหมัก

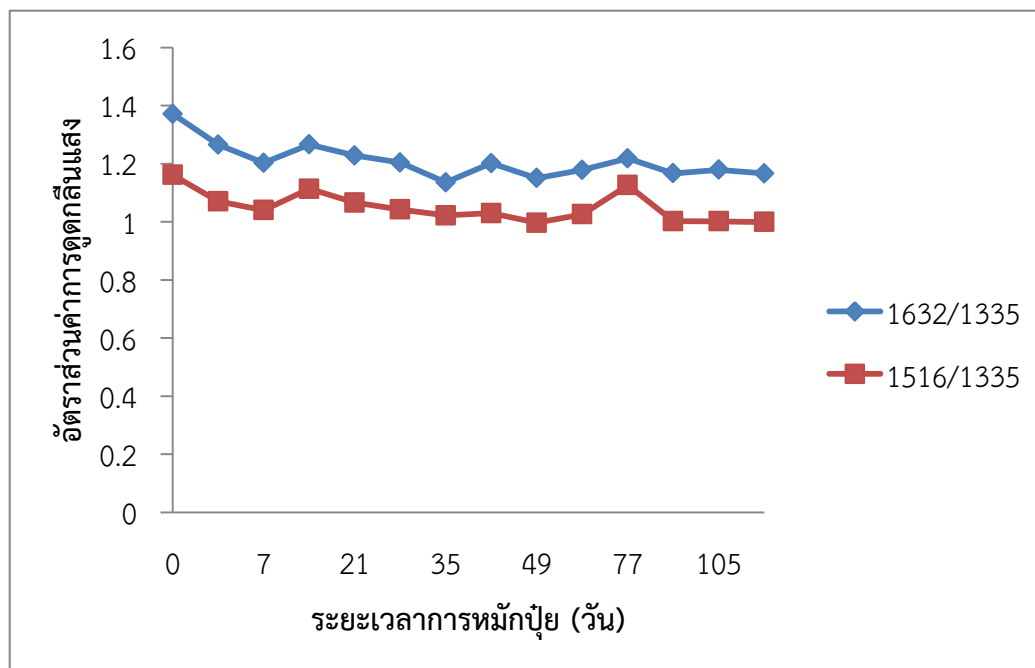
ตัวแปร		พันธะ C-O			พันธะ C-H		พันธะ C=N	พันธะ C=C, C=O	พันธะ C≡C	พันธะ C-H		พันธะ O-H C-N
		1030	1153	1211	1335	1416	1516	1632	2114	2874	2932	3225
พันธะ C-O	1030	1	.999**	.999**	.999**	.998**	.993**	.995**	.864**	.989**	.987**	.988**
	1153		1	1.000**	.999**	.999**	.991**	.992**	.867**	.990**	.987**	.988**
	1211			1	1.000**	.999**	.991**	.992**	.867**	.990**	.987**	.989**
พันธะ C-H	1335				1	.999**	.991**	.993**	.878**	.991**	.988**	.990**
	1416					1	.994**	.995**	.874**	.992**	.989**	.990**
พันธะ C=N	1516						1	.997**	.844**	.983**	.984**	.981**
พันธะ C=C, C=O	1632							1	.869**	.992**	.993**	.989**
พันธะ C≡C	2114								1	.893**	.883**	.893**
พันธะ C-H	2874									1	.999**	.998**
	2932										1	.996**

**มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$, $n = 14$

อย่างไรก็ดีเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างกรดฮิวมิกระหว่างกระบวนการหมัก การศึกษาอัตราส่วนของโครงสร้างที่เสถียรต่อโครงสร้างที่เสถียรน้อยกว่าสามารถบ่งบอกรูปแบบโครงสร้างที่เกิดและสลายที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกันระหว่างกระบวนการหมักได้ เช่น อัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแอโรแมติกประเภท C=O และ C=C ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1632 เซนติเมตร⁻¹ และประเภท C=N ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1516 เซนติเมตร⁻¹ ต่อโครงสร้างแอลิแพติก ประเภท CH₂ และ CH₃ ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1335 เซนติเมตร⁻¹ (1632/1335 และ 1516/1335) โดยหากค่าอัตราส่วนดังกล่าวนี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่าเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกที่มีเสถียรภาพของโครงสร้างมากขึ้น (Cuetos et al., 2010; Ouagoudi et al., 2015) ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแอโรแมติกต่อแอลิแพติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดฮิวมิกมีมากขึ้น ($r = 0.849$, $p < 0.01$ และ $r = 0.602$, $p < 0.05$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 21 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการสร้างโครงสร้างที่เสถียรเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกที่สำคัญ ดังนั้นเมื่อปริมาณกรดฮิวมิกค่อยๆ ลดต่ำลง การเกิดโครงสร้างที่เสถียรมากๆ ก็ลดต่ำลงด้วย โดยสัดส่วนของโครงสร้างดังกล่าวแปรผกผันกับระยะเวลาการหมักปุ๋ยที่นานขึ้น ($r = -0.595$, $p < 0.05$ และ $r = -0.551$, $p < 0.05$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 22 อย่างไรก็ตามแม้ว่าวันที่ 42 จะเป็นวันที่มีการดูดกลืนแสงสูงที่สุดในทุกๆ ตำแหน่งจำนวนคลื่น แต่เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างพบว่าสัดส่วนของโครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่าและทำให้คุณภาพกรดฮิวมิกสูงกว่าคือวันที่ 77 จากนั้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอโรแมติกต่อแอลิแพติกที่ 1632/1335 และที่ 1516/1335 กับปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ($r = 0.849$, $p < 0.01$; $r = 0.602$, $p < 0.05$) $n=14$



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแโรแมติกต่อโครงสร้างแอลิแพติกที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเก็บปุ๋ยไว้นานขึ้น โครงสร้างแโรแมติกจะสลายกลายเป็นโครงสร้างแอลิแพติกที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) (Fuented et al., 2007) ที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยทำละลายกรดฮิวมิกและดูดซับธาตุอาหาร (Malan, 2015) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย คิดเป็นร้อยละ 45.4, 15.8 และ 34.6 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 40.95 (ตารางที่ 20)

โดยค่าอัตราส่วน O/C มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 0.84 - 1.09 ในวันที่ 0 - 63 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 1.15 ไปเป็น 2.50 ในวันที่ 77 - 119 แสดงว่านับตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปเกิดกระบวนการย่อยสลายก่อให้เกิดโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนสูง (Dou et al., 2010) สอดคล้องกับค่าอัตราส่วน C/H ($r = -0.967$, $p < 0.01$) ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วจาก 7.21 ไปเป็น 4.66 ในวันที่ 77 - 119 อันแสดงถึงการเกิดโครงสร้างแอลิแพติกที่มีเสถียรภาพน้อยกว่า (Giovanela et al., 2010) ในระหว่างกระบวนการหมัก ดังการศึกษาของ Spaccini et al. (2009) ที่พบว่าอัตราส่วนนี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 60 จนถึงวันที่ 150 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของกระบวนการหมัก โดยยืนยันได้ว่ามีการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอลิแพติกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 20 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก ของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

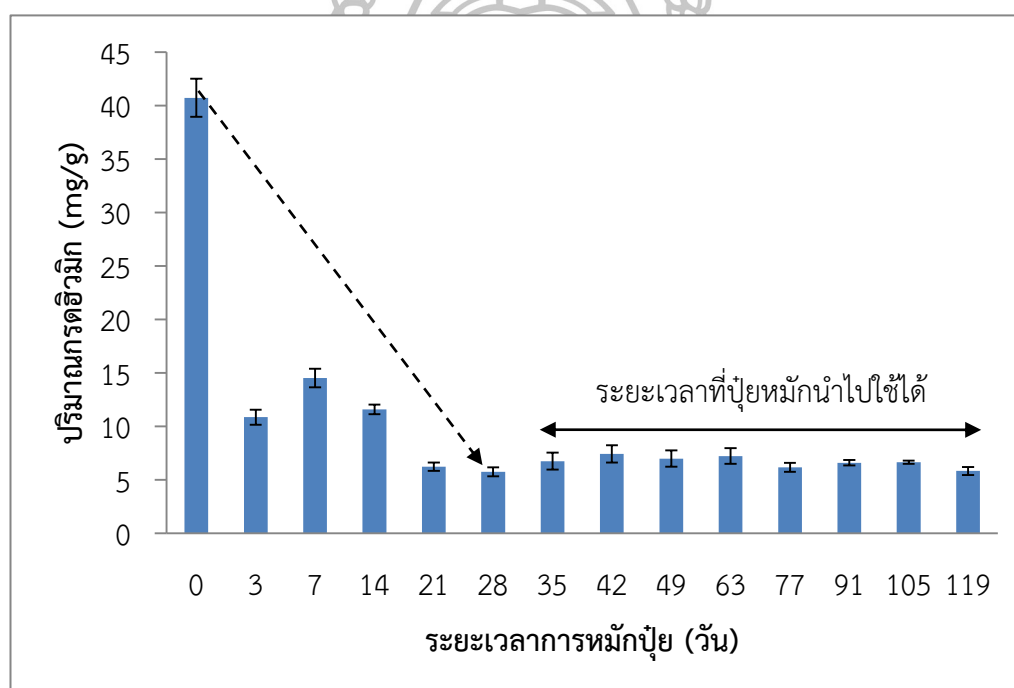
ระยะเวลาการหมักปุ๋ย (วัน)	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (มิลลิกรัม/1 กรัม ของกรดฮิวมิก)				อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ โดยน้ำหนักอะตอม	
	C	H	O	N	C/H	O/C
0	46.93	6.52	39.29	7.26	7.20	0.84
3	46.36	6.11	41.01	6.52	7.59	0.88
7	44.68	6.03	42.60	6.69	7.41	0.95
14	45.34	6.23	41.56	6.87	7.28	0.92
21	43.95	6.07	43.13	6.85	7.24	0.98
28	41.94	5.78	45.59	6.69	7.26	1.09
35	35.67	5.96	52.13	6.24	5.98	1.46
42	43.12	5.89	44.19	6.80	7.32	1.02
49	40.90	5.54	46.87	6.69	7.38	1.15
63	41.82	5.75	45.76	6.67	7.27	1.09
77	40.79	5.66	46.79	6.76	↑ 7.21	↓ 1.15
91	31.96	5.94	56.69	5.41	5.38	1.77
105	28.37	5.76	60.81	5.06	4.93	2.14
119	25.61	5.49	64.15	4.75	↓ 4.66	↓ 2.50

จากการศึกษาครั้งนี้ สรุปได้ว่าการนำเอาเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี เข้ามาช่วยในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงเป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างในช่วงระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น สรุปได้ว่าช่วงเวลาที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่เจริญเต็มที่และมีคุณภาพดีเหมาะสมต่อการนำไปใช้มากที่สุดอยู่ในช่วง 42 - 77 โดยมีคุณภาพดีที่สุดในวันที่ 77 แต่หากเก็บปุ๋ยไว้นานเกินไป (79 - 119 วัน) สามารถทำให้ปุ๋ยเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากถูกย่อยสลายกลายเป็นโครงสร้างที่เล็กลงและใช้เป็นธาตุอาหารให้แก่พืช

อย่างไรก็ตามแม้ว่าวันที่ 42 ของกระบวนการหมักจะมีคุณภาพของกรดฮิวมิกต่ำกว่าวันที่ 77 เล็กน้อย (ภาพที่ 21) แต่ปริมาณกรดฮิวมิกที่มีมากกว่าวันที่ 77 ถึง 1.3 เท่า (ภาพที่ 18) ส่งผลให้ปุ๋ยหมักวันที่ 42 มีความน่าสนใจในการพิจารณาเลือกใช้ปุ๋ยหมักซึ่งมีอายุสั้นที่สุดและมีปริมาณกรดฮิวมิกสูงที่สุด แต่หากต้องการปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีและเสถียรสามารถคงทนอยู่ในดินได้เป็นเวลานานที่สุดจะเป็นวันที่ 77 ของกระบวนการหมัก

4.3.2 ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

การติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร (ภาพที่ 23) พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ โดยพบว่า ณ วันที่เริ่มผสมปุ๋ยหมัก (วันที่ 0) มีปริมาณกรดฮิวมิกสูงที่สุด 40.7 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อกระบวนการหมักเริ่มขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิสูง (วันที่ 1 - 28) ปริมาณกรดฮิวมิกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 10.9 มิลลิกรัมต่อกรัมในวันที่ 3 และมีค่าต่ำที่สุด 5.7 มิลลิกรัมต่อกรัมในวันที่ 28 อย่างไรก็ตามเมื่อถึงระยะที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่ (วันที่ 35) ปริมาณกรดฮิวมิกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งอันเนื่องมาจากกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกจากกระบวนการย่อยสลายของวัตถุดิบตั้งต้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.1 มิลลิกรัมต่อกรัมในวันที่ 35 - 63 แต่เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นหมดไป (วันที่ 77 - 119) ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงอีกครั้งเช่นเดียวกับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่โดยมีค่าค่อนข้างคงที่เฉลี่ยอยู่ที่ 6.3 มิลลิกรัมต่อกรัม



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน

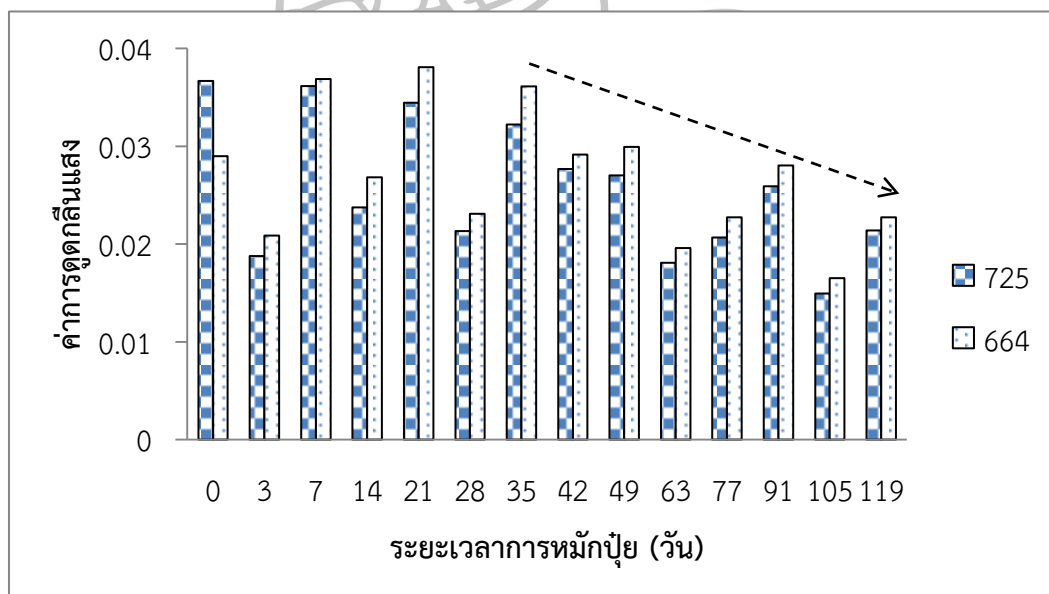
การเปลี่ยนแปลงของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแบ่งเป็น 5 กลุ่มเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้

- กลุ่ม f วันที่ 0
- กลุ่ม e วันที่ 7
- กลุ่ม d วันที่ 3 และ 14
- กลุ่ม c วันที่ 21 และวันที่ 35 - 105
- กลุ่ม b วันที่ 21, 35 และวันที่ 49 - 119
- กลุ่ม a ตั้งแต่วันที่ 21 - 35, 49 และวันที่ 77 - 119

อย่างไรก็ดี การเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของกรดฮิวมิกระหว่างกระบวนการหมักด้วยอินฟราเรดสเปกตรัมในภาพที่ 24 ไม่สอดคล้องกับปริมาณกรดฮิวมิคที่เกิดขึ้น แม้ในวันแรกของกระบวนการหมักอินฟราเรดสเปกตรัมของสารฮิวมิคที่ส่วนใหญ่ได้จากมูลค่างาวจะมีค่าสูงที่สุด เช่นเดียวกับปริมาณกรดฮิวมิคที่สูงที่สุดเหมือนในปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ แต่เมื่อกระบวนการหมักปุ๋ยเริ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอินฟราเรดสเปกตรัมมีค่าแปรปรวนตลอดช่วงกระบวนการหมักปุ๋ย โดยในช่วงอุณหภูมิสูง (วันที่ 1 - 28) มีค่าสูงสุดวันที่ 21 แต่เมื่อปุ๋ยหมักย่างเข้าสู่ในช่วงเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป) ปริมาณกรดฮิวมิคมีมากที่สุดอยู่ในช่วงวันที่ 35 - 63 ขณะที่การดูดกลืนแสงที่มีค่ามากกว่าวันอื่นๆ ทุกความยาวคลื่นอยู่ในช่วงวันที่ 35 - 49 อันแสดงถึงการเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของกรดฮิวมิคจากนั้นการดูดกลืนแสงจะค่อยๆ ลดลงในวันที่ 63 เนื่องจากสารตั้งต้นหมดไป กระบวนการสลายกรดฮิวมิคจะเกิดมากขึ้นกว่ากระบวนการสร้าง ซึ่งจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกรดฮิวมิคนั้นไม่สัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพเชิงโครงสร้างที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของกระบวนการหมักที่มีอิทธิพลต่อสูตรมูลสุกรมมากกว่าสูตรมูลไก่ ดังจะกล่าวในรายละเอียดถัดไป

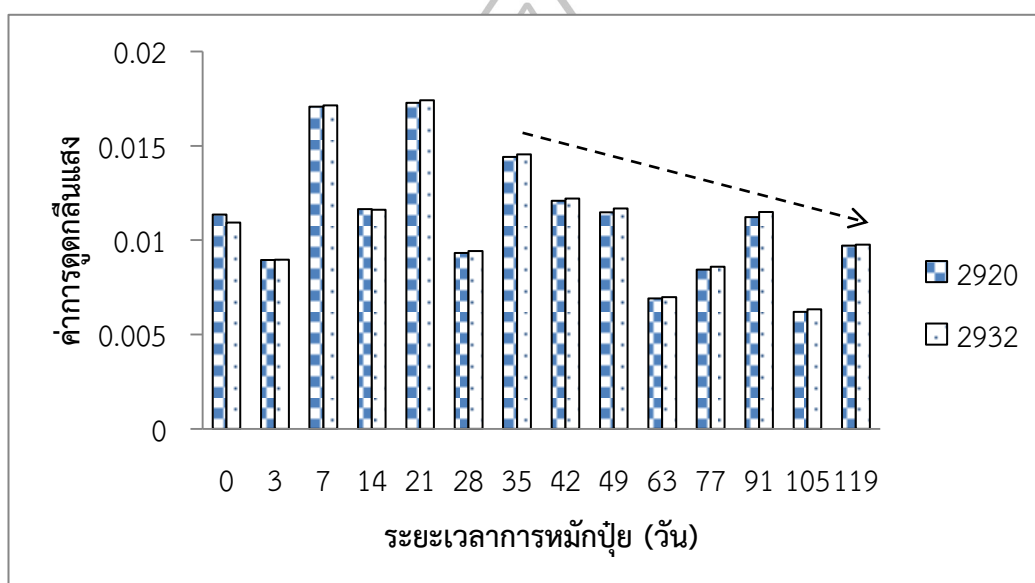


เนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อโครงสร้างของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรในช่วงระยะต่างๆ ที่แตกต่างกัน โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมักและช่วงอุณหภูมิสูง (วันที่ 0-28) การดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าค่อนข้างแปรปรวน อาจเนื่องมาจากในช่วงนี้เกิดทั้งกระบวนการสลายตัวและสร้างของกรดฮิวมิกดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของพันธะ C=H ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นที่ใกล้กับ 720 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นแบบงอของหมู่ CH₂ มากกว่า 3 หมู่ขึ้นไป (เย็นหทัย, 2549) โดยจากภาพที่ 24 และ 25 การดูดกลืนแสงที่มีค่าสูงสุดในช่วงนี้ ที่ 725 เซนติเมตร⁻¹ จะเป็นบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงสูงที่สุด แต่เมื่อกระบวนการหมักปุ๋ยเริ่มขึ้นบริเวณการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุดจะเลื่อนตำแหน่งไปอยู่ที่ 667 เซนติเมตร⁻¹ อันแสดงถึงการสั่นแบบงอนอกระนาบของพันธะ =CH ซึ่งหมายถึงการลดลงของพันธะ C-H ภายในโครงสร้างแอลิแพติกและเกิดเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่เสถียรมากขึ้น และมีค่าสูงที่สุดในวันที่ปุ๋ยเพิ่งเจริญเต็มที่ (วันที่ 35) จากนั้นจะมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อเก็บปุ๋ยไว้นานขึ้นเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่น 725 เซนติเมตร⁻¹ ที่มีค่าลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายพันธะไม่อิ่มตัวของโครงสร้างทั้งสองด้วยจุลินทรีย์กลุ่มเมโสฟิลิก ซึ่งสามารถย่อยสลายโครงสร้างยากๆ ได้ให้กลายเป็นโครงสร้างที่เล็กลง (mineralization process) (Czoch and Modarski, 1988; Ryckeboer et al., 2003; Domeizel et al., 2004; Rebollido et al., 2008)



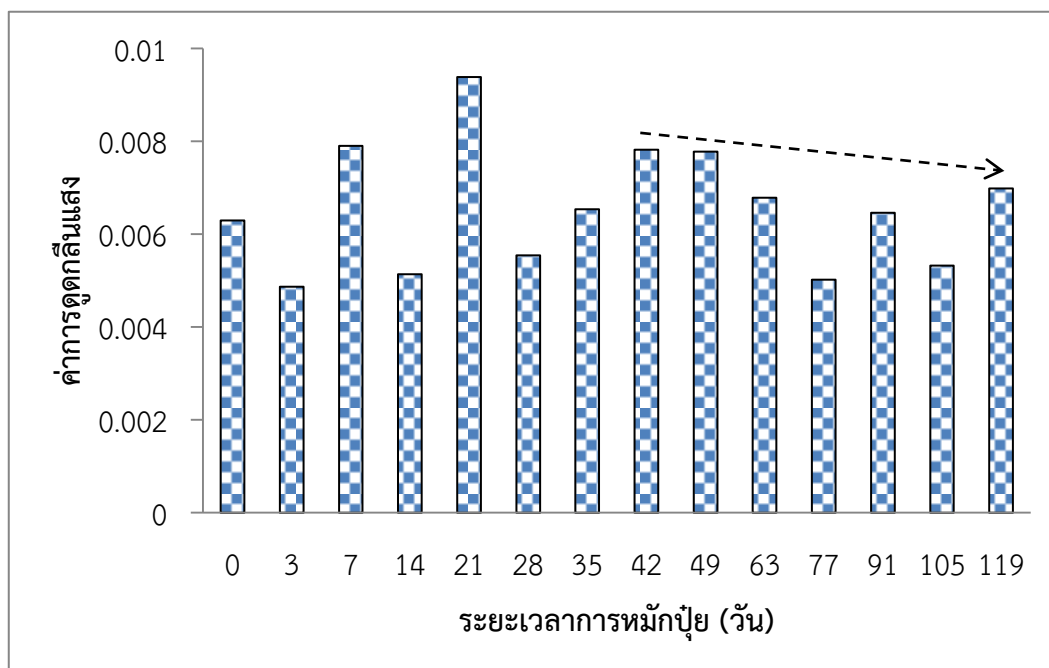
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 725 เซนติเมตร⁻¹ และพันธะ C=H ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 667 เซนติเมตร⁻¹ ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน

นอกจากนี้พันธะ C-H ภายในโครงสร้างแอลิแพติกซึ่งปรากฏที่ตำแหน่งจำนวนคลิ่น 2920 เซนติเมตร⁻¹ (Wei et al., 2007; Hu et al., 2011; Fels et al., 2015) ที่พบมากกว่าโครงสร้างพันธะ C-H ภายในโครงสร้างแอโรแมติกที่ตำแหน่งจำนวนคลิ่น 2932 เซนติเมตร⁻¹ (Silverstein et al., 1991) ในวันที่เริ่มกระบวนการหมัก (วันที่ 0) จะมีการดูดกลืนแสงลดลงต่ำกว่าที่ตำแหน่งจำนวนคลิ่น 2932 เซนติเมตร⁻¹ เมื่อกระบวนการหมักเริ่มขึ้นแสดงถึงการเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้นโดยมีการดูดกลืนแสงของทั้งสองตำแหน่งจำนวนคลิ่นในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่สูงที่สุดในวันที่ 35 จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์เช่นกัน (ภาพที่ 26)



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ที่ตำแหน่งจำนวนคลิ่น 2920 เซนติเมตร⁻¹ และ 2932 เซนติเมตร⁻¹ ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน

อย่างไรก็ดีการเกิดพันธะสามในช่วงตำแหน่งจำนวนคลิ่น 2322 เซนติเมตร⁻¹ ในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป) จะมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42 และจะคงที่ไปจนถึงวันที่ 49 จากนั้นจะลดต่ำลงเล็กน้อยไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก (ภาพที่ 27) ซึ่งอาจบ่งบอกถึงช่วงอายุปุ๋ยหมัก 42 - 49 วัน ที่เป็นช่วงที่พบโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่มีเสถียรภาพมากที่สุด โดยช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมักโครงสร้างที่ย่อยสลายยากนี้จะค่อยๆ ลดลงจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์เช่นเดียวกับกับโครงสร้างพันธะเดี่ยว C-H และโครงสร้างพันธะคู่ =CH ทำให้เมื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งจำนวนคลิ่น จึงเป็นไปได้ทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 21

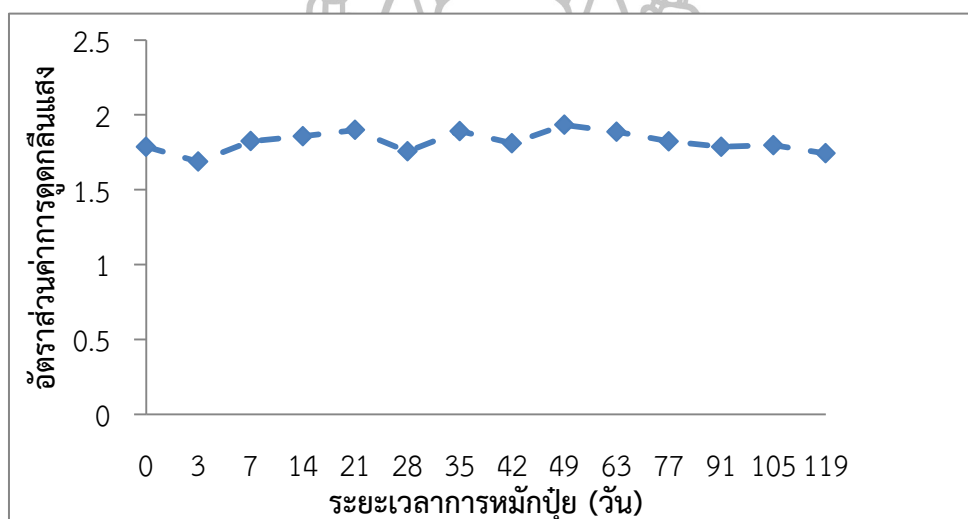


ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ $C=C$ และ $C\equiv N$ ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2322 cm^{-1} ของกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาการหมักต่างกัน

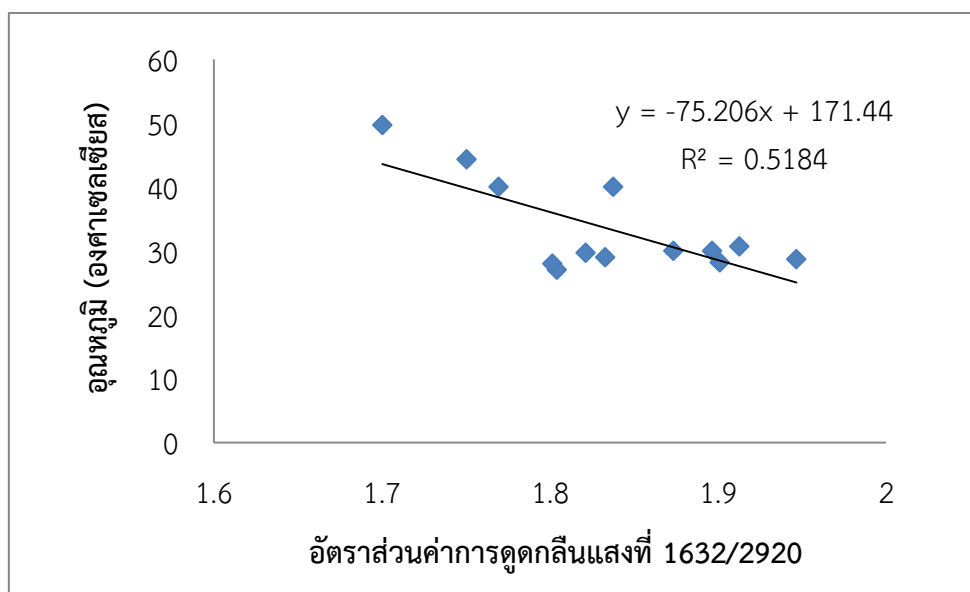
ตารางที่ 21 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของพันธะภายในโครงสร้างกรดฮิวมิกตลอดกระบวนการหมัก

ตัวแปร		พันธะเดี่ยว C-H			พันธะคู่ =CH	พันธะสาม C≡C, C≡N
		2920	2932	725		
พันธะเดี่ยว C-H	2920	1	.999**	.883**	.974**	.699**
	2932		1	.865**	.973**	.707**
	725			1	.919**	.627**
พันธะคู่ =CH	664				1	.701**
พันธะสาม C≡C, C≡N	2322					1

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นยังสัมพันธ์กับการศึกษาค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแอโรแมติกประเภท C=O และ C=C ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1632 เซนติเมตร⁻¹ ต่อโครงสร้างแอลิฟติกประเภท CH₂ และ CH₃ ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 2920 เซนติเมตร⁻¹ (1632/2920) เป็นอีกดัชนีหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ระดับการเกิดฮิวมิก การเจริญเต็มที่และเสถียรภาพของปุ๋ยหมักได้ (Cuetos et al., 2010, Ouagoudi et al., 2015) หากค่าอัตราส่วนนี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าโครงสร้างกรดฮิวมิกมีเสถียรภาพสูง พบว่าค่าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงอยู่ในช่วง 1.90 - 1.95 ในวันที่ 35 - 49 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 28 บ่งชี้ได้ว่าในช่วงวันที่ 35 - 49 เกิดโครงสร้างแอโรแมติกเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันเกิดการกระบวนกรย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ เช่น สารประกอบแอลิฟติก โพลีแซคคาไรด์ และแอลกอฮอล์ (wu et al., 2011; Xi et al., 2012) โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิ (r=-0.569, p<0.05) ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างแอโรแมติกต่อแอลิฟติก (1632/2920) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร



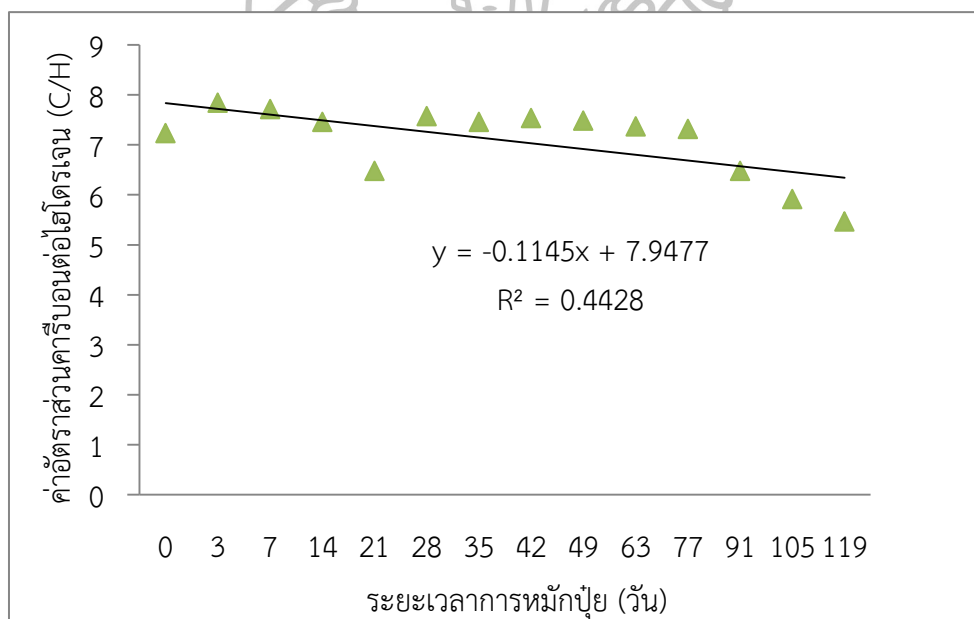
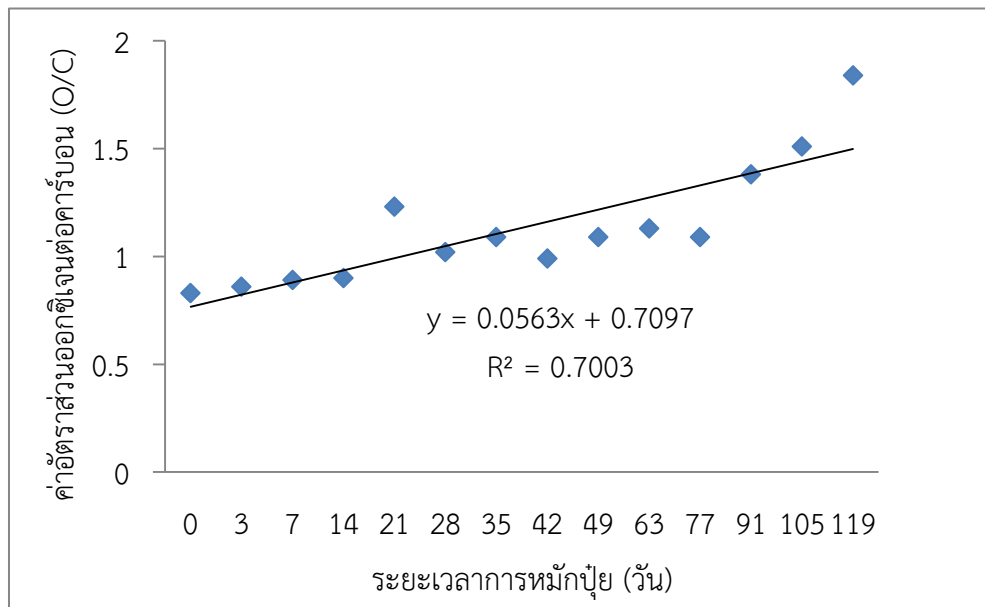
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ 1632/2920 ต่ออุณหภูมิ ($r = -0.967$, $p < 0.01$)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกและอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรร่วมด้วยซึ่งช่วยยืนยันถึงคุณภาพที่ลดลงของปุ๋ยหมัก โดยพบว่าปริมาณคาร์บอนมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณออกซิเจน ($r = -0.998$, $p < 0.01$) และไนโตรเจน ($r = 0.807$, $p < 0.01$) ของกรดฮิวมิกโดยปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย คิดเป็นร้อยละ 33.87 และร้อยละ 26.25 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น คิดเป็นร้อยละ 30.78 (ตารางที่ 22) จากผลการทดลองนี้แสดงว่าเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างหมักปุ๋ยและเกิดเป็นสารซึ่งมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ โดยในกระบวนการหมักปุ๋ยเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยกิจกรรมของพวกจุลินทรีย์ และเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนลดลงสอดคล้องกับการศึกษาอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น ค่าอัตราส่วน O/C ($r=0.837$, $p<0.01$) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังภาพที่ 30 ก) ขณะที่ค่าอัตราส่วน C/H ($r=-0.665$, $p<0.01$) มีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 30 ข) แสดงว่าโมเลกุลของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ถูกสร้างขึ้นส่วนใหญ่มีโครงสร้างแอลิแพติกที่มีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 22 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก ของปุ๋ยหมัก
สูตรมูลสุกร

ระยะเวลา การหมักปุ๋ย (วัน)	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (mg/1 g ของกรดฮิวมิก)				อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ โดยน้ำหนักอะตอม	
	C	H	O	N	C/H	O/C
0	47.83	6.62	39.57	5.98	7.23	0.83
3	47.50	6.06	40.95	5.49	7.84	0.86
7	46.81	6.07	41.54	5.58	7.71	0.89
14	46.12	6.19	41.70	5.99	7.45	0.90
21	39.57	6.12	48.83	5.48	6.47	1.23
28	43.91	5.80	44.57	5.72	7.57	1.02
35	42.45	5.70	46.11	5.74	7.45	1.09
42	44.23	5.87	43.71	6.19	7.53	0.99
49	42.26	5.65	46.22	5.87	7.48	1.09
63	41.78	5.68	47.02	5.52	7.36	1.13
77	42.32	5.79	46.12	5.77	7.31	1.09
91	37.39	5.78	51.44	5.39	6.47	1.38
105	35.72	6.04	53.80	4.44	5.91	1.51
119	31.63	6.79	58.17	4.41	5.46	1.84





ข)

ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบต่อระยะเวลาการหมักของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

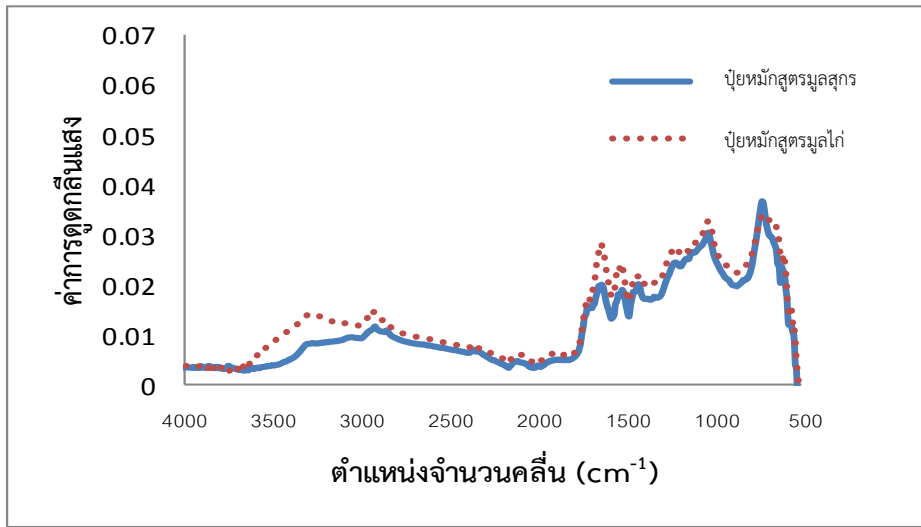
- ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนกับระยะเวลาการหมักปุ๋ย ($r=0.837$, $p<0.01$)
- ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนกับระยะเวลาการหมักปุ๋ย ($r = -0.665$, $p < 0.01$)

ดังนั้นเมื่อนำเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี เข้ามาช่วยในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร สรุปได้ว่าช่วงเวลาที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเจริญเต็มที่และมีคุณภาพดีเหมาะสมต่อการนำไปใช้มากที่สุด คือวันที่ 35 - 49 แต่หากเก็บปุ๋ยไว้นานเกินไป (มากกว่า 49 วัน) ปุ๋ยจะมีคุณภาพลดลงจากการสูญเสียโครงสร้างที่มีความเสถียร เนื่องจากถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ และเมื่อพิจารณาคุณภาพของปุ๋ยหมักเทียบกับปริมาณกรดฮิวมิก พบว่าวันที่ 35 - 63 ปุ๋ยหมักมีปริมาณกรดฮิวมิกสูง ดังนั้นช่วงระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการเลือกปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีปริมาณกรดฮิวมิกสูง อีกทั้งอุดมไปด้วยโครงสร้างที่เสถียรควรอยู่ในช่วง 35 - 49 วัน โดยโครงสร้างที่เสถียรจะมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น การยึดหยุ่น ความสามารถในการ อุ่นน้ำและป้องกันไม่ให้น้ำระเหยไปจากดิน ช่วยปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดูดซับธาตุอาหารและเป็นตัวกลางในการลำเลียงธาตุอาหารจากดินไปสู่รากพืช ฯลฯ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3

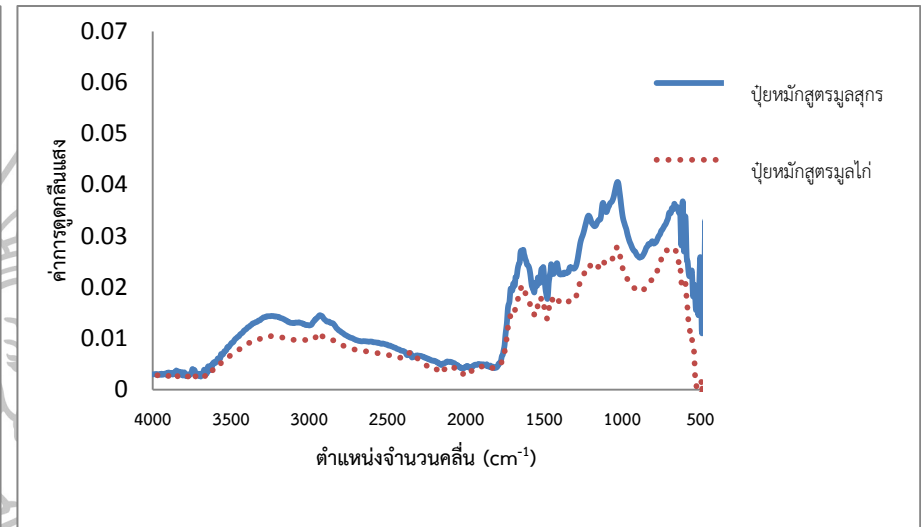
4.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่

การศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการหมักปุ๋ยมีอิทธิพลที่แตกต่างอย่างชัดเจนต่อระยะเวลาที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ในปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร (ภาพที่ 30) โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมัก (วันที่ 0 ภาพที่ 31 ก) กราฟการดูดกลืนแสงของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อกระบวนการหมักปุ๋ยเริ่มขึ้น ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรถึงวันที่เจริญเต็มที่เร็วกว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ โดยพบว่าวันที่ 35 ของกระบวนการหมักซึ่งเป็นวันแรกที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเจริญเต็มที่ ส่งผลให้ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรแสดงกราฟการดูดกลืนแสงที่มากกว่าปุ๋ยหมักสูตรไก่ (ภาพที่ 31 ข) ขณะที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ในวันที่ 42 ของกระบวนการหมักเป็นวันที่ปุ๋ยหมักมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ได้ (ภาพที่ 31 ค) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ รวมถึงความยากง่ายต่อการย่อยสลายที่แตกต่างกันของวัตถุดิบตั้งต้น ส่งผลให้ปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่แตกต่างกัน โดยวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 119 ภาพที่ 31 ง) กราฟการดูดกลืนแสงของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรมีค่าลดต่ำกว่าวันที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่แสดงถึงการย่อยสลายโครงสร้างกรดฮิวมิกเมื่อสารตั้งต้นหมดไป

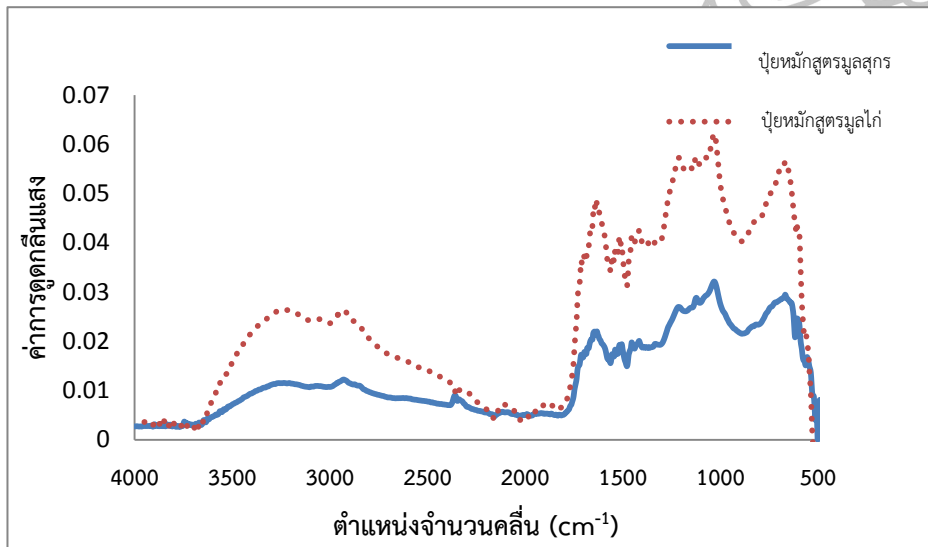
ดังนั้นนอกจากการนำเอาเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปีมาใช้ในการตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักอันเป็นประโยชน์ในการพิจารณาเลือกชนิดของปุ๋ยหมักเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดี ตลอดจนช่วงระยะเวลาในการนำไปใช้ประโยชน์ที่เหมาะสมแล้ว เทคนิคนี้ยังเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเปรียบเทียบสารอินทรีย์ที่มีการควบคุมปัจจัยของการทดลองที่เหมือนกัน อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเชิงคุณภาพของการศึกษาวิวัฒนาการของสารฮิวมิกที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจากกระบวนการเกิดที่มาจากสารตั้งต้นในธรรมชาติที่หลากหลาย เช่น จากซากพืชซากสัตว์ที่ประกอบด้วยลิกนิน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น



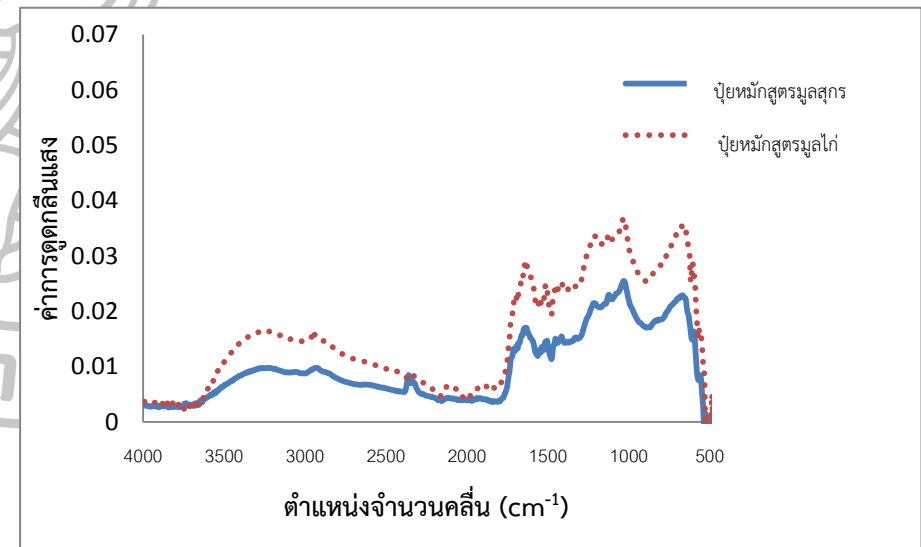
ก) วันที่ 0 ของกระบวนการหมัก



ข) วันที่ 35 ของกระบวนการ



ภาพที่ 31 อินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในวันที่ 0, 35, 42 และ 119 เปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่



บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบปุ๋ยหมัก 2 สูตรที่มีวัตถุดิบหลักตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ มูลสุกรและมูลไก่โดยใช้เทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปีร่วมกับข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก โดยทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน และเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าจากการประเมินระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ได้ โดยพิจารณาตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น สี กลิ่น และลักษณะของปุ๋ย ระยะเวลาที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก สูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่ คือเวลาตั้งแต่ 35 และ 42 วันเป็นต้นไปตามลำดับ โดยแบ่งได้เป็น 4 ระยะ คือ 1) ระยะเริ่มผสม คือวันที่ 0 ของกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร 2) ระยะอุณหภูมิสูง คือ ช่วงตั้งแต่วันที่ 1 - 34 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและวันที่ 1 - 41 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ 3) ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา คือตั้งแต่วันที่ 35 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและช่วงวันที่ 42 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ และ 4) ระยะการเจริญเต็มที่ คือช่วงตั้งแต่วันที่ 36 - 119 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและวันที่ 43 - 119 สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

เมื่อพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมักเปรียบเทียบตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรพบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรผ่านมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรและถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและปริมาณธาตุอาหารหลักอย่าง ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงกว่ามาตรฐาน โดยปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ สูงกว่าค่ามาตรฐาน 1.3 - 2.0 เท่า และปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม สูงกว่าค่ามาตรฐาน 2.4 - 2.6 เท่า, 28.4 - 52.0 เท่า และ 5.0 - 6.0 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าค่ามาตรฐาน 1.4 - 2.5 เท่า และปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม สูงกว่าค่ามาตรฐาน 2.8 - 3.3 เท่า, 12.6 - 22.2 เท่า และ 14.6 - 19.8 เท่า ตามลำดับ

ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่พบว่ามีปริมาณกรดฮิวมิกมากที่สุดในวันที่ 42 เป็น 12.6 มิลลิกรัมต่อกรัม จากกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกด้วยการย่อยสลายวัตถุดิบอินทรีย์ขนาดใหญ่จากนั้นจึงมีปริมาณลดลงอีกครั้งหนึ่งตั้งแต่วันที่ 49 เป็นต้นไป เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นหมดไปอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเท่ากับอุณหภูมิภายนอกทำให้กรดฮิวมิกกลายเป็นอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์แทน โดยจะมีปริมาณค่อนข้างคงที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.3 ± 0.6 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกรดฮิวมิกโดยใช้เทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปีโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงการสั่นของพันธะไม่อิมตัวและค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง เช่น อัตราส่วนการดูดกลืนแสงระหว่างโครงสร้างแอมโรแมติกประเภท C=O และ C=C ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1632 เซนติเมตร⁻¹ และประเภท C=N ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1516 เซนติเมตร⁻¹

ต่อโครงสร้างแอลิแพติก ประเภท CH_2 และ CH_3 ที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น 1335 เซนติเมตร⁻¹ (1632/1335 และ 1516/1335) พบว่าสัดส่วนของโครงสร้างกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรมากกว่าและคุณภาพดีกว่าคือวันที่ 77 จากนั้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังนั้นจากการพิจารณาในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่พบว่าปุ๋ยหมักอายุ 42 วัน จึงเป็นวันที่เหมาะสมในการนำไปใช้เพราะนอกจากจะใช้เวลาในการหมักสั้นที่สุดแล้วยังมีปริมาณกรดฮิวมิกสูงที่สุด นอกจากนี้ไม่ควรเก็บปุ๋ยไว้นานเกินไป (มากกว่า 77 วัน) เพราะจะทำให้ปุ๋ยเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากถูกย่อยสลายกลายเป็นโครงสร้างที่เล็กลงจากการนำไปใช้ของจุลินทรีย์แทนสารตั้งต้นทั้งหมดไป

สำหรับปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ปริมาณกรดฮิวมิกมีค่าสูงเฉลี่ยประมาณ 7.1 ± 0.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 35 - 63 เนื่องมาจากกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกจากกระบวนการย่อยสลายของวัตถุดิบตั้งต้น แต่เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นหมดไป (วันที่ 77-119) ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงอีกครั้งเช่นเดียวกับปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่โดยมีค่าค่อนข้างคงที่เฉลี่ยอยู่ที่ 6.3 ± 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปีพบว่าอิทธิพลของกระบวนการหมักมีผลต่อโครงสร้างของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรในช่วงระยะต่างๆ ที่แตกต่างกัน โดยพบการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญและเห็นเด่นชัดของพันธะเดี่ยว C-H, พันธะคู่ =CH และพันธะสาม $\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{N}$ ที่พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงแรกของกระบวนการหมักโดยมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอายุที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่สูงที่สุดในช่วงวันที่ 35 - 49 จากนั้นโครงสร้างทั้งสามจะค่อยๆ ลดลงจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์เช่นกัน อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่พบว่าปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรแสดงแถบอินฟราเรดสเปกตรัมส่วนใหญ่คล้ายคลึงกัน แตกต่างกันเพียงแค่ว่าความเข้มในการดูดกลืนแสง ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรถึงวันที่เจริญเต็มที่เร็วกว่าปุ๋ยหมักสูตร มูลไก่ เนื่องจากวัตถุดิบที่ย่อยสลายได้ง่ายกว่ามูลไก่ที่มีกลีบเป็นองค์ประกอบโดยพบว่าวันที่ 35 ของกระบวนการหมักซึ่งเป็นวันแรกที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรเจริญเต็มที่ ส่งผลให้ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรแสดงกราฟการดูดกลืนแสงที่มากกว่าปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ขณะที่ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ในวันที่ 42 ของกระบวนการหมักเป็นวันที่ปุ๋ยหมักมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ได้

จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาปริมาณและโครงสร้างกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและสูตรมูลไก่สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการหมักปุ๋ยมีอิทธิพลต่อระยะเวลาที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่แตกต่างอย่างชัดเจนในปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตร ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ รวมถึงความยากง่ายต่อการย่อยสลายที่แตกต่างกันของวัตถุดิบตั้งต้น ส่งผลให้ปุ๋ยหมักทั้ง 2 สูตรมีระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่แตกต่างกันและการศึกษาเชิงปริมาณเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอในการบ่งบอกคุณภาพของปุ๋ยหมัก ดังนั้นเทคนิค FT-IR จึงถูกนำมาช่วยในการติดตามโครงสร้างสารฮิวมิกเพราะนอกจากจะสามารถใช้ในเชิงเปรียบเทียบคุณภาพของปุ๋ยหมักเพื่อประกอบการพิจารณาการเลือกชนิดปุ๋ยแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บรักษาได้อีกด้วย เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีปริมาณกรดฮิวมิกที่มากที่สุดและมีโครงสร้างที่เสถียรอยู่ปรับปรุงคุณภาพได้นานๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ของเกษตรกรในการเลือกใช้ปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ทั้งสองชนิดในอนาคตสืบไป

รายการอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2548. เอกสารวิชาการปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. กรุงเทพฯ.
- กาญจนา สุราภา. 2557. การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีทางจุลินทรีย์ : การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยมูลหมูและมูลไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เกียรติชัย ตั้งสิริวรกุล. 2547. การทำปุ๋ยหมักจากกากตะกอนของมูลสุกรและปลั๊กิ่ง เอเจนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จักรพันธ์ อินทจักร. 2555. การใช้สีโอเนาร์โคทเพื่อปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยหมักและผลผลิตค่น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จุฑาวรรณ สุนทรณิตย์. 2557. การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี: การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เจนวิทย์ กรอบทอง. 2544. การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรียกับสารไบโอเนคในการทำปุ๋ยหมักจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง และใบไม้แห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชัชฎาพร องอาจ. 2531. การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายปุ๋ยหมัก. งานวิจัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, พระนครศรีอยุธยา.
- ชวிரรรถ คล่องตรวจโรค. 2554. การเปรียบเทียบการสกัดกรดฮิวมิคจากวัสดุชีวภาพโดยกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการร่วมไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ณัฐพร นากรุงศรี. 2552. การทำปุ๋ยหมักจากมูลฝอยตลาดสดโดยใช้ชานอ้อยเป็น Bulking Agent. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ทรายแก้ว อนาคต, ชุตินา จันทร์เจริญ, พัฒน์พงษ์ เกิดหล้า, พิลาลักษณ์ ลุ่มลิว และสาธิต กาละพวก. 2556. ผลของปุ๋ยมูลไก่และปุ๋ยเคมีต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ผลผลิต และคุณภาพของอ้อยในกลุ่มชุดดินที่ 36 จังหวัดเพชรบูรณ์. รายงานวิจัย. กลุ่มวิชาการเพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 8, พิษณุโลก.
- ธีรยุทธ์ วิไลวัลย์ และวรวรรณ พันธุมนาวิน. (2548). อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี. เอกสารประกอบการสอนภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า1-2
- ธันวดี ศรีธาวีรัตน์. (2547). รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษากระบวนการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. 108 หน้า
- นันทธีรา สรรมณี. (2541). เคมีสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- _____, กุลนาถ อบสุวรรณ, กมลชนก พานิชการ และศุภโชค กำภูพงษ์. 2558. การศึกษา ระดับการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมัก และผลการเป็นคีเลตต่อความสามารถในการ

- ปลดปล่อยจุลธาตุอาหาร. รายงานผลการวิจัยปีที่ 1 โครงการต่อเนื่อง 2 ปี. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- บุญสูง แก้วจรัส. 2553. การศึกษาประสิทธิภาพการทำปุ๋ยหมักฟางข้าวโดยการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์และการปรับวัสดุหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ประยูร คำเต็ม. 2547. การศึกษาการศึกษาการทำปุ๋ยหมักจากเปลือกกล้วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- เพ็ญภา เพ็ญอักษร. 2553. การทำปุ๋ยหมักจากใบและลำต้นมันสำปะหลัง: อิทธิพลของรูปและความเข้มข้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์สาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไพศาล रिमชลา. 2555. การศึกษาขนาดของวัสดุหมักขยะประเภทผลไม้และเปลือกผลไม้กับสัดส่วนการคลุกเคล้าด้วยดินเนื้อละเอียดที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ภัทรพร กังวานเชษฐา. 2555. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ยงยุทธ โอสถสภา. (2546). **ชีวมีสและกรดชีวมีค**. นครปฐม : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม.
- เย็นหทัย หนาแน่น. 2549. **สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- รสสุคนธ์ พุ่มพันธุ์วงศ์. 2549. **การผลิตปุ๋ยอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดเอมเพอร์เรียม, กรุงเทพฯ.
- ราชกิจจานุเบกษา. (2548). ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 109 ง หน้า 9-10 ลงวันที่ 30 กันยายน 2548.
- เสาวรส อักษรนนท์. (2537). **สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์**. หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู, กรุงเทพฯ.
- สังวาลย์ กัมพลาศิร. (2550). การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีส่วนลำต้นเหนือดินของต้นกะลา (*Alpinia nigra*) ที่มีฤทธิ์ แอนติออกซิแดนท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- สุทธิ พลรักษา. 2552. การทำปุ๋ยหมักจากผักตบชวาผสมมูลวัวโดยใช้สารเร่งชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- สายชล พรหมอยู่, อัจฉรา จิตตลดากร, หลุขภู ภัทรดิลก. (2555). ผลของการใช้ปุ๋ยมูลวัว ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมี ต่อการผลิตผักบั้งจีน, น. 3. **การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 2**. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, อาคารสัมมนา 1 – 2

- สุภาวดี สืบสาย. 2556. การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิคของปุ๋ยหมักด้วยการใช้หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ร่วมกับเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อัคกะบัทคาน ปาทาน. (2543). การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารหอมระเหยในมะขามหวาน โดย FTIT. งานวิจัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต เคมี, สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์.
- อัญชลี ไชยเนตร. 2552. การศึกษาดัชนีของกระบวนการฮิวมิฟิเคชันต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Alexander, M. 1977. **Introduction to soil microbiology**. Toppan Printing Co (S) Pte. Ltd. Singapore : 169-181.
- Amir, S., A. Jouraiphy, A. Meddich, M. Gharous E., P. Winterton and M. Hafidi. 2010. Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: Elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. **Journal of hazardous waste** 177: 524-529.
- Bernal, M.P., J.A. Alburquerque, and R. Moral. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**. 100: 5444-5453.
- Bio Ag Technologies International, (1999). Humic Acid Structure and Properties. Available Source: http://www.phelpstek.com/graphics/bioag/humic_acid.pf, July 11, 2014.
- Baddi, G.A., M. Hafidi, J. Cegarra, J.A. Alburquerque, J. GonzalveZ, V.Gilard and J.C. Revel. 2004. Characterization of fulvic acids by elemental and spectroscopic (FTIR and ¹³C-NMR) analyses during composting of olive mill wastes plus straw. **Bioresource Technology**. 93: 285-290.
- Beff, T., M. Blane, L Malley, J.L. Fische, P.F. Lyon and M. Aragno. 1996. Taxonomic and metabolic microbial diversity duing composting. In de Bertoldi, M., **The Science of Composting** : Part I pp. 149-161, London: Chapman & Hall.
- Benito, M., A. Masaguer, A. Moliner, N. Arrigo and R.M. Palma. 2003. Chemical and Microbiological parameters for the characterization of the stability and maturity of pruning waste compost. **Biol Fertil Soils**. 37: 184-189.
- Bustamante, M.A., C. Paredes, F.C. Marhuenda-Egea, A. Perez-Espinosa, M.P. Bernal and R. Moral. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. **Chemosphere**. 72: 551-557.
- Castaldi, P., G. Alberti, R. Merella and P. Melis. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying

- suitable parameters for evaluation of compost maturity. **Waste Management**. 25, 2: 209 - 213.
- Cuetos, M.J., X. Gomez, M. Otero and A. Moran. (2010). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste: study of biological stabilization by Fourier Transform infrared spectroscopy and thermogravimetry combined with mass spectrometry. **Biodegradation**. 21: 543-556.
- Czoch, W.P. and M. Ordarski. 1988. Actinomycetee Enzymes, pp. 219-283. In M. Good-fellow, S.T. Williams and M. Mordaski, eds. **Actinomycetes in Biotechnology**. Academic Prees, San Diego.
- Domeizel, M., A. Kkalil and P. Prudent. 2004. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost. **Bioresource technology**. 94: 177-184.
- Droussi, Z., V. Dorazio, M. Hafidi and A. Ouattmane. 2009. Elemental and spectroscopic characterization of humic-acid-like compounds during composting of olive mill by-products. **Journal of Hazardous Materials**. 163: 1289-1297.
- Enev, V., L. Pospíšilová, M. Klučáková, T. Liptaj, L. Doskočil. 2014. Spectral characterization of selected humic substances. **Soil & Water Res**. 9: 9–17.
- Fels, L.F., M. Zamama and M. Hafidi. 2015. Advantages and Limitations of Using FTIR Spectroscopy for Assessing the Maturity of Sewage Sludge and Olive Oil Waste Co-composts. Available Source: <http://dx.doi.org/10.5772/60943>. April 20, 2016.
- Fels, L.E., M. Zamama, A.E. Asil and M. Hafidi. 2014. Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 87: 128-137.
- Fialho, L.L, W.T. Lopes da Silva, Debora M.B.P. Miloro, M.L. Simoes and L.M. Neto. 2010. Characterization of organic matter from composting of different residues by physicochemical and spectroscopic methods. **Bioresource Technology**. 101: 1927-1934.
- Fuentes, M., R. Baigorri, G. Gonzalez-Gaitano and J.M. Garcia-Mina. 2007. The complementary use of ¹H NMR, ¹³C NMR, FTIR and size exclusion chromatography to investigate the principal structural changes associated with composting of organic materials with diverse origin. **Organic Geochemistry**. 38: 2012-2023.

- Giovanella, M., J.S. Crespo, M. Antunes, D.S. Adamatti, A.N. Fernandes, A. Barison, C.W.P. da Silva, R. Guégan, M. Motelica-Heino and M.M.D. Sierra. 2010. Chemical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from the bottom sediments of a Brazilian subtropical microbasin. **Journal of Molecular Structure**. 982: 111-119.
- Gondar, D., R. Lopez, S. Fiol, J.M. Antelo, F. Arce. 2005. Characterization and acid-base properties of fulvic and humic acids isolated from two horizons of an ombrotrophic peat bog. **Geoderma**. 126: 367-374.
- Hargitai, L., 1994. Biochemical transformation of humic substances during humification related to their environmental functions. **Environment International**. 20, 43-48.
- Huang, G.F., Q.T. Wu, J.W.C. Wong, and B.B. Nagar. 2006. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. **Bioresource Technology**. 97, 15: 1834-1842.
- Hsu, J.H. and S.L. Lo. 1999. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. **Environmental Pollution**. 104: 189-196.
- He, X-S., B-D. Xi, Y-H. Jiang, L-S. He, D. Li, H-W. Pan and S-G. Bai. Structural transformation study of water-extractable organic matter during the industrial composting of cattle manure. **Microchemical Journal**. 106: 160-166.
- Higashikawa, F.S., C.A. Silva, C.A. Nunes and M.A. Sanchez-Monedero. 2014. Fourier transform infrared spectroscopy and partial least square regression for the prediction of substrate maturity indexes. *Science of the Environment*. 470-471: 536-542.
- Hu, Z., Y. Liu, G. Chen, X. Gui, T. Chen and X. Zhan. 2011. Characterization of organic matter degradation during composting of manure-straw mixtures spiked with tetracyclines. **Bioresource Technology**. 102: 7329-7334.
- Inbar, Y., Y. Chen, and Y. Hadar. 1990. Humic substance formed during the composting of organic matter. **Soil Science Society of America Journal**. 54, 5: 1316 - 1323.
- Jouraiphy, A., S. Amir, P. Winterton, M. El Gharous, J-C. Revel and M. Hafidi. 2008. Structural study of the fulvic fraction during composting of activated sludge-plant matter: Elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. **Bioresource Technology**. 99: 1066-1072.

- Liu, D., R. Zhang, H. Wu, D. Xu, Z. Tang, G. Yu, Z. Xu and Q. Shen. 2011. Changes in biochemical and microbiological parameters during the period of rapid composting of dairy manure with rice chaff. **Bioresource Technology**. 102: 9040-9049.
- Malan, C..2015. Review: Humic and Fulvic Acids. A Practical Approach. Available Source: <http://www.fssa.org.za/Symposium/2015/06-paper.pdf>. May 11, 1016.
- Mema, V. 2006. Identification of extraction methods for the production of humic acids from black liquor. **Department of Process Engineering**, University of Stellenbosch.
- Ouaqoudi Zahra El, F., L.E. Fels, L. Lemee, A. Ambles and M. Hafidi. 2015. Evaluation of lignocellulose compost stability and maturity using spectroscopic (FTIR) and thermal (TGA/TDA) analysis. *Ecological Engineering*. 75: 217-222.
- Rebollido, R., J. Martinez, Y. Aguilera, K. Melchor, I. Koerner and R. Stegmann. 2008. Microbial population during composting process of organic fraction of municipal solid waste. **Applied ecology and environmental research**. 63: 61-67.
- Ryckeboer, J., J. Mergaert, K. Vaes, S. Klammer, D. De Clercq, J. Coosemans, H. Insam and J. Swings. 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. **Annals Microbiol**. 53: 349-410.
- Sellami, F., S. Hachicha and M. Chtourou. 2008. Maturity Assessment of Composted Olive Mill Wastes Using UV Spectra and Humification Parameters. **Bioresource Technology**. 99: 6900-6907.
- Silva, M.E.F., L. T. de Lemos, O.C. Nunes and A.C.C. Queda. 2014. Influence of the composition of the initial mixtures on the chemical composition, physicochemical properties and humic-like substances content of composts. **Waste Management**. 34: 21-27.
- Siverstein, R.M., G. Clayton Bassler, T.C. Morrill. 1991. **Spectrometric identification of organic compounds**. 5 nd ed. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Spaccini, R. and A. Piccolo. 2009. Molecular characteristics of humic acids extracted from compost at increasing maturity stages. **Soil Biology & Biochemistry**. 41: 1164 - 1172.
- Stevenson, F.J. 1994. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction**. 1 nd ed. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Schnitzer, M. (1978). Humic substances: chemistry and reactions. In: Schnitzer, M., Khan, S.U. (Eds.), **Soil Organic Matter**. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-64.

- Tan, K.H. (2003). **Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies**. New York: Marcel Dekker.
- Wu, L., L.Q. Ma and G.A. Martinez. 2000. Comparison of Methods for Evaluating Stability and Maturity of Biosolids Compost. **Journul of Environmental Quality**. 29: 424-429.
- Wu, H., Y. Zhao, Y. Long, Y. Zhu and H. Wang. 2011. Evaluation of the biological stability of waste during landfill stabilization by thermogravimetric analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. **Bioresource Technology**. 102: 9403 – 9408.
- Wei Z, Xi B, Zhao Y, Wang S, Liu H and Jiang Y. 2007. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. **Chemosphere**. 68:368-74.
- Xi, BD., X. Song He, ZM. Wei, YH Jiang, MX. Li, D. Li, Y. Li and QL. Dang. 2012. Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. **Chemosphere**. 88: 744-750.
- Zbytniewski, R. and B. Buszewski. 2005. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties. **Bioresource Technology**. 96: 471-478.
- Zhang J., G. Zeng, Y. Chen, M. Yu, Z. Yu, H. Li, Y. Yu and H. Huang. 2011. Effects of physic-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. **Bioresource Technology**. 102: 2950-2956.
- Zhou, Y., A. Selvam and J.W.C. Wong. 2014. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues. **Bioresource Technology**. 168: 229-234.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

1. ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและมูลไก่

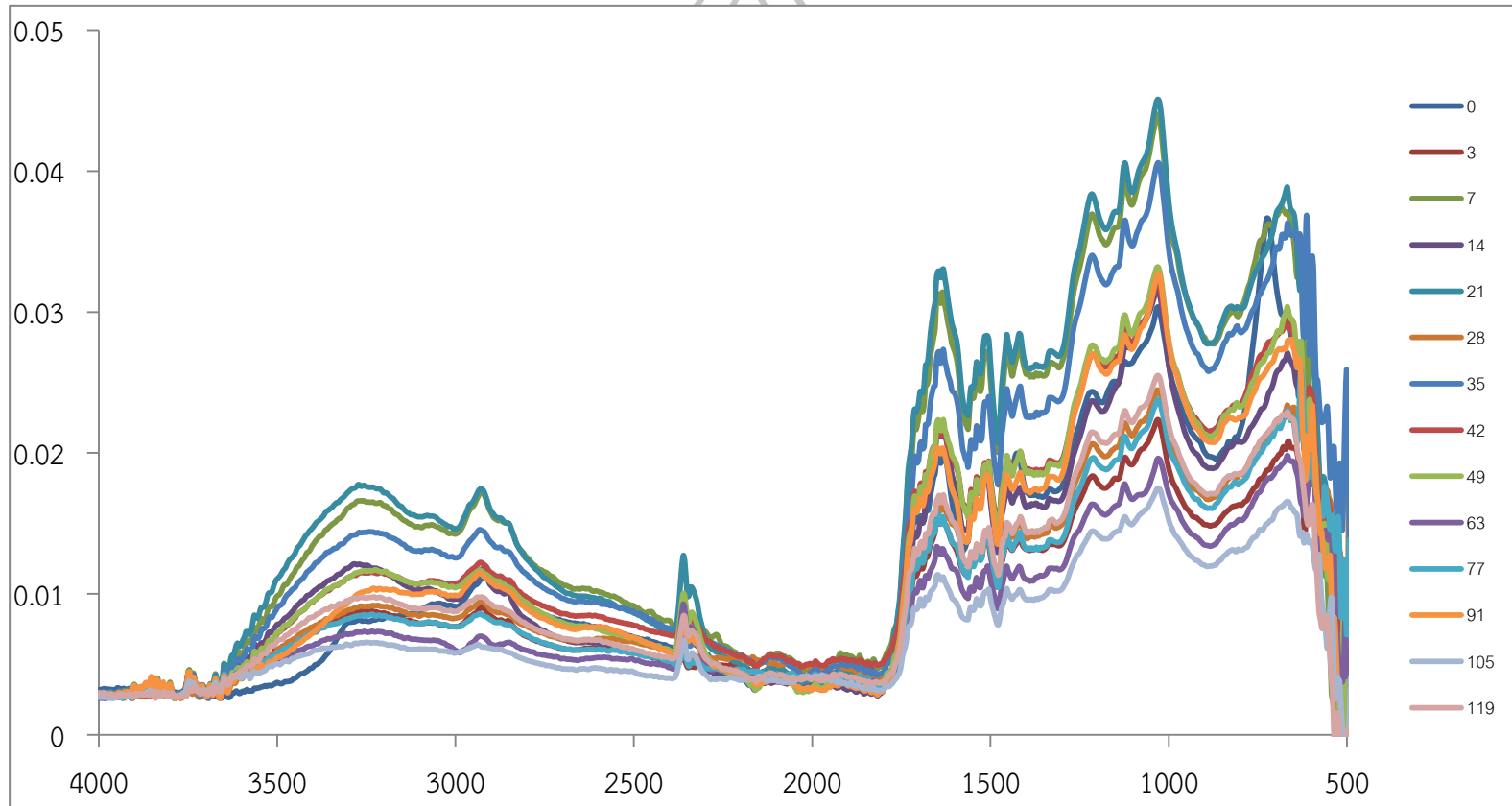
ตารางที่ 23 ปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรและปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ระยะเวลาการหมักปุ๋ย (วัน)	ปริมาณกรดฮิวมิก (mg/g soil)	
	ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร	ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่
0	40.73 ± 1.77	20.12 ± 1.81
3	10.85 ± 0.70	11.16 ± 1.04
7	14.51 ± 0.88	10.85 ± 0.11
14	11.58 ± 0.44	10.91 ± 0.29
21	6.23 ± 0.39	10.45 ± 0.27
28	5.73 ± 0.42	9.13 ± 1.17
35	6.74 ± 0.79	8.38 ± 3.15
42	7.41 ± 0.80	12.57 ± 1.47
49	6.98 ± 0.76	9.42 ± 0.63
63	7.22 ± 0.73	11.36 ± 1.19
77	6.16 ± 0.41	9.81 ± 0.91
91	6.58 ± 0.25	10.59 ± 0.22
105	6.63 ± 0.15	10.39 ± 0.55
119	5.82 ± 0.37	10.32 ± 0.35

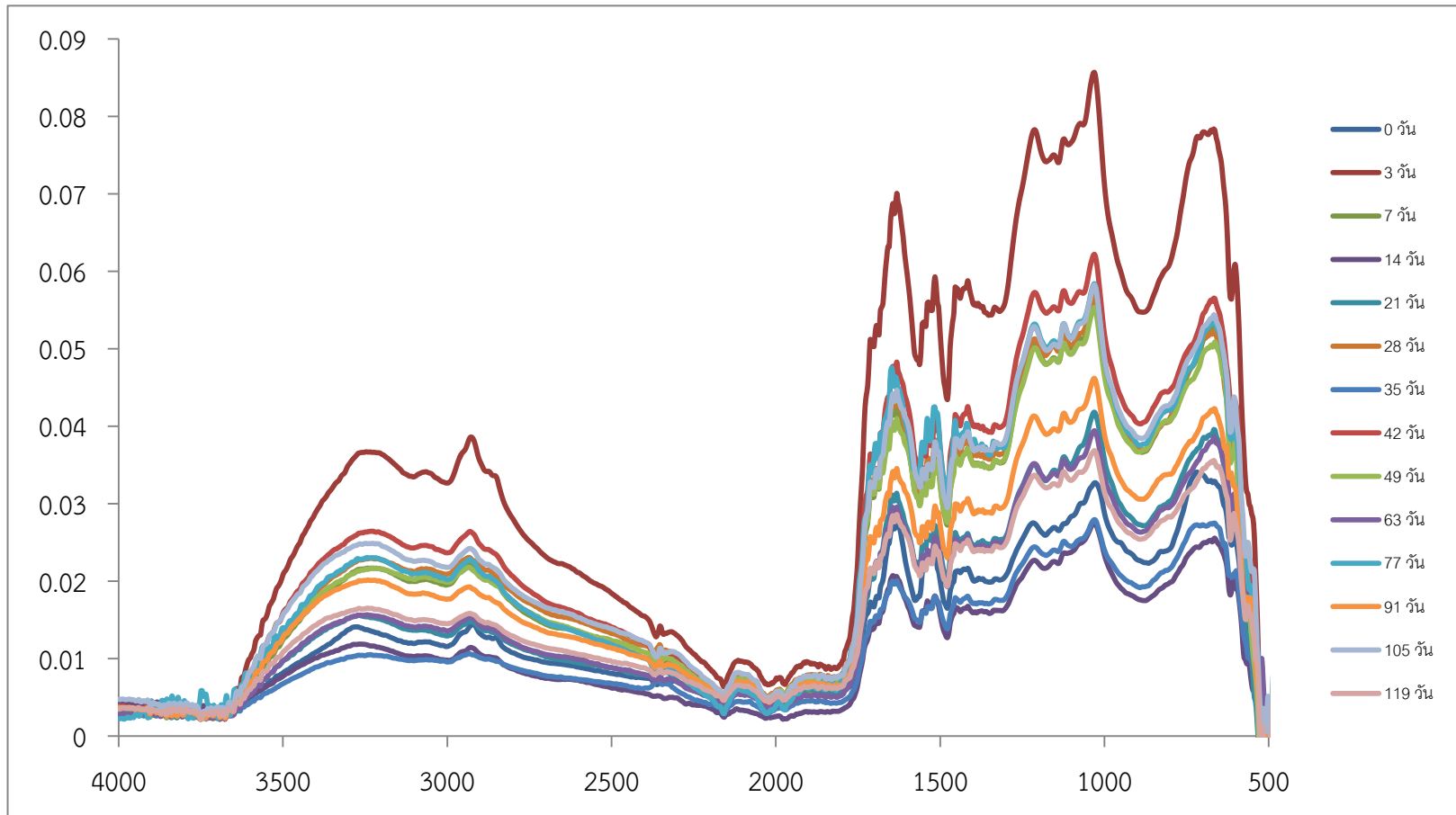


ภาคผนวก ข

1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิค FT-IR (จำนวนคลื่น ตั้งแต่ 4,000 – 400 เซนติเมตร⁻¹)



ภาพที่ 32 แถบอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน



ภาพที่ 33 แถบอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกรที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ยต่างกัน

2. ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพันธะหรือหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR

ตารางที่ 24 ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่างๆ

ระยะเวลา การหมักปุ๋ย (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น (เซนติเมตร ⁻¹)							
	664	725	1030	1123	1215	1327	1416	1504
0	0.029323	0.036652	0.030363	0.026493	0.024346	0.017365	0.019345	0.01802
3	0.020747	0.018762	0.022359	0.019689	0.018359	0.013512	0.01392	0.013501
7	0.037102	0.036140	0.044032	0.039342	0.036955	0.026416	0.027607	0.026968
14	0.027111	0.023732	0.031469	0.027510	0.023701	0.016674	0.017545	0.017898
21	0.038854	0.034449	0.045101	0.040593	0.038381	0.027222	0.028387	0.028009
28	0.023402	0.021312	0.024466	0.022120	0.020647	0.014876	0.015056	0.014300
35	0.036302	0.032218	0.040606	0.036522	0.034028	0.023922	0.024717	0.023981
42	0.029480	0.027655	0.032133	0.028845	0.026978	0.019427	0.020097	0.019413
49	0.030385	0.026996	0.033196	0.029797	0.027655	0.019242	0.020118	0.019329
63	0.019827	0.018071	0.019613	0.017800	0.016364	0.011823	0.011845	0.011792
77	0.023030	0.020663	0.023783	0.021184	0.019627	0.01381	0.014384	0.014066
91	0.027926	0.025886	0.032758	0.028372	0.02703	0.018328	0.018599	0.018300
105	0.016556	0.014945	0.017513	0.015474	0.014456	0.010289	0.010271	0.010313
119	0.022912	0.021380	0.025497	0.023003	0.021488	0.015292	0.015477	0.014706

ตารางที่ 24 ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่างๆ (ต่อ)

ระยะเวลา การหมักปุ๋ย (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น (เซนติเมตร ⁻¹)						
	1632	2114	2322	2874	2920	2932	3217
0	0.019897	0.004512	0.006298	0.010471	0.011367	0.030363	0.026493
3	0.015209	0.004252	0.004870	0.008147	0.008945	0.022359	0.019689
7	0.03138	0.005749	0.007903	0.015214	0.017077	0.044032	0.039342
14	0.021828	0.003657	0.005140	0.010180	0.011652	0.031469	0.027510
21	0.033048	0.004783	0.009389	0.015389	0.017278	0.045101	0.040593
28	0.016507	0.005086	0.005543	0.008671	0.009329	0.024466	0.022120
35	0.027342	0.005512	0.006538	0.013305	0.014418	0.040606	0.036522
42	0.022017	0.005702	0.007823	0.011265	0.012089	0.032133	0.028845
49	0.022347	0.004101	0.007781	0.010856	0.011480	0.033196	0.029797
63	0.013147	0.00427	0.006788	0.006434	0.006916	0.019613	0.017800
77	0.015463	0.004318	0.005023	0.007972	0.008437	0.023783	0.021184
91	0.020267	0.003865	0.006465	0.010495	0.011234	0.032758	0.028372
105	0.011187	0.003959	0.005322	0.006035	0.006210	0.017513	0.015474
119	0.017025	0.004384	0.006986	0.009030	0.009713	0.025497	0.023003

ตารางที่ 25 ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่ ณ ตำแหน่งจำนวนคลื่นต่างๆ

ระยะเวลา การหมักปุ๋ย (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งจำนวนคลื่น (เซนติเมตร ⁻¹)										
	1030	1123	1211	1335	1416	1516	1632	2114	2874	2932	3225
0	0.032698	0.027432	0.027419	0.020272	0.021671	0.02355	0.027803	0.006027	0.012765	0.014133	0.013483
3	0.085658	0.077100	0.078266	0.055355	0.058788	0.059274	0.070065	0.009786	0.034185	0.038469	0.036646
7	0.056157	0.050604	0.050819	0.035488	0.037164	0.036916	0.042697	0.006098	0.020346	0.022392	0.021670
14	0.027537	0.023651	0.022680	0.016254	0.016765	0.018102	0.020583	0.003439	0.010254	0.011406	0.011631
21	0.041807	0.036066	0.035026	0.025515	0.026148	0.027203	0.031346	0.005639	0.013615	0.014827	0.015294
28	0.056895	0.052014	0.051263	0.036666	0.038572	0.038228	0.044146	0.007736	0.021464	0.023046	0.022901
35	0.027949	0.025151	0.024418	0.017639	0.018060	0.018031	0.020038	0.004484	0.009973	0.010639	0.010421
42	0.062185	0.057496	0.057269	0.040176	0.042542	0.041377	0.048289	0.007328	0.024080	0.026404	0.026439
49	0.055320	0.050738	0.050132	0.035595	0.037117	0.035476	0.040953	0.007438	0.020120	0.021774	0.021681
63	0.039420	0.035645	0.035157	0.025078	0.025796	0.025736	0.029561	0.005466	0.013974	0.015330	0.015547
77	0.058398	0.053254	0.053190	0.037730	0.040246	0.042493	0.045966	0.006125	0.020639	0.022843	0.023026
91	0.046168	0.041698	0.041283	0.029602	0.030669	0.029676	0.034553	0.007060	0.017888	0.019261	0.020104
105	0.058223	0.053204	0.052818	0.037875	0.039303	0.037942	0.044666	0.008230	0.022162	0.024221	0.024883
119	0.036851	0.034124	0.033663	0.024524	0.025322	0.024516	0.028613	0.006612	0.014649	0.015836	0.016416

3. ข้อมูลการวิเคราะห์อัตราส่วนการดูดกลืนแสง

ตารางที่ 26 อัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร และมูลไก่ที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ

ระยะเวลา การหมักปุ๋ย (วัน)	ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร		
	1632/2924	1632/1335	1516/1335
0	1.786247	1.371498	1.161701
3	1.686890	1.265739	1.070798
7	1.823782	1.203139	1.040239
14	1.857228	1.266334	1.113695
21	1.899092	1.228532	1.066157
28	1.755130	1.204004	1.042601
35	1.891133	1.136005	1.022223
42	1.810609	1.201936	1.029893
49	1.932630	1.150527	0.996657
63	1.887581	1.178762	1.026238
77	1.823037	1.218288	1.126239
91	1.786583	1.167252	1.002500
105	1.797108	1.179300	1.001769
119	1.743115	1.166735	0.999674





ตารางที่ 27 การจัดกลุ่มปุ๋ยเปรียบเทียบเชิงปริมาณกรดฮิวมิคระหว่างวันต่างๆ ของปุ๋ยสูตรมูลสุกร ตัวเลขที่ปรากฏ คือค่าเฉลี่ยกรดฮิวมิคในแต่ละวัน กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่น้อยที่สุด และกลุ่มที่ 6 เป็นกลุ่มที่มากที่สุด

HA

day	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
Duncan ^a 28	3	5.7256					
119	3	5.8178	5.8178				
77	3	6.1624	6.1624	6.1624			
21	3	6.2303	6.2303	6.2303			
91	3	6.5825	6.5825	6.5825			
105	3	6.6303	6.6303	6.6303			
35	3	6.7422	6.7422	6.7422			
49	3	6.9758	6.9758	6.9758			
63	3		7.2153	7.2153			
42	3			7.4080			
3	3				10.8529		
14	3				11.5779		
7	3					14.5083	
0	3						40.7282
Sig.		.085	.055	.086	.242	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 28 การจัดกลุ่มปุ๋ยเปรียบเทียบเชิงปริมาณกรดฮิวมิคระหว่างวันต่างๆ ของปุ๋ยสูตรมูลไก่ ตัวเลขที่ปรากฏ คือค่าเฉลี่ยกรดฮิวมิคในแต่ละวัน กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่น้อยที่สุด และกลุ่มที่ 4 เป็นกลุ่มที่มากที่สุด

HA

day	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
Duncan ^a 35	3	8.3825			
28	3	9.1333	9.1333		
49	3	9.4161	9.4161		
77	3	9.8153	9.8153		
119	3	10.3188	10.3188	10.3188	
105	3	10.3947	10.3947	10.3947	
21	3	10.4526	10.4526	10.4526	
91	3	10.5879	10.5879	10.5879	
7	3		10.8463	10.8463	
14	3		10.9118	10.9118	
3	3		11.1566	11.1566	
63	3		11.3601	11.3601	
42	3			12.5688	
0	3				20.1181
Sig.		.066	.069	.063	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ 29 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ธาตุองค์ประกอบ	ระยะเวลา การหมัก	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	ไนโตรเจน (N)
ระยะเวลาการหมัก	1.000	-.900**	-.531	.904**	-.705**
คาร์บอน (C)		1.000	.429	-.998**	.807**
ไฮโดรเจน (H)			1.000	-.448	.134
ออกซิเจน (O)				1.000	-.830**
ไนโตรเจน (N)					1.000

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

ตารางที่ 30 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ธาตุองค์ประกอบ	ระยะเวลา การหมัก	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	ไนโตรเจน (N)
ระยะเวลาการหมัก	1.00	-.899**	-.738**	.902**	-.829**
คาร์บอน (C)		1.000	.597*	-.999**	.955**
ไฮโดรเจน (H)			1.000	-.614*	.509
ออกซิเจน (O)				1.000	-.961**
ไนโตรเจน (N)					1.000

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14



ตารางที่ 31 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ตัวแปร	ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร		
	ค่าอัตราส่วน O/C	ค่าอัตราส่วน C/N	ค่าอัตราส่วน C/H
ระยะเวลาการหมัก	0.890**	-0.507	-0.761**
ค่าอัตราส่วน O/C	1.000	-0.465	-0.930**
ค่าอัตราส่วน C/N		1.000	0.364
ค่าอัตราส่วน C/H			1.000

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

ตารางที่ 32 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ตัวแปร	ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่		
	ค่าอัตราส่วน O/C	ค่าอัตราส่วน C/N	ค่าอัตราส่วน C/H
ระยะเวลาการหมัก	0.879**	-0.848**	-0.798**
ค่าอัตราส่วน O/C	1.000	-0.861**	-0.967**
ค่าอัตราส่วน C/N		1.000	0.838**
ค่าอัตราส่วน C/H			1.000

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14



ตารางที่ 33 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 1632/2924 ต่อระยะเวลาการหมักปุ๋ย ค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร

ปุ๋ยหมักสูตรมูลสุกร	ระยะเวลาการหมัก ปุ๋ย (วัน)	ค่าอัตราส่วน O/C	ค่าอัตราส่วน C/H	ปริมาณกรดฮิวมิก
ระยะเวลาการหมักปุ๋ย	1	.890 ^{**}	-.761 ^{**}	-.496
ค่าอัตราส่วน 1632/2924	-.072	-.105	.138	-.164

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

ตารางที่ 34 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 1632/1335 และ 1516/1335 ต่อระยะเวลาการหมักปุ๋ย ค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และปริมาณกรดฮิวมิกของปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่

ปุ๋ยหมักสูตรมูลไก่	ระยะเวลาการหมักปุ๋ย (วัน)	ค่าอัตราส่วน O/C	ค่าอัตราส่วน C/H	ปริมาณกรดฮิวมิก
ระยะเวลาการหมักปุ๋ย	1	.879 ^{**}	-.798 ^{**}	-.346
ค่าอัตราส่วน 1632/1335	-.595 [*]	-.537 [*]	.448	.820 ^{**}
ค่าอัตราส่วน 1516/1335	-.551 [*]	-.599 [*]	.520	.602 [*]

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=14

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=14

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวศศิธร สายแก้ว
Miss Sasithorn Saikaew
ที่อยู่ 82 หมู่4 ตำบลหนองพันจันทร์ อำเภอบ้านคา จังหวัดราชบุรี 70180
โทรศัพท์ 097 2467015
Email address suntoby19@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขาชีวเคมี ณ university of du main (France)
พ.ศ. 2555 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

ประวัติการฝึกอบรม

พ.ศ. 2556 อบรมการทวนสอบ ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี และการควบคุมคุณภาพผลการ
ทดสอบ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ. 2557 อบรมเชิงปฏิบัติการการประยุกต์ใช้เครื่อง HPLC เพื่อวิเคราะห์สารสมุนไพร รุ่นที่ 4
ณ ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2559 อบรมเทคนิคพื้นฐานทางจุลชีววิทยาทางอาหาร ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ. 2559 อบรมหลักสูตร"การวิเคราะห์สถิติเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม R" รุ่นที่ 2 ณ
มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

Sasithorn Saikaew, Jaruwan Hawahsuwan, Kamolchanok Panishkan, Kullanart
Obsuwan and Natdhera Sanmanee. 2558. Study of humification degree of
Chicken manure composts using FTIR spectroscopy technique. ในเอกสาร
ประกอบการประชุม The 3rd Environment Asia International Conference
“Towards International Collaboration for an Environmentally Sustainable
World” ระหว่างวันที่ 17-19 มิถุนายน 2558 ณ โรงแรมมณเฑียร ริเวอร์ไซด์
กรุงเทพมหานคร. หน้า 27.