



การศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างการหมักปุ๋ยมูลวัว
ด้วยการใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี



โดย
นางสาวสิริประภัสสร ระย่าย้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างการหมักปุ๋ยมูลวัว
ด้วยการใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิลิเบิลสเปกโทรสโกปี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา **2558**
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**STUDY OF HUMIC ACIDS' EVOLUTION DURING COMPOSTING PERIOD
OF PORCINE MANURE USING ULTRAVIOLET-VISIBLE SPECTROSCOPY TECHNIQUE**



**By
Miss Siripraphat Rayayoi**

**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 “การศึกษาวิวัฒนาการของกรตวิมิกระหว่างการหมักปุ๋ยมูลวัวด้วยการใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี” เสนอโดยนางสาว สิริประภัสสร ระย้าย้อย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลชนก พานิชการ)

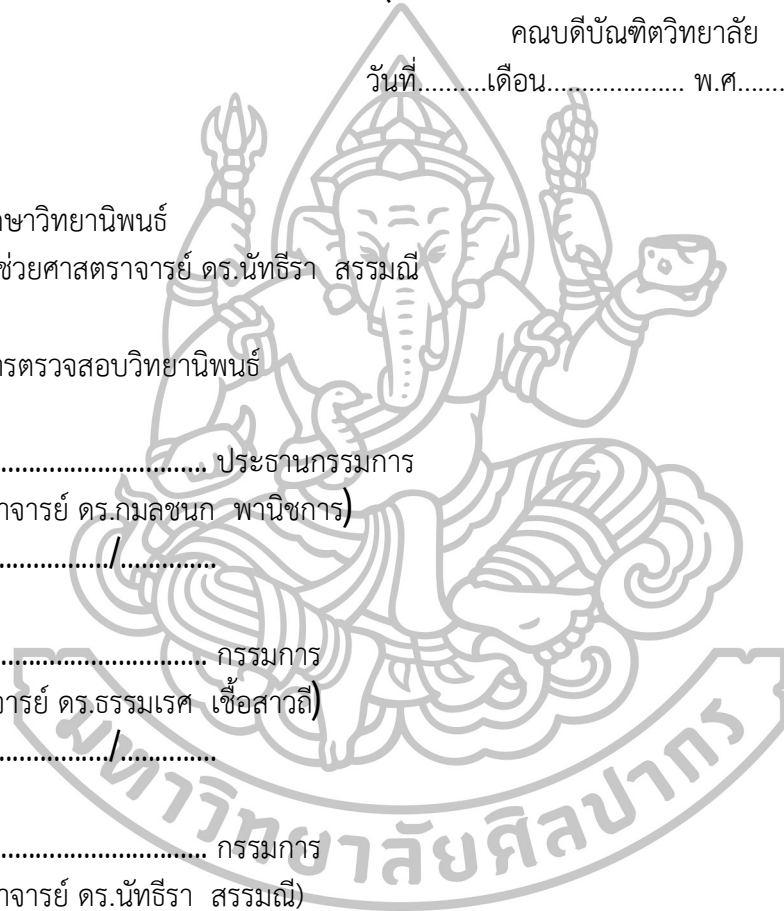
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวลี)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี)

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



55311326: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก/กรดฮิวมิก/อัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

สิริประภัสสร รัชชีย้อย: การศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างการหมักปุ๋ยมูลวัวด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ.ดร.นันทธีรา สรรมณี. 88 หน้า.

มูลวัวผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรถูกใช้ศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างกระบวนการหมักด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 4 เดือน และแบ่งตัวอย่างตามอุณหภูมิได้เป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มต้น (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง (ระหว่างวันที่ 1-34) ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (วันที่ 35) และระยะเจริญเต็มที่ (ระหว่างวันที่ 36-119) เมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้นทั้งอินทรีย์วัตถุและค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของปุ๋ยหมักจะค่อยๆ ลดลง ($r = 0.671$ และ -0.655 , $p < 0.01$) รวมทั้งปริมาณกรดฮิวมิกที่แปรตามปริมาณอินทรีย์วัตถุด้วย ($r = 0.585$, $p < 0.05$) ค่าอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกแสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับเวลาเช่นกัน โดยเมื่อค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) ลดลงค่าอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาดังกล่าว ($r = -0.777$ และ $r = 0.921$ ตามลำดับ, $p < 0.01$) บ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว เช่น หมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่มีมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น อย่างไรก็ตามจากลักษณะของอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีแบ่งปุ๋ยตามทิศทางของการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวออกเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะเพิ่มขึ้น (ระหว่าง วันที่ 0-63) และระยะลดลง (ระหว่าง วันที่ 64-119) จากการศึกษาพบว่าช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงที่อยู่ระหว่าง 260 – 280 นาโนเมตร (ช่วง E₂) 460 – 480 นาโนเมตร (ช่วง E₄) และ 600 – 670 นาโนเมตร (ช่วง E₆) มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 63 ซึ่งค่าลอการิทึม E (Log E) ชี้ให้เห็นว่ากรดฮิวมิกที่เสถียรปรากฏ ในวันที่ 63 77 และ 119 แม้กระนั้นก็ตามมีเพียงปุ๋ยหมักที่นาน 63 วันที่มีปริมาณกรดฮิวมิกมากกว่าวันอื่นๆ ถึง 1.5 เท่า ทำให้ระยะเวลาการหมัก 63 วัน จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมมากที่สุด

กล่าวโดยสรุป เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตสเปกโทรสโกปีเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาวิวัฒนาการของโครงสร้างกรดฮิวมิก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถใช้เป็นดัชนีหนึ่งในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักได้ และยังช่วยในการกำหนดการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักรวมทั้งช่วงระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีอีกด้วย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

55311326: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: COMPOST/HUMIC ACIDS/ULTRAVIOLET-VISIBLE SPECTROSCOPY

SIRIPRAPHAT RAYAYOI: STUDY OF HUMIC ACIDS' EVOLUTION DURING COMPOSTING PERIOD OF PORCINE MANURE USING ULTRAVIOLET-VISIBLE SPECTROSCOPY TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NATDHERA SANMANEE, Ph.D. 88 pp.

Cow manure mixed with agricultural wastes was studied the evolution of its humic acids through the composting process using Ultra Violet-Visible Spectroscopy (UV-Vis) technique. Samples were selected during fermenting period for 4 months and were divided after the temperature into 4 stages: initial stage (day 0), thermophillic stage (during day 1-34), end of active stage (day 35) and mature stage (during day 36-119). As the length of mixing went further, organic matters and C/N ratios of the compost gradually decrease ($r=-0.671$ and -0.655 , $p< 0.01$) including the amounts of humic acid that corresponded to the amounts of organic matters ($r=0.585$, $p< 0.05$). The ratios of elemental composition of humic acid also showed significantly related to the time. As the C/H was decreasing ($r=-0.777$, $p<0.01$), O/C was increasing ($r= 0.921$, $p< 0.01$) implying the occurring of more unstable structures such as $-COOH$ along the mixing period. However, UV-Vis spectroscopy characteristics divided the compost after the direction of unsaturated structures into 2 phases: the increasing phase (during day 0-63) and the decreasing phase (during day 64-119). From this study, all the highest absorbency ranges between 260-280 nm (E_2 range), 460-480 nm (E_4 range) and 600-670 nm (E_6 range) were found on day 63. The logarithm E (Log E) also pointed that stable humic acids were found on day 63, 77 and 119. Nevertheless, only the compost fermented for 63 days that held at least 1.5 times of the amounts of humic acid than the others. As a result, the most appropriate time for fermenting the compost should be 63 days.

In summary, UV-Vis spectroscopy technique is a useful tool to study the evolution of humic acid's structures. The changing appearance could be used as a good index of compost quality. It helps in determining compost maturity including the duration of practical period to use 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.นันทธีรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือให้ข้อคิดและเทคนิควิธีการเขียนรายงานการวิจัย จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลชนก พานิชการ เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงที่ได้อนุเคราะห์ให้เครื่องมือในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณพระคุณท่านอาจารย์ทั้งหลายมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนคุณแต่คุณแม่กฤษสสรณ์ รัชชัยย์ และคุณพ่อสม รัชชัยย์ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอดถือว่าเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย และขอมอบแด่บูรพาคุณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ขั้นตอนการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปύุ่หมัก.....	4
ความหมายของปύุ่หมัก.....	4
คุณลักษณะของปύุ่หมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร 2548.....	5
ระยะของปύุ่หมักแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	6
ปัจจัยที่ควบคุมอัตราการย่อยสลายในกองปύุ่หมัก.....	8
ลักษณะของเศษวัสดุ.....	8
องค์ประกอบทางเคมีของเศษวัสดุ.....	8
ความชื้น.....	10
การระบายอากาศ.....	10
ความสำคัญและประโยชน์ของปύุ่หมัก.....	11
ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของดิน.....	11
ด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน.....	11
ด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม.....	12
สารฮิวมิค.....	12
การจัดจำแนกสารฮิวมิค.....	13
โครงสร้างของสารฮิวมิค.....	14
บทบาทและประโยชน์ของสารฮิวมิค.....	17
ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิค.....	18
การตรวจวัดโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตสเปกโทรสโกปี.....	22
หลักการของอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	22

หลักการของการดูดกลืนแสง.....	23
การดูดกลืนรังสีของสารอินทรีย์.....	23
ช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	24
ความยาวคลื่น 205-300 นาโนเมตร.....	25
ความยาวคลื่น 260-280 นาโนเมตร.....	25
ความยาวคลื่น 460-480 นาโนเมตร.....	25
ความยาวคลื่น 600-670 นาโนเมตร.....	25
อัตราส่วนความยาวคลื่น.....	26
อัตราส่วน E_2/E_4	26
อัตราส่วน E_4/E_6	26
อัตราส่วน E_2/E_6	27
ผลต่างของลอการิทึม E_{400} กับ E_{600} (Log E).....	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
สารเคมีและรีเอเจนต์.....	38
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	39
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	41
การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ย.....	41
ขั้นตอนการหมักปุ๋ย.....	42
ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์.....	44
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์.....	44
วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	44
การวิเคราะห์หาความชื้น (Moisture content).....	44
การวิเคราะห์หาความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	45
การวิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature).....	45
การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....	45
การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter).....	45
การสกัดสารฮิวมิก.....	46
การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง.....	46
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	46
4 ผลการศึกษา.....	47
คุณลักษณะของปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร.....	47
การกำหนดระยะปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ.....	51
ระยะเริ่มผสม (Initial phase).....	52
ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase).....	52
ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase).....	52

ระยะที่ป่วยเจริญเต็มที่ (Mature phase).....	52
ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นและระยะเวลาการหมัก.....	54
กรดฮิวมิก: ปริมาณธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ.....	55
ปริมาณกรดฮิวมิก.....	55
ปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก.....	57
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ	
การย่อยสลายของปุ๋ยหมัก.....	59
การตรวจวัดโครงสร้างโดยใช้อูวี.....	60
ความยาวคลื่นกลุ่ม 205-230 นาโนเมตร.....	60
ความยาวคลื่นกลุ่ม 260-280 นาโนเมตร.....	62
ความยาวคลื่นกลุ่ม 460-480 นาโนเมตร.....	62
ความยาวคลื่นกลุ่ม 600-670 นาโนเมตร.....	63
อัตราส่วนความยาวคลื่น.....	65
อัตราส่วนระหว่าง E_2/E_4	66
อัตราส่วนระหว่าง E_4/E_6	66
อัตราส่วนระหว่าง E_2/E_6	68
ผลต่างของลอกกาลิทึม E_{400} กับ E_{600} ($\log E$).....	69
5 สรุปลผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	86
ประวัติผู้วิจัย.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยที่จำเป็นต่อพืชของวัสดุคิบทำปุ๋ยหมักชนิดต่างๆ	4
2	คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548.....	5
3	คุณสมบัติบางประการ และหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิก และฟัลวิก.....	14
4	คุณสมบัติและประโยชน์ของสารฮิวมิก.....	17
5	ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกจากวัสดุคิบที่ใช้หมักต่างชนิดกัน.....	18
6	อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่สกัดจากวัสดุคิบต่างชนิดและ ระยะเวลาการหมักต่างกัน.....	20
7	พันธะของสารอินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนรังสีในค่าความยาวคลื่นในช่วง 160-280 นาโนเมตร.....	24
8	การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงแสงที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค ยูวีสเปกโทรสโกปี.....	26
9	ตารางค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280นาโนเมตรต่อ 472 นาโนเมตร (Q_2/Q_4) ที่ความยาวคลื่น 280 ต่อ 664 นาโนเมตร (Q_2/Q_6) และที่ความยาวคลื่น 472 ต่อ 664 นาโนเมตร (Q_4/Q_6) ของตัวอย่างปุ๋ย หมักที่ศึกษา.....	33
10	ความแตกต่างในคุณสมบัติเชิงแสงในกลุ่มของกรดฮิวมิก.....	36
11	วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	37
12	แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS NO. และบริษัทผู้ผลิต.....	38
13	แสดงรายการอุปกรณ์ เครื่องแก้ว เครื่องมือ ยี่ห้อและบริษัท.....	39
14	ส่วนผสมของปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา.....	42
15	คุณลักษณะปุ๋ยหมักมูลวัวเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่าย ของกรมวิชาการเกษตร.....	49
16	ลักษณะของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	51
17	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างปัจจัยทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาการหมัก.....	55
18	เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของระยะเวลา ปริมาณกรดฮิวมิกกับอุณหภูมิ และสารอินทรีย์.....	56
19	ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมัก.....	58
20	เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบกับความชื้นและอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับ ระยะเวลาการหมัก.....	59
21	สรุปทิศทางการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิมตัวทางคุณลักษณะ เชิง แสงของกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักมูลวัวด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีตลอดกระบวนการหมัก.....	65

22	ค่าดัชนีฮิวมิฟิเคชันของสารฮิวมิก (Log E) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	69
23	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลวัว.....	80
24	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักมูลวัวด้วยช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	82
25	ค่าอัตราส่วนของการดูดกลืนคลื่นแสงตลอดระยะเวลาการหมัก.....	83
26	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก.....	87



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปุ๋ยหมักมูลวัวที่ย่อยสลายสมบูรณ์.....	5
2	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน C/N ของปุ๋ยหมัก W1 และ W2 ตลอดระยะเวลา การหมัก.....	9
3	รูปแบบของสารฮิวมิกที่แบ่งตามคุณสมบัติการละลายในกรดและด่าง.....	13
4	ลักษณะสีของสารฮิวมิก.....	15
5	โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid).....	15
6	โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic acid).....	16
7	การเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบตลอด ช่วงการหมัก.....	19
8	ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอน.....	22
9	สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง 200-800 นาโนเมตร ของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก ที่หมักเป็นระยะเวลา 0-119 วัน.....	28
10	ค่าดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย.....	29
11	ค่าดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย.....	29
12	(ก) คือ ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับพืชสด และหมักกลางแจ้ง ระยะเวลา 1 วัน (B1), 50 วัน (B2), 80 วัน (B3) และ 110 วัน (B4) (ข) คือ ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับเศษซากพืชที่หมักมาแล้ว และหมักในร่มระยะเวลา 2 วัน (N1), 10 วัน (N2), 21 วัน (N3), 30 วัน (N4), 50 วัน (N5) และ 120 วัน (N6)	30
13	กราฟการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน E ₄ /E ₆ , E ₂ /E ₆ , E ₂ /E ₄ ตลอดกระบวนการหมัก 0 ถึง 200 วัน.....	31
14	วิวัฒนาการของการดูดกลืนรังสียูวีของสารฮิวมิก ระหว่างวันที่ 4 ถึง 146 วัน.....	32
15	(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดคล้ายสารฮิวมิก ของวัสดุ P2, P3 และ P4 ที่หมักเป็นระยะเวลา 210 วัน. (ข) การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน E ₄ /E ₆ ของสารที่คล้ายสารฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ย หมัก P3 ที่หมักเป็นระยะเวลา 210 วัน.....	34
16	อัตราส่วน E ₄ /E ₆ ของกรดฮิวมิกในดินที่มีการใส่เชื้อ P.chrysosporium และ S.Badius หลังการบ่ม 65 วัน.....	35
17	แผนผังการทดลอง โดยภาพรวมของการศึกษา.....	40
18	ลักษณะของมูลวัว.....	41
19	ขั้นตอนการทำปุ๋ยหมัก.....	42

ภาพที่		หน้า
20	ขั้นตอนการผสมวัสดุคิบโดยใช้วัสดุคิบผสม.....	43
21	การแบ่งระยะปฏิกิริยาตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	51
22	ลักษณะการหมักของปฏิกิริยาหมักวันเริ่มผสม (0 วัน).....	52
23	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ($r=0.865, p<0.01$).....	53
24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก.....	54
25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก.....	54
26	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกกับสารอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	56
27	ความสัมพันธ์ของปริมาณกรดฮิวมิกกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ.....	57
28	สเปกตรัมการดูดกลืนคลีนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลในปุ๋ยหมัก 0 ถึง 119 วัน	61
29	ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 205 นาโนเมตร กับปริมาณกรดฮิวมิก ($r=0.734, p<0.05$).....	62
30	ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลีนแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ($r=0.801, p<0.01$).....	63
31	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลีนแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลีนแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร	64
32	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 472 นาโนเมตร (E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	66
33	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร (E_4) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	67
34	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	68
35	ผลการวิเคราะห์ความดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักมูลวัวที่ระยะเวลาต่างกัน.....	84
36	การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน E_2/E_4 E_4/E_6 E_2/E_6	85

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปุ๋ยเคมีมีราคาแพง เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด (กรมวิชาการเกษตร, 2548) การใช้ปุ๋ยเคมีเป็นเวลานานจะทำให้ลายสมดุลของระบบนิเวศดิน และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในดิน ปุ๋ยเคมีจะเร่งอัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ทำให้โครงสร้างของดินเสื่อมลง ดินจึงแข็งกระด้างไม่อุ้มน้ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อพืช (วิฑูรย์, 2547) พืชจึงเจริญเติบโตช้าและให้ผลผลิตน้อย ปุ๋ยเคมี เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมเมื่อเติมปริมาณมากทำให้ดินมีความเป็นกรดมากยิ่งขึ้น (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ขณะที่ปุ๋ยฟอสเฟตอาจมีธาตุโลหะหนักและสารพิษ เช่น แคดเมียม ปรอท และอาร์เซนิกปนเปื้อนสู่ดินได้ (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

การใช้ปุ๋ยหมักจึงเป็นวิธีหนึ่ง ในการช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี ส่วนใหญ่เกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยหมักขึ้นใช้เอง โดยปุ๋ยหมักเกิดจากการนำวัสดุอินทรีย์ที่เหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ซากพืชซากสัตว์จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร มูลสัตว์และวัสดุอินทรีย์อื่นๆ มาทำปุ๋ยโดยผ่านกระบวนการย่อยสลาย (รสสุคนธ์, 2549) นอกจากธาตุอาหารที่ได้จากการหมักปุ๋ยแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายได้เป็นสารสีน้ำตาลคล้ายเกือบดำ เรียกว่า สารฮิวมิก (humic substances) โดยสารฮิวมิกนี้มีคุณสมบัติในการช่วยดินอุ้มน้ำได้ถึง 20 เท่าของน้ำหนักตัวมันเอง ช่วยให้อนุภาคดินไม่แตกกระจายอยู่กันเป็นกลุ่มเป็นก้อน นอกจากนี้ยังช่วยในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนของธาตุอาหารและจุลธาตุอาหาร สามารถรักษาสมดุลความเป็นกรดต่างของดิน และเมื่อตัวมันถูกย่อยสลายจะได้เป็นผลผลิตแอมโมเนีย ไนเตรทฟอสเฟต และซัลเฟต ซึ่งเพิ่มปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ให้แก่ดินได้อีกด้วย (นัทธีรา และคณะ, 2555)

สารฮิวมิก แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามคุณสมบัติการละลาย ได้แก่ กรดฮิวมิก (humic acid) กรดฟัลวิก (fulvic acid) และฮิวมิน (humine) (Stevenson, 1994) เนื่องจากกรดฮิวมิกมีโมเลกุลที่ค่อนข้างใหญ่ จึงมีความเสถียรมากกว่ากรดฟัลวิก (Stevenson, 1994; Tan, 2003) ทำให้กรดฮิวมิกมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินได้มากกว่ากรดฟัลวิกที่มีโครงสร้างที่เล็กและเสถียรภาพน้อยกว่า นอกจากนี้การที่กรดฟัลวิกละลายน้ำได้ดีกว่า (Stevenson, 1994; Tan, 2003) ทำให้กรดฟัลวิกถูกชะล้างไปจากแหล่งกำเนิดได้ง่าย ขณะที่ฮิวมินมีโครงสร้างที่ใหญ่มากไม่ละลายในกรดและต่างเพราะมีหมู่ฟังก์ชันน้อย จึงมีอิทธิพลมากในการดูดซับไอออนในดิน (Stevenson, 1994)

ดังนั้นประเด็นวิจัยในการศึกษานี้ เพื่อที่จะศึกษาคุณภาพสารฮิวมิกของปุ๋ยหมักที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์โดยมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาโครงสร้างของกรดฮิวมิก และวิวัฒนาการ การเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างของกรดฮิวมิก เพื่อนำมาประเมินเสถียรภาพของปุ๋ยหมักในการนำไปใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดิน สำหรับโครงสร้างที่เสถียรของกรดฮิวมิกได้แก่ โครงสร้างแอโรแมติก เช่น พันธะ C=O มีพลังงาน 745 กิโลจูล/โมล, พันธะ C=C มีพลังงาน 839 กิโลจูล/โมล,

พันธะ $N=N$ มีพลังงาน 945 กิโลจูล/โมล, $C=S$ มีพลังงาน 477 กิโลจูล/โมล, $N=O$ มีพลังงาน 590 กิโลจูล/โมล และ NO_2 มีพลังงาน 607 กิโลจูล/โมล ขณะที่โครงสร้างที่ไม่เสถียร เช่น โครงสร้างพันธะเดี่ยวจะมีพลังงานที่ต่ำกว่า พันธะแตกหักง่ายกว่า เช่น พันธะ $C-I$ มีพลังงาน 218 กิโลจูล/โมล, พันธะ $C-Cl$ มีพลังงาน 339 กิโลจูล/โมล, และพันธะ $C-O$ มีพลังงาน 358 กิโลจูล/โมล (ประภาณี, 2539) เป็นต้น

สำหรับการศึกษาโครงสร้างกรดฮิวมิกนี้ใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตสเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษาโครงสร้างเนื่องจากโครงสร้างที่เสถียรส่วนใหญ่ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างแอมโรแมติกและพันธะคู่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงยูวีและวิสิเบิลได้ (Stevenson, 1994; Tan, 2003) นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังเป็นเทคนิคที่ใช้ง่าย รวดเร็ว เหมาะกับการใช้ศึกษาเพื่อติดตามวิวัฒนาการทางโครงสร้าง ณ ระยะเวลาหมักต่างๆ ได้ โดยการศึกษาปุ๋ยมูลวัว ซึ่งวัตถุ ที่ใช้ในกระบวนการหมักปุ๋ย ชนิดนี้หาได้ง่าย ในท้องถิ่นและเป็นที่ยอมรับของเกษตรกร

ซึ่งการติดตามวิวัฒนาการทางโครงสร้างของกรดฮิวมิก และการกำหนดระยะเวลาที่ปุ๋ยหมัก มีความเสถียรที่สุดจะมีประโยชน์ต่อเกษตรกรในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ในการปรับปรุงดิน เพราะมีความคงทนเมื่ออยู่ในดินได้นานกว่าระยะเวลาอื่นๆ ขณะที่ปุ๋ยเคมีไม่มีคุณสมบัตินี้ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของธาตุอาหารในปุ๋ยหมัก กับลักษณะเชิงโครงสร้างต่างๆ ของกรดฮิวมิก จะช่วยให้เกิดการมองเห็นภาพของความเป็นประโยชน์ใน กระบวนการที่สิ่งมีชีวิตนำธาตุอาหารในปุ๋ยหมักไปใช้ปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น การระบายอากาศของดินเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบรากของพืชสามารถแผ่กระจายในดินได้ดีซึ่งส่งผลให้ดูดธาตุอาหารได้มากขึ้นด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตของมูลวัว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างของกรดฮิวมิกจากเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกกับคุณภาพของปุ๋ยหมักมูลวัว

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระยะเวลาการหมักและสูตรปุ๋ยหมักมูลวัวชนิดเดียว จะมีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษาได้ใช้ตัวอย่างปุ๋ยหมักซึ่งจัดทำขึ้นโดย ผศ.ดร.นันทิรา สรรพณี โดยใช้พื้นที่ทำปุ๋ยหมักในตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งใช้ปุ๋ยหมัก ที่เป็นส่วนผสมหลักคือ มูลสัตว์ โดยทำการหมักปุ๋ยมูลวัว จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักที่เวลา 0 3 7 14 21 28 35 42 63 77 91 105 และ 119 วัน มาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี ศึกษาอุณหภูมิ วิเคราะห์มาตรฐานคุณภาพ ปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าความ

เป็นกรด - ต่าง ค่าการนำไฟฟ้า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และวิเคราะห์ปริมาณและโครงสร้างของสารฮิวมิก โดยใช้คุณสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ ในการทำปุ๋ยหมัก

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 วางแผนการทดลอง
- 1.5.3 เขียนโครงร่างการวิจัยและเสนอหัวข้อวิทยานิพนธ์
- 1.5.4 ทำการทดลอง และเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักมาวิเคราะห์ผลทางห้องปฏิบัติการ
- 1.5.5 รวบรวมและสรุปผลการทดลอง
- 1.5.6 ค้นหาข้อมูลและเผยแพร่ผลงานสู่ภายนอก
- 1.5.7 เขียนวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทำให้ทราบระยะเวลาการหมักที่เหมาะสม สำหรับปุ๋ยหมักมูลวัว
- 1.6.2 สามารถทราบถึงระยะและการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมัก และความสัมพันธ์ทางโครงสร้างของสารฮิวมิกจากเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี
- 1.6.3 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ปุ๋ยหมักในการปรับปรุงดินในการ เพาะปลูก



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยเซลลูโลสซึ่งประกอบไปด้วย แคมทรีเรีย แอคทีโนมัยซิส และเชื้อรา ความเร็วในการย่อยสลายนอกจากขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุด้วย วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำปุ๋ยหมักได้แก่ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย เศษตอซังพืช และมูลสัตว์ทางการเกษตร

จากการศึกษาของ Jenn (1998) พบว่าปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตปุ๋ยเพื่อให้มีความเสถียร และใช้เป็นแหล่งของสารอาหารและนำไปปรับปรุงดินได้ ดังตารางที่ 1 ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยที่จำเป็นต่อพืชของวัสดุคอกทำปุ๋ยหมักชนิดต่างๆ พบว่าค่าของธาตุอาหารในมูลวัวที่แห้ง มีธาตุไนโตรเจนมีค่า 1.95 ขณะที่ธาตุอาหารฟอสฟอรัสในมูลวัวมีค่า 1.76 และธาตุโพแทสเซียม 0.48 โดยที่วัวกินฟางและหญ้า ซึ่งมีแต่เซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนประกอบ ธาตุอาหารที่พบในมูลวัวจึงมีค่าต่ำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยที่จำเป็นต่อพืชของวัสดุคอกทำปุ๋ยหมักชนิดต่างๆ

สารอาหารหลัก (%)			
ชนิดของมูลสัตว์	Nitrogen (N)	Phosphorus (P)	Potassium (K)
มูลวัว ¹	1.95	1.76	0.48
ฟางข้าว ²	0.55	0.09	1.09
ซังข้าวโพด ³	1.07	0.51	1.19
เปลือกไม้ ⁴	0.51	0.16	0.43

ที่มา: ¹Jenn (1998), ²Huang et al (2008), ³กรมพัฒนาที่ดิน (2551) และ ⁴Fukushima et al (2009)

2.1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก หมายถึงปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่างๆ มาหมักรวมกัน ผลิตด้วยวิธีการทำให้ขึ้น สับ บด ร่อน และผ่านการหมักอย่างสมบูรณ์ จนแปรสภาพไปจากเดิม ซึ่งกระบวนการหมักเป็นการย่อยสลายทางชีววิทยา โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (กรมวิชาการเกษตร, 2548) เพื่อให้สารอินทรีย์สลายตัว ผุพังจนมีลักษณะเป็นสารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่น สีน้ำตาลปนดำ มีอัตราส่วนประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ เมื่อกระบวนการย่อยสลายเศษพืชและวัสดุเสร็จสมบูรณ์ก็จะได้ปุ๋ยอินทรีย์ (ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ทำให้ดินโปร่งเพิ่มความพรุน

ให้แก่ดิน ทำให้เกิดการระบายน้ำ และอากาศในดินดีขึ้น ช่วยให้ดินอุ้มน้ำและดูดซับธาตุอาหารพืชดีขึ้น เพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีพของพืช ทำให้พืชและจุลินทรีย์เจริญเติบโต และส่งเสริมกิจกรรมต่างๆ ได้ดีขึ้น (ทิพวรรณ, 2547)



ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักมูลวัวที่ย่อยสลายสมบูรณ์
ที่มา: จุฑาวรรณ (2557)

2.2 คุณลักษณะของปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร 2548

ปุ๋ยหมักที่ผลิตได้จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเศษวัสดุที่ใช้ กรรมวิธีในการกอง ตลอดจนการดูแลรักษา (ปรัชญาและคณะ, 2540) โดยในปัจจุบันได้มีการส่งเสริมและรณรงค์ให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอินทรีย์มากขึ้น เนื่องจากมีราคาถูกกว่าปุ๋ยเคมีและไม่ก่อให้เกิดปัญหาดินแน่นที่บเหมือนการใช้ปุ๋ยเคมี (วิฑูรย์, 2547) การผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อใช้และจำหน่ายจึงเพิ่มมากขึ้น โดยกรมวิชาการเกษตรกำหนดมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่าย พ.ศ. 2548 ดังตาราง ที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548

คุณลักษณะ	เกณฑ์มาตรฐาน
ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
ปริมาณหินและกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
พลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-8.5
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio)	ไม่เกิน 20:1

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548
(ต่อ)

การนำไฟฟ้า	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต่อเมตร
ปริมาณธาตุอาหารหลัก	-ไนโตรเจน (total N) ไม่น้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก -ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₂) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก -โพแทสเซียม (total K ₂ O) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่าร้อยละ 80
อุณหภูมิ	ใกล้เคียงกับอุณหภูมิรอบๆบริเวณ
แคดเมียม (cadmium)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โครเมียม (chromium)	ไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทองแดง (copper)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ตะกั่ว (lead)	ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปรอท (mercury)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ที่มา: คิวนาท (2556)

2.3 ระยะของปุ๋ยหมักแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

คุณภาพของปุ๋ยหมักและกลไกการควบคุมกระบวนการหมักที่สำคัญในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ให้กลายเป็นสารสีดำคล้ำที่เรียกว่าสารฮิวมิกได้แก่การทำงานของจุลินทรีย์ จากการศึกษาของ Boland et al. (2000) และ Zeng et al. (2009) แบ่งกระบวนการหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเป็นตัวควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในช่วงกระบวนการหมักปุ๋ย สามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะ ซึ่งจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีสามารถแบ่งอายุของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังนี้

2.3.1 ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสม มีระยะเวลาประมาณ 1 -2 วัน (Boland et al., 2000) เมื่อมีการผลิตปุ๋ยหมักจากวัสดุอินทรีย์ จะมีการดูแลกองปุ๋ยโดยมีการกลับกองปุ๋ย รดน้ำ เพื่อให้เกิดสภาพในกองปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ชนิดต่างๆที่ติดมากับเศษวัสดุ จะเริ่มเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนขึ้น ในระยะแรกของการย่อยสลายโดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงประมาณ 30-45 องศาเซลเซียส ระยะนี้เป็นช่วงแรกของการเริ่มหมักปุ๋ย ซึ่งปุ๋ยมีอายุได้ 0 วัน เป็นช่วงระยะที่ยังไม่มีการเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ ปุ๋ยหมักมีกลิ่นฉุนรุนแรง โดยสามารถเห็นวัตถุติดตั้งต้นในเนื้อปุ๋ย

2.3.2 ระยะเวลาอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

อุณหภูมิของปุ๋ยในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปถึง 45 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะเพิ่มสูงถึง 45-60 องศาเซลเซียส หรือมากกว่านี้เป็นช่วงที่เกิดการย่อยสลายสูงสุด จนทำให้เกิดความร้อนสะสมในกองปุ๋ยหมัก กลุ่มจุลินทรีย์จะทำงานให้อุณหภูมิเพิ่มไปถึง 55 องศาเซลเซียส อย่างรวดเร็วประมาณ 5 วัน และอุณหภูมิขึ้นๆลงๆ มีลักษณะเหมือนฟันเลื่อย และระยะนี้จะอยู่ประมาณ 30 วันและจุลินทรีย์จะลดลง (Sellamiet al., 2008)

จากการศึกษาของ Fourti et al. (2010) พบว่าระยะนี้สำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างวันที่ 30 และ 130 วัน ของกระบวนการหมัก ในระหว่างที่ปุ๋ยอุณหภูมิสูงเกิน ความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ผ่านขั้นตอนการหมักสำหรับปุ๋ย 2 กอง และอาจเกิดจากจำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สารประกอบที่ย่อยสลายได้อย่างง่ายดาย และเนื้อสารอาหารที่มีอยู่สูง และค่อนข้าง มีขนาดเล็ก ของเศษอินทรีย์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 40 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์มีการแข่งขันน้อยลงและจะถูกแทนที่ด้วยจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่ทนอุณหภูมิสูง และระยะนี้จะเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอย่างรวดเร็วในกระสอบปุ๋ย จึงต้องมีการกลับกระสอบปุ๋ยทุกวัน เพื่อให้อากาศเข้าไปให้เพียงพอต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์อย่างทั่วถึง ปุ๋ยในระยะนี้ยังมีกลิ่นฉุนรุนแรง และสามารถมองเห็นวัตถุติดตั้งต้นได้บางส่วน

จากการศึกษาของ Boland et al. (2000) พบว่า ระยะเวลาอุณหภูมิสูง ความร้อนจากการเผาผลาญที่สร้างโดยจุลินทรีย์จะทำให้อุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักเพิ่ม 70 - 80 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้สามารถฆ่าไวรัสพืชและเชื้อโรคที่อยู่ในปุ๋ยหมักได้จะถูกฆ่าและย่อยสลาย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะไปยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมาก ก๊าซมีเทนจะมีการผลิตมากขึ้นในช่วงระยะอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นผลมาจากแบคทีเรียที่สร้าง ก๊าซมีเทนจำนวนมาก

2.3.3 ระยะเวลาสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase)

เนื่องจากสารที่อยู่ในระยะสุดท้าย จุลินทรีย์มีกิจกรรมน้อยลง ทำให้อุณหภูมิค่อยๆลดลง เป็นระยะที่ปุ๋ยสุกหรือเสถียร ช่วงนี้พวก แบคทีเรีย (mesophilic) เริ่มมีการสร้างโคลิไนน์ใหม่และเริ่มทำการย่อยสลายใหม่อีกครั้ง อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วและสารตั้งต้นเริ่มหมดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง และพวกสารวัตถุติดตั้งต้นจะลดลงร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุเริ่มต้น การสร้างแก๊สมีเทนก็จะลดลง ขณะที่มีการสร้างก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เพิ่มขึ้น (Boland et al., 2000) สารที่ถูกย่อยสลายจะเข้าสู่ระยะ bio-oxidative จุลินทรีย์ย่อยสลายระยะสุดท้ายต้องใช้หลายสัปดาห์ ซึ่งระยะนี้ substrate ลดน้อยลง อุณหภูมิลด อุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงบ้างเล็กน้อย โดยอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเริ่มคงที่ เนื่องจากอินทรีย์ที่อยู่ในระยะสุดท้ายถูกย่อยสลายและเปลี่ยนโครงสร้างเป็นอินทรีย์วัตถุจนหมด ทำให้จุลินทรีย์มีกิจกรรมน้อยลง อุณหภูมิค่อยๆ ลดลง (Sellami et al., 2008)

2.3.4 ระยะเวลาเจริญเต็มที่ (Maturation phase)

กองปุ๋ยจะเย็นลง เศษวัสดุ จะมีลักษณะร่วนซุย มีสีดำ หรือ สีน้ำตาลเข้ม ระยะนี้เป็นระยะที่อุณหภูมิได้ที่แล้ว จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก (ทิพวรรณ, 2542) เป็นช่วงที่อัตราการย่อยสลายลดลงจนกระทั่งอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักลดลง และลดลงอย่างช้าๆ ช่วงนี้เป็น

ระยะที่ใกล้จะเสร็จสิ้นของการย่อยสลายแล้วระยะที่อุณหภูมิคงที่ ปุ๋ยหมักจะไม่มีกลิ่นฉุน และไม่มี ส่วนผสมตั้งต้นเหลืออยู่ เนื่องจากถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ กลายเป็นสารอินทรีย์ ที่ค่อนข้าง มีความเสถียร จากการศึกษาของ Fourti et al. (2010) พบว่าอุณหภูมิเริ่มลดลงหลังจาก 130 วัน การลดลงนี้เป็นผลมาจากการลดลงของสารอินทรีย์

2.4 ปัจจัยที่ควบคุมอัตราการย่อยสลายในกองปุ๋ยหมัก

กระบวนการย่อยสลายเศษพืชภายในกองปุ๋ยหมักนั้นเกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายวัสดุเศษพืชขึ้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพแวดล้อมในกองปุ๋ยหมัก หลายประการ ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายนั้น อาจส่งเสริมหรือลดอัตราการย่อยสลายของวัสดุได้ แต่โดยจุดมุ่งหมายหลักได้เน้นถึงคุณสมบัติของวัสดุเศษพืชและหลักการปฏิบัติที่ถูกต้องเพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายในระหว่างการผลิตปุ๋ยหมักเป็นประการสำคัญดัง นั้น สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ภายในกองปุ๋ยหมักจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ และมีผลต่อไปถึงอัตราการย่อยสลายด้วย สำหรับปัจจัยของสภาพแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายวัสดุเศษพืชในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ

2.4.1 ลักษณะของเศษวัสดุ (characteristic of plant residue)

ส่วนใหญ่การทำปุ๋ยหมักจะทำจากเศษพืช โดยเฉพาะการส่งเสริมให้แก่เกษตรกร ลักษณะของเศษวัสดุจึงมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งได้แก่ ขนาดของเศษวัสดุ ความสด ของเศษวัสดุ เป็นต้น ขนาดของเศษวัสดุ ถ้าเป็นเศษวัสดุที่มีขนาดเล็กได้แก่ ขี้สับข้าว เศษปอ และขุยไฟ การผสมคลุกเคล้าทำได้ทั่วถึง พื้นที่ผิวสัมผัสมีมาก ดังนั้นโอกาสที่จะถูกย่อยสลายจึงมี มากกว่า สำหรับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ได้แก่ ฟางข้าว และผักตบชวา การผสมคลุกเคล้าจะทำได้ ไม่ทั่วถึงนัก และปฏิบัติค่อนข้างลำบาก ดังนั้นการกองปุ๋ยหมักจากเศษวัสดุขนาดใหญ่จึงควรกองเป็น ชั้นๆ และเมื่อถึงเวลากลับกองปุ๋ยหมัก จะเป็นการช่วยผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดียิ่งขึ้น แต่วัสดุพืชที่มี ขนาดใหญ่ซึ่งเป็นเส้นหรือท่อนั้น จะทำให้ภายในกองปุ๋ยหมักมีการแพร่กระจาย หรือมีการระบาย อากาศดีกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากวัสดุขนาดใหญ่จะมีลักษณะโปร่งมากกว่า (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษวัสดุ (composite of residue)

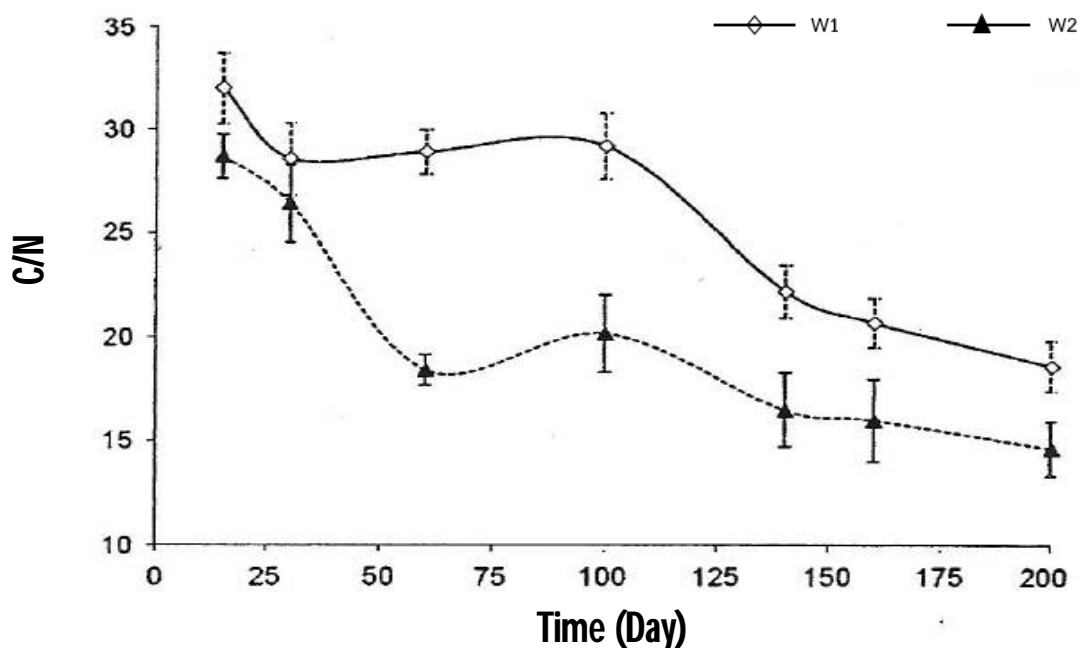
โดยทั่วไปการทำปุ๋ยหมักมักจะพิจารณาถึงอัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอน ต่อไนโตรเจนของเศษวัสดุนั้นๆ เพราะโครงสร้างของเศษพืชส่วนมากจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่จุดสำคัญอยู่ที่องค์ประกอบของไนโตรเจนซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดอัตราการย่อยสลาย สำหรับวัสดุเศษพืชที่นำมาใช้ทำปุ๋ยหมักอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือพวกที่ย่อยสลายได้ง่ายกับ พวกที่ย่อยสลายได้ยาก

สารประกอบคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นสารที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน จนกระทั่งได้โมเลกุลเล็กและนำเข้าไปในเซลล์ เพื่อใช้เป็น แหล่งของพลังงานและสร้างส่วนประกอบของเซลล์สำหรับสารประกอบไนโตรเจนจะถูกย่อยสลาย เช่นกันและเซลล์จุลินทรีย์จะนำไปใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน เพื่อสร้างส่วนประกอบของเซลล์ เช่น สารโปรตีน และกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) เป็นต้น โดยปกติเซลล์ของจุลินทรีย์มีคาร์บอนส่วน

คาร์บอนต่อไนโตรเจน ประมาณ 10-15 ซึ่งหมายความว่า การที่จุลินทรีย์ดูดสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าไปใช้ในเซลล์ 10-15 หน่วย จำเป็นต้องดูดสารประกอบไนโตรเจนเข้าไปด้วย 1 หน่วย จึงจะทำให้เกิดความสมดุลของสารประกอบทั้งสองในเซลล์ และจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดี การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่า C/N ratio ต่ำ เช่น ต้นพืชตระกูลถั่วต่างๆ อาจจะไม่จำเป็นต้องเติมสารไนโตรเจน หรืออาจจะเติมในปริมาณที่น้อยกว่าที่ใช้กับเศษวัสดุที่มีค่า C/N ratio สูง วัสดุเศษพืชตระกูลถั่วมีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างสูงกว่าวัสดุการเกษตรชนิดอื่น ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มอัตราการย่อยสลายได้มากขึ้น และใช้ระยะเวลาการย่อยสลายสั้นกว่าวัสดุที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

นอกจากนี้ค่า C/N ratio สามารถนำไปใช้พิจารณาว่าปุ๋ยหมักที่ทำนั้นจะนำไปใช้ได้หรือไม่ โดยปกติถ้าปุ๋ยหมักมีค่า C/N ratio ลดลงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 20:1 ถือว่าสามารถนำปุ๋ยหมักดังกล่าวไปใช้ในดินได้โดยไม่ทำให้พืชเป็นอันตรายและเป็นปุ๋ยหมักคุณภาพดี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

จากการศึกษาของ Fourti et al. (2010) พบว่า ในการศึกษาอัตราส่วน C/N ของปุ๋ยหมัก ในการทดลอง W1 (100 % ขยะของแข็ง) และ W2 (60% ของขยะของแข็งและ 40% จากตะกอนบำบัด) ในการทดลอง W1 จะสูงกว่าการทดลอง W2 ค่าเหล่านี้จะลดลง ภาพที่ 2 ในการทดลองที่ 1 จาก 32 ที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการหมักเหลือ 18.6 และจาก 28.5 เหลือ 14.6 ในการทดลอง ที่ 2 โดยการใช้กากตะกอนสามารถอธิบายอัตราส่วน C/N ที่มีค่าน้อยกว่า 20 บ่งบอกได้ถึงสัดส่วนที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน C/N ของปุ๋ยหมัก W1 และ W2 ตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา: Fourti et al. (2010)

2.4.3 ความชื้น (moisture content)

ความชื้น เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิต และการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากปฏิกิริยาในระบบ **metabolism** ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ และการปลดปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์จุลินทรีย์เพื่อย่อยสารโมเลกุลใหญ่

โดยปกติภายในกองปุ๋ยหมักจะมีอุณหภูมิสูงทำให้น้ำระเหยจากกองปุ๋ยตลอดเวลา ถึงแม้ว่าสารอินทรีย์วัตถุดิบจะมีคุณสมบัติที่อุ้มน้ำได้ดีก็ตาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมน้ำลงในกองปุ๋ยหมัก ในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้ปริมาณความชื้นมากหรือน้อยเกินไป ระดับความชื้นในกองปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายประมาณร้อยละ 50-60 (โดยน้ำหนัก) ถ้าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 40 การย่อยสลายจะเกิดขึ้นมากเกินกว่าร้อยละ 80 ทำให้กองปุ๋ยหมักแฉะเกินไปการระบายอากาศไม่ดี จนทำให้เกิดสภาพไม่มีอากาศกระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าเช่นกัน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายเศษพืชส่วนใหญ่เป็นพวกที่ต้องการอากาศหรือต้องการออกซิเจนในการสร้างพลังงาน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

ความชื้นที่เหมาะสมมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก ในกองปุ๋ยจะมีการระเหยของน้ำที่เติมเข้าไป โดยความชื้นที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้การหมักช้าลง หรือกระบวนการหมักหยุดชะงักลง ซึ่งสิ่งนี้นำไปสู่สถานะที่ไม่มีออกซิเจนและสร้างกลิ่นเกิดขึ้น กองปุ๋ยที่แห้งไม่เพียงแต่จะเป็นอันตรายต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์แต่ยังสร้างฝุ่นละอองเกิดขึ้น ซึ่งมีกลิ่นและอาจจะเกิดเชื้อก่อโรคที่เป็นเชื้อรา เช่น *Apergillus fumigates* จึงควรที่จะรักษาระดับความชื้นให้อยู่ระหว่างร้อยละ 40 – 60 (ธงชัย, 2546)

นอกจากนี้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการรักษาระดับความชื้นที่เหมาะสมยังเกี่ยวข้องกับสถานะอากาศ ในที่ร้อนๆความชื้นแห้ง น้ำระเหยมาก หากที่จะรักษาระดับเอาไว้ เนื่องมาจากการสูญเสียของน้ำที่ระดับมาก จะรักษาระดับความชื้นได้ยาก เนื่องจากมีการระเหยของน้ำในปริมาณมาก ถ้ากองปุ๋ยแห้งเกินไป กระบวนการหมักนี้จะหยุดชั่วคราว ก่อนที่ปุ๋ยจะเข้าสู่การเจริญเต็มที่ มีการเอาปุ๋ยใส่ลงไปขาย กองปุ๋ยที่แห้งนี้จะหยุดชะงักและเป็นปัญหาโดยเฉพาะถ้าปุ๋ยกลับมาขึ้นอีกครั้ง กระบวนการหมักจะเริ่มอีกครั้ง เมื่อกระบวนการหมักเริ่มขึ้น จะเข้าสู่สถานะที่ไม่มีออกซิเจนอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไม่มีออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดกลิ่นและทำให้เกิดสารที่มีความเป็นพิษต่อพืช ถ้ามีความชื้นสูงก็เป็นปัญหา จำเป็นต้องระบายความชื้นออกไปโดยการเติมสารพวกที่ทำให้แห้งขึ้นหรือรักษาความชื้นโดยการมุงหลังคา (Michael et al., 1995; Vineh et al., 2010)

2.4.4 การระบายอากาศ (aeration)

การระบายอากาศในกองปุ๋ยหมัก เป็นสิ่งจำเป็นอีกประการหนึ่งเนื่องจากจุลินทรีย์พวกที่ต้องการอากาศ จะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในระบบการหายใจภายในเซลล์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายอากาศ เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอต่อการเจริญและย่อยสลายเศษซากพืช การระบายอากาศหรือการเพิ่มออกซิเจนให้แก่กองปุ๋ย อาจจะทำให้ได้โดยการกลับกองปุ๋ย ซึ่งนอกจากจะมีผลดีในการระบายอากาศแล้ว ยังช่วยคลุกเคล้าเศษวัสดุต่างๆ ให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ การกลับกองปุ๋ยหมักในช่วงเวลาที่เหมาะสมจะทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และเป็นวิธีการที่ไม่ต้องลงทุนแต่ต้องใช้แรงงานเพิ่มขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

การทำปุ๋ยหมักโดยไม่มีกรกลบกองปุ๋ยจะทำให้อัตราการย่อยสลายเศษพืชลดลง และการใช้แผ่นพลาสติกคลุมกองปุ๋ยหมักทั้งหมดไม่ก่อให้เกิดผลดีในการทำปุ๋ยหมัก จะยิ่งทำให้ระยะเวลาการเป็นปุ๋ยหมักนานขึ้น จุลินทรีย์ไม่สามารถดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายได้ เนื่องจากไม่มีออกซิเจนสำหรับในระบบการหายใจของจุลินทรีย์และไม่มีการระบายอากาศเกิดขึ้นภายในกองปุ๋ยหมัก สำหรับกรณีการนำวัสดุพวกทางมะพร้าว หรือแผ่นพลาสติกคลุมเฉพาะบริเวณพื้นผิวหน้ากองปุ๋ยหมักสามารถที่จะทำได้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการระเหยของน้ำภายในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งการระบายอากาศภายในกองปุ๋ยหมักยังเกิดขึ้นบริเวณด้านข้างของกองปุ๋ยได้ ดังนั้นการกลบกองปุ๋ยหมักบ่อยครั้ง จะส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยหมักและทำให้เกิดปุ๋ยหมักเร็วขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551; นฤมล, 2553)

2.5 ความสำคัญและประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ 1) ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช 2) ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และ 3) ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

2.5.1 ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงสภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชถ้าเป็นดินเนื้อละเอียด อัดตัวกันแน่น เช่นดินเหนียว ปุ๋ยหมักก็จะช่วยให้ดินนั้นมีสภาพร่วนซุยมากขึ้น ไม่อัดตัวกันแน่นทึบ ทำให้การระบายน้ำและการระบายอากาศดีขึ้น ช่วยให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำหรือดูดซับน้ำที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น ทำให้รากพืชเจริญเติบโตได้รวดเร็ว แข็งแรง แตกแขนงได้มาก มีระบบรากที่สมบูรณ์ จึงดูดซับแร่ธาตุต่างๆ และน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในดินเนื้อหยาบ เช่นดินทรายและดินร่วนปนทราย ส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีสารอินทรีย์อยู่น้อย ไม่อุ้มน้ำ การใส่ปุ๋ยหมักก็จะช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและทำให้ดินเหล่านั้นสามารถดูดซับน้ำไว้ให้พืชได้มากขึ้น ในดินเนื้อหยาบจึงควรต้องใส่ปุ๋ยหมักให้มากกว่าปกติ (ธงชัย, 2546)

นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยหมักยังก่อให้เกิดโทษได้เช่นกัน เพราะปุ๋ยหมักที่มาจากกระบวนการหมักที่ไม่สมบูรณ์จะประกอบไปด้วยแอมโมเนียอิสระ ปริมาณสูง กรดอินทรีย์บางตัว หรือสารประกอบที่ละลายน้ำอื่นๆ ซึ่งสามารถ จำกัดการงอกของเมล็ดและการเจริญของพืชได้ เมื่อใส่ลงไปบนดินจะมีผลทางด้านลบต่อการเจริญของพืช เนื่องจากเกิดการปลดปล่อยออกซิเจนในดินและไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์และสารประกอบที่เป็นพิษต่อพืช (California Compost Quality council, 2001)

2.5.2 ด้านการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ปุ๋ยหมัก เป็นแหล่งแร่ธาตุอาหารที่จะปลดปล่อยออกมาให้แก่ต้นพืชอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอโดยทั่วไปแล้วปุ๋ยหมักจะมีแร่ธาตุอาหารพืชที่สำคัญครบถ้วน กล่าวคือมีไนโตรเจนทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 2.5 ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชประมาณร้อยละ 0.2 ถึง 2.5 และโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 0.5 ถึง 1.8 ปริมาณแร่ธาตุอาหารดังกล่าวจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเศษพืชที่นำมาหมักและวัสดุอื่นๆ ที่ใส่ลงไปในการกองปุ๋ย

นอกจากธาตุอาหาร 2 ธาตุที่กล่าวมาแล้ว ปุ๋ยหมักยังมีธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ อีก เช่น แคลเซียม กำมะถัน แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง โบรอน โมลิบดีนัม คลอรีน และธาตุอื่นๆ ซึ่งปกติแล้วปุ๋ยเคมีจะไม่มีหรือมีเพียงบางธาตุเท่านั้น ธาตุเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชไม่น้อยกว่าธาตุอาหารหลัก เพียงแต่ต้องการในปริมาณน้อยเท่านั้น

นอกจากจะเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชแล้ว ปุ๋ยหมักยังมีคุณค่าในแง่การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินอีกหลายประการ เช่น ช่วยทำให้แร่ธาตุอาหารพืชในดินแปรสภาพไปอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่าย ช่วยดูดซับธาตุอาหารพืชเอาไว้ไม่ให้ถูกน้ำฝนหรือน้ำชลประทานชะล้างสูญหายไปได้ง่าย เป็นการช่วยถนอมแร่ธาตุอาหารในปุ๋ยไม่เข้มข้นเหมือนปุ๋ยเคมี แต่ก็มีลักษณะอื่นๆ ที่ช่วยรักษา และปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินได้เป็นอย่างดี (ธงชัย, 2546)

2.5.3 ด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อมได้ดังนี้

1) เป็นการกำจัดขยะมูลฝอยทั่วไปทำให้บริเวณที่อยู่อาศัยถูกสุขลักษณะ น่าอยู่ สะอาดตา

2) ช่วยลดอุบัติเหตุซึ่งเกิดจากการทำลายเศษพืชโดยการเผา เช่น ตอซังข้าว เศษหญ้า เศษขยะข้างถนน ซึ่งเป็นวิธีไม่ถูกต้อง ทำให้เกิดอุบัติเหตุ การจราจรติดขัด ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน และยังทำให้อากาศเป็นพิษรวมทั้งทำลายสิ่งแวดล้อมของโลกด้วย การนำเศษพืชเหล่านั้นมาทำปุ๋ยหมักจะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

3) ลดปัญหาทางด้านกลิ่นจากของเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรของเหลือต่าง ๆ หากปล่อยทิ้งไว้ ณาเข้าจะเกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เมื่อได้นำมาทำเป็นปุ๋ยหมักแล้ว จะเป็นการนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกและยังเป็นการลดปัญหาทางด้านกลิ่นได้ด้วย

4) เป็นการกำจัดวัชพืชน้ำต่างๆ ทำให้สัตว์น้ำได้รับออกซิเจน และแสงแดดเต็มที่ เกิดสภาพสมดุลในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

5) ช่วยให้การสัญจรทางน้ำสะดวกขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำจัดผักตบชวา ซึ่งมักมีมากเกินความต้องการตามแม่น้ำ ห้วย หนอง คลอง บึง และแหล่งน้ำทั่วไป (ธงชัย, 2546)

2.6 สารฮิวมิก

ปุ๋ยหมักเกิดจากอินทรีย์วัตถุ ซากพืช ซากสัตว์ ต่างๆ ผ่านการคลุกเคล้าให้เข้าภายใต้กระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในระยะเวลาที่เหมาะสม โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการแปรสภาพย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วจากนั้นการย่อยสลายก็จะช้าลงเรื่อยๆ เนื่องจากสารอินทรีย์เหล่านั้นแปรสภาพไปเป็นสารฮิวมิก ซึ่งสารฮิวมิกมีโครงสร้างที่ซับซ้อนสลายตัวยาก แต่ก็ยังค่อยๆ สลายตัวต่อไปจนในที่สุดก็กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ซึ่งสารฮิวมิกเป็นองค์ประกอบสำคัญของอินทรีย์วัตถุประมาณ 60-80 % (มณฑนีย์, 2554) สามารถพบในดินในน้ำ และแหล่งน้ำธรรมชาติ ตะกอนในคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ และมหาสมุทร แหล่งพรุ (Peat bog) ถ่านหิน (วิทยา, 2531) และในปุ๋ยหมัก (Sanchez-Monedero et al., 1999)

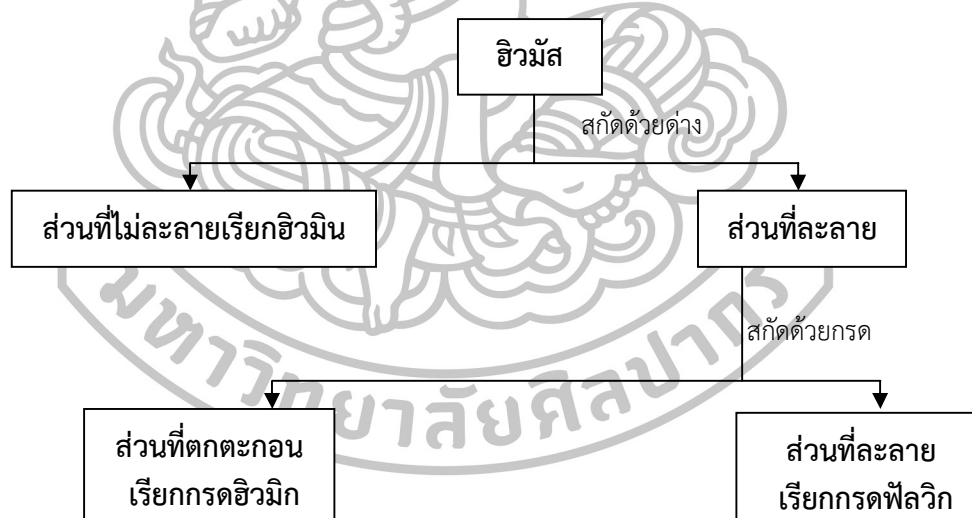
งานวิจัยที่ศึกษากรดฮิวมิกจากการทำปุ๋ยหมักเช่นจากการศึกษา Goyal et al. (2005) เปรียบเทียบปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิคที่เกิดขึ้นจากปุ๋ยหมักที่แตกต่างกัน 5 ชนิด พบว่าปุ๋ยหมัก

จากขานอ้อยผสมกับมูลวัวและควายในอัตราส่วน 4:1 มีกรดฮิวมิก และ กรดฟัลวิกสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ปุ๋ยหมักจากขานอ้อยผสมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:1 โคลนจากบ่อน้ำทิ้งในกระบวนการสกัดน้ำตาลให้ใสขึ้น มูลเป็นไก่อจากฟาร์มในท้องถิ่นและผักตบชวาที่เก็บจากบ่อน้ำ ในหมู่บ้าน ตามลำดับ ซึ่งกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกจะสามารถบ่งบอกถึงกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่ากระบวนการฮิวมิฟิเคชันที่มากขึ้นได้

Huang et al. (2008) ศึกษาการย่อยสลายลิกนินทางชีวภาพของฟางข้าวต่อกระบวนการเกิดฮิวมิฟิเคชันและคุณภาพของฮิวมัสด้วยเชื้อ *Phanerochaete chrysosporium* และ *Streptomyces badius* โดยทำการตรวจสอบผลในช่วง 56 วัน และบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาการย่อยสลายลิกนินและกระบวนการสร้างสารฮิวมิกของฟางข้าวในช่วงของการบ่มโดยสายพันธุ์ที่แตกต่างกันของกลุ่มสิ่งมีชีวิตสองกลุ่ม โดยใช้ดัชนีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สารสกัดฮิวมิก กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก

2.6.1 การจัดจำแนกสารฮิวมิก

สารฮิวมิกสามารถจำแนกได้ตามคุณสมบัติของการละลายในกรดและด่างที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ กรดฮิวมิกจะตกตะกอนในสารละลายกรดแต่จะละลายได้ในสารละลายด่าง ส่วนกรดฟัลวิกนั้นจะละลายอยู่ในสารละลายกรด และฮิวมิน จะไม่ละลายในสารละลายกรดหรือด่างเลยดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 รูปแบบของสารฮิวมิกที่แบ่งตามคุณสมบัติการละลายในกรดและด่าง
ที่มา: Stevenson (1994)

2.6.2 โครงสร้างของสารฮิวมิก

โครงสร้างเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดจะมีผลต่อคุณสมบัติบางประการของสาร ดังเช่น สารฮิวมิกทั้ง 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติการละลายและสมบัติบางประการที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากโครงสร้างของสารที่แตกต่างกัน โดยในโครงสร้างของกรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน จะมีธาตุองค์ประกอบที่เหมือนกันคือ คาร์บอน (carbon, C) และออกซิเจน (oxygen, O) แต่จะมีปริมาณธาตุไฮโดรเจน (hydrogen, H) ไนโตรเจน (nitrogen, N) และซัลเฟอร์ (sulfur, S) เป็นองค์ประกอบที่มีสัดส่วนแตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 คุณสมบัติบางประการ และหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิกและฟัลวิก

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 (pH1)	ไม่ละลาย	ละลาย
น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง	ประมาณ 100-หลายล้าน	180-10,000
หมู่ functional group (ปริมาณออกซิเจนในหมู่ Functional group)		
คาร์บอกซิล	14-45	58-65
ฟีนอล	10-38	9-19
แอกซอลล์	13-15	11-16
คาร์บอนิล	4-23	4-11
เมทอกซิล	1-5	1-2

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

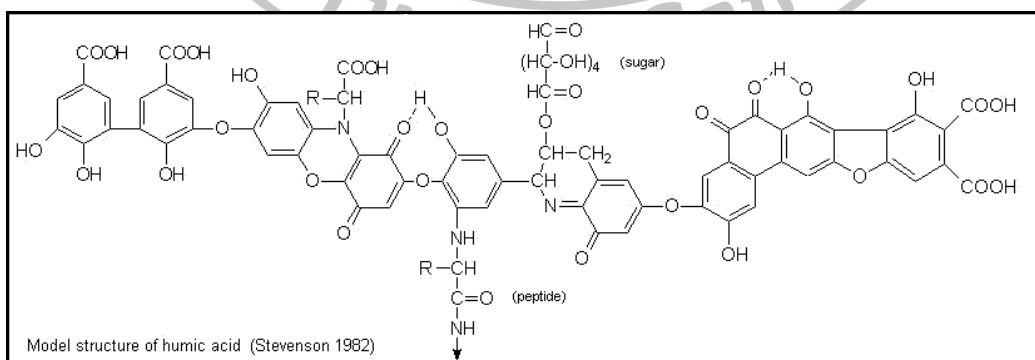
นอกจากนี้โครงสร้างหลัก ได้แก่ โครงสร้างแอโรแมติกและแอลิแพติกตลอดจนพันธะที่ไม่อิ่มตัวต่างๆ โครงสร้างเหล่านี้จะบ่งบอกเสถียรภาพในสิ่งแวดล้อม สารฮิวมิกที่มีโครงสร้างเหล่านี้มากจะมีเสถียรภาพอยู่ปรับปรุงดินได้นานขณะที่สารฮิวมิกที่มีโครงสร้างเหล่านี้น้อยจะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการต่างๆ ได้โดยง่าย (นัทธีรา และคณะ, 2555) ทำให้มีการเติมสารฮิวมิกในรูปแบบของปุ๋ยอินทรีย์ลงไปดินเสมอ

1) กรดฮิวมิก (Humic acid, HA)

กรดฮิวมิกจะละลายได้ดีในสารละลายต่าง แต่ตกตะกอนในสารละลายกรด และละลายน้ำได้เล็กน้อย สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยของกรดฮิวมิก คือ $C_{10}H_{12}O_5N$ ซึ่งสามารถพบกรดฮิวมิกได้ ทั้งในดินในน้ำ และในปุ๋ยมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ สีของกรดฮิวมิก จะเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะบางประการของกรดฮิวมิกได้ ดังภาพที่ 4 คือ สีน้ำตาลเข้มถึงดำจะชี้ให้เห็นว่ากรดฮิวมิกนั้นจะมีการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันมีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณคาร์บอนอยู่มาก แต่จะมีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย อีกทั้งค่าความเป็นกรดและการละลายน้ำค่อนข้างต่ำอีกด้วย กรดฮิวมิกนั้นจะไม่มีการกลั่น และในธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์หรือของแข็งที่มีสภาพเป็นกรด มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ค่อนข้างเสถียร จึงทำให้เกิดความคงทนในดินได้ดี เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ กรดฮิวมิกนั้นจะมีโครงสร้างเป็นแอโรแมติก หมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จะเป็นหมู่ฟีนอลิก (Ar-OH) ดังภาพที่ 5 ซึ่งจะยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะอื่นๆ ได้

Humic substances (pigmented polymers)				
Fulvic acid		Humic acid		Humins
Light yellow	Yellow brown	Dark brown	Grey-black	Black
<p>————— increase in intensity of colour —————></p> <p>————— increase in degree of polymerization —————></p> <p>2 000 ————— increase in molecular weight —————> 300 000 ?</p> <p>45% ————— increase in carbon content —————> 62%</p> <p>48% ————— decrease in oxygen content —————> 30%</p> <p>1 400 ————— decrease in exchange acidity —————> 500</p> <p>————— decrease in degree of solubility —————></p>				
Chemical properties of humic substances. (Stevenson 1982)				

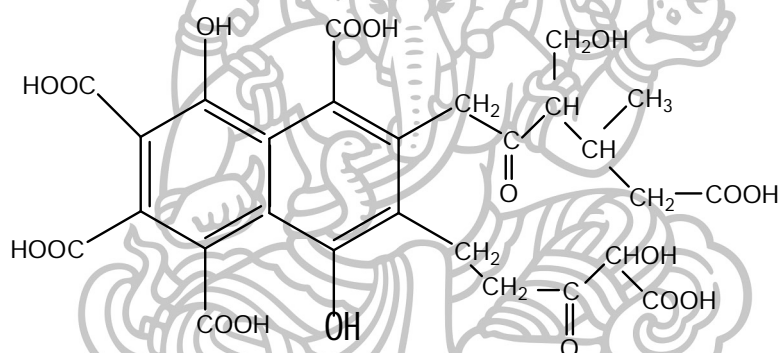
ภาพที่ 4 ลักษณะสีของสารฮิวมิก
ที่มา: Stevenson (1982)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid)
ที่มา: Stevenson (1994)

2) กรดฟัลวิก (Fulvic acid, FA)

กรดฟัลวิกสามารถละลายได้ทั้งในกรด ต่าง และน้ำ สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยของกรดฟัลวิก คือ $C_{12}H_{12}O_9N$ มีลักษณะเป็นคอลลอยด์หรือของแข็งที่มีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณคาร์บอนอยู่น้อย แต่จะมีปริมาณออกซิเจนมาก ค่าความเป็นกรดและการละลายน้ำสูง กรดฟัลวิกจัดเป็นสารประกอบที่มีขี้และมีความเป็นกรดสูงยึดจับกับโลหะได้ดี พบได้ในน้ำมากกว่าในดิน มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุดในจำพวกสารฮิวมิก มีความเสถียรน้อยกว่ากรดฮิวมิกเนื่องจากละลายในน้ำได้ดี จึงไม่เกิดความคงทนในดิน แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดีกว่ากรดฮิวมิก เพราะในโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายอลิฟาติก หมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่จะเป็นหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ดังภาพที่ 6 ซึ่งจะยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี โดยในโครงสร้างของกรดฟัลวิกนั้นจะพบว่ามีปริมาณธาตุออกซิเจนมากกว่ากรดฮิวมิก แต่จะมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์น้อยกว่าอีกด้วย



Model structure of fulvic acid by Buffle

ภาพที่ 6 โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic acid)
ที่มา: Stevenson (1994)

3) ฮิวมิน (Humin, HM)

ฮิวมินเป็นสารฮิวมิกชนิดหนึ่งที่มีสีดำ เกิดจากกระบวนการฮิวมิฟิเคชันผ่านปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบเป็นพวกเอสเทอร์ และสายไฮโดรคาร์บอนที่ยาวต่อกันไปเรื่อยๆ ไม่ละลายในน้ำแม้ในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่าง (Mecozzi et al., 2001; Rice, 2001) ฮิวมินจึงมีความคงทนมาก และย่อยสลายยากจึงไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา (Stevenson, 1994) และทำให้มีบทบาทในดินน้อย

2.7 บทบาทและประโยชน์ของสารฮิวมิก

สารฮิวมิกมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดินทางด้านกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งทางกายภาพได้แก่ ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน การทำให้โครงสร้างในชั้นดินมีการระบายอากาศได้ดีขึ้น และป้องกันการกัดเซาะของดิน ทางด้านเคมี เช่น กรดฮิวมิกมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ทำให้จุลินทรีย์ในดินไม่ให้ถูกชะล้างได้ง่ายขึ้น (ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) โดยสามารถสรุปคุณสมบัติและประโยชน์ของสารฮิวมิกได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติและประโยชน์ของสารฮิวมิก

คุณสมบัติ / คุณลักษณะของฮิวมิก	ประโยชน์ต่อดิน
1. การอุ้มน้ำ - สารอินทรีย์สามารถอุ้มน้ำได้ถึง 20 เท่าของน้ำหนักตัวมันเอง	ป้องกันการหดตัวของดิน ทำให้ดินมีความชุ่มชื้นโดยเฉพาะดินทราย
2. การเคลือบอยู่กับอนุภาคดินเหนียว - สารอินทรีย์ที่เคลือบและทำให้อนุภาคดินเหนียวเชื่อมกันอยู่เป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า aggregates	โครงสร้างดินเสถียรมากกว่าเดิม ดินมีรูพรุนเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊ส และช่วยในการซึมผ่านของน้ำ
3. การแลกเปลี่ยนไอออนและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน - สารอินทรีย์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะที่ละลายน้ำ เช่น ไอออนของทองแดง (Cu^{2+}), แมงกานีส (Mn^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) และโลหะไอออนอื่นๆ	การแลกเปลี่ยนไอออนเหล่านี้ทำให้ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange capacity ; CECC) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นดัชนีบ่งบอกถึงการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่สำคัญแก่พืช
4. การเพิ่มปริมาณแร่ธาตุอื่นๆ - สารอินทรีย์เมื่อถูกย่อยสลายจะได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนีย ไนเตรท ฟอสเฟต ซัลเฟต และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	สารเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพืช
5. คุณสมบัติของการเป็นบัฟเฟอร์ - สามารถรักษาสมดุลความเป็นกรด เบสของดิน ได้ในช่วงแคบๆ	ช่วยให้ปฏิกิริยาอื่นๆในดินดำเนินต่อเองได้อย่างเป็นปกติ

ที่มา: Stevenson (1994)

การนำสารฮิวมิกไปใช้กับดินทรายที่เสื่อมโทรม จากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การพรวนดิน การใช้สารปราบศัตรูพืช และการใช้ปุ๋ยเคมีสารฮิวมิกจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้มีความอุดมสมบูรณ์และให้ผลผลิตที่ตีมากยิ่งขึ้น (Zbytniewski et al., 2005)

2.8 ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

ธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกได้ โดยกรดฮิวมิกจะประกอบด้วยธาตุที่สำคัญดังนี้ คือ ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของกรดฮิวมิก (Stevenson et al., 1994)

2.8.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบในโครงสร้างของกรดฮิวมิก

ปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้อธิบายคุณลักษณะโครงสร้างบางประการของสารฮิวมิกได้ โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่ใช้วัตถุดิบและระยะเวลาในการหมักปุ๋ยจะแตกต่างกัน ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้จากการศึกษา ของ Huang et al. (2006), Sellami et al. (2008), Plaza et al. (2008), Fukushima et al. (2009), Amir et al. (2010) พบว่าปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน มีแนวโน้มลดลง ซึ่งปริมาณธาตุคาร์บอนที่ลดลงจะบ่งชี้ถึงการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ระหว่างกระบวนการหมัก ในขณะที่เดียวกันหากปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในช่วงระยะกึ่งกลางของการหมักปุ๋ย (ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา) จะชี้ให้เห็นว่ามีการปลดปล่อยของสารประกอบแอลิแฟติกจากโครงสร้างอื่นๆ เช่น ลิกนิน ทำให้คาร์บอนเพิ่มขึ้นมา สารประกอบแอลิแฟติกเหล่านี้จะถูกย่อยสลายต่อในช่วงต่อมาของกระบวนการหมักปุ๋ย ส่วนปริมาณธาตุไฮโดรเจนที่ลดลงจะแสดงถึงการแทนที่ (fusion reaction) หรือการรวมตัวของโครงสร้างแอลิแฟติกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติก และปริมาณไนโตรเจนที่ลดลง หมายถึงการย่อยสลายของอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างกระบวนการหมัก

ตารางที่ 5 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกจากวัตถุดิบที่ใช้หมักต่างชนิดกัน

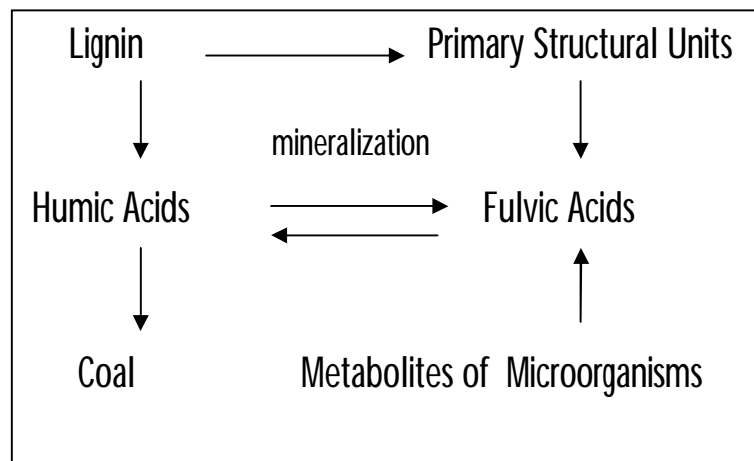
ชนิดของวัตถุดิบ	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ปริมาณร้อยละ			
		ธาตุ คาร์บอน (C)	ธาตุ ไฮโดรเจน (H)	ธาตุ ออกซิเจน (O)	ธาตุ ไนโตรเจน (N)
มูลหมูผสมขี้เลื่อย ¹	0	52.7	6.2	34.7	4.8
	63	47.9	5.5	40.0	5.2
ของเสียจากน้ำมัน มะกอก ²	0	48.4	6.4	38.4	2.8
	63	45.3	5.8	42.1	2.7
ของเสียโรงงานน้ำมัน มะกอก ³	0	42.4	7.6	39.8	1.2
	182	20.8	5.0	41.3	2.0

ตารางที่ 5 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิคจากวัตถุดิบที่ใช้หมักต่างชนิดกัน (ต่อ)

ชนิดของวัตถุดิบ	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ปริมาณร้อยละ			
		ธาตุ คาร์บอน (C)	ธาตุ ไฮโดรเจน (H)	ธาตุ ออกซิเจน (O)	ธาตุ ไนโตรเจน (N)
มูลวัวบด ⁴	0	56.3	6.7	31.2	5.1
	240	55.9	6.1	31.4	5.2
เศษเปลือกไม้สน ⁵	0	58.1	5.6	33.9	0.4
	7	56.8	6.3	29.9	4.2
	23	53.4	6.3	29.8	6.4
	43	56.4	6.4	29.2	5.0
	365	53.2	6.2	30.9	4.5
กากตะกอนน้ำเสีย กับเศษวัสดุเหลือใช้ ⁶	15	48.7	6.8	36.5	7.3
	135	47.5	6.5	37.5	7.3

ที่มา: ¹Huang et al. (2006), ²Wei et al. (2007), ³Sellami et al. (2008), ⁴Plaza et al. (2008), ⁵Fukushima et al. (2009) และ ⁶Amir et al. (2010)

เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Wei et al. (2007) พบว่าปริมาณธาตุออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะกระบวนการหมัก นอกจากนี้ การศึกษาของ Stevenson (1994) ยังพบว่าการเกิดปฏิกิริยาของสารฮิวมิคนั้นเกิดขึ้นได้จากการที่มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสูง เช่นพวกคาร์บอกซิลิก ฟีนอลิก อินอลิก แอลกอฮอล์ คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล ควิโนนอัลฟา-เบต้าที่ไม่อิ่มตัวของควิโนน ดังนั้นจึงบอกได้ว่าปริมาณความเป็นกรดรวมทั้งหมด ในกรดฟัลวิก (640-1420 เซนตริโมล/กิโลกรัม) นั้นมากกว่ากรดฮิวมิค (560-890 เซนตริโมล/กิโลกรัม) และกรดฟัลวิกมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่าพวกสารอินทรีย์พอลิเมอร์อื่นๆ ที่มีในธรรมชาติ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบตลอดช่วงการหมัก
ที่มา: Stevenson (1994)

2.9.2 อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก สามารถนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกได้ และยังใช้พิจารณาเพื่อติดตามแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ย โดยอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบมีดังนี้

2.9.2.1 อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio) ของกรดฮิวมิก

อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) อัตราส่วนนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชัน O-alkyl และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) ในกรดฮิวมิก โดยจะลดลงถ้ากรดฮิวมิกเพิ่มขึ้น (Tan, 2003) ส่วนการศึกษาของ Amir et al. (2010); Visser et al. (1983) และ Sanchez Monedero et al. (2002) พบว่าอัตราส่วนที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะบ่งชี้ว่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนอยู่ (C=O) และอาจทำให้เกิดโครงสร้างแอโรแมติกในกระบวนการหมักปุ๋ยจนถึงที่สุดกระบวนการหมัก อัตราส่วน O/C ที่มีค่าลดลงบ่งชี้ว่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดในโครงสร้างกรดฮิวมิกเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิลิก (Polak and Sulkowski, 2006) ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ Wei et al. (2007) Veeken et al. (2000) Huang et al. (2006) และ Bustamante et al. (2008) ที่พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะทำให้อัตราส่วนนี้ลดลง แสดงถึงการเกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ เกิดโครงสร้างแอโรแมติกซับซ้อนยิ่งขึ้นจากการหมักเศษขยะมูลฝอย เป็นระยะเวลา 0-63 วัน โดยค่า O/C ในวันที่ 0 มีค่า 0.7 และเริ่มลดลงในวันที่ 63 เป็น 0.6 ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่สกัดจากวัสดุติดบต่างชนิดและระยะเวลาการหมักต่างกัน

ชนิดของวัสดุติดบ	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)		
		O/C	C/H	C/N
กากตะกอนของน้ำเสีย ¹	0	1.76	7.03	26.88
	35	1.38	9.52	8.85
มูลไก่ผสมมูลหมูและข้าวฟ่าง ²	0	0.63	1.85	2.38
	112	0.66	1.75	1.47
มูลหมูผสมขี้เลื่อย ³	0	2.02	0.70	12.60
	63	1.60	0.69	10.60
เศษขยะมูลฝอย ⁴	0	0.7	0.7	20.1
	63	0.6	0.9	14.1
ของเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกผสมฟางข้าว ⁵	0	0.65	0.58	34.92
	360	0.54	0.49	13.95

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่สกัดจากวัตถุติดต่างชนิดและระยะเวลาการหมักต่างกัน (ต่อ)

ชนิดของวัตถุติด	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)		
		O/C	C/H	C/N
เศษเปลือกไม้สน ⁶	0	0.72	10.21	138.38
	67	0.70	9.00	13.29
	83	0.79	8.44	8.36
	103	0.69	8.74	11.11
	121	0.71	8.98	11.39
	365	0.77	9.11	8.03

ที่มา: ¹Veeken et al. (2000), ²Sanchez Monedero et al. (2002), ³Huang et al. (2006), ⁴Wei et al. (2007), ⁵Bustamante et al. (2008) และ ⁶Fukushima et al. (2009)

2.9.2.1 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H ratio) ของกรดฮิวมิก

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน C/H ของกรดฮิวมิกมีความสำคัญในการบ่งชี้การเกิดโครงสร้างแบบแอโรแมติกหรือเกิดโครงสร้างแบบแอลิฟาติก หากอัตราส่วน C/H ของกรดฮิวมิกลดลงจะบ่งชี้ถึงการเกิดของโครงสร้างแอลิฟาติก (Fukushima et al., 2009) จากการศึกษาของ Sanchez-Monedero et al. (2002) และ Huang et al. (2006) และ Bustamante et al. (2008) พบว่าการลดลงของไฮโดรเจนเมื่อเกิดกระบวนการหมักปุ๋ย แสดงถึงการเกิดโครงสร้างแบบแอลิฟาติก ในโครงสร้างของกรดฮิวมิก ดังตารางที่ 6 การลดลงของคาร์บอนชี้ให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้น ถ้าอัตราส่วน C/H ของกรดฮิวมิกสูงขึ้นบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกไปเป็นโครงสร้างแบบแอโรแมติกที่เสถียรภาพขึ้น (Huang et al., 2006; Garcia et al., 2009) เนื่องจากมีกระบวนการย่อยสลายแร่ธาตุเกิดเป็นโมเลกุลเล็กๆ เช่น ไนเตรท กรดคาร์บอกซิลิกเกิดขึ้นมาก ทำให้ปริมาณโครงสร้างแอโรแมติกในกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้น (Faustino et al., 2009; Polak et al., 2005) ดังการศึกษาของ Veeken et al. (2000) และ Wei et al. (2007)

2.9.2.3 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของกรดฮิวมิก

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) แสดงถึงปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในโครงสร้างของกรดฮิวมิก (Tan, 2003) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในอัตราส่วน C/N ของกรดฮิวมิกในกระบวนการเกิดสารฮิวมิก จากการศึกษาของ Veeken et al. (2000) Sanchez Monedero et al. (2002) Huang et al. (2006) Wei et al. (2007) Bustamante et al. (2008), พบว่า อัตราส่วน C/N มีค่าสูงสุดในช่วงแรกของการหมักปุ๋ยเนื่องจากยังมีการย่อยของสารอินทรีย์ที่เป็นวัตถุติดตั้งต้น และเมื่อเข้าสู่ระยะคงสภาพ อัตราส่วน C/N มีแนวโน้มลดลงบ่งชี้ว่าเกิดกระบวนการย่อยของสารอินทรีย์ไปเป็นกรดฮิวมิกที่มากขึ้น ดังตารางที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในอัตราส่วน C/N ของกรดฮิวมิกในกระบวนการเกิดสารฮิว

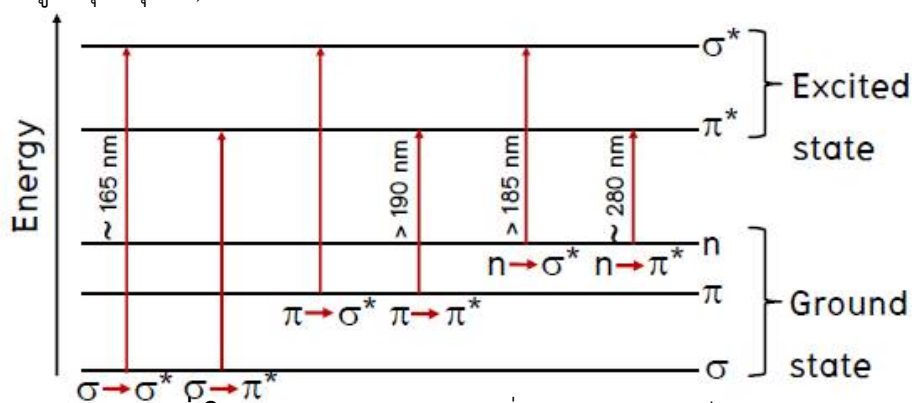
มิก C/N ลดต่ำลงบ่งบอกถึงโมเลกุลของกรดฮิวมิกส่วนใหญ่มีโครงสร้างแอลิแฟติกโดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกรดฟัลวิกไปเป็นกรดฮิวมิกที่มีโครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น

2.10 การตรวจวัดโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตสเปกโทรสโกปี

เทคนิคทางสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ตรวจสอบหาสูตรโครงสร้างของสารฮิวมิกได้ เพราะโครงสร้างที่เสถียรส่วนใหญ่ ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างแอโรแมติกและพันธะคู่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงยูวีและวิสิเบิลได้ (Wei et al, 2007 ; Tan, 2003) นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังเป็นเทคนิคที่ใช้ง่าย รวดเร็ว เหมาะกับการใช้ศึกษาเพื่อติดตามวิวัฒนาการทางโครงสร้าง ณ ระยะเวลาหมักต่างๆ ได้สำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนรังสีของสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบเชิงซ้อน ทั้งมีสีและไม่มีสี สมบัติดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวางเพราะเป็นเทคนิคที่ใช้ง่าย รวดเร็ว มีความแม่นยำ (Domeizel et al., 2004) และมีสภาพไว (sensitivity) สูง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของสารฮิวมิก

2.10.1 หลักการของอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี มีค่าการดูดกลืนแสงของรังสีอัลตราไวโอเลต (200-400 นาโนเมตร) และรังสีวิสิเบิล (400 -800 นาโนเมตร) เกิดจากการสั่นสะเทือนทางไฟฟ้าจึงทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นอยู่ตลอดเวลา และเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน (การทรานซิชัน) ของอิเล็กตรอนในโมเลกุลไปอยู่ในระดับที่สูงขึ้นกว่าเดิม พลังงานที่โมเลกุลดูดกลืนเข้าไปขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นหรือความถี่ของคลื่นแสงนั้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนจาก **occupied orbital** ไปเป็น **unoccupied orbital** ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า โดยทั่วไปแล้วการทรานซิชัน (transition) จะเปลี่ยนจาก **highest occupied molecular orbital (HOMO)** ไปเป็น **lowest unoccupied molecular orbital (LUMO)** ซึ่งความแตกต่างของพลังงานระหว่าง **electronic level** ในโมเลกุลส่วนมากจะมีค่าประมาณ 125-650 kJ/mole (กิโลจูลต่อโมล) โมเลกุลที่มีพลังงานต่ำสุดจะอยู่ใน σ orbital สำหรับ π orbital จะมีพลังงานสูงกว่าและออร์บิทัล (orbital) ของ **unshared pair** ที่เรียกว่า **nonbonding (n) orbital** ก็จะมีพลังงานสูงขึ้นไปอีก นอกจากนี้ **unoccupied** หรือ **antibonding orbital** (π^* และ σ^*) เป็นออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงที่สุด (ชุตินา, 2547) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

ที่มา: Huang et al. (2006)

2.10.2 หลักการของการดูดกลืนแสง

โมเลกุลส่วนใหญ่จะดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้มาก ซึ่งเป็นไปตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert' law) ตามสมการที่ 3.1

$$A = \log (I_0/I) = \epsilon cb \quad (3.1)$$

A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbanc)

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนที่จะผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง (sample cell)

I = ความเข้มของแสงหลังจากที่ผ่านเซลล์ตัวอย่างออกมา

c = ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ (molar) ของตัวถูกละลาย (solute)

b = ความยาวเป็นเวทิตเมตร (cm) ของเซลล์ตัวอย่าง

ϵ = โมลาร์แอบซอร์บทิวิตี (molar absorptivity)

$\log (I_0/I)$ คือ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbanc) หรือ optical density (ในอดีตนิยมใช้คำนี้) ใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น A สำหรับ molar absorptivity หรือ molar extinction coefficient (ในอดีตนิยมใช้คำนี้) ใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น ϵ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10^6 ถ้า ϵ มีค่ามากกว่า 10^4 จะเรียกว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความเข้มสูง (high-intensity absorption) และถ้ามีค่าต่ำกว่า 10^3 จะเรียกว่ามีการดูดกลืนแสงที่ความเข้มต่ำ (low-intensity absorption) (ชุดิมา, 2547)

2.10.3 การดูดกลืนรังสีของสารอินทรีย์

สารซึ่งดูดกลืนรังสีความยาวคลื่นบางช่วงระหว่าง 800-400 nm (แสงที่ตามองเห็น) ได้จะปรากฏเป็นสีให้ตาเราเห็น สารอินทรีย์จำนวนมากสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนรังสีที่เหลือจะผ่านทะลุสารนั้นได้จึงปรากฏให้เราเห็นเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม ด้วยเหตุผลนี้เอง สารอินทรีย์ที่มีสีจึงมักเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม

ส่วนของโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นสาเหตุทำให้มองเห็นเป็นสีเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore มาจาก chrome ซึ่งแปลว่า สี) โครโมฟอร์ส่วนมากจะมีพันธะชนิดไม่อื่นตัว เช่น C=C C=O N=N และ-NO เป็นต้น ส่วนหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ เช่น HO NH Cl และBr ไม่สามารถทำให้ปรากฏการเป็นสีได้ด้วยตัวเองแต่มีอิทธิพลต่อโครโมฟอร์ เมื่อหมู่เหล่านี้ใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มิได้สร้างพันธะ (non-bonding electrons) คอนจูเกตกับโครโมฟอร์ เราเรียกว่าออกโซโครม (auxochrome) หมู่เหล่านี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งความยาวคลื่นและความเข้มของการดูดกลืนแสง ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 พันธะของสารอินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนรังสีในค่าความยาวคลื่นในช่วง 160-280 นาโนเมตร

พันธะของสารอินทรีย์	ความยาวคลื่น
C=C	165
C=C	175
	195
	223
C=O	160
	180
	280
R - NO	200
C=N	274
C=C-C=C	165
C=C-C=O	217
	220
	315
	220
C=C-C=C	230
	184
Benzene	204
	254

ที่มา: เย็นททัย (2549)

2.11 ช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตบีที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดสารชีวโมเลกุล

สารชีวโมเลกุลที่สกัดได้ เมื่อนำมาวัดหาช่วงค่าของการดูดกลืนรังสีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต บี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน โดยมีบทบาทสำคัญในช่วงที่มีความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงของสารชีวโมเลกุลทั้งช่วงอัลตราไวโอเล็ต (200- 400 นาโนเมตร) และช่วงที่มองเห็นได้ (400 – 800 นาโนเมตร) มีรูปแบบการดูดกลืนแสงในช่วงสูงสุดและต่ำสุด ค่อนข้างไม่ชัดเจน ช่วงการดูดกลืนรังสีสูงสุดมักจะแสดงอยู่ในช่วง 260 – 300 นาโนเมตร การดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารชีวโมเลกุลจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน ความยาวคลื่นใดก็ตามที่ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางโครงสร้างของโมเลกุล (Zbytniewski et al., 2005) จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีทางสเปกโทรสโกปีมีความสำคัญในการศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการศึกษาถึงโครงสร้างทางเคมีของสารชีวโมเลกุล (Domeizel et al., 2004)

2.11.1 ความยาวคลื่น 205 ถึง 300 นาโนเมตร

การดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น 205 ถึง 300 นาโนเมตร บอถึงการ เปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน $\pi-\pi$ ของโครงสร้างแอโรแมติก มีการเกิดพันธะที่เป็นโครงสร้างแอโรแมติก ในช่วงความยาวนี้ และอาจเกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ เช่น ไนเตรท และคาร์บอกซิลิก (Domeizel et al., 2004) และการดูดกลืนแสงใกล้ความยาวคลื่นที่ 210 นาโนเมตร จะบอกการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอน $\pi-\pi$ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการรีดักชันในหมู่ NH_3 และระดับการสร้างพอลิเมอร์ที่สูงจากกระบวนการนี้ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น (Wei et al., 2007) และในช่วง 230-235 นาโนเมตร แสดงถึงวงแหวนเบนซินที่เกิดขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไป แถบการดูดกลืนนี้จะเลื่อนไปทางด้านขวาที่ความยาวคลื่น 230 ถึง 235 นาโนเมตร (Zbytniewski et al., 2005)

2.11.2 ความยาวคลื่น 260 ถึง 280 นาโนเมตร (ช่วง E_2)

ความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร บอถึงการดูดกลืนของโครงสร้างแอโรแมติกและการเกิดโครงสร้างในหมู่ฟังก์ชัน $\text{C}=\text{C}$ $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{N}=\text{N}$ ในโครงสร้างแอโรแมติก ซึ่งมักพบในโครงสร้างของลิกนินและควิโนน (Zbytniewski et al., 2005; Albrecht et al., 2011) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเปลี่ยนแปลง และมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะ $\pi-\pi^*$ ในโครงสร้างแอโรแมติก โดยไหล่การดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นและกว้างขึ้นในช่วงของระยะเวลาการหมัก (Chefetz et al., 1996; Wei et al., 2007) โดยไหล่การดูดกลืนสามารถสังเกตได้ช่วง 260 -280 นาโนเมตร การทรานเฟอร์ของอิเล็กตรอนนี้เกิดจากการดูดกลืนแสงที่ทับซ้อนกันของโครโมฟอร์ในฮิวมิกจำนวนมาก โดยทั่วไปโครโมฟอร์ที่ทำหน้าที่ในการดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่เป็นพวกฟีนอลิก แอโรลีน กรดเบนโซอิก อนุพันธ์ของอะนิลีน (Giovanela et al., 2010) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลิกนินและควิโนนไปเป็นโครงสร้างตั้งต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Domeizel et al., 2004)

2.11.3 ความยาวคลื่น 460 ถึง 480 นาโนเมตร (ช่วง E_4)

ความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร บอการเริ่มต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Zbytniewski et al., 2005) โดยสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นนี้จะเพิ่มขึ้น แสดงว่าเริ่มเกิดกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกมีโครงสร้างแอลิแฟติกเกิดขึ้น (Sellami et al., 2008) โดยบอกการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเกิดสารฮิวมิกไปเป็นเป็นโครงสร้างแอลิแฟติกบ่งชี้ถึงการเกิดโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่สำคัญ

2.11.4 ความยาวคลื่น 600 ถึง 670 นาโนเมตร (ช่วง E_6)

ความยาวคลื่น 600 – 670 นาโนเมตรจะบอกถึงสารประกอบแอโรแมติกที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากพันธะคู่ของหมู่ $\text{C}=\text{O}$ แสดงถึงความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารประกอบแอโรแมติกซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารฮิวมิก (Domeizel et al., 2004) ในระหว่างการหมักปุ๋ยจะพบว่าค่านี้เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไปเกิดกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติก มีระดับการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน ($\text{C}=\text{O}$) เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้น แสดงถึงโครงสร้างแอโรแมติกที่เพิ่มขึ้น (He et al., 2011)

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงแสงที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวีสเปกโทรสโกปี

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	การเปลี่ยนแปลง	อ้างอิง
205 -230	การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน $\pi-\pi^*$ ของโครงสร้างแอโรแมติก การเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอน $\pi-\pi$ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันในหมู่ NH_2	1, 2, 3
260 -280	การดูดกลืนคลื่นแสงของโครงสร้างแอโรแมติกที่มีหมู่ฟังก์ชัน $\text{C}=\text{C}$ $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{N}=\text{N}$	2, 5
460 - 480	พบโครงสร้างแอลิแฟติก ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการสร้างกรดฮิวมิก	2, 4
600 - 670	โครงสร้างแอโรแมติก เนื่องจากพันธะคู่ของหมู่ฟังก์ชัน $\text{C}=\text{O}$ ที่เป็นโครงสร้างของกรดฮิวมิก	1

หมายเหตุ : ¹Domeizel et al. (2004), ²Zbytniewski et al. (2005), ³Wei et al. (2007),
⁴Sellami et al. (2008) และ ⁵Albrecht et al. (2011)

2.12 อัตราส่วนความยาวคลื่น

อัตราส่วนความยาวคลื่นแสงเป็นการศึกษาระดับการเกิดสารฮิวมิกจากการนำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ตรวจพบในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมาหารกัน โดยอัตราส่วนที่ความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 472 นาโนเมตร (E_2/E_4) และความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 665 นาโนเมตร (E_2/E_6) อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_4/E_6) โดยมีอัตราส่วนที่สนใจดังนี้

2.12.1 อัตราส่วน E_2/E_4

อัตราส่วน E_2/E_4 เป็นการนำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ซึ่งหมายถึงโครงสร้างแอโรแมติกในลิกนิน มาหารกับอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 472 นาโนเมตร (E_4) ซึ่งเป็นสัดส่วนของโครงสร้างจำพวกเริ่มต้นของแอลิแฟติกของกระบวนการฮิวมิกฟิเคชัน อัตราส่วน E_2/E_4 โดยค่าที่น้อยลงบ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรมีปริมาณมากขึ้นจากการย่อยสลายโครงสร้างลิกนินตั้งต้น (Sellami et al., 2008; Remmy et al., 2010) โดยอัตราส่วน E_2/E_4 นี้มีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายสารฟีนอลิก ควิโนน ของสารฮิวมิก ไปเป็น *carboxylic aromatic compound* (Andreina et al., 2013)

2.12.2 อัตราส่วน E_4/E_6

อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 465 นาโนเมตร (E_4) หมายถึงโครงสร้างเริ่มต้นจำพวกแอลิแฟติกของกระบวนการฮิวมิกฟิเคชันหารกับอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 665 นาโนเมตร (E_6) บ่งบอกโครงสร้างแอโรแมติกที่ประกอบด้วยพันธะคู่ในโครงสร้างสารฮิวมิก (E_4/E_6) โดยค่าที่น้อยลงของอัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรมีปริมาณมากขึ้นโดยการเกิด

โครงสร้างที่มีความเสถียรมากมีพันธะที่มีพลังงานสูง เช่น พลังงานพันธะในวงแหวนแอโรแมติก พันธะคู่ และพันธะสาม (ประภาณี, 2539; Albrecht et al., 2011) อัตราส่วน E_4/E_6 บอกระดับการรวมตัวและพอลิเมอร์ไรเซชันขององค์ประกอบแอโรแมติก และสามารถใช้เป็นดัชนีของกระบวนการอิวมิกฟิเคชัน (El Hajjouji et al., 2007) ค่าที่น้อยลงจะบอกระดับการเกิดโครงสร้างที่เสถียร (Zbytniewski et al., 2005) อย่างไรก็ตามค่า E_4/E_6 ที่เพิ่มไปสูงสุด ชี้ให้เห็นว่าโมเลกุลของสารอินทรีย์ ที่มีขนาดเล็กกว่ารวมตัวกัน เกิดโครงสร้างที่เป็นแอลิฟาติกและโครงสร้างที่เป็นแอลิฟาติกมากและมีปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน หมู่คาร์บอกซิลิกที่สูง (Lucima et al., 2008)

2.12.3 อัตราส่วน E_2/E_6

อัตรา E_2/E_6 การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 280 นาโนเมตร (E_2) หมายถึง โครงสร้างแอโรแมติก ในลักษณะที่อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างแอโรแมติกที่ประกอบด้วยพันธะคู่ในโครงสร้างของสารอิวมิก อัตราส่วน E_2/E_6 ค่าที่น้อยลงของอัตราส่วนนี้ บ่งบอกถึงการย่อยสลายของสารตั้งต้นไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่เพิ่มขึ้น (Zbytnieski et al., 2005) อัตราส่วน E_2/E_6 ที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของสารประกอบที่มี หมู่ฟีนอลและเบนซีน คาร์บอกซิลในกลุ่มโครงสร้างของสารอิวมิก เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักในช่วง 1 เดือนแรก เป็นระยะการทำงานของจุลินทรีย์ ดูได้จากมีการลดลงอย่างรวดเร็วของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยถูกเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หมู่อามีน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และกรดอินทรีย์ (Stevenson., 1994) E_2/E_6 ค่าที่ลดต่ำลงบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของแอโรแมติก และการเข้าสู่ระดับอิวมิกฟิเคชัน (Lipski et al., 1999)

2.12.4 ผลต่างของลอการิทึม E_{400} กับ E_{600} (Log E)

ค่า Log E เป็นผลต่างของลอการิทึมของการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 400 นาโนเมตรกับ 600 นาโนเมตรดังสมการที่ 3

$$\log E = \log E_{400} - \log E_{600} \quad (1)$$

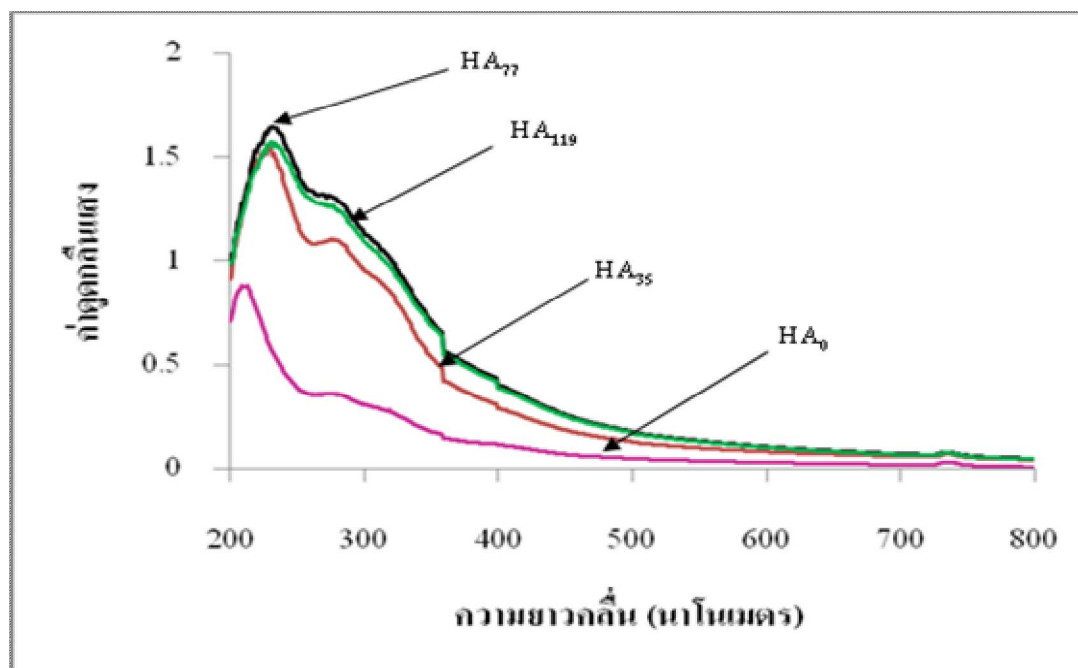
เมื่อ E คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

นำมาใช้อธิบายระดับการเกิดกรดอิวมิกของสารอินทรีย์ได้ โดยค่า Log E ที่ลดต่ำลงจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสารอิวมิกของสารอินทรีย์ที่เสถียร (Kumada, 1987; Tan, 2003; Oskars et al., 2013) โดยค่าความแปรปรวนที่น้อยกว่า 0.6 จะเป็นค่าสำหรับสารอิวมิกที่มีความเสถียรมากแต่ถ้ามีค่ามากกว่า 1.1 จะเป็นอิวมิกที่มีความเสถียรน้อย (Tan, 2003)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิลิเบิลสเปกโทรสโกปีเพื่อตรวจสอบคุณภาพปุ๋ยหมัก

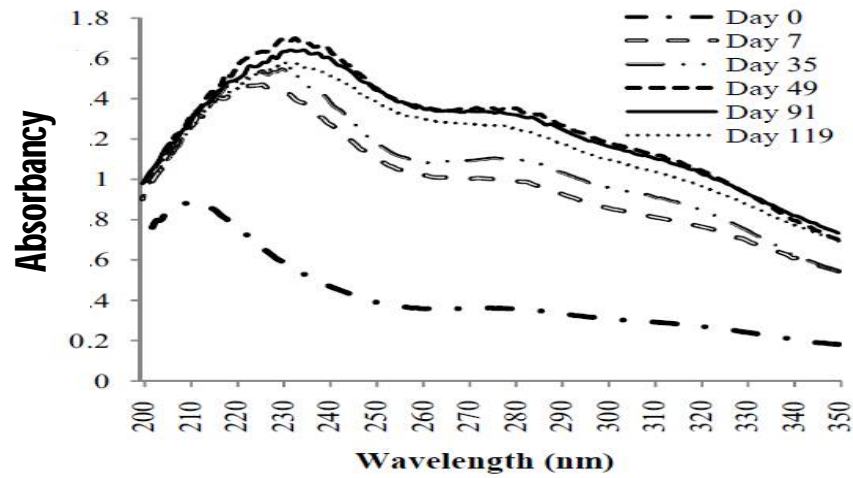
อัญชลี (2552) ทำการศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักมูลสัตว์ผสมกับวัสดุที่ใช้หมักหลายชนิด เป็นระยะเวลา 0 -119 วัน พบว่าจากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิลิเบิล โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร จากกรดอิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักที่ทำขึ้นเองในพื้นที่หมู่ 4 ตำบลหนองงูเหลือม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ที่มีอายุ 0 35 77 และ 119 วัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันเป็นการบ่งชี้ว่ากรดอิวมิกจะเพิ่มขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญในช่วง 35 วันแรก แต่ในวันที่ 119 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการหมักปุ๋ย กลับพบว่ากรดฮิวมิกลดลงเนื่องจากการดูดกลืนคลื่นแสงลดลง ดังภาพที่ 9 อาจเป็นเพราะว่าเมื่อหมักปุ๋ยนานเกินไปอาจทำให้มีการย่อยสลายกรดฮิวมิกเกิดเป็นแร่ธาตุขนาดเล็กมาก หรือเพราะอินทรีย์วัตถุที่เป็นสารตั้งต้นของกรดฮิวมิกนั้นถูกย่อยสลายจนหมดแล้ว



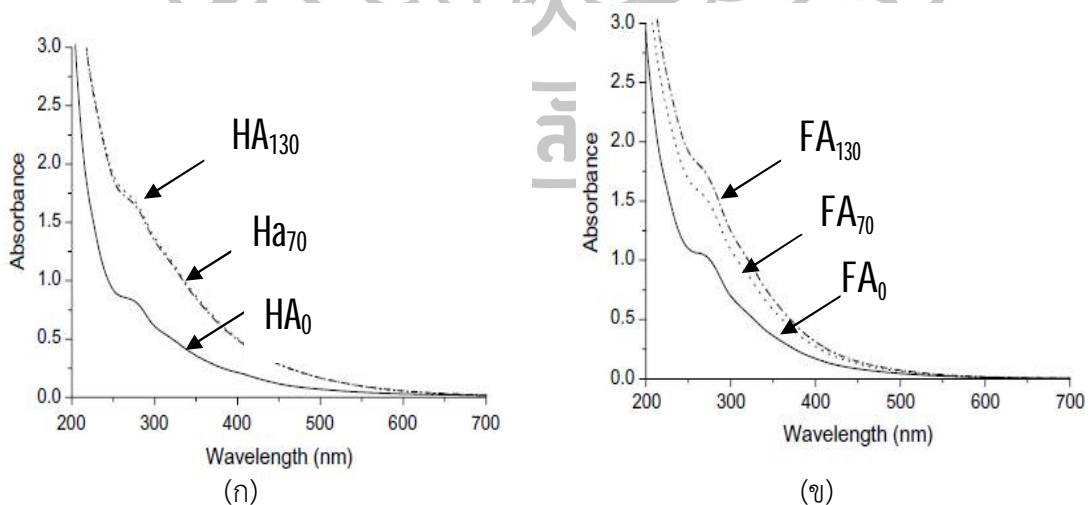
ภาพที่ 9 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง 200-800 นาโนเมตรของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่หมักเป็นระยะเวลา 0-119 วัน
ที่มา: อัญชลี (2552)

Sanmanee et al. (2011) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสารฮิวมิก เพื่อกำหนดคุณภาพของปุ๋ยหมัก โดยวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 350 นาโนเมตร จากปุ๋ยหมักมูลสัตว์ ที่หมักเป็นระยะเวลา 119 วัน พบว่าค่าดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าสูงสุดในช่วง 210-235 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในระหว่างวันที่ 0 - 49 วันที่ 49 มีค่าสูงสุดและจะคงที่ จนถึง 3 เดือน เป็นการบ่งชี้ถึงการเกิดโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไนเตรต และคาร์บอกซิลิก ที่เกิดเร็วกว่าโมเลกุลแอมโรแมติกที่ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง 280 นาโนเมตร ดังภาพที่ 10 และอัตราส่วน E_{253}/E_{230} มีอัตราค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการหมักบ่งชี้ถึงการปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ แต่ถ้าทิ้งปุ๋ยหมักไว้นานกว่านั้นคุณภาพปุ๋ยจะลดลง



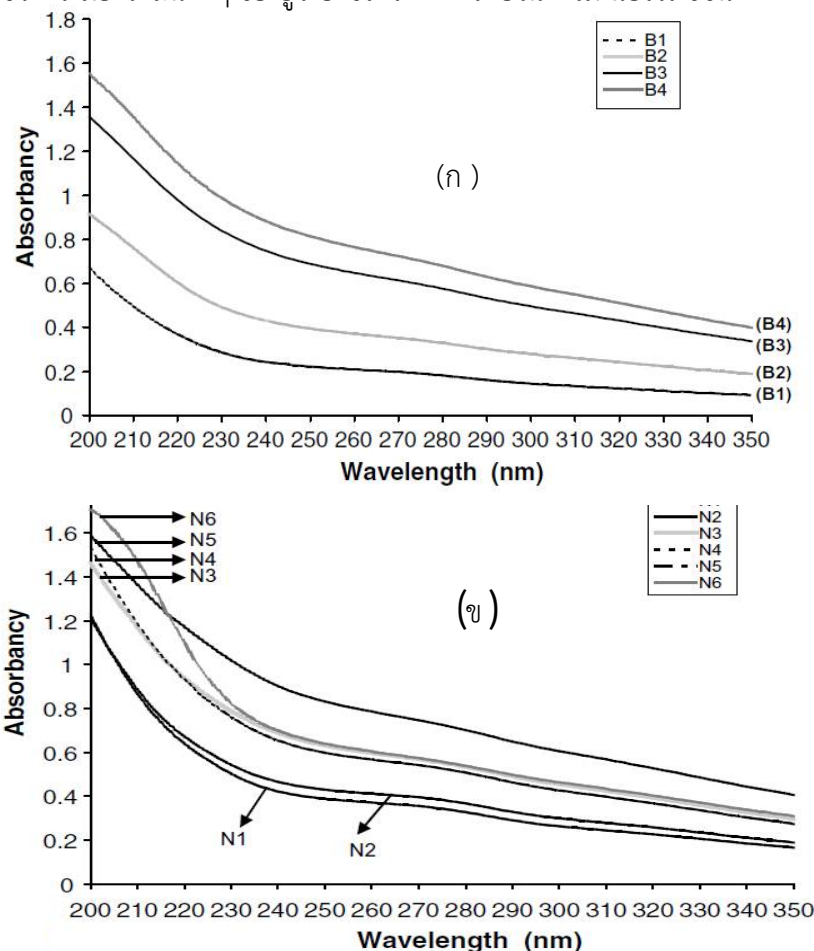
ภาพที่ 10 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย
ที่มา: Sanmanee et al. (2011)

Amine-Khodja et al. (2006) ทำการศึกษาค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 700 นาโนเมตร ของสารสกัดฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่หมักเศษของเสี้ยวของชุมชน ที่มีอายุ 0 70 และ 130 วัน พบว่า ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของกรดฮิวมิก และกรดฟัลวิก มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักปุ๋ยที่เพิ่มขึ้น โดยปุ๋ยหมักที่ช่วงอายุ 0 ถึง 70 วันของการหมักปุ๋ยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปุ๋ยหมักที่ช่วงอายุ 70 ถึง 130 วัน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและยาวนานกันไป ซึ่งหมายถึง การย่อยสลายของสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการหมัก และเมื่อวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นหมดไปกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นน้อย ซึ่งสเปกตรัมที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และจะสูงสุดที่ 450 นาโนเมตร ดังภาพที่ 11



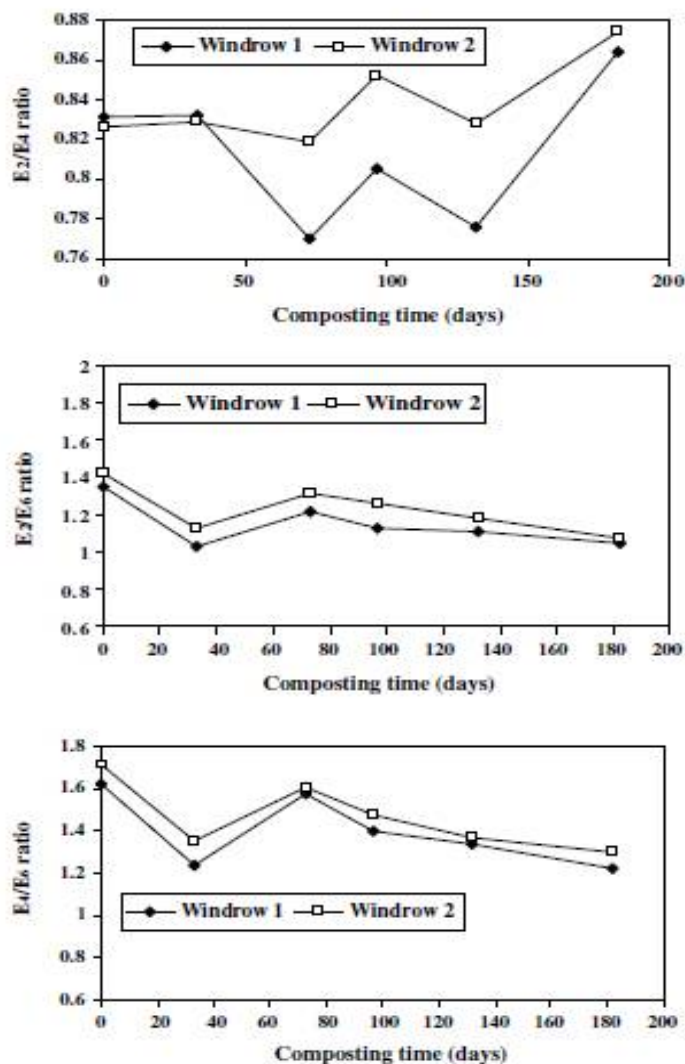
ภาพที่ 11 ค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลของสารฮิวมิก
(ก) สารสกัดกรดฮิวมิก (ข) สารสกัดกรดฟัลวิก
ที่มา: Amine-Khodja et al. (2006)

Domeizel et al. (2004) ศึกษาค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล (ช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 350 นาโนเมตร) ในปุ๋ยหมักสองชนิด คือ ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับพืชสดและหมักกลางแจ้งเมื่อทำการศึกษาทางโครงสร้างด้วยเทคนิคยูวีสเปกโทรสโกปี เพื่อติดตามระดับการเกิดสารฮิวมิก ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นระหว่าง 250 – 300 nm ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะคู่ เช่น C=C C=O และ N=N ภายในโครงสร้างของสารประกอบแอโรแมติกหรือสารประกอบที่ไม่อิ่มตัว โดยการดูดกลืนนี้ซึ่งมีค่าสูงขึ้นตลอดระยะเวลาของการหมักปุ๋ย สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสารประกอบแอโรแมติก อันบ่งชี้ถึงระดับการเกิดฮิวมิกของกระบวนการหมักปุ๋ย ทั้งนี้การศึกษาโดยใช้เทคนิคยูวีสเปกโทรสโกปียังช่วยสร้างความชัดเจน โดย จากภาพที่ 12 (ก) จะพบว่าการดูดกลืนของปุ๋ย 21 วัน (B1) มีค่าต่ำกว่าค่า 50 วัน (B2) 80 วัน (B3) และ 110 วัน (B4) ตามลำดับ เมื่อสังเกตสเปกตรัมของปุ๋ยหมัก N6 ดังแสดงในภาพที่ 12 (ข) แสดงการดูดกลืนที่เข้มบริเวณความยาวคลื่นระหว่าง 200 และ 220 nm และมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเกิดกระบวนการมิเนอไรเซชัน ของโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไนเตรต, กรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น ซึ่งจะแสดงการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นต่ำๆ ของยูวี บ่งชี้ได้ว่าเกิดกระบวนการมิเนอไรเซชัน



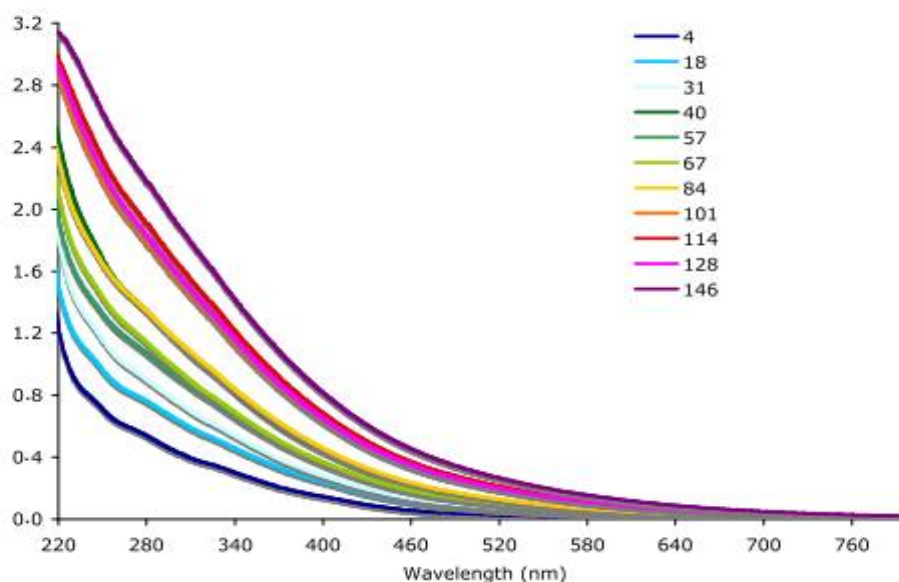
ภาพที่ 12 (ก) คือ ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับพืชสดและหมักกลางแจ้ง ระยะเวลา 21 วัน (B1) 50 วัน (B2) 80 วัน (B3) และ 110 วัน (B4)
 (ข) คือ ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับเศษซากพืชที่หมักมาแล้วและหมักในร่ม ระยะเวลา 2 วัน (N1) 10 วัน (N2) 21 วัน (N3) 30 วัน (N4) 50 วัน (N5) และ 120 วัน (N6)
 ที่มา: Domeizel et al. (2004)

Sellami et al. (2008) ศึกษาการหมักของกากตะกอนขยะกับกากของเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกเป็นระยะเวลา 182 วัน โดยใช้เทคนิคยูวีสเปกโทรสโกปีพบว่า การดูดกลืนคลื่นแสงของสารฮิวมิก ช่วงคลื่น 280 นาโนเมตรมีความสำคัญกับการพบโครงสร้างลิกนินและควิโนนในสารฮิวมิก ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมัก ช่วงคลื่น 472 นาโนเมตร พบโครงสร้างแอโรแมติกในช่วงระยะสุดท้ายของกระบวนการหมัก และการใช้อัตราส่วน E_4/E_6 E_2/E_6 และ E_2/E_4 เพื่อประเมินระดับของฮิวมิฟิเคชัน และพบว่าอัตราส่วน E_4/E_6 เมื่อระยะเวลาการหมักยาวนานขึ้นอัตราส่วน E_4/E_6 จะลดลงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลิกนินไปเป็นแอลิฟาติก อัตราส่วน E_2/E_6 และ อัตราส่วน E_2/E_4 เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นอัตราส่วนนี้ก็จะลดลงแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายอย่างรวดเร็วของสารอินทรีย์ โดยทิศทางของอัตราส่วน E_2/E_6 และ อัตราส่วน E_2/E_4 มีการเปลี่ยนแปลงเป็นกระบวนการเกิดกรดฮิวมิกที่คล้ายกัน ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กราฟการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน E_4/E_6 E_2/E_6 และ E_2/E_4 ตลอดกระบวนการหมัก 0 ถึง 200 วัน
ที่มา: Sellami et al. (2008)

Albrecht et al. (2011) ศึกษาการเปรียบเทียบยูวีสเปกโทรสโกปี(UV-spectro) กับเอ็มเอ็นอาร์(MNR) เพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบการเกิดกรดฮิวมิกของการทำปุ๋ยหมักจากขยะสีเขียว และกากตะกอนน้ำเสีย เป็นระยะเวลา 4 18 31 40 57 67 84 101 114 128 และ 146 วัน โดยใช้เทคนิค UV-Vis ศึกษารูปร่างของสเปกตรัมที่ลดลงพร้อมกับความยาวคลื่นระหว่าง 220-800 นาโนเมตรที่เพิ่มขึ้น พบว่าการปรากฏไหล่การดูดกลืนระหว่าง 250 -300 นาโนเมตรซึ่งเป็นลักษณะของการพบสารประกอบแอมโรแมติกโดยการดูดกลืนของพันธะคู่ C=C C=O และ N=N และการดูดกลืนแสงที่ 460 -480 นาโนเมตร วันที่ 146 มีการดูดกลืนแสงสูงที่สุดตลอดช่วงความยาวคลื่น แสดงถึงการดูดกลืนของสารอินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการฮิวมิฟิเคชัน ดังภาพที่ 14 และนอกจากนี้อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสง Q_2/Q_6 Q_4/Q_6 และ Q_2/Q_4 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของอัตราส่วนทั้งหมดระหว่างวันที่ 4 และ 18 หลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ถึงวันที่ 84 และมีค่าลดลงในช่วงสุดท้ายของกระบวนการทำปุ๋ยหมักซึ่งมีค่า 31.1 5.8 และ 5.4 สำหรับ Q_2/Q_6 Q_4/Q_6 และ Q_2/Q_4 ตามลำดับ ดังตารางที่ 9 โดยช่วง 4-18 วันแรกเป็นช่วงที่มีการย่อยสลายอย่างรวดเร็วของโปรตีนและไขมัน และประมาณสามสัปดาห์ของการทำปุ๋ยหมักค่าอัตราส่วนทั้งหมดเริ่มคงที่ระหว่างวันที่ 18 และ 84 บ่งชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟีนอลและหมู่เบนซีนคาร์บอกซิลในโครงสร้างของสารฮิวมิก ค่าอัตราส่วน Q_4/Q_6 ที่มีค่าน้อยลงจะใช้ในการกำหนดลักษณะของการเกิดสารฮิวมิก



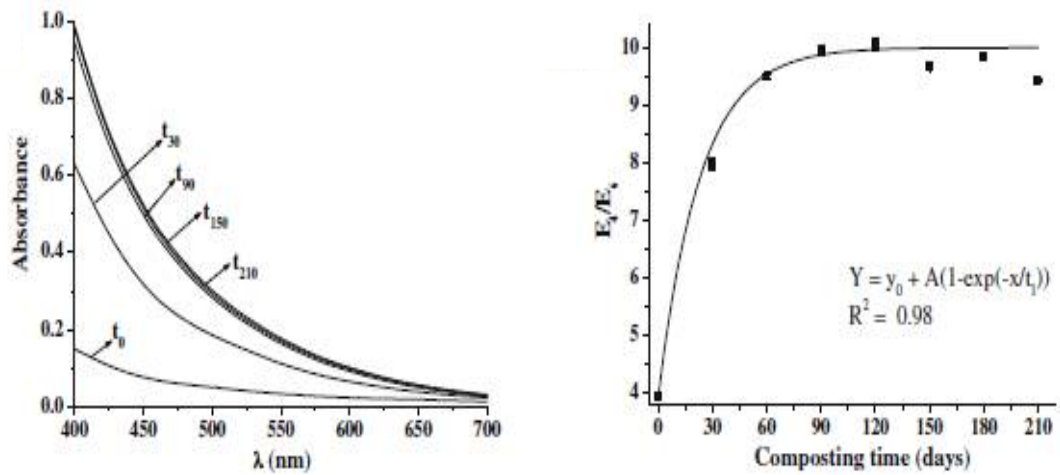
ภาพที่ 14 วิวัฒนาการของการดูดกลืนรังสียูวีของสารฮิวมิก ระหว่างวันที่ 4 ถึง 146 วัน
ที่มา: Albrecht et al. (2011)

ตารางที่ 9 ตารางค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตรต่อ 472 นาโนเมตร (Q_2 / Q_4) ที่ความยาวคลื่น 280 ต่อ 664 นาโนเมตร (Q_2/Q_6) และที่ความยาวคลื่น 472 ต่อ 664 นาโนเมตร (Q_4/Q_6) ของตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ศึกษา

Time (d)	Q_2/Q_6	Q_4/Q_6	Q_2/Q_4
4	275.4	23.4	11.8
18	55.7	6.9	8.1
31	57.0	7.4	7.7
40	50.1	7.3	6.9
57	58.4	8.4	6.9
67	59.2	8.4	7.1
84	53.6	8.2	6.5
101	40.0	6.7	6.0
114	37.9	6.5	5.8
128	41.5	7.0	5.9
146	31.1	5.8	5.4

ที่มา: Albrecht et al. (2011)

Lucima et al. (2010) ศึกษาลักษณะของสารอินทรีย์หมักจากวัสดุเหลือใช้โดยวิธีทางกายภาพเป็นระยะเวลา 210 วัน และตรวจวัดด้วยสเปกโทรสโกปี พบว่าสเปกตรัมของการดูดแสงยูวี-วิสเปกโทรสโกปีและวิลิเบิล ของสารฮิวมิกเมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างในความเข้มข้นของการดูดกลืนแสงในแต่ละกองจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นจากระบวนการฮิวมิฟิเคชัน ภาพที่ 15 (ก) สเปกตรัมของวัสดุคล้ายสารฮิวมิกที่สกัดจากดิน P2 P3 และ P4 แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของการดูดกลืนเมื่อเวลาผ่านไป ภาพที่ 15 (ข) พบว่าอัตราส่วน E_4/E_6 เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนคลื่นแสง ที่ 465 นาโนเมตรและ 665 นาโนเมตร บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงจากแอลิแฟติกไปเป็นแอโรแมติกที่เสถียร อัตราส่วน E_4/E_6 จะคงที่ 90 วัน และมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสารฮิวมิกที่สกัดจากดิน ซึ่งให้เห็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่าในระดับการรวมตัวกันของโครงสร้างที่เป็นแอลิแฟติก และโครงสร้างที่เป็นแอลิแฟติกมากกว่าและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันและหมู่คาร์บอกซิลิกที่สูงกว่า



(ก)

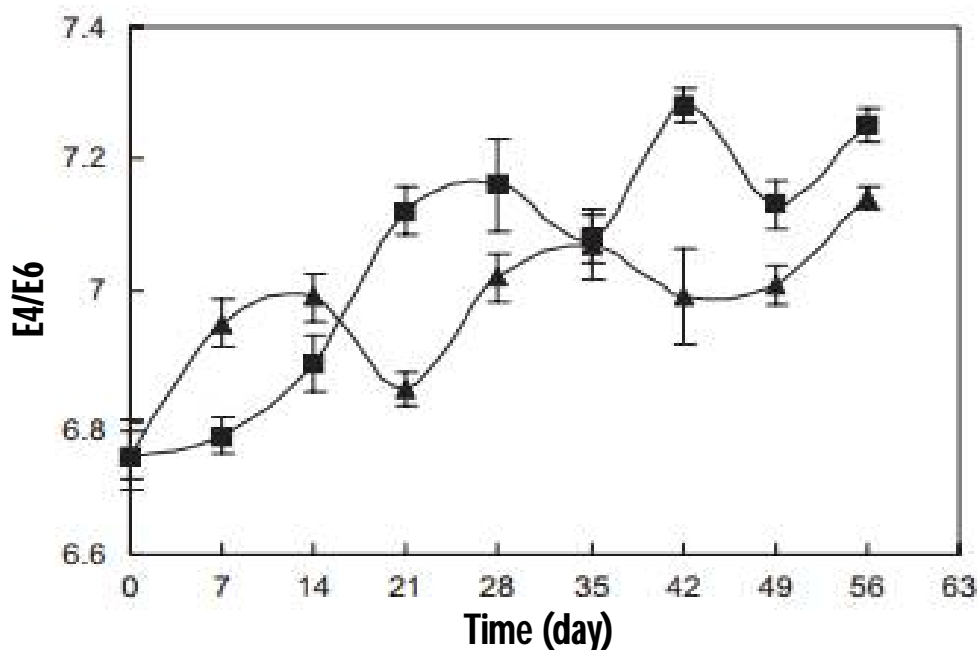
(ข)

ภาพที่ 15 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดคล้ายสารฮิวมิก ของวัสดุ P2 P3 และ P4 ที่หมักเป็นระยะเวลา 210 วัน

(ข) การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน E_4/E_6 ของสารที่คล้ายสารฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมัก P3 ที่หมักเป็นระยะเวลา 210 วัน

ที่มา: Lucima et al. (2010)

Zeng et al. (2008) ศึกษาผลของกระบวนการย่อยสลายลิกนินในฟางข้าวโดยจุลินทรีย์กลุ่มลิกนินโอไลติกสองชนิดที่แตกต่างกัน คือ *Phanerochaete chrysosporium* (เชื้อราขาวที่ทำให้เกิดรากเน่า) และ *Streptomyces badius* (แอคติโนมัยซีส) ที่มีผลต่อคุณภาพของฮิวมัส ในระหว่างการบ่ม 56 วันที่ 30 องค์พบว่ากระบวนการย่อยสลายลิกนินสามารถบ่งบอกสารสกัดจากฮิวมิก (HE) กรดฮิวมิก (HA) และกรดฟัลวิก (FA) ได้ โดยค่าอัตราส่วน E_4/E_6 ของกรดฮิวมิกใช้อธิบายลักษณะของกรดฮิวมิก ดังภาพที่ 16 ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกวัดได้ในระหว่างการหมัก ค่าการดูดกลืนแสงที่ 465 และ 665 นาโนเมตร ที่เรียกว่าอัตราส่วน E_4/E_6 ซึ่งให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน E_4/E_6 เป็นตัวบ่งชี้ขนาดโมเลกุล การควบแน่น (condensation) และ การเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันเป็นวงให้กลายเป็นโครงสร้างแอโรแมติก ค่าอัตราส่วน E_4/E_6 ที่มีค่าสูงเกี่ยวข้องกับการพบสารประกอบอินทรีย์ที่มีความเป็นแอโรแมติกต่ำและไม่อยู่ในรูปของพอลิเมอร์โดยจะถูกเปลี่ยนรูปได้ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ลงไปในดินค่าอัตราส่วน E_4/E_6 ของกรดฮิวมิกนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่ม 56 วันอันบ่งชี้ถึงการลดลงของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของกรดฮิวมิก เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะทำให้กรดฮิวมิกลดลงหรือโครงสร้างแอโรแมติกลดลง



ภาพที่ 16 อัตราส่วน E_4/E_6 ของกรดฮิวมิกในดินที่มีการใส่เชื้อ *P.chrysosporium* (■) และ *S. Badius* (▲) หลังการบ่ม 65 วัน
ที่มา: Zeng et al. (2008)

Cunha et al. (2009) ศึกษาการจำแนกลักษณะของฮิวมิกจากดินของป่าอะเมซอน โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ศึกษาชนิดของดิน 3 ชนิด คือ กลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่มีการปนเปื้อนของสารพิษจากเกษตรกรรม (ASF) กลุ่มดินที่มีการปนเปื้อนสารพิษจากเกษตรกรรม (CAS) และกลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่ไม่มีการปนเปื้อนของสารพิษ (NASF) เมื่อนำไปตรวจวัดโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่าดินที่มีค่า $\text{Log } E$ น้อยกว่า 0.6 ซึ่งหมายถึงมีความเสถียรมาก อยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน (Tan, 2003) คือกลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่มีการปนเปื้อนของสารพิษจากเกษตรกรรม และกลุ่มดินที่มีการปนเปื้อนสารพิษจากเกษตรกรรมที่ต่างมีค่า $\text{Log } E$ เท่ากับ 0.5 ขณะที่กลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่ไม่มีการปนเปื้อนของสารพิษมีค่า $\text{Log } E$ เท่ากับ 0.7 (ตารางที่ 10) ดังนั้น การทำการเกษตรโดยเฉพาะการเติมปุ๋ยหมักอาจมีอิทธิพลสำคัญต่อคุณภาพของสารฮิวมิก และการปนเปื้อนของสารพิษอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของกรดฮิวมิกจึงทำให้บริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารพิษจากการทำเกษตรกรรมมีค่า $\text{Log } E$ ต่ำกว่าดังกล่าว

ตารางที่ 10 ความแตกต่างในคุณสมบัติเชิงแสงในกลุ่มของกรดฮิวมิก

กลุ่มตัวอย่าง	log E
กลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่มีการ ปนเปื้อนของสารพิษจาก เกษตรกรรม (ASF)	0.5
กลุ่มดินที่มีการปนเปื้อนสารพิษ จากเกษตรกรรม (CAS)	0.5
กลุ่มดินบริเวณป่าไม้ที่ไม่มีการ ปนเปื้อนของสารพิษ (NASF)	0.7

ที่มา: Cunha et al. (2009)



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แบ่งกระบวนการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่ 1 การทำปุ๋ยหมัก การหมักปุ๋ย การเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก และการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักมาสกัดสารอินทรีย์ ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน โดยเปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรกับพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ และขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงแผนผังการดำเนินการทดลองโดยรวมของการศึกษาครั้งนี้ไว้ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์หรือการทดลอง	วิธีการทดลอง	เครื่องมือที่ใช้
พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของปุ๋ยหมัก		
สี	วัดค่าสี	ชุดทดสอบสีดิน
กลิ่น ลักษณะของปุ๋ยหมัก	การสังเกต	จมูกทดสอบกลิ่น
อุณหภูมิ	วัดอุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์
ความชื้น (Moiture)	อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C	เครื่องอบลมร้อน (Hot air oven)
ค่าความเป็น กรด-ด่าง (pH)	วิธีโพเทนชิโอเมตรี (Potentiometry)	เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) *	วัดค่าการนำไฟฟ้าปริมาณของไอออนที่ละลายในน้ำ	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	คำนวณจากค่า TOC	เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	คำนวณระหว่างค่า TC และ TN **	เครื่องวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด และเครื่องกลั่นไนโตรเจน
ปริมาณธาตุอาหารหลัก - ไนโตรเจน (Total N) ** - ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅) * - โพแทสเซียม (K ₂ O) *	วิธี Kjeldahl Method วิธี Digestion with perchloric acid วิธี Atomic Absorption Spectrophotometer	เครื่องกลั่นไนโตรเจน เครื่องอัลตราไวโอเล็ต และ วิธีเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องเฟลมโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 11 วิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

พารามิเตอร์หรือการทดลอง	วิธีการทดลอง	เครื่องมือที่ใช้
พารามิเตอร์ทางการเกิดสารชีวมีก		
การสกัดสารชีวมีก *	วิธีมาตรฐานของ IHSS	เครื่องเขย่า และเครื่องหมุนเหวี่ยง (เครื่อง Centrifuge)
ปริมาณธาตุองค์ประกอบ CHON *	วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของกรมพัฒนาที่ดิน	เครื่อง AA, เครื่อง UV, เครื่องกลั่นไนโตรเจน
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารชีวมีก	วิธีสเปกโทรสโกปี	เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Uv Visible spectroscopy)

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

** ข้อมูลจากงานวิจัยของภัทรพร (2555)

3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 12 โดยมีการระบุถึงบริษัทผู้ผลิต และ CAS NO. (Chemical Abstracts Service number) ของสารแต่ละชนิด

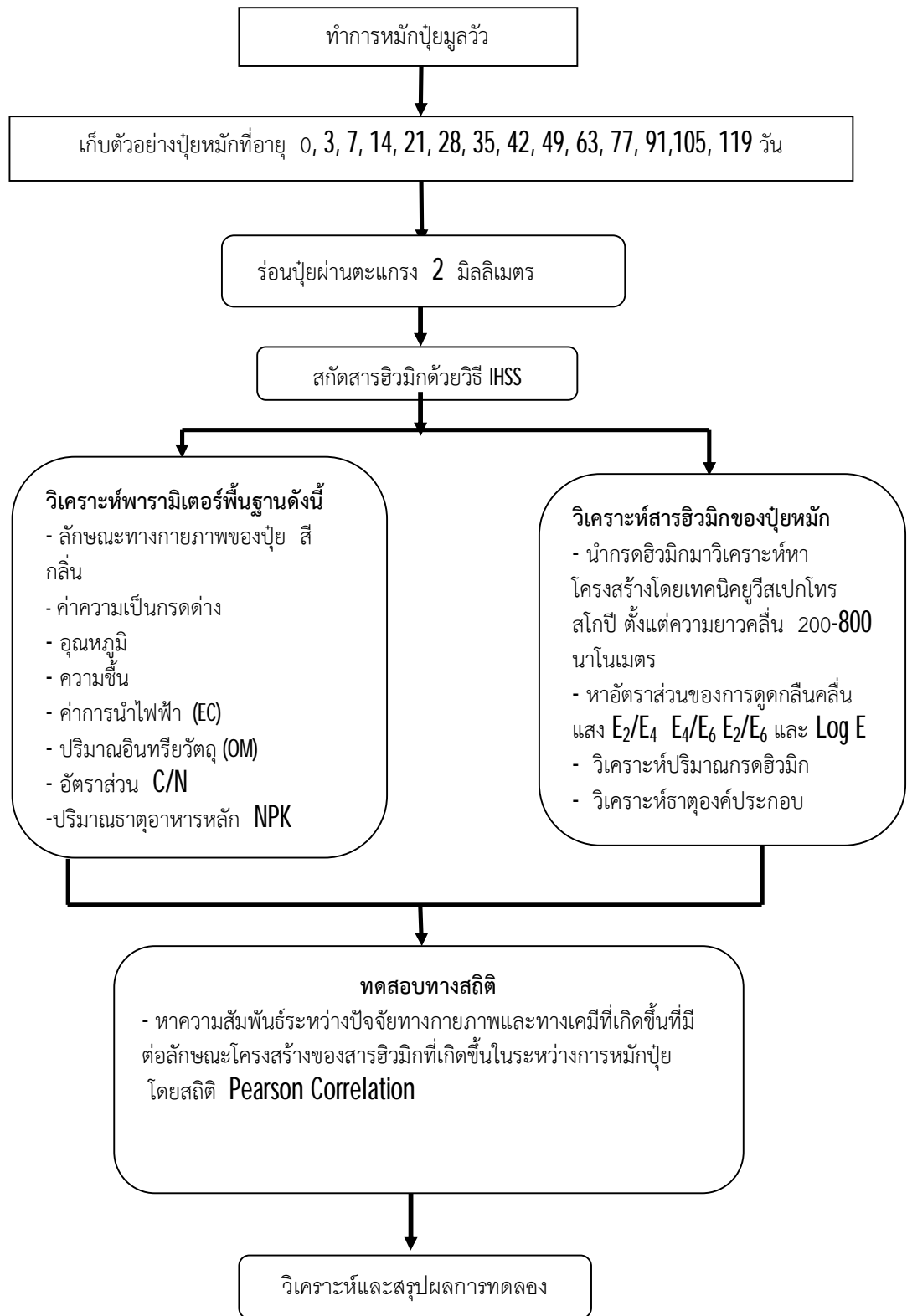
ตารางที่ 12 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS NO. และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS number	บริษัท
สำหรับสกัดสารชีวมีก		
Hydrochloric acid	Cas No.7647-01-0	บริษัท Merck
Sodium hydroxide	Cas No. 1310-73-2	บริษัท Merck
Sodium bicarbonate	Cas No. 144-55-8	บริษัท Univar
Hydrofluoric acid	Cas No. 7664-39-3	บริษัท Univar
น้ำอุลตราเพียว	-	ม.ราชภัฏหม่มบ้านจอมบึง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงรายการอุปกรณ์ เครื่องแก้ว เครื่องมือ ยี่ห้อและบริษัท

เครื่องมือที่ใช้	รุ่น /ยี่ห้อ	บริษัท
เครื่องหมุนปั่นเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifuge)	Kubota 3700	แอฟฟินเทค จำกัด
เครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง	Pricisa 125 ASCS Swiss Quality	เบคไทย กรุงเทพ เคมีภัณฑ์
เครื่องเขย่าแนวราบ	GFL 3017	ไซเนอร์จีโซลูชั่น
เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer	Lamda 12	เปอร์กิน เอลเมอร์
เครื่อง N ₂ – evaporater	N-EVAP 111	สิทธิ์พรแอสโซซิเอต
ตู้ดูดความชื้น	Dry 100	ไซเนอร์จีโซลูชั่น
ตู้ดูดควัน	newlab 252	ไซเนอร์จีโซลูชั่น
เครื่องร่อน Sieve	As 200	ไซเนอร์จีโซลูชั่น
เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)	HI9803	หจก. ซายนิฟิคเคมีคอลซัพพลาย
เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH meter)	ID1000	หจก. ซายนิฟิคเคมีคอลซัพพลาย
ชุดทดสอบสีดิน (Munsell Soil Color Chart)	-	Kollmorgan corporation
ตู้อบ (Dry Oven)	Ecocell	Medcenter



ภาพที่ 17 แผนผังการทดลอง โดยภาพรวมของการศึกษา

3.3 ขั้นตอนการดำเนินวิจัย

3.3.1 การหมักและการเตรียมตัวอย่างปุ๋ย

ในการศึกษานี้ผู้ศึกษาได้ใช้ตัวอย่างปุ๋ยหมักซึ่งจัดทำขึ้นโดย ผศ.ดร.นันทธีรา สรรภณี โดยใช้พื้นที่ทำปุ๋ยหมักในตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม ซึ่งใช้ปุ๋ยหมักคือ ปุ๋ยมูลวัว ดังภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่าลักษณะปุ๋ยมูลวัวจะมีสีน้ำตาลเข้ม ลักษณะเป็นเนื้อละเอียดไม่ค่อยมีกลิ่นฉุน การศึกษาครั้งนี้กำหนดประเภทของปุ๋ยหมัก ที่ต้องการศึกษาคือ ปุ๋ยหมักสูตรมูลวัว ซึ่งในการผลิตปุ๋ยหมักครั้งนี้ใช้วัตถุดิบที่นำมาจากวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้โดยทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ดังตารางที่ 14 ซึ่งแบ่งแยกส่วนผสมตามสถานะ ดังนี้ คือ ชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก และชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้ง



ภาพที่ 18 ลักษณะของมูลวัว
ที่มา: จุฑาวรรณ (2557)

ชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก

- ปลายน้ำจืด จำนวน 8.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- กากน้ำตาล จำนวน 2.88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- สับปะรด จำนวน 0.29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- สารเร่งพด.2 จำนวน 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- รำละเอียด จำนวน 1.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้ง

- กระจุกวัวปน จำนวน 0.86 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- รำละเอียด จำนวน 1.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- มูลค่างควา จำนวน 0.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- ธาตุอาหาร จำนวน 0.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ยี่ห้อบิกโพล)
- โดโลไมท์ จำนวน 5.47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.2 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

ในการหมักปุ๋ยจะใช้วัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมจากวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐมดังภาพที่ 19 โดยใช้ส่วนผสมตามตารางที่ 14 ซึ่งจะแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ชุด ดังนี้



(ก) การแบ่งชุดทำผสมเพื่อทำปุ๋ยหมัก

(ข) การผสมปุ๋ยหมัก

ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทำปุ๋ยหมัก

(ก) การแบ่งชุดทำผสมเพื่อทำปุ๋ยหมัก

(ข) การผสมปุ๋ยหมัก

ที่มา: จุฬารวรรณ (2557)

ตารางที่ 14 ส่วนผสมของปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

ส่วนผสม	ปริมาณ	แหล่งที่มา	อายุส่วนผสม	
ชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก	ปลาน้ำจืด	ร้อยละ 8.98	กลุ่มเกษตรกรอินทรีย์ตำบลบางช้างอำเภอสามพรานจังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	กากน้ำตาล	ร้อยละ 2.99		
	สับปะรด	ร้อยละ 0.30		
	สารเร่ง พด.2	ร้อยละ 0.01		
	รำละเอียด	ร้อยละ 1.50		
ชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้ง	กระดุกวัวป่น	ร้อยละ 1.50	กลุ่มเกษตรกรอินทรีย์ตำบลบางช้างอำเภอสามพรานจังหวัดนครปฐม	1 เดือน
	รำละเอียด	ร้อยละ 0.90		
	มูลค่างคว	ร้อยละ 0.60		
	ธาตุอาหาร (Mg, Ca และ Fe)	ร้อยละ 0.60		
	โดโลไมท์	ร้อยละ 0.30		

ตารางที่ 14 ส่วนผสมของปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

ส่วนผสม	หน่วย	ปริมาณ	แหล่งที่มา	อายุ ส่วนผสม
มูลวัว	ร้อยละโดย น้ำหนัก	77.55	จังหวัดราชบุรี	2 เดือน
ขี้แสดนาเกลือ	ร้อยละโดย น้ำหนัก	5.47	นาเกลือ จังหวัดสมุทรสาคร	2 เดือน

โดยการทำปุ๋ยหมักสูตรมูลวัวจะใช้ส่วนผสมทั้ง 2 ชุดดังปริมาณที่กล่าวในข้างต้น และใช้มูลวัวเป็นวัตถุดิบหลักจำนวนร้อยละ 77.55 โดยน้ำหนัก (13 กระสอบ) นอกจากนี้ยังมีการเติมขี้แสดนาเกลือเพิ่มเข้าไปในปุ๋ยหมัก จำนวนร้อยละ 5.47 โดยน้ำหนัก การทำปุ๋ยหมักจะต้องทำในพื้นที่ที่ห่างไกลชุมชนเพื่อป้องกันกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนการทำปุ๋ยหมักนั้นจะเริ่มจากการผสมคลุกเคล้าส่วนผสมโดยนำเอามูลแต่ละชนิดที่เตรียมไว้มาใส่ในเครื่องบดผสม โดยการเติมน้ำเพื่อให้มูลแยกออกจากกันและผสมให้เข้ากันดังภาพที่ 20 ให้มีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60 จากนั้นใส่ขี้แสดนาเกลือ และใส่ส่วนผสมชุดที่ 1 ส่วนผสมน้ำหมัก และส่วนผสมชุดที่ 2 ส่วนผสมของแห้งตามปริมาณข้างต้น ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปบรรจุใส่กระสอบๆ ละ 15 กิโลกรัม ซึ่งกระสอบที่ใช้นี้จะต้องเป็นกระสอบที่ระบายอากาศได้ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบให้แน่น เพื่อนำกลับมาหมักต่อที่เรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร แล้วตั้งกระสอบขึ้นเรียงกันไป จะไม่ตั้งกระสอบปุ๋ยหมักชิดกันจนเกินไปเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบโดยใช้วัตถุดิบผสม
ที่มา: นัทธีรา (2555)

3.3.3 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์

ในการเก็บตัวอย่างนั้นจะเก็บตัวอย่างส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้ในการหมักปุ๋ย มาวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดก่อน จากนั้นเมื่อหมักปุ๋ยเสร็จแล้วจะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ย จากกระสอบอีกครั้งโดยก่อนเก็บตัวอย่างให้พลิกกลับกระสอบปุ๋ยหมักไปมา 2 ถึง 3 ครั้ง เพื่อให้ปุ๋ย ในกระสอบผสมกัน และบันทึกลักษณะอื่นๆของปุ๋ยหมักในกระสอบ เช่น สี กลิ่น ลักษณะการจับตัวของปุ๋ย เป็นต้น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยโดยใช้ปิ๊กเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตักปุ๋ยในแต่ละ กระสอบๆ ละประมาณ 3 ปิ๊กเกอร์ จนกระทั่งครบทุกกระสอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างบริเวณตรง กลางของกระสอบปุ๋ยเพื่อเป็นตัวแทนของปุ๋ยทั้งหมดซึ่งจะเก็บตัวอย่างปุ๋ย เมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0 3 7 14 21 28 35 42 49 63 77 91 105 และ 119 วัน ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่างด้วย ทุกครั้ง

3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์

นำตัวอย่างปุ๋ยที่เก็บมาตากให้แห้งใน Laminar flow ห้อง Clean room (วิธี Air Dry) จากนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ได้แก่ การคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุไม้ และโลหะอื่นๆ ออก และชั่งตัวอย่างปุ๋ยให้ได้ 500 กรัม จากนั้นนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 5.0 มิลลิเมตรจนกระทั่งเหลือปริมาณของแข็ง ที่ค้างอยู่บนตะแกรงไม่เกิน 25 กรัม และนำตัวอย่างทั้งหมดมาคัดแยกขนาดอนุภาคปุ๋ยโดยใช้ตะแกรง ขนาด 2.0 มิลลิเมตรหากปุ๋ยมีขนาดใหญ่ไม่สามารถร่อนได้ให้นำปุ๋ยมาตำให้ละเอียดก่อนแล้วจึง ทำการร่อน และนำปุ๋ยขนาดดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและพารามิเตอร์ที่ใช้ ใน การทดลองทั้งหมดซึ่งในการวิเคราะห์แต่ละครั้งต้องหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างทุกครั้ง ที่วิเคราะห์ไม่ว่าพารามิเตอร์ใดก็ตามและหากไม่ต้องการวิเคราะห์ในทันทีให้เก็บตัวอย่างไว้ในที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส โดยเมื่อต้องการวิเคราะห์พารามิเตอร์ใดๆ ก็ตามให้นำตัวอย่างออกมาไว้ในที่ อุณหภูมิห้องก่อนการวิเคราะห์ 24 ชั่วโมง

3.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย การหาค่าความชื้น ของตัวอย่าง การสกัดสารฮิวมิก การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์ มีรายละเอียดขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.4.1 การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture content)

การวัดความชื้นอาศัยหลักการหาความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการให้ ความร้อน ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่างนั่นเอง โดยชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงด้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบ ลมร้อน (EcoCell) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาผึ่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังอบ ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่าปุ๋ยหมักจะมีน้ำหนักคงที่กล่าวคือน้ำหนักหลังอบ มีความแตกต่างจากน้ำหนักที่ชั่งในครั้งก่อนไม่เกินร้อยละ 4 หากเกินกว่านี้ควรทำซ้ำใหม่ แล้วจึงนำ ค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความชื้นดังสมการ

สูตรการคำนวณค่าความชื้น

$$\text{ความชื้น(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}} \quad (2)$$

3.4.2 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-ด่างในส่วนของสารละลายด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

3.4.3 การวัดอุณหภูมิ (Temperature)

การวัดค่าอุณหภูมิจะทำทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก ด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์ โดยวัดอุณหภูมิที่กลางกระสอบของปุ๋ยหมัก และก่อนวัดอุณหภูมิจะต้องมีการพลิกกลับกระสอบปุ๋ยก่อนทุกครั้งเพื่อให้ปุ๋ยในกระสอบผสมกัน

3.4.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

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

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน} = \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (mg/g)}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/g)}} \quad (3)$$

3.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ เนื่องจากคาร์บอนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ โดยนำค่าร้อยละของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ คูณกับ "Van Bemmelen factor" ซึ่งเท่ากับ 1.724 ดังสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณอินทรีย์วัตถุ} = \text{ร้อยละของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์} \times 1.724 \quad (4)$$

3.4.5 การสกัดสารฮิวมิก

ทำการสกัดสารฮิวมิกเพื่อแยกชนิดและหาปริมาณของกรดฮิวมิก (humic acid; HA) และกรดฟัลวิก (fulvic acid; FA) ในปุ๋ยหมักด้วยเทคนิค Isolation of IHSS Soil Fulvic and Humic Acid ของ Methods of Soil Analysis, Part 3 Chemical methods (Sparks et al., 1996) โดยชั่งปุ๋ย 5.0 กรัมใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด - ด่างให้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมล เป็น 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าแนวระนาบความเร็วรอบ 150 RPM เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารละลายปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 RPM เป็นเวลา 5 นาที สารละลายใส ที่ได้จะเป็นกรดฟัลวิก Extract1 นำตะกอนมาปรับ ค่าความเป็นกรด - ด่างให้มากกว่าหรือเท่ากับ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมล ปรับปริมาตรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมล เป็น 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าและความเร็วรอบเท่าเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไป นำสารละลายปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2500 RPM 10 นาที ทิ้งตะกอนที่เป็นส่วนของฮิวมินกับดินทิ้งไป นำสารละลายใสมาตกตะกอนกรดฮิวมิกด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 โมล นำไปเซ็นตริฟิวจ์ 5 นาที เพื่อแยกสารละลายใสที่เป็นกรดฟัลวิก Extract2 ออกมา จากนั้นจะทำการสกัดให้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์อีกครั้ง โดยการนำตะกอนฮิวมิกมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมล กรดไฮโดรคลอริก และกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 0.3 โมล 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ที่ทำด้วยเทฟลอน เขย่าสารละลายทิ้งไว้ข้ามคืน นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยง จะได้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์บนที่กน้ำหนักเปียก (wet weight) นำไปทำให้แห้ง (Freeze dry) แล้วจึงบันทึกน้ำหนักแห้ง (dry weight)

3.5 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

ชั่งกรดฮิวมิก 5 มิลลิกรัม ละลายด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เข้มข้น 0.05 โมลาร์ 25 มิลลิลิตร เจือจางสารละลายเป็น 2 เท่าในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimatsu รุ่น Lamda 12 และคำนวณอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 472 นาโนเมตร (E_2/E_4) และความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 665 นาโนเมตร (E_2/E_6) อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_4/E_6)

3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

หลักการ การวิเคราะห์ทางสถิติเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันกับพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) เวอร์ชัน 16.0

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักศึกษาจากปุ๋ยหมักมูลวัวที่ผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กระจุกวัวปน รำละเอียด มูลค่างควา ผสมกับธาตุอาหารรองที่ขาดด้วยน้ำหมักที่ประกอบด้วยปลา กากน้ำตาล สับปะรด สารเร่งพด.2 เก็บตัวอย่างตลอดการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน ในวันที่ 0 3 7 14 21 28 35 42 49 63 77 91 105 และ 119 วัน ตามลำดับ ศึกษาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยหมักจากโครงสร้างกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักโดยใช้เทคนิคยูวีสเปกโทรสโกปีร่วมกับลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก อันนำไปสู่การประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักและอายุของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมตลอดจนระยะเวลาที่ควรเก็บรักษาเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

4.1 คุณลักษณะของปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

กรมวิชาการเกษตรได้มีการควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายให้เกษตรกร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยหมักที่ศึกษานี้กับคุณลักษณะตามเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548) พบว่าเป็นไปตามตารางที่ 15 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดของปุ๋ยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร ที่ต้องมีขนาดไม่เกิน 12.5 x 12.5 มิลลิเมตร และไม่ปรากฏปริมาณหิน และกรวดที่มีขนาดเกินกว่า 5 มิลลิเมตร อีกทั้งตรวจไม่พบพลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ ตลอดระยะเวลาการหมักจากผลการทดลองในวันแรกของการหมัก (วันที่ 0) และวันสิ้นสุดกระบวนการหมัก (วันที่ 119) ขนาดของปุ๋ยหมักมีขนาด 0.2 มิลลิเมตร และไม่พบปริมาณหิน กรวดแร่ วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ สิ่งเจือปนต่างๆ โดยขนาดของปุ๋ยหมักผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามกรมวิชาการเกษตร

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการหมัก โดยระยะแรกของการหมักปุ๋ยจะต้องมีการพรมน้ำที่ผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์คลุกเคล้าให้ทั่วกองปุ๋ยหมักอย่างทั่วถึง ทั้งนี้ความชื้นที่แนะนำสำหรับ ปุ๋ยหมักไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 40-60 เพื่อให้มีออกซิเจนอย่างเพียงพอ เพราะนอกจากจะเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์แล้วยังเป็นตัวพาให้จุลินทรีย์สัมผัสกับวัตถุดิบได้อย่างทั่วถึงช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์อีกด้วย และถ้าหากมีน้ำมากเกินไปอากาศจะไม่สามารถผ่านเข้าออกได้ อาจทำให้เกิดการหมักแบบไร้ออกซิเจนขึ้น ซึ่งจะส่งกลิ่นรบกวนและก่อให้เกิดเชื้อก่อโรคได้อีกด้วย (ฉัตรชัย, 2552; Pace et al., 1995; Vi-Neh, 2000) โดยในวันแรกของการหมักความชื้นของปุ๋ยหมักมีค่าร้อยละ 41.3 (วันที่ 0) จากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจากการระเหยของน้ำไปจนถึงวันสิ้นสุดกระบวนการหมักมีค่าร้อยละ 10.4 โดยความชื้นของปุ๋ยหมักตั้งแต่วันที่ 7 เป็นต้นไปผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักที่ดีต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ซึ่งพบว่าปุ๋ยหมักนี้มีปริมาณสารอินทรีย์วัตถุ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในระยะการหมัก 2 เดือนแรก (วันที่ 0 - 63) โดยมีค่าอยู่ในช่วง

ร้อยละ **31.6 – 44.4** จากนั้นปริมาณอินทรีย์วัตถุมีแนวโน้มลดต่ำลงและไม่เหมาะที่จะนำมาเพื่อการจำหน่าย

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ให้มีค่าอยู่ระหว่าง **5.5 – 8.5** โดยตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วง **5.8 - 6.8**

ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่น้อยกว่า **6** เดซิซีเมนต่อเมตร โดยตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วง **3.3 – 22.5** เดซิซีเมนต่อเมตร เนื่องจากการเติมขี้คุดนากลือเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร ดังนั้นการใช้ปุ๋ยหมักนี้จึงควรใช้เพียงปริมาณน้อยเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาดินเค็ม

ปริมาณธาตุอาหารหลักได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ของปุ๋ยหมักมูลวัวมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ที่กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ **1.0** สำหรับไนโตรเจน และไม่น้อยกว่าร้อยละ **0.5** สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม โดยปุ๋ยหมักที่วิจัยมีปริมาณไนโตรเจนฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมอยู่ในช่วงร้อยละ **1.3 – 2.2 0.6 – 1.9** และ **1.2 – 2.1** ตามลำดับ

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในปุ๋ยหมักเป็นสารที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ บ่งบอกถึงการหมักปุ๋ยที่สมบูรณ์ควรมีค่าน้อยกว่า **20:1** (Stevenson, 1994; Fourti et al., 2010) โดยเมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมัก (วันที่ 0) มีค่า **20:1** แต่เมื่อกระบวนการหมักผ่านไปอัตราส่วนนี้มีค่าลดลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร โดยมีค่าอยู่ในช่วง **11.1 – 18.3** (วันที่ 3 -119)

นอกจากนี้ปุ๋ยหมักนี้ตรวจไม่พบสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และปรอท ซึ่งเป็นสารพิษที่เกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ต้องมีค่าไม่เกิน **50 5 300 500 500** และ **2** มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ดังนั้นจากคุณลักษณะของปุ๋ยหมักพบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุการหมักตั้งแต่ 35 วัน เป็นต้นไปจะมีอุณหภูมิเย็นลงเท่ากับอุณหภูมิภายนอก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 และสามารถนำมาใช้พิจารณาความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

ตารางที่ 15 คุณลักษณะปุ๋ยหมักมูลวัวเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร

คุณลักษณะ	เกณฑ์มาตรฐานกำหนด	ระยะเวลาการหมัก (วัน)													
		0	3	7	14	21	28	35	42	63	77	91	105	119	
ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน $\leq 12.5 \times 12.5$ มิลลิเมตร	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
ปริมาณหินและกรวดขนาด 5 มม.	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตรไม่เกิน ร้อยละ 5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.2	1.5	2.0	1.0	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	
พลาสติกแก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	
ปริมาณความชื้นและสิ่งระเหยได้	ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก	41.3	36.4	34.4	30.0	27.7	19.4	21.1	21.1	16.0	14.9	14.4	11.7	10.4	
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 30	44.4	44.1	34.0	31.6	34.6	41.1	37.4	32.8	36.3	29.3	28.7	33.7	29.1	
ความเป็นกรดต่าง	5.5 – 8.5	6.7	6.5	6.8	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.6	5.8	

ตารางที่ 15 คุณลักษณะปุ๋ยหมักมูลวัวเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตร (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์มาตรฐานกำหนด	ระยะเวลาการหมัก (วัน)												
		0	3	7	14	21	28	35	42	63	77	91	105	119
ค่าการนำไฟฟ้า(EC: Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร	6.9	8.9	14.4	3.3	12.9	9.0	18.3	22.5	9.3	13.8	17.4	12.0	12.4
ไนโตรเจน(Total Nitrogen) ¹	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก	1.3	2.2	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.6
ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅) ¹	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	1.2	1.3	1.7	1.5	1.9	1.2	1.1	1.4	0.6	1.2	1.4	1.1	1.6
โพแทสเซียม (K ₂ O) ¹	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	1.2	1.9	2.1	1.9	2.0	1.9	2.1	2.1	1.9	1.7	2.0	2.0	1.7
C/N ratio โดยน้ำหนักอะตอม ²	น้อยกว่า 20:1	20.0	11.9	16.8	15.0	15.4	18.3	16.8	14.8	14.9	12.9	11.8	13.4	11.1
อุณหภูมิ	อุณหภูมิลดลงเท่ากับบรรยากาศภายนอก	37	38.3	34	30	31.5	34	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*หมายเหตุ สำหรับปริมาณสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และปรอท ทำการทดลองและผ่านเกณฑ์มาตรฐานพบว่า มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร คือ มีค่าไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ³

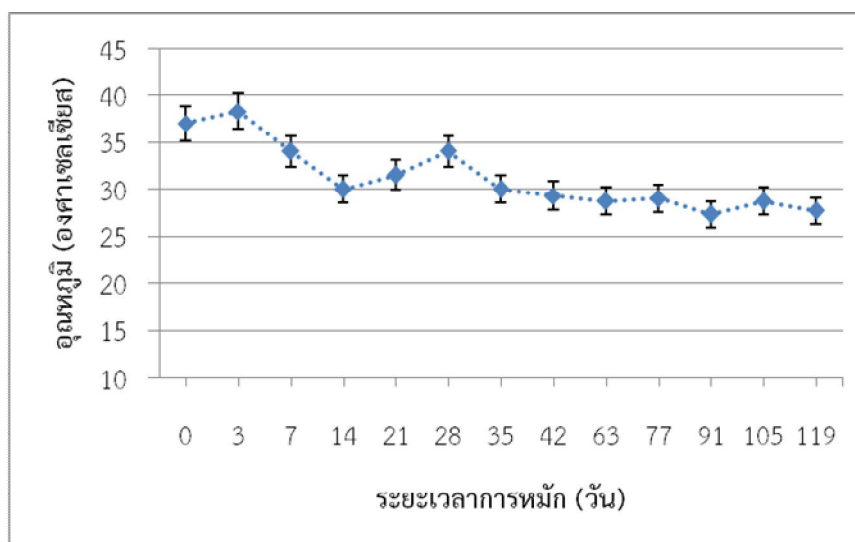
ที่มา : ¹ภัทรพร (2555); ²จุฑาวรรณ (2558); ³อมรรัตน์ (2559)

ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

4.2 การกำหนดระยะป่วยหนักตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

อายุของป่วยหนักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะ ภาพที่ 21 ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 1 -34) ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (วันที่ 35) และระยะที่ป่วยเจริญเต็มที่ (วันที่ 36 -119) มีรายละเอียดคุณลักษณะของป่วยหนักที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 15 และตารางที่ 16



ภาพที่ 21 การแบ่งระยะป่วยหนักมูลวัวตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตารางที่ 16 ลักษณะของป่วยหนักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ระยะการหมัก	ระยะเวลา	อุณหภูมิ (°C)	สี	กลิ่น	ลักษณะของป่วย
ระยะเริ่มผสม	วันที่ 0	37	สีเหมือนวัสดุตั้งต้น	กลิ่นเหมือนวัตถุดิบตั้งต้นของส่วนผสมป่วยหนัก	เห็นส่วนผสมของวัสดุหมักต่างๆชัดเจน
ระยะอุณหภูมิสูง	วันที่ 1-34	30.0-38.3	สีน้ำตาลอ่อน	กลิ่นรุนแรงของแก๊สแอมโมเนีย	มองเห็นวัตถุดิบตั้งต้นได้ชัดเจน
ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา	วันที่ 35	30	สีน้ำตาลเข้ม	มีกลิ่นแอมโมเนียปานกลาง	เนื้อปุ๋ยมีขนาดเล็กกลางปุ๋ยมูลีลักษณะร่วนขึ้น มองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้นเดิม
ระยะที่ป่วยเจริญเต็มที่	วันที่ 36-119	27.7-29.3	สีน้ำตาลเข้ม	กลิ่นแอมโมเนียลดน้อยลงไม่มีกลิ่นฉุน	มองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้นเหลืออยู่ ปุ๋ยมูลีลักษณะร่วนขึ้น

4.2.1 ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสมคือวันแรกของการทำปุ๋ยหมัก (วัน0) ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าสูงที่สุดถึงร้อยละ 44.4 ส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงที่สุด 20.0 เช่นเดียวกัน การคลุกเคล้าส่วนผสมทำให้อุณหภูมิของปุ๋ยในวันนี้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 37 องศาเซลเซียส ภาพที่ 22 ปุ๋ยหมักมีกลิ่นจากวัตถุดิบตั้งต้นของส่วนผสมและสังเกตเห็นวัตถุดิบต่างๆดังกล่าวในเนื้อปุ๋ยได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 22 ลักษณะการหมักของปุ๋ยหมักมูลวัววันเริ่มผสม (0 วัน)

4.2.2 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

อุณหภูมิของปุ๋ยในช่วงนี้จะมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ ยิ่งอัตราการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์มากขึ้นอุณหภูมิในปุ๋ยหมักก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งในช่วงอุณหภูมิสูงนี้ (วันที่ 1 -34) อุณหภูมิของปุ๋ยหมักจะอยู่ในช่วง 30.0 – 38.3 องศาเซลเซียส ปุ๋ยในระยษะนี้มีกลิ่นฉุนรุนแรงจากกระบวนการหมัก และยังสามารถมองเห็นวัตถุดิบตั้งต้นได้

4.2.3 ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase)

ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาเป็นวันที่อุณหภูมิในกองปุ๋ยเพิ่งจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิภายนอกในวันที่ 35 มีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส โดยเนื้อปุ๋ยมีขนาดเล็กลง ปุ๋ยมีลักษณะร่วนขึ้น มองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้นเดิม มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเหลือร้อยละ 37.3 และไม่มีกลิ่นฉุนเหมือนในระยะอุณหภูมิสูง

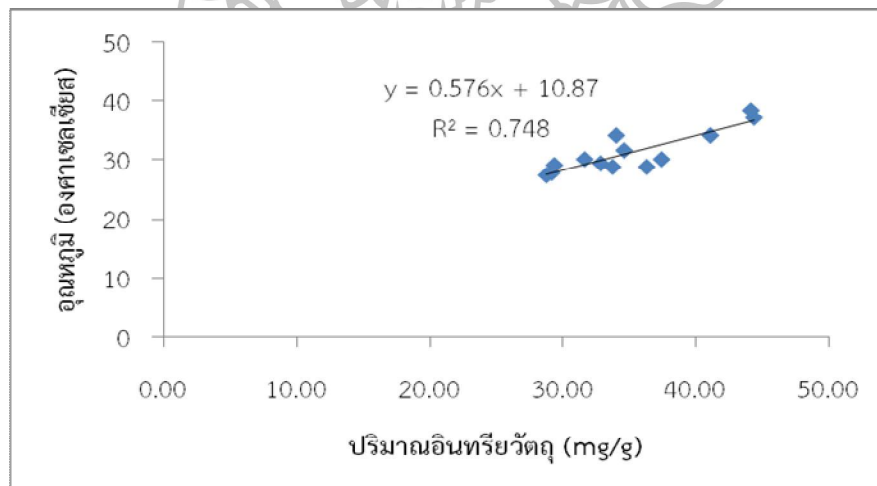
4.2.4 ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (Mature phase)

ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (วันที่ 36 -119) ระยะนี้อุณหภูมิปุ๋ยหมักจะคงที่เท่ากับอุณหภูมิภายนอกมีค่าอยู่ในช่วง 27.7 – 29.3 ปุ๋ยหมักจะไม่มีกลิ่นฉุนและมองไม่เห็นวัตถุดิบตั้งต้นเหลืออยู่ ดังภาพที่ 23



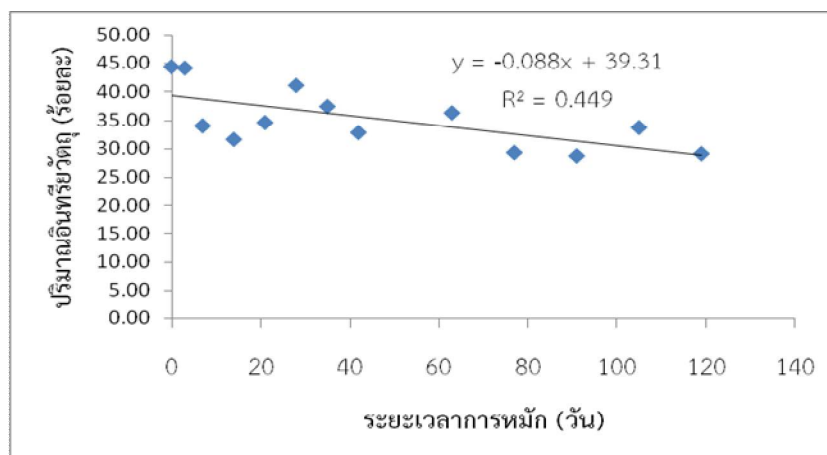
ภาพที่ 23 ลักษณะของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักวันที่ 119

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการหมักพบว่า อุณหภูมิในกองปุ๋ยสัมพันธ์กับการย่อยสลายของจุลินทรีย์โดยยังมีปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นมากอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะมีค่ามาก แต่เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลง การทำงานของจุลินทรีย์ลดลงดังภาพที่ 24 ($r = 0.865, p < 0.01$)

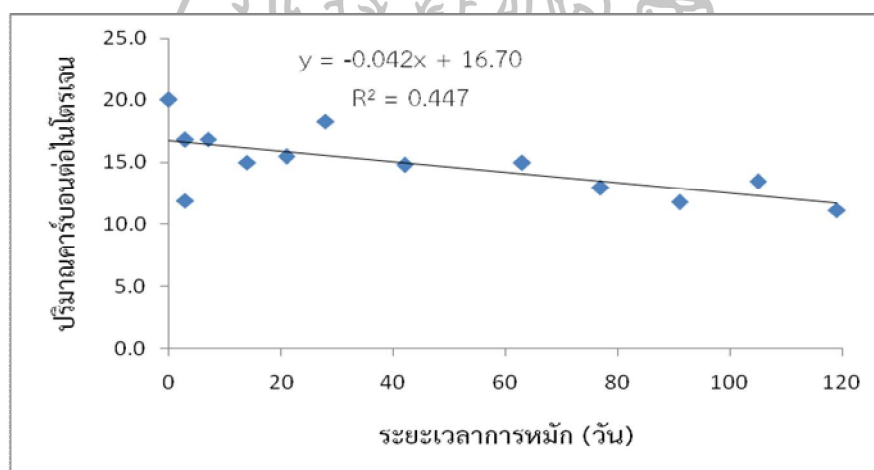


ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ($r = 0.865, p < 0.01$)

จากการพิจารณาปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = -0.671$ และ $-0.655, p < 0.01$) ดังภาพที่ 25 (ก) และ (ข) โดยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงร้อยละ 34.5 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าเพียง 11.1 สอดคล้องกับการศึกษาของ Bustamante et al. (2008) ที่หมักปุ๋ยจากของเสียจากโรงงานไวน์กับ มูลสัตว์ที่พบว่าทั้งอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนล้วนลดลงในระยะนี้เช่นกัน



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.671$, $p < 0.01$)



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.655$, $p < 0.01$)

ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก

4.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นและระยะเวลาการหมัก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นมีความสัมพันธ์กันตลอดระยะเวลาการหมัก ตารางที่ 17 โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นอุณหภูมิและความชื้นของปุ๋ยหมักลดลง ($r = -0.794$ และ -0.869 ตามลำดับ, $p < 0.01$) อันเนื่องมาจากระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น กระบวนการของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารตั้งต้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อสารตั้งต้นค่อยๆ หมดไป ทำให้อุณหภูมิของปุ๋ยหมักที่เกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงทำงานค่อยๆ เย็นลง สอดคล้องกับการศึกษาของ กาญจนนา (2557) ที่พบว่าปริมาณแบคทีเรียในปุ๋ยหมักมูลหมูและมูลไก่ ที่เมื่อปุ๋ยเข้าระยะเจริญเต็มที่ จะลดลงจากช่วงภาวะอุณหภูมิสูงประมาณ 5-9 เท่า เช่นเดียวกับการระเหย

ของน้ำและการนำน้ำไปใช้ของจุลินทรีย์ที่ทำให้ความชื้นในปุ๋ยหมักลดลงดังกล่าว ซึ่งทั้งอุณหภูมิและความชื้นต่างก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญด้วย ($r = 0.861, p < 0.01$)

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างปัจจัยทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	อุณหภูมิ	ความชื้น
ระยะเวลาการหมัก	-0.794**	-0.869**
อุณหภูมิ	1	0.861**

หมายเหตุ ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=13

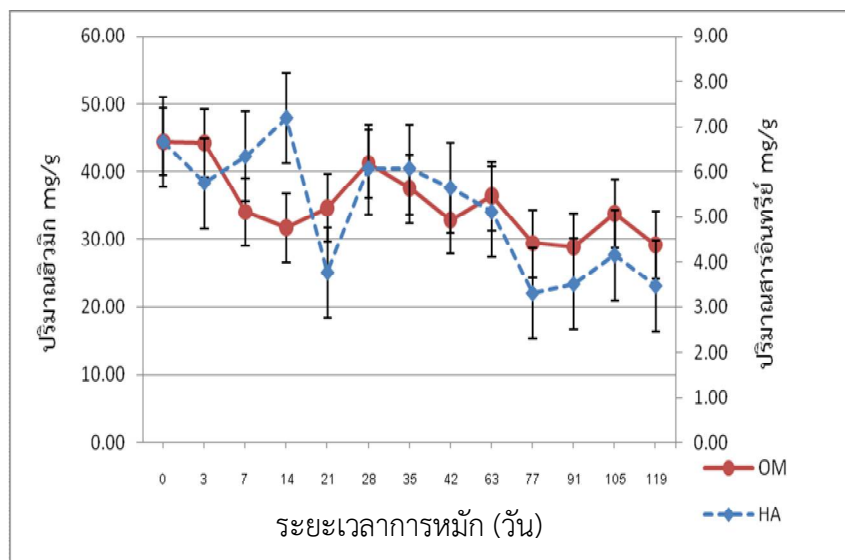
4.4 กรดฮิวมิก: ปริมาณธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ

กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์สีดำคล้ำที่สกัดได้จากปุ๋ยหมักประกอบด้วยธาตุที่สำคัญได้แก่ ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของกรดฮิวมิก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฮิวมิกจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบและส่งผลต่อสัดส่วนของธาตุเหล่านี้ที่สามารถใช้เป็นตัวชี้แสดงคุณลักษณะของสารฮิวมิกได้ เช่น สัดส่วนปริมาณออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) มักหมายถึงหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดในโครงสร้างของกรดฮิวมิก สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) บ่งบอกถึงความเป็นแอโรแมติกเสถียรภาพของโครงสร้างของกรดฮิวมิกและสัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่ลดน้อยลงจะหมายถึงการเกิดกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสารอินทรีย์จะถูกรวมเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของกรดฮิวมิกทำให้เกิดโครงสร้างแอโรแมติก และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นออกซิเจนเพิ่มขึ้น (อัญชลี, 2552; Baddi et al., 2004) ซึ่งอัตราส่วนทั้งหมดเป็นตัวชี้หนึ่งที่สำคัญที่ใช้ประกอบการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของกรดฮิวมิกได้ (Stevenson, 1994; Maria et al., 2010)

4.4.1 ปริมาณกรดฮิวมิก

ปริมาณกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 3.31 – 6.66 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยปริมาณกรดฮิวมิกที่มีค่าสูงในวันที่ 0 อาจเนื่องมาจากวัตถุดิบตั้งต้น เช่น มูลค่างคาว และมูลวัวที่มีสารฮิวมิกเป็นองค์ประกอบตั้งต้นอยู่ จากนั้นเมื่อกระบวนการหมักเริ่มต้น (ระยะอุณหภูมิสูง) เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อันนำไปสู่การย่อยสลายวัตถุดิบอินทรีย์ที่ผสมในปุ๋ยหมักสร้างกรดฮิวมิกที่เกิดจากกระบวนการหมัก ทำให้ปริมาณกรดฮิวมิกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนไปสูงสุดในวันที่ 14 ขณะที่ปริมาณสารอินทรีย์มีค่าลดลงดังกล่าว ดังภาพที่ 26 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิของปุ๋ยเท่ากับอุณหภูมิภายนอกตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป ปริมาณสารอินทรีย์และปริมาณกรดฮิวมิกเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้สารอินทรีย์และปริมาณกรดฮิวมิกแปรตามกันอย่างมีนัยสำคัญ ($r=0.585, p<0.05$) เมื่อวัตถุดิบสารตั้งต้นลดลงน้อยลง กระบวนการสร้างสารฮิวมิกจะเกิดขึ้น โดยจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นในปุ๋ยหมัก จุลินทรีย์มีการนำกรดฮิวมิกไปใช้ทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลง

และปริมาณกรดฮิวมิกจะลดลงตามกัน ($r=-0.782, p<0.01$) เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ที่ค่อยๆ ลดลง เช่นกัน ($r=-0.671, p<0.01$) ดังตารางที่ 18



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดฮิวมิกกับสารอินทรีย์ตลอดระยะเวลาการหมัก

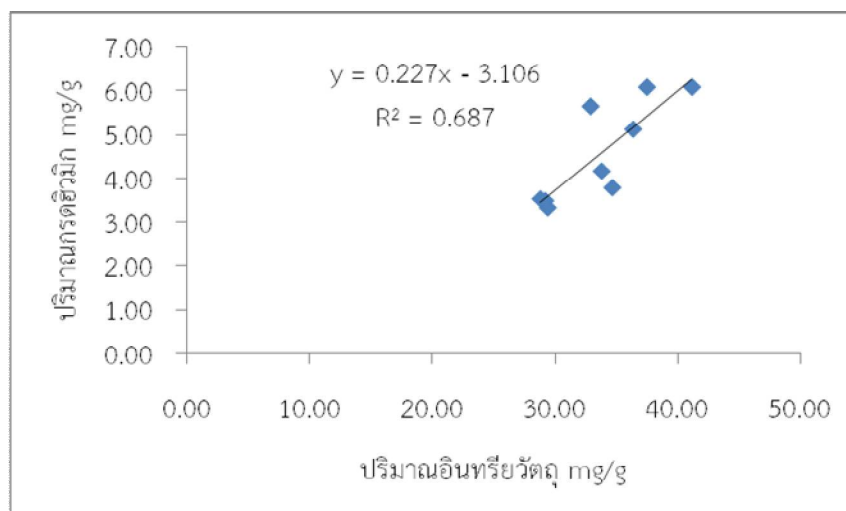
ตารางที่ 18 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของระยะเวลา ปริมาณกรดฮิวมิกกับอุณหภูมิและสารอินทรีย์

พารามิเตอร์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ (Temp)	สารอินทรีย์ (OM)
ระยะเวลา	1	-0.794**	-0.671*
ปริมาณกรดฮิวมิก	-0.782**	0.572*	0.585*

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, n=13

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=13

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางสถิติตั้งแต่วันที่ 21-119 พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุกับปริมาณกรดฮิวมิกมีความสัมพันธ์กันทางสถิติชนิดแปรผันตามกัน เมื่ออินทรีย์วัตถุที่เป็นสารตั้งของกรดฮิวมิกถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายและถูกเปลี่ยนเป็นกรดฮิวมิก ทำให้ปริมาณกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้น ($r= 0.585, p<0.05$) ดังภาพที่ 27 และเมื่อถึงระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ ในวันที่ 35 ปริมาณกรดฮิวมิกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกรดฮิวมิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถึงระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่และปริมาณกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 63 โดยมีค่าประมาณ 5.11 มิลลิกรัมต่อกรัม และจะลดลงและลดลงในวันที่ 77- 119 มีค่าประมาณ 3.31 – 3.47 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นเริ่มลดลงน้อยลง กระบวนการสร้างสารฮิวมิกเกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการสลาย (mineralization process) (Sellami et al., 2008) ดังนั้นจึงเกิดการย่อยสลายกรดฮิวมิกเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงดังกล่าว



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ของปริมาณกรดฮิวมิกกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ($r = 0.585$, $p < 0.05$)

4.4.2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิก

ปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) สามารถใช้คาดการณ์น้ำหนักหรือสูตรโมเลกุลของกรดฮิวมิกและใช้จำแนกความแตกต่างของกรดฮิวมิกได้ (Kim, 2003) นอกจากนี้ยังเป็นดัชนีที่ใช้อธิบายคุณลักษณะโครงสร้างบางประการของสารฮิวมิกได้ จากตารางที่ 19 ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกพบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 28.5 และ 25.3 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณธาตุออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 59.8 ขณะที่ธาตุไฮโดรเจนมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

โดยปริมาณธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.880$ และ -0.799 , $p < 0.01$) อาจเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์นำคาร์บอนและไนโตรเจนไปใช้ โดยเฉพาะช่วงท้ายของกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปที่สารตั้งต้นซึ่งเป็นวัตถุดิบหมดไปจุลินทรีย์นำกรดฮิวมิกไปใช้แทน สอดคล้องกับปริมาณกรดฮิวมิกที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = -0.782$, $p < 0.01$) โดยอัตราการลดลงของธาตุทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันและส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 9.1-10.7

สำหรับปริมาณธาตุไฮโดรเจนของกรดฮิวมิกที่พบได้ทั้งในโครงสร้างที่เป็นแอลิแฟติกและแอโรแมติกทำให้ปริมาณไนโตรเจนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักตลอดกระบวนการหมักโดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.07 – 5.74 ซึ่งเมื่อนำมาหาอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/H) พบว่ามีค่าลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักเช่นกัน ($r = -0.777$, $p < 0.05$) โดยอัตราส่วนนี้ได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณคาร์บอนที่ลดลงอย่างชัดเจน อันเป็นการยืนยันถึงการย่อยสลายโครงสร้างกรดฮิวมิกให้มีเสถียรภาพลดลง โดยเฉพาะในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมักดังกล่าว

ส่วนปริมาณธาตุออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r=-0.898$, $p< 0.01$) และเป็นผลให้อัตราส่วนปริมาณออกซิเจนต่อคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยและสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) (Stevenson, 1994; Fuented et al., 2007) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้ จะมีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรเจนอะตอมได้ตั้งแต่ค่าความเป็นกรดต่าง 3.0 ขึ้นไป (Tan, 2003) ทำให้โครงสร้างกรดฮิวมิกมีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น กรดฮิวมิกมีเสถียรภาพลดลง และเป็นสัดส่วนกับโครงสร้างที่เล็กลงด้วย (Stevenson, 1994) โดยสัดส่วนนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r=0.921$, $p< 0.01$) โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 91 -119 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นมากถึง 1.9-2.2 เท่าจากวันเริ่มผสม

ตารางที่ 19 ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลาการหมัก (วัน)	ร้อยละปริมาณธาตุองค์ประกอบ				อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบโดยน้ำหนัก		
	คาร์บอน (C)	ไฮโดรเจน (H)	ออกซิเจน (O)	ไนโตรเจน (N)	O/C	C/H	C/N
0	47.50	5.74	42.30	4.51	0.89	8.28	10.53
3	45.70	5.54	44.70	4.06	0.98	8.25	11.26
7	44.50	5.70	45.74	4.06	1.03	7.81	10.96
14	44.00	5.70	45.80	4.50	1.04	7.72	9.78
21	38.90	5.42	51.56	4.12	1.33	7.18	9.44
28	45.60	5.59	44.50	4.31	0.98	8.16	10.58
35	39.50	5.25	51.40	3.86	1.30	7.52	10.23
42	39.10	5.42	51.20	4.29	1.31	7.21	9.11
63	41.19	5.35	59.30	4.21	1.44	7.70	9.78
77	38.90	5.07	60.10	4.08	1.54	7.67	9.53
91	30.53	5.61	60.70	3.20	1.99	5.44	9.54
105	31.13	5.34	60.40	3.16	1.94	5.83	9.85
119	33.96	5.12	57.60	3.37	1.70	6.63	10.08

จะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนสามารถช่วยอธิบายถึงแนวโน้มการเกิดโครงสร้างบางประการของกรดฮิวมิกได้ ซึ่งอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบนี้ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยการย่อยสลายทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของปุ๋ยหมักดังกล่าวจะได้อธิบายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก

ปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญต่อการสลายสารอินทรีย์ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นที่มีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ (ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.791$ และ 0.717 ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยเมื่อเริ่มกระบวนการหมักที่อุณหภูมิสูงอัตราส่วนนี้จะมีค่าสูงจากคาร์บอนอินทรีย์ที่อยู่ในวัตถุเดิมที่มีปริมาณมากจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิของการหมักเย็นลง ขณะที่อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนที่บ่งบอกถึงโครงสร้างที่ละลายน้ำได้ดีจากองค์ประกอบหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีปริมาณมากจะแปรผกผันกับอุณหภูมิและความชื้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = -0.805$ และ -0.798 ตามลำดับ, $p < 0.01$) ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของธาตุองค์ประกอบกับความชื้นและอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	temp	ความชื้น	ระยะเวลาการหมัก
C/N	0.791**	0.582	-0.477
C/H	0.717*	0.641*	-0.777**
O/C	-0.805**	-0.798**	0.921**

หมายเหตุ * มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, $n=13$

** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, $n=13$

เมื่อนำปัจจัยทางอุณหภูมิ ที่สัมพันธ์ต่อกระบวนการหมักไปหาความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยใช้ multiple regression โดยวิธี stepwise selection เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลที่สามารถอธิบายอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนในเชิงความสัมพันธ์เส้นตรงสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C/N = 0.565 + 0.141 \text{ temp.}$$

$$R^2 = 0.626, n=13 \quad (5)$$

$$C/H = 1.745 + 0.179 \text{ temp.}$$

$$R^2 = 0.514, n=13 \quad (6)$$

$$O/C = 3.937 - 0.083 \text{ temp.}$$

$$R^2 = 0.648, n=13 \quad (7)$$

โดย C/N คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

C/H คือ คาร์บอนต่อไฮโดรเจน

O/C คือ ออกซิเจนต่อคาร์บอน

temp คือ อุณหภูมิ

พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิสามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนได้ร้อยละ 62.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนได้ร้อยละ 51.4 และอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนใช้อธิบายได้ถึงร้อยละ 64.8 ตามลำดับ

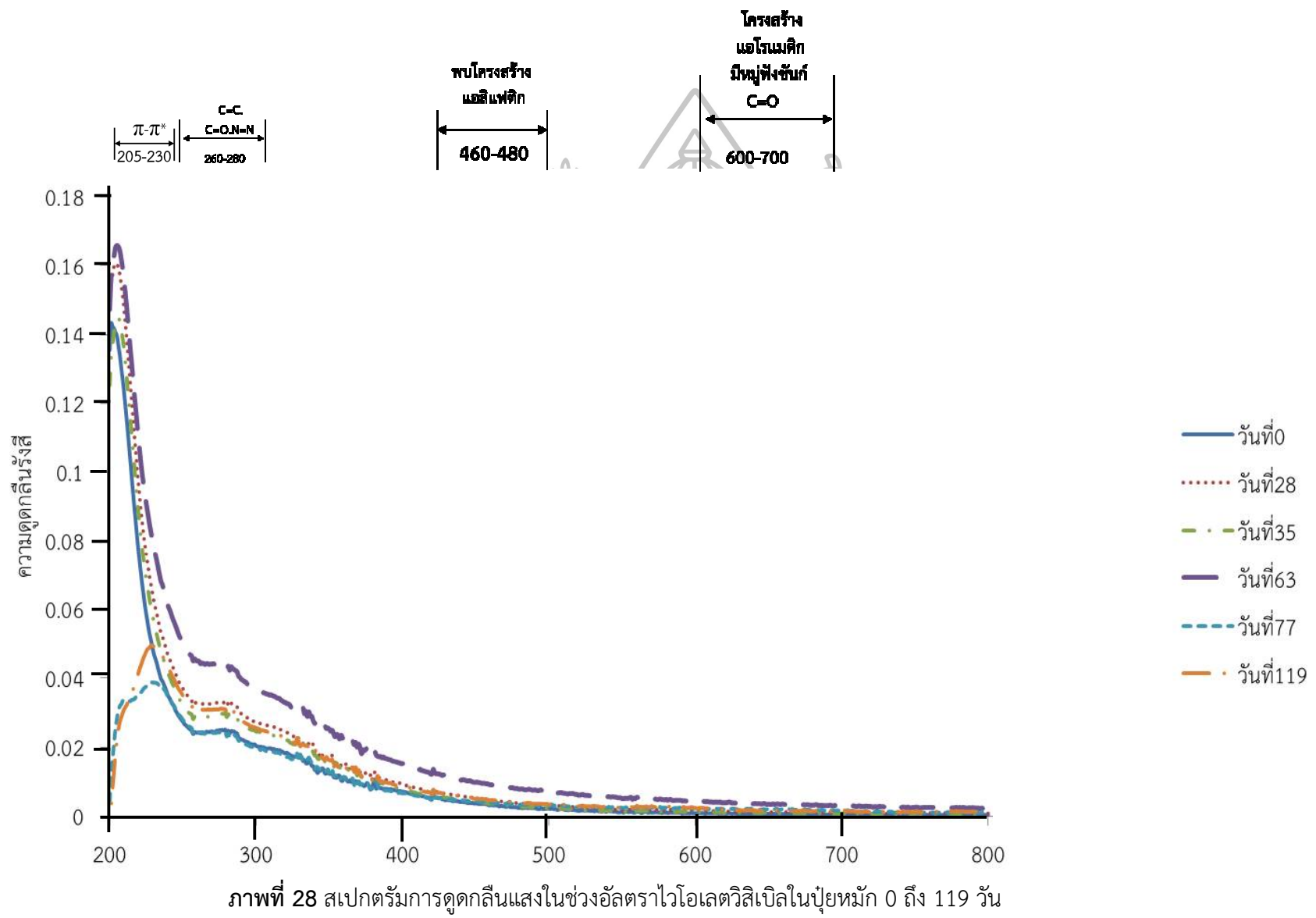
อย่างไรก็ดีเพียงปริมาณธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบยังไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างได้อย่างชัดเจนนัก เนื่องจากลักษณะการเกิดพันธะในโครงสร้างแบบต่างๆ ที่จะมีส่วนสำคัญในการกำหนดเสถียรภาพของโครงสร้างกรดฮิวมิกนั้น ยังไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้เพียงตัวแปรข้างต้นนี้ ทำให้การศึกษาลักษณะการเกิดพันธะแบบต่างๆ ในโครงสร้างโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีจึงมีความสำคัญ ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

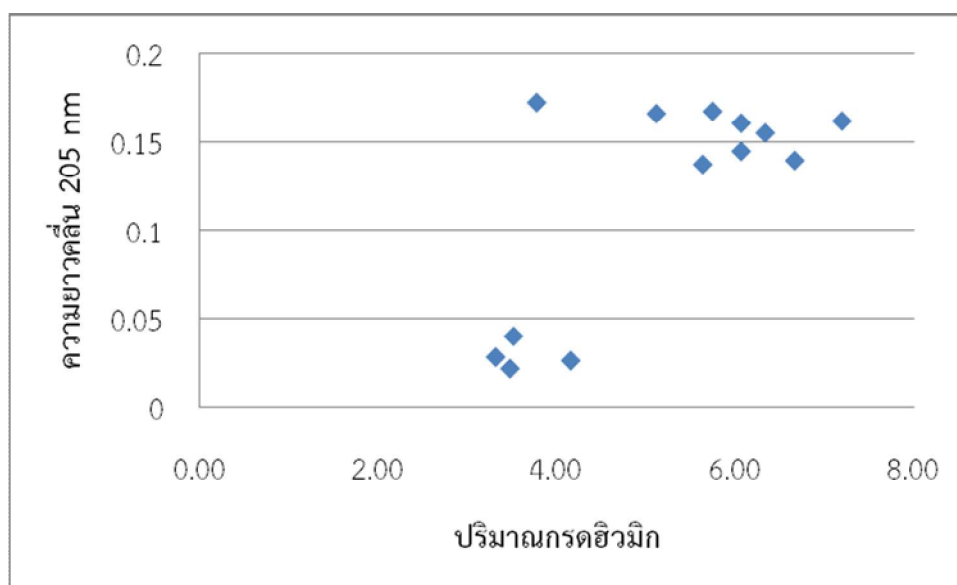
4.4 การตรวจวัดโครงสร้างโดยใช้ยูวี

นำกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยมูลวัว ที่มีอายุ 0 3 7 14 21 28 35 42 63 77 91 105 และ 119 วัน มาตรวจวัดหาค่าความดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในกรดฮิวมิก พบว่ามีการเปลี่ยนค่าความดูดกลืนรังสีในความยาวคลื่นที่สำคัญดังนี้

4.4.1 ความยาวคลื่นกลุ่ม 205 - 230 นาโนเมตร

ช่วงความยาวคลื่น 205 - 230 นาโนเมตร บอกถึงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน $\pi-\pi^*$ ของโครงสร้างแอมโรแมติกในโครงสร้างของลิกนินและควิโนนซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Wei et al., 2007) ทำให้ปริมาณกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงนี้ ($r=0.734, p<0.05$) ดังภาพที่ 29 โดยช่วงการหมักระยะแรกจากวันที่ 0 - 28 การดูดกลืนคลื่นแสงนี้จะมีค่าสูงและลดต่ำลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปเมื่อสารตั้งต้นหมดไป เช่นเดียวกับที่ปริมาณกรดฮิวมิกอาจถูกย่อยสลายสารแทนทำให้ปริมาณกรดฮิวมิกลดลงเช่นกัน





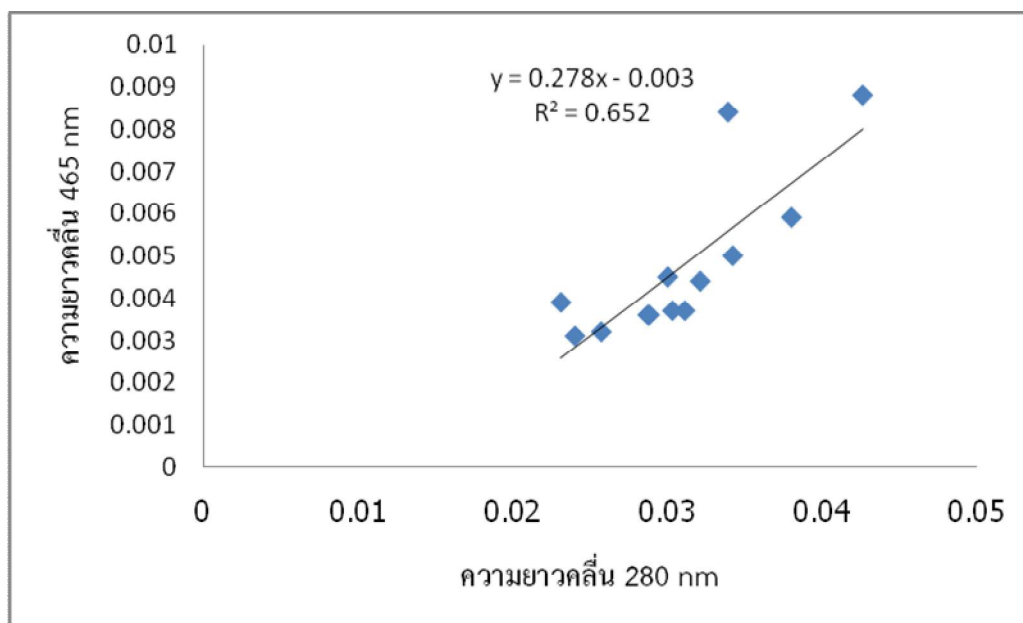
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงที่ความคลื่น 205 นาโนเมตร กับปริมาณกรดฮิวมิก ($r=0.734$, $p<0.05$)

4.4.2 ความยาวคลื่นช่วง 260 -280 นาโนเมตร (ช่วง E_2)

ความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร (ช่วง E_2) แสดงถึงการดูดกลืนของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของพันธะ $\pi-\pi^*$ ที่ประกอบด้วย $C=C$, $C=O$ และ $N=N$ ในโครงสร้างวงแหวนของลิกนินและควิโนน (Domeizel et al., 2004; Zbytniewski et al., 2005; Albrecht et al., 2011) โดยการดูดกลืนแสงในช่วงนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและไปสูงสุดในวันที่ 63 ดังภาพที่ 28 แสดงถึงการสร้างโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะในควิโนนที่พบโครงสร้างนี้มาก จากนั้นการดูดกลืนคลื่นแสงจะลดลงในระยะท้ายๆ ของกระบวนการหมักเมื่อสารตั้งต้นของโครงสร้างดังกล่าวหมดไป

4.4.3 ความยาวคลื่นช่วง 460 – 480 นาโนเมตร (ช่วง E_4)

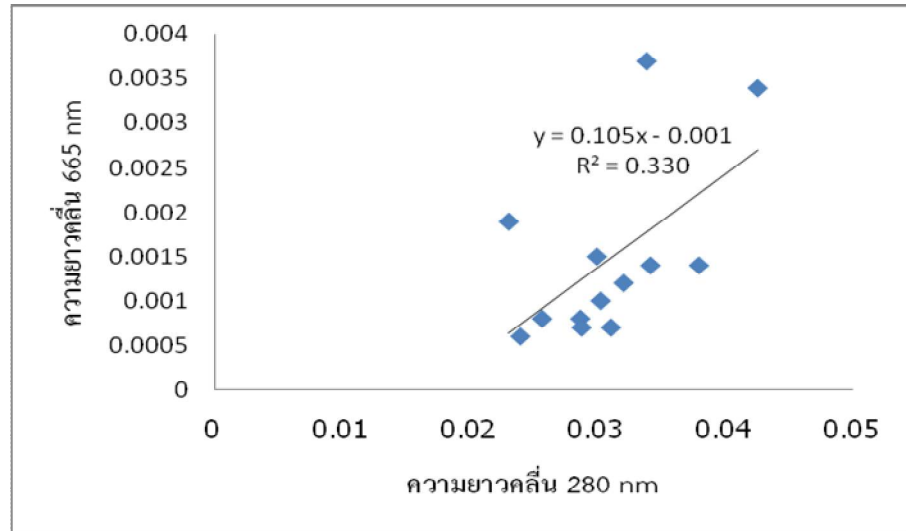
ความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร (ช่วง E_4) แสดงการเริ่มต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Zbytniewski and Buszewski et al., 2005) โดยสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นนี้เพิ่มขึ้น แสดงว่าเริ่มเกิดกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกมีโครงสร้างแอลิแฟติกเกิดขึ้น (Sellami et al., 2008) ในการทดลองนี้ จะเห็นการเพิ่มขึ้นของเส้นกราฟจากวันที่ 0 ไปยังวันที่ 63 ดังภาพที่ 28 โดยวันที่ 63 มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 465 นาโนเมตร แสดงถึงการพบโครงสร้างแอลิแฟติกในช่วงนี้ ขณะที่วันที่ 77 ณ ตำแหน่งนี้กลับมีค่าการดูดกลืนที่ต่ำกว่า บอถึงการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเกิดสารฮิวมิกไปเป็นโครงสร้างแอลิแฟติกซึ่งสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญ ($r=0.802$, $p<0.01$) บอถึงปริมาณของลิกนินและควิโนนที่สัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับโครงสร้างแอลิแฟติกด้วย ดังภาพที่ 30



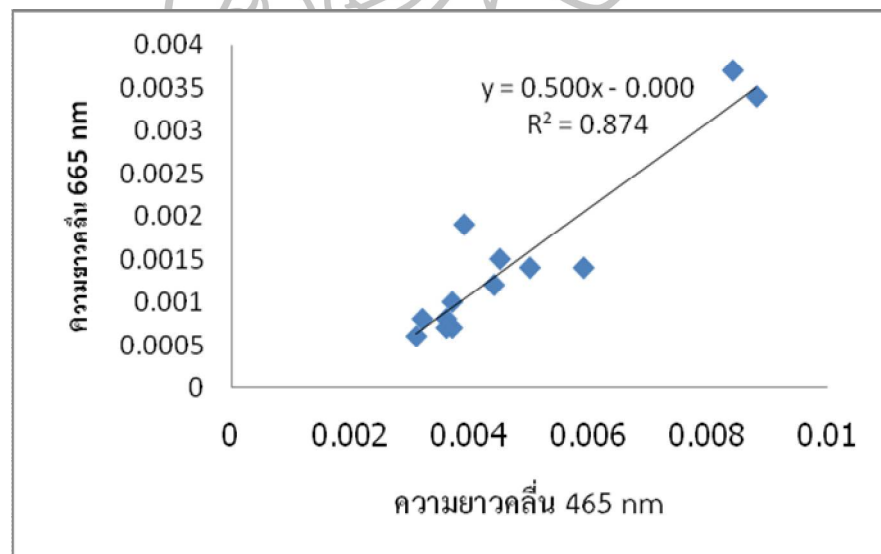
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ($r=0.801$, $p<0.01$)

4.4.4 ความยาวคลื่นช่วง 600- 670 นาโนเมตร (ช่วง E_6)

ความยาวคลื่น 600 – 670 นาโนเมตร (ช่วง E_6) จะบอกถึงสารประกอบแอโรแมติกที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากพันธะคู่ของหมู่ฟังก์ชัน $C=O$ แสดงถึงความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารประกอบแอโรแมติกซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารฮิวมิก (Domeizel et al., 2004) จากผลการทดลองความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรในช่วงนี้มีการดูดกลืนคลื่นแสงน้อยมาก อย่างไรก็ตามในวันที่ 63 เป็นวันที่มีการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงนี้สูงที่สุด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแอโรแมติกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่เพิ่มมากขึ้น (ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร) กับ (ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร) และการเปลี่ยนโครงสร้างแอลิฟาติกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติกซึ่งเป็นโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรยิ่งขึ้น (ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร) กับ (ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร) โดยมีความสัมพันธ์กันทางสถิติซึ่งแปรผันตามกันอย่างมีนัยสำคัญ ($r=0.808$; 0.999 , $p<0.01$) ดังภาพที่ 31 เมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไปเกิดกระบวนการสร้างกรดฮิวมิกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติก มีระดับการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน ($C=O$) เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักยาวนานขึ้น แสดงถึงโครงสร้างแอโรแมติกที่เพิ่มขึ้น (He et al., 2011)



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ($r=0.808$, $p<0.01$)



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนคลื่นแสง 465 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลื่นแสง 665 นาโนเมตร ($r=0.999$, $p<0.01$)

ภาพที่ 31 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความดูดกลืนคลื่นแสง 465 นาโนเมตร กับความดูดกลืนคลื่นแสง 665 นาโนเมตร

เมื่อแบ่งปฏิตามทิศทางของการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวในช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงที่อยู่ระหว่าง 260 – 280 นาโนเมตร (ช่วง E_2) 460 – 480 นาโนเมตร (ช่วง E_4) และ 600 – 670 นาโนเมตร (ช่วง E_6) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะเพิ่มขึ้น (ระหว่าง วันที่ 0-63) และ ระยะลดลง (ระหว่าง วันที่ 64-119) ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 21 พบว่าโครงสร้างทั้ง 3 ช่วงคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 30 และภาพที่ 31) โดยโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวต่างๆ จากทั้ง 3 ช่วงคลื่นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 63 จากนั้นโครงสร้างดังกล่าวจะลดลงไปจนสิ้นสุดกระบวนการหมัก ทำให้ช่วงอายุการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 63 วันเป็นช่วงเวลาที่ดีที่สุดเนื่องจากมีปริมาณโครงสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวมาก พลังงานพันธะเหล่านี้สูง และมีความเสถียรอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาการหมักอื่นๆ

ตารางที่ 21 สรุปทิศทางการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวทางคุณลักษณะเชิงแสงของกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักมูลวัวด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีตลอดกระบวนการหมัก

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	การเปลี่ยนแปลง ของโครงสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัว	ระยะเพิ่มขึ้น	ระยะลดลง
		วันที่ 0-63	วันที่ 64 - 119
205 -230	การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน $\pi-\pi^*$ ของโครงสร้างแอโรแมติก	↑	↓
260 -280	การดูดกลืนของโครงสร้างแอโรแมติกที่มีหมู่ฟังก์ชัน C=C, C=O และ N=N	↑	↓
460 - 480	พบโครงสร้างแอลิแพติก ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการสร้างกรดฮิวมิก	↑	↓
600 - 670	โครงสร้างแอโรแมติก เนื่องจากพันธะคู่ของหมู่ฟังก์ชัน C=O ที่เป็นโครงสร้างของกรดฮิวมิก	↑	↓

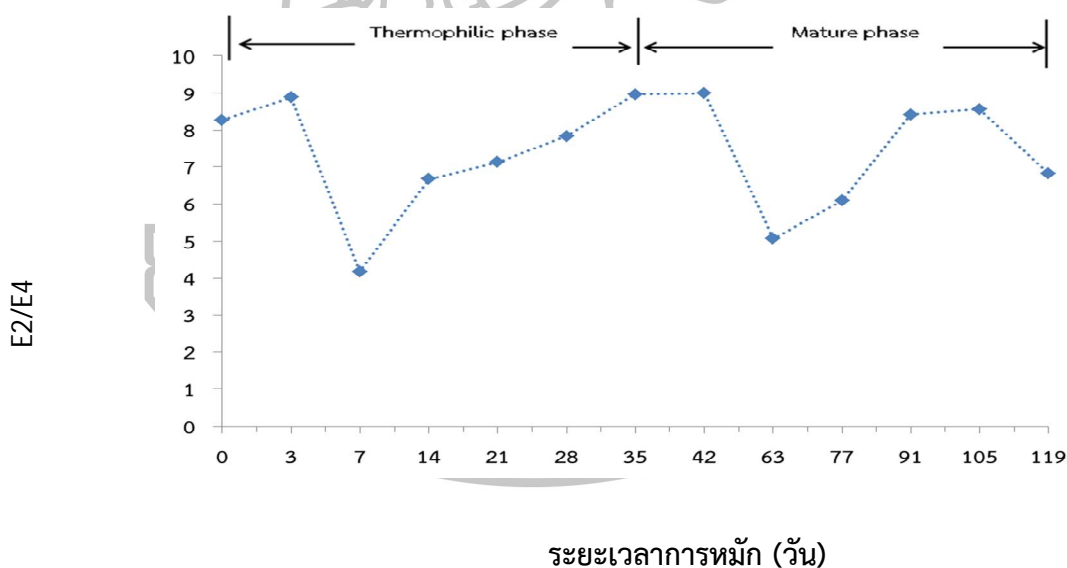
หมายเหตุ ↓ การลดลง, ↑ การเพิ่มขึ้น

4.5 อัตราส่วนความยาวคลื่น

การพิจารณาอัตราส่วนความยาวคลื่นแสงเป็นการศึกษาระดับการเกิดสารฮิวมิกจากการนำค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ตรวจพบในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมาหารกัน โดยอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 472 นาโนเมตร (E_2/E_4) และความยาวคลื่นที่ 280 ต่อ 665 นาโนเมตร (E_2/E_6) อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_4/E_6) ซึ่งอัตราส่วนเหล่านี้สามารถอธิบายทิศทางการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกได้ดังนี้

4.5.1 อัตราส่วนระหว่าง E_2/E_4

อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ซึ่งหมายถึงโครงสร้างแโรแมติกในลิกนิน ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร (E_4) ซึ่งเป็นสัดส่วนของโครงสร้างจำพวกเริ่มต้นแอลิแพติก ของกระบวนการฮิวมิคฟิเคชัน (E_2/E_4) โดยค่าที่น้อยลงบ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรที่มีปริมาณมากขึ้นจากการย่อยสลายโครงสร้างลิกนินตั้งต้น (Sellami et al., 2008; Remmy et al., 2010) ซึ่งในช่วงระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ แต่เมื่อปุ๋ยเจริญเต็มที่ไปแล้วจะมีค่าคงที่ในช่วงสั้นๆ (วันที่ 35-42) จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำที่สุดในวันที่ 63 ภาพที่ 32 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้อีกครั้งหนึ่งแม้จะอยู่ในสภาวะที่สารตั้งต้นหมดไปแล้วก็ตาม (วันที่ 77-119) อาจเนื่องมาจาก โครงสร้างแอลิแพติกที่เกิดขึ้นใหม่จากการย่อยสลายโครงสร้างฮิวมิคที่เสถียรที่ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นแทนเมื่อวัสดุดิบตั้งต้นหมดไป ดังภาพที่ 7 โดยลักษณะของสารฮิวมิคที่มีความเสถียรน้อยกว่าจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับ กรดฟัลวิก คือ มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมาก เช่น COOH และ C=O (Veeken et al., 2000) สอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนของกรดฮิวมิคที่พบมากขึ้นถึงร้อยละ 57.6- 60.7 ตั้งแต่วันที่ 91 เป็นต้นไป ในขณะที่โครงสร้างที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมีค่าลดลงอยู่ที่ร้อยละ 30.5 – 38.9 และส่งผลให้อัตราส่วน O/C ในวันที่ 91 มีค่าสูงที่สุดในช่วง 1.69 – 1.99 มากกว่าในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ในวันที่ 35 ถึง 1.3 -1.5 เท้าดังตารางที่ 21

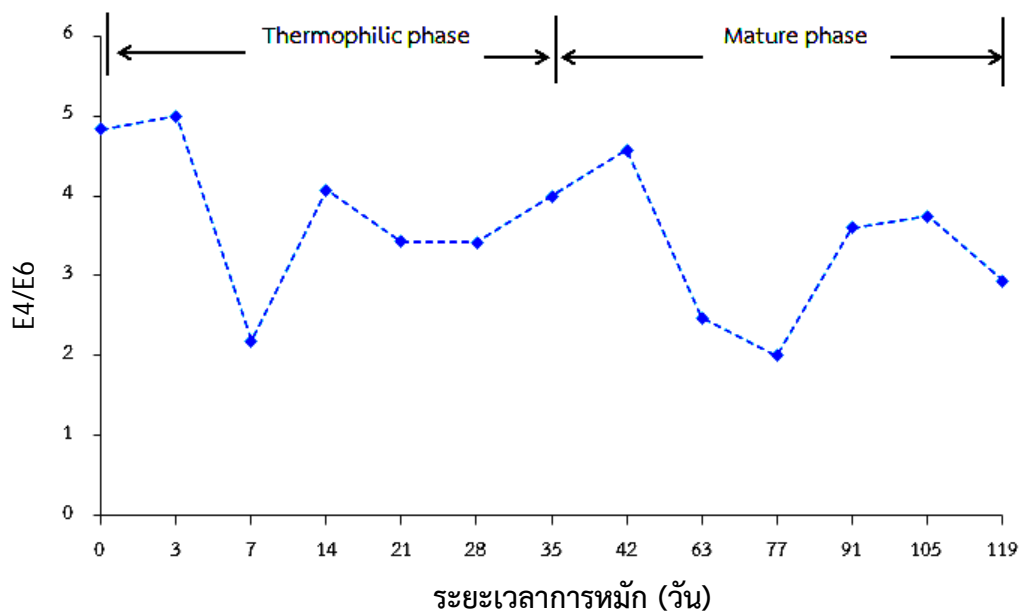


ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 472 นาโนเมตร (E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก

4.5.2 อัตราส่วนระหว่าง E_4/E_6

อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร (E_4) ซึ่งหมายถึงโครงสร้างเริ่มต้นจำพวกแอลิแพติกของกระบวนการฮิวมิคฟิเคชันต่อความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างแโรแมติกที่ประกอบด้วยพันธะคู่ในโครงสร้างสารฮิวมิค (E_4/E_6) โดยค่าที่น้อยลง

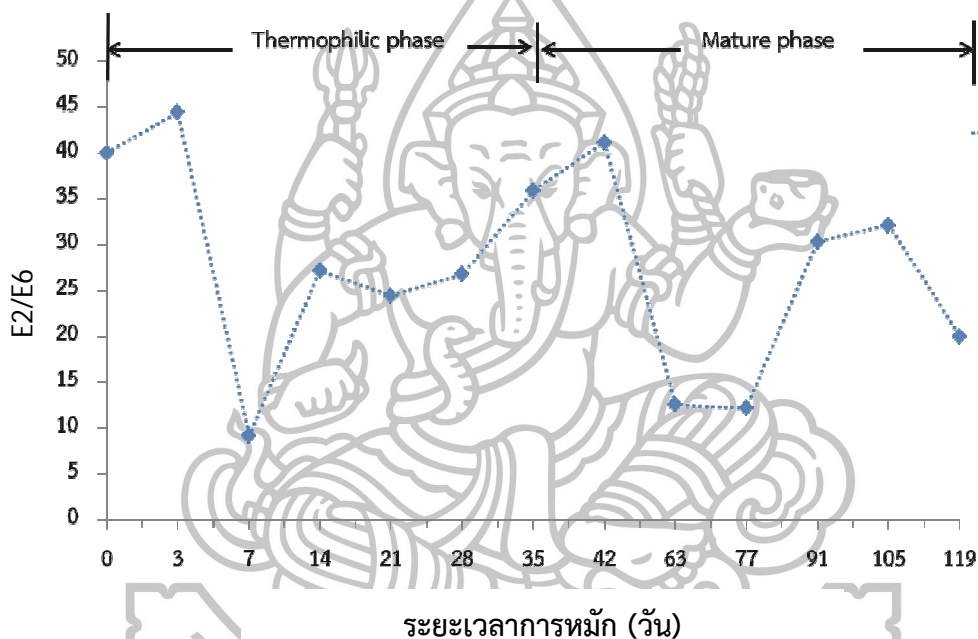
ของอัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรมีปริมาณมากขึ้นโดยการเกิดโครงสร้างที่มีความเสถียรมากมีพันธะที่มีพลังงานสูง เช่น พลังงานพันธะในวงแหวนแอโรแมติก พันธะคู่ และพันธะสาม (ประภาณี, 2539; Albrecht et al., 2011) ขณะที่โครงสร้างเบื้องต้นของสารฮิวมิคได้แก่ โครงสร้างแอลิแฟติกจะลดลง (Zbytniewski et al., 2005; Fialho et al., 2010) พบว่าในช่วงแรกของระยะอุณหภูมิต่ำ (วันที่ 0-3) อัตราส่วน E_4/E_6 จะสูง ภาพที่ 33 เนื่องจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นแอลิแฟติกมากคล้ายกับงานวิจัยของ Sellami et al. (2008) แต่เมื่อระยะเวลาการหมักยาวนานขึ้นเข้าสู่ระยะคงสภาพ (Mature phase) อัตราส่วนนี้มีแนวโน้มลดต่ำลงในวันที่ 63 และ 77 อาจเนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างแอโรแมติกที่เสถียรมากขึ้นจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตและควิโนน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการออกซิไดส์บริเวณหมู่ฟังก์ชันที่มีฟีนอลิกแล้วสร้างพันธะกับหมู่เมทอกซี (methoxy) และ/หรือปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างแอลิแฟติกของสารฮิวมิค เกิดเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่เสถียรมากกว่า (Zbytniewski et al., 2005; Sellami et al., 2008) โดยอัตราส่วน E_4/E_6 นี้มีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 77 จากนั้นอัตราส่วนนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการที่สารตั้งต้นซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์หมดไปและจุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างสารฮิวมิคเพื่อนำไปใช้แทน ทำให้การดูดกลืนคลื่นแสงบริเวณความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร ลดลงและอัตราส่วน E_4/E_6 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Albrecht et al. (2011)



ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร (E_4) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ตลอดระยะเวลาการหมัก

4.5.3 อัตราส่วน E_2/E_6

อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) หมายถึง โครงสร้างแอรโม่ติก ในลิกนินต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างแอรโม่ติก ที่ประกอบด้วยพันธะคู่ในโครงสร้างของสารฮิวมิก (E_2/E_6) โดยค่าที่น้อยลงของอัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงการย่อยสลายของสารตั้งต้นไปเป็นโครงสร้างแอรโม่ติกที่เพิ่มขึ้น (Zbytnieski และ Buszewski 2005) พบว่าอัตราส่วน E_2/E_6 มีแนวโน้มของกราฟ ภาพที่ 34 ไปในทิศทางเดียวกันกับ อัตราส่วน E_4/E_6 ภาพที่ 28 โดยโครงสร้างแอลิแพติก (E_4) จะอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานกว่าโครงสร้างพวงลิกนินที่เป็นสารตั้งต้น (E_2) ทำให้ค่าต่ำสุดของอัตราส่วน E_4/E_6 ช้ากว่า E_2/E_6 ถึง 2 สัปดาห์แม้ว่าหลังจากนั้น อัตราส่วนทั้งสองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งคู่จากการถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายก็ตาม



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 665 นาโนเมตร (E_6) ตลอดระยะเวลาการหมัก

จากการพิจารณาอัตราส่วน E_2/E_4 E_2/E_6 และ E_4/E_6 พบว่าสามารถใช้ช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงระดับการเกิดสารฮิวมิกได้ เนื่องจากอัตราส่วนเหล่านี้จะบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของกรดฮิวมิก โดยอัตราส่วน E_2/E_4 และ E_2/E_6 มีค่าต่ำสุดสำหรับปุ๋ยหมักมูลวัว ในวันที่ 63 จากนั้นอัตราส่วนเหล่านี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการหมักถูกใช้หมดไปในช่วงวันเวลาดังกล่าว และอัตราส่วน E_4/E_6 จะมีค่าต่ำสุดในวันที่ 77 แสดงถึงการเกิดโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่เสถียร ดังนั้นวันที่เหมาะสมในการนำปุ๋ยหมักมูลวัวไปใช้ประโยชน์ควรเลือกปุ๋ยหมักมูลวัวที่หมักเป็นเวลา 63 วัน เพราะเป็นวันที่ปุ๋ยหมักมีการย่อยสลายสารตั้งต้นไปเป็นกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรที่สุด และหากเก็บไว้นานเกิน 77 วัน วัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นจะถูกย่อยสลายหมดไปทำให้การเกิดโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่เสถียรลดลง ปุ๋ยหมักจะมีคุณภาพลดลงดังกล่าว

4.5.4 ผลต่างของลอกกาลิทึม E_{400} กับ E_{600} (Log E)

ค่า Log E เป็นผลต่างของลอกกาลิทึมที่การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 400 นาโนเมตรกับ 600 นาโนเมตร สมการที่ 1 นำมาใช้อธิบายระดับการเกิดกรดฮิวมิกของสารอินทรีย์ได้ โดยค่า Log E ที่ลดต่ำลงจะเป็นการแสดงออกถึงระดับของการเกิดสารฮิวมิกของสารอินทรีย์ที่เสถียร (Kumada, 1987; Tan, 2003; Oskars et al., 2013) พบว่าเมื่อปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะอุณหภูมิต่ำสูง (วันที่ 1 -34) ทำให้ค่า Log E มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นแอลิแพติกอยู่ ดังตารางที่ 22 โดยการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน E_4/E_6 แต่เมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยนานขึ้นเข้าสู่ระยะคงสภาพ (Mature phase) (วันที่ 36 -119) อัตราส่วนนี้มีแนวโน้มลดลง โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างแอลิแพติกไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติก โดยค่าที่น้อยกว่า 0.6 จะเป็นฮิวมิกที่มีความเสถียรมาก แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 1.1 จะเป็นฮิวมิกที่มีความเสถียรน้อย (Tan, 2003) พบว่าในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ปุ๋ยที่มีอายุ 63 77 และ 119 วันจัดเป็นช่วงที่กรดฮิวมิกที่มีความเสถียรเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์อย่างไรก็ดีการจะนำกรดฮิวมิกไปใช้ประโยชน์ควรคำนึงถึงปริมาณกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งจากภาพที่ 21 พบว่าวันที่ 63 มีปริมาณกรดฮิวมิกมากกว่าวันที่ 77 และ 119 ถึง 1.5 เท่าทำให้วันที่ 63 จัดเป็นวันที่กรดฮิวมิกมีทั้งปริมาณและคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้มากที่สุด

ตารางที่ 22 ค่าดัชนีฮิวมิฟิเคชันของสารฮิวมิก (Log E) ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะการหมัก	การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว	ระยะเวลาการหมัก (วัน)	Log E
ระยะเริ่มผสม		0	0.89
ระยะอุณหภูมิต่ำสูง	ระยะเพิ่มขึ้น	3	0.86
		7	0.47
		14	0.85
		21	0.72
		28	NC
ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา		35	0.78
ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่	ระยะลดลง	42	0.89
		63	0.54
		77	0.44
		91	0.77
		105	0.79
		119	0.55

หมายเหตุ : NC หมายถึงไม่สามารถคำนวณได้ (not calculated) เนื่องจาก Log E_{400} มีค่าต่ำมากทำให้ Log E มีค่าติดลบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ปุ๋ยหมักมูลวัวผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กระจุกวัวปน รำละเอียด มูลค่างควา ผสมกับธาตุอาหารรองที่มีแคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก จากนั้นรดด้วยน้ำหมักที่ประกอบด้วย ปลา กากน้ำตาล สับปะรด สารเร่งพด.2 ทำการหมักปุ๋ยเป็นระยะเวลา 4 เดือน โดยเก็บตัวอย่างปุ๋ย ในวันที่ 0 37 14 21 28 35 42 63 77 91 105 และ 119 วัน จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะ พื้นฐานของปุ๋ยหมักและเปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 และ ติดตามคุณลักษณะทางกายภาพและคุณลักษณะเชิงแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร 2548 ซึ่งประกอบด้วยลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาดของปุ๋ย ปริมาณหินและกรวด พลาสติกแก้ว และโลหะ ปริมาณความชื้น ลักษณะทางเคมี เช่น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ค่าความเป็นกรดต่าง ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม พบว่าปุ๋ยหมัก มูลวัวมีลักษณะทางกายภาพและเคมีส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร มีความอุดมสมบูรณ์สูงจากปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่มากกว่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อ แบ่งระยะของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เป็น 4 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (วันที่0) ระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 1-34) ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (วันที่35) ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ (วันที่ 36-119) ซึ่งระยะเวลาการหมักมีอิทธิพลต่อคุณภาพปุ๋ยหมักที่ทั้งปริมาณอินทรีย์วัตถุและ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r=-0.671$ และ -0.655 , $p < 0.01$) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ พบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุ ตั้งแต่ 35 วันเป็นต้นไปมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยการนำปุ๋ยหมักนี้ไปใช้อาจต้อง ใช้แต่เพียงปริมาณน้อยเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดินเค็มเนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่ามาตรฐาน และควรนำชี้แฉกดินเกลือออกจากส่วนผสมสำหรับการหมักในอนาคตต่อไป

นอกจากนี้ปริมาณสารอินทรีย์ยังเป็นตัวบ่งชี้สำคัญต่อการเกิดปริมาณกรดฮิวมิกที่เป็นผลผลิต จากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นปริมาณกรดฮิวมิกและสารอินทรีย์ จะลดลงแปรตามกันอย่างมีนัยสำคัญ ($r=0.585$, $p < 0.05$) โดยทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนของกรด ฮิวมิกต่างก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($r=-0.777$, $p < 0.01$) ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักตลอดกระบวนการหมัก ขณะที่ปริมาณธาตุออกซิเจนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นและ เป็นผลให้อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r= 0.921$, $p < 0.01$) ซึ่งการเพิ่มสัดส่วนของโครงสร้างที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีนี้ ทำให้เสถียรภาพของกรดฮิวมิกในระยะท้ายๆ ของกระบวนการหมัก ตั้งแต่วันที่ 91-119 มีค่าลดลงอย่างมากถึง 1.9-2.2 เท่า

เพื่ออธิบายโครงสร้างแบบต่างๆ ของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นจากการเกิดพันธะของธาตุ องค์ประกอบ งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคทางอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีซึ่งศึกษา ความดูดกลืนรังสีของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวและพบได้ทั่วไปในโครงสร้างกรดฮิวมิกมาใช้ศึกษา

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในกรดฮิวมิกที่ระยะเวลาต่างๆได้ เช่น ความยาวคลื่น 205 - 230 นาโนเมตร บอกรการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน $\pi-\pi^*$ ของโครงสร้างแอรโม่ติก ความยาวคลื่น 260 - 280 นาโนเมตร (ช่วง E_2) แสดงถึงการดูดกลืนของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของลิกนินและควิโนนที่เป็นวงแหวน ความยาวคลื่น 460 - 480 นาโนเมตร (ช่วง E_4) เป็นลักษณะโครงสร้างแอลิแพติกซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการสร้างกรดฮิวมิก และความยาวคลื่น 600 - 670 นาโนเมตร (ช่วง E_6) แสดงการพบโครงสร้างแอรโม่ติกที่เสถียรของกรดฮิวมิก โดยพบว่าเมื่อแบ่งปุ๋ยตามทิศทางของการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวจากการดูดกลืนคลื่นแสงทั้ง 3 ช่วงที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะเพิ่มขึ้น (ระหว่าง วันที่ 0-63) และระยะลดลง (ระหว่าง วันที่ 64-119) โดยโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวดังกล่าวจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 63 และจะค่อยๆ ลดลงไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมักเช่นเดียวกับปริมาณสารอินทรีย์และกรดฮิวมิกที่ลดต่ำลงในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมักเช่นกัน

เพื่อศึกษาทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ ในรูปอัตราส่วนของโครงสร้างที่เสถียรน้อยต่อโครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่า ได้แก่ อัตราส่วน E_2/E_4 อัตราส่วน E_4/E_6 และอัตราส่วน E_2/E_6 ซึ่งค่าอัตราส่วนที่น้อยลงจะบอกถึงสัดส่วนของโครงสร้างกรดฮิวมิกที่เสถียรมีปริมาณมากขึ้น พบว่าจากการศึกษานี้อัตราส่วนทั้ง 3 มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน โดยมีความแปรปรวนอย่างมากในช่วงระยะอุณหภูมิสูง จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่ จะมีค่าลดต่ำที่สุดในช่วงวันที่ 63-77 และไปเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมัก (วันที่ 91-119) แสดงให้เห็นถึงการสลายโครงสร้างที่เสถียรของกรดฮิวมิกเมื่อสารตั้งต้นหมดไป

นอกจากนี้ผลต่างของลอการิทึมของการดูดกลืนคลื่นแสงที่ E_{400} กับ E_{600} หรือที่เรียกว่า $\text{Log } E$ ที่ต่ำกว่า 0.6 จะบ่งบอกถึงลักษณะของกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรมาก (Tan, 2003) ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าในช่วงที่ปุ๋ยเจริญเต็มที่วันที่ 63 77 และ 119 จะเป็นช่วงที่มีค่า $\text{Log } E$ 0.54 0.44 และ 0.55 ตามลำดับ จึงเป็นช่วงเวลาที่กรดฮิวมิกมีความเสถียรเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นพบว่าปุ๋ยอายุ 63 วันจะมีปริมาณกรดฮิวมิก มากกว่าวันที่ 77 และ 119 ถึง 1.5 เท่า ทำให้ปุ๋ยอายุ 63 วันมีคุณสมบัติเชิงปริมาณ และคุณภาพดีที่สุด

จะเห็นได้ว่าเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีสามารถนำมาประยุกต์เพื่อศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างการหมักปุ๋ยได้ และลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของกรดฮิวมิกสามารถนำมาใช้เลือกอายุของปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีที่สุดได้ เพราะปุ๋ยหมักที่ดีจะต้องมีโครงสร้างกรดฮิวมิกที่เสถียร อันประกอบไปด้วยโครงสร้างของพันธะไม่อิ่มตัวและโครงสร้างแอรโม่ติกเป็นจำนวนมาก เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้สามารถอยู่ในสิ่งแวดล้อมและช่วยในการปรับปรุงคุณภาพดินได้นาน นอกจากนี้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์ทางโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อติดตามตรวจสอบคุณภาพปุ๋ยหมักอันจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาปุ๋ยหมักชนิดอื่นๆ เชิงคุณภาพในอนาคตได้ต่อไป

รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. คู่มือการจัดการอินทรีย์วัตถุเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สำนักเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ. หน้า 42-53.
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. เอกสารวิชาการปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. กรุงเทพฯ.
- จุฬารัตน สุนทรณิตย์. 2557. การศึกษาการเจริญเติบโตของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิลิเบิลสเปกโทรสโกปี: การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. 2552. การทำปุ๋ยหมัก (Composting). ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. (Online). แหล่งที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/38803>. 12 กรกฎาคม 2557.
- ชุติมา ลีหมั้วทวาริทธิ์. 2547. สเปกโทรสโกปี. นครปฐม: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ทิพวรรณ สิทธิรงค์สรรงค์. 2542. ปุ๋ยหมัก ดินหมักและปุ๋ยหมักชีวภาพ. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ทิพวรรณ สิทธิรงค์สรรงค์. 2547. ปุ๋ยหมัก ดินหมักและปุ๋ยหมักชีวภาพ. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ธงชัย มาลา. 2546. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 246-281.
- ธงชัย มาลา. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธงชัย มาลา และอรุณศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์. 2541. การปรับปรุงดินโดยใช้ปุ๋ยหมัก. เอกสารเผยแพร่วิชาการภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม.
- นฤมล วงษ์สุวรรณรงค์. 2553. ประสิทธิภาพของการหมักขยะชุมชนโดยการคลุกเคล้ากับดินเนื้อละเอียด ภายใต้ การ รด น้ำ ใน ปริมาณ ที่ แตก ต่าง กัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัทธีรา สรรมณี. 2555. โลหะในแหล่งน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.
- นัทธีรา สรรมณี กุลนาถ ออบสุวรรณ และ กมลชนก พานิชการ. 2554. ผลกระทบของระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตของพืชบางชนิด. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- นัทธีรา สรรมณี, กุลนาถ ออบสุวรรณ, กมลชนก พานิชการ และศุภโชค กำภูพงษ์. 2558. การศึกษาระดับการเกิดฮิวมิกของปุ๋ยหมัก และผลการเป็นคีเลตต่อความสามารถในการปลดปล่อยจุลธาตุอาหาร. รายงานผลการวิจัยปีที่ 1 โครงการต่อเนื่อง 2 ปี. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- ประกาศิต อินทรสำอางค์. 2549. การแปรสภาพและคุณภาพของปุ๋ยหมักจากฟางข้าว ชานอ้อย ชี้เลื่อย เปลือกยูคาลิปตัสและตะกอนน้ำเสียโรงงานเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ประภาณี เกษมศรี. 2539. เคมี่ทั่วไปเล่ม 1. ภาควิชาเคมี. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรัชญา และคณะ. 2540. การจัดการกับธาตุอาหารสำหรับข้าวนาพื้นที่ราบ สถาบันวิจัย
เกษตรกรรมและป่าไม้ กระทรวงเกษตรและป่านไม้.
- ปิ่น จันจุฬา, เมธา วรรณพัฒน์. 2546. บทบาทของอาหารเยื่อใยต่อกระบวนการหมักในรูเมน
ปริมาณการกินได้ผลผลิตและองค์ประกอบน้ำนมในโครีดนม. อาหารโคนม. 20: 8-27.
- ภัทรพร กังวานเจษฎา. 2555. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนเพื่อเป็นดัชนีการเจริญเต็มที่
ของปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มณฑิณี เศรษฐักดี. 2554. ปฐพีวิทยาเบื้องต้นคณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (online). แหล่งที่มา: <http://cw.rmuti.ac.th2>. 3
สิงหาคม 2557.
- มันสิน ตัฒกุลเรศม์. 2547. เคมี่วิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- เย็นหทัย หนาแน่น. 2549. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- รจเรช แพทย์สาสดี. 2551. ริงส์อัลตราไวโอเล็ต. สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รสสุคนธ์ พุ่มพันธุ์วงศ์. 2549. การผลิตปุ๋ยอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดเอ็มพอร์เรียม,
กรุงเทพฯ.
- วิฑูรย์ ปัญญากุล. 2547. การตลาดเกษตรอินทรีย์. กรุงเทพฯ : มูลนิธิสายในแผ่นดิน.
- วิทยา มะเสนา. 2531. อิทธิพลหรือกรดอิทธิพล. วารสารเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น 16(1): 7-8.
- วิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ. 2534. การผลิตโคนม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- วีระ กสารติกุล. 2536. การศึกษาคุณภาพของหญ้าและถั่วอาหารสัตว์เขตร้อนบางชนิดที่ระยะ
การเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศิวนาท ไทยภักดี. 2556. การศึกษาอิทธิพลของเปลือกสับปะรดและดินนาต่อประสิทธิภาพการย่อย
สลายของขยะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภรัตน์ จิตต์จำนง. 2546. อินทรีย์วัตถุในดิน. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. (online).
แหล่งที่มา: http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass-uploads/lib/document/2_b6fa.pdf. 13 มิถุนายน 2554.
- สมเจตน์ จันทวัฒน์ . 2530. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 6. โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- สุธรรม ประทุมสวัสดิ์. 2545. เทคนิคการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ (Composting). พัฒนาเทคนิค
ศึกษา 14 (43): 38-42.
- สุภาวดี สืบสาย. 2556. การศึกษาระดับการเกิดอิทธิพลของปุ๋ยหมักด้วยการใช้หมูฟังกักชั้นที่เป็นกรด
ร่วมกับเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยศิลปากร.

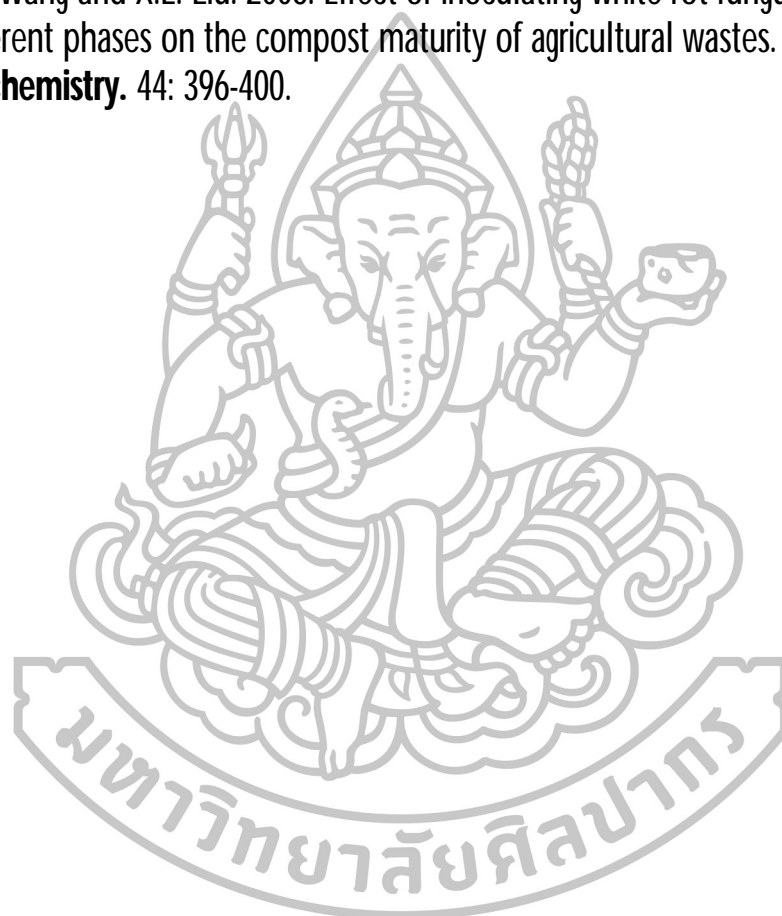
- สุวรรณ สิมะกรพันธ์. 2535. โคนม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักส่งเสริมวิชาการวิทยาลัยครูธนบุรี สหวิทยาลัยรัตนโกสินทร์, กรุงเทพฯ.
- อัญชลี ไชยเนตร. 2552. การศึกษาดัชนีของกระบวนการฮิวมิฟิเคชันต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Albrecht, R., J.L. Petet, G. Terrom and C. Perissol. 2011. Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting. **Bioresource Technology**. 102: 4495-4500.
- Amine-Khodja, A., O. Trubetskaya, O. Trubetskoj, L. Cavani, C. Ciavatta, G. Guyot and C. Richard. 2006. Humic-like substances extracted from composts can promote the photodegradation of Irgarol 1051 in solar light. **Chemosphere**. 62: 1021-1027.
- 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** 177: 524-529.
- Andreina, A.. 2013. The Supramolecular Structure of Humic Substances. **Soil Science**. 166: 810-832.
- 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.
- Boland, G.J., J.I. Boulter and J.T. Trevors. 2000. Compost: A study of the development process and end-product potential for suppression of turfgrass disease. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**. 16: 115-134.
- California Compost Quality Council. (2001). Compost Maturity Index. (Online). แหล่งที่มา: <http://www.epa.gov/compost/pubs/ca-index.pdf>. 11 กรกฎาคม 2556.
- Chefetz, B., F. Adani, P. Genevini, F. Tambone, Y. Hadar, and Y. Chen. 1996. Humic acid transformation during composting of municipal solid waste. **Journal of Environmental Quality**. 27: 794-800.
- Chen, Y.. 2003. Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: application of spectroscopic methodologies to maturity determination of composts. **Compost Sci. Util**. 11: 152-168.
- Cunha, T.J.F., E.H. Novotny, B.E. Madari, L. Martin-Neto. M.O. de O Rezende, L.P. Canelas and V. de M Benites. 2009. Spectroscopy Characterization of Humic Acids Isolated from Amazonian Dark Earth Soils. Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision: Springer Science+Business Media B.V.

- 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.
- El Hajjouji, H., N. Fakharedine, G.A. Baddi, P. Winterton, J.R. Bailly, J.C. Revel, M. Hafidi. 2007. Treatment of olive mill waste-water by aerobic biodegradation: an analytical study using gel permeation chromatography, ultraviolet-visible and fourier transform infrared spectroscopy. **Bioresource Technology**. 98: 3513-3520.
- Faustino, E.M.V., I.P. Valeria, I.S. Maria and D.B. Claudio. 2009. Combined UV-Vis absorbance and fluorescence properties of extracted humic substances-like for characterization of composting evolution of domestic solid wastes. **Geoderma**. 151: 61-67.
- Fourti, O., N. Jedidi and A. Hassen. 2010. Humic substances change during the co-composting process of municipal solid wastes and sewage sludge. **World Microbiol Biotechnol**. 26: 2117-2122.
- Fukushima, M., K. Yamamoto, K. Ootsuka, T. Komai, T. Aramaki, S. Ueda and S. Horiya. 2009. Effect of the maturity of wood waste compost on the structural feature of humic acids. **Bioresource Technology**. 100: 791-797.
- Garcia, J.. 2009. **Organic Spectroscopy Principles and Application**. 2nd ed. Alpha Science International Ltd. Harrow.
- Giovanela, 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.
- Goyal, S., S.K.Dhull and K.K. Kapoor. 2005. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. **Bioresour. Technol**. 96: 1584-1591.
- Hay, H.B. and C.E. Clapp. 2001. Humic Substances: Consideration of Composting, aspect of structure, and environmental influences. **Soil Science**. 166: 723-737.
- He, X-S., B-D. Xi, Y-H. Jiang, L-S. He, D. Li, H-W. 2011. 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.
- Huang, G.F., Q.T. Wu, J.W.C. Wong and B.B. Nagar. 2006. Transformation organicmatter during co-composting of pig manure with sawdust. **Bioresource Technology**. 97: 1834-1842.

- Huang, G.F., J.W.C. Wong, Q.T. Wu, and B.B. Nagar. 2008. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. **Waste Management**. 24, 8: 805-813.
- Jenn, S.. 1998. Composted animal manures: Precautions and processing. Honolulu (HI): University of Hawaii.
- Kim, K.D., S. Nemeč and G. Musson. 1997. Effects of composts and soil amendments on soil microflora and Phytophthora root and crown rot of bell pepper. **Crop Protection**. 16: 165-172.
- Kumada, K. 1987. **Chemistry of Soil Organic matter**. Developments in soil Science Vol.17 Tokyo: Japan Scientific Societies Press.
- Lipski, M., J. Slawinski and D. Zych. 1999. Changes in the luminescent properties of humic acids induced by UV radiation. **J. Fluoresc.** 9: 133-138.
- Lucima, L.. 2008. Biochemical transformation of humic substances during humification related to their environmental functions. **Environment International**. 20:43-48.
- Lucima, K.. 2010. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biol. Rev.* 63: 433-462.
- Maria, G. and M. Rosa. 2010. Humic acids of different origin as modifiers of cadmium-ion chemistry: A spectroscopic approach to structural properties and reactivity. **Inorganica Chimica Acta**. 363: 495-503.
- Michael, S.P.. 1995. Composting processes. In *Bioconversion of waste material to industrial products*, 3th ed. Edited by Martind, A.M. Elsevier Applied Science; London, U.K. PP. 147-186.
- Mecozzi, M., R. Acquistucci, V.D. Noto, E. Pietrantonio, M. Amici and D. Cardarilli. 2001. Characterization of mucilage aggregates in Adriatic and Tyrrhenian Sea: structure similarities between mucilages and the insoluble fraction of marine humic substances. **Chemosphere**. 44: 709-720.
- Oskans, N.C.. 2013. Organic fertilizers: their nature, properties and use. A publication of farming systems and soil resource institute, UPLB, Laguna. PP. 250-260.
- Oskars, P.. 2013. Comparative Study of Peat Humic Acids By Using UV-Spectroscopy. **1st Annual International Interdisciplinary Conference, AIC 2013, 24-26 April**, Azores, Portugal.
- Plaza, c., R. Nogales, N. Senesi, E. Benitez and A. PoLo. 2008. Organic matter humification by vermicomposting of cattle manure alone and mixed with twophase olive pomace. **Bioresource Technology**. 99: 5085-5089.
- Polak, J., M. Bartoszek, M. Zadło, A. Kos and W.W. Sulkowski. 2006. The spectroscopic studies of humic acid extracted from sediment collected at different seasons. **Chemosphere**. 84: 1548-1555.

- Remmy, N.. 2010. Composted materials as organic fertilizers. **Science of Total Environment**. 81-82: 521-542.
- Rice, J.A. 2001. Humin. **Soil Science**. 166: 848-857.
- Sanchez-Monedero, M.A., A. Roig, J. Cegarra and M.P. Bernal. 1999. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenal fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. **Bioresource Technology**. 70: 193-201.
- Sanchez-Monedero, M.A., A. Roig, J. Cegarra and M.P. Bernal. 2002. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenal fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. **Bioresource Technology**. 70: 193-201.
- Sanmanee, N., K. Panishkan, K. Obsuwan, and S. Dharmvanij. 2011. Study of Compost Maturity during Humification Process using UV-Spectroscopy. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 56: 648-650.
- Sellami, F., S. Hachicha, M. Chtourou, K. Medhioub and E. Ammar. 2008. Maturity Assessment of Composted Olive Mill Wastes Using UV Spectra and Humification Parameters. **Bioresource Technology**. 99: 6900-6907.
- Schnitzer, M. (1972). Humic substances: chemistry and reactions. In: Schnitzer, M., Khan, S.U. (Eds.), *Soil Organic Matter*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-64.
- Stevenson, F.J., 1992. *Humic Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, Wiley, New York.
- Stevenson, F. J.. 1994. **Humus Chemistry: Genesis. Composition**, 2 nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Tan, K.H. (2003). **Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies**. New York: Marcel Dekk
- Veeken, A., Hamelers, B., in press. 2000. Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components, **Bioresourc Technol**.
- Vi Neh, M.E.. 2000. Cashew wine vinegar production: Alcoholic and Acetic Fermentation. Unidade Academica de Engenharia Quimica, Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprigio Veleso 882, CEP: 58106-970.
- Visser, S.. 1983. Proteolytic enzymes and their action on milk proteins, A review *Neth. Milk Dairy J.* 35:65.
- Wang. LY., Wu, F.C., Zhang. R.Y., W., Li, W., Liao, H.Q. 1990. Characterization of dissolved organic matter fractions from Lake Hongfeng. Southwestern China Plateau. **J. Environ. Sci.** 21: 581-588.

- Wei, Z., B. Xi, Y. Zhao, S. Wang, H. Liu and Y. .Jiang. 2007. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. **Chemosphere**. 68: 368-374.
- 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.
- Zeng, G.M., H.L. Huang, D.L. Huang, X.Z. Yuan, R.Q. Jiang, M. Yu, H.Y. Yu, J.C. Zhang, R.Y. Wang and X.L. Liu. 2008. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. **Process Biochemistry**. 44: 396-400.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพ และทางเคมีของปุ๋ยหมัก

ข้อมูลลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมักมูลวัว

ระยะเวลา (วัน)	TOC (mg/g) ±SD	TC (mg/g) ±SD	TIC (mg/g) ±SD	HA (mg/g) ±SD
0	257.6±6.19	266.69±6.20	9.12±0.80	6.66±1.11
3	256.3±24.01	266.40±24.35	10.13±0.35	5.74±0.70
7	197.5±0.71	207.15±1.12	9.66±0.41	6.33±0.80
14	183.7±8.61	192.42±8.55	8.74±0.17	7.19±0.38
21	200.9±12.68	209.37±12.14	8.45±0.73	3.77±1.34
28	238.5±1.95	247.76±2.45	9.22±0.56	6.06±0.49
35	217.3±1.75	225.82±1.34	8.57±0.52	6.06±6.79
42	190.7±5.78	199.26±5.23	8.58±0.16	5.63±0.23
63	210.7±21.67	219.24±21.77	8.50±0.10	5.11 ± 0.64
77	170.4±14.61	179.08±14.49	8.63±0.48	3.31 ± 0.12
91	167.0±14.24	174.82±14.18	7.83±0.19	3.51 ±0.24
105	195.9±10.63	204.45±10.55	8.59±0.55	4.15 ±0.31
119	169.3±3.56	177.36±3.48	8.10±0.70	3.47 ±0.18



ภาคผนวก ข

ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีจากความยาวคลื่นช่วงต่างๆ

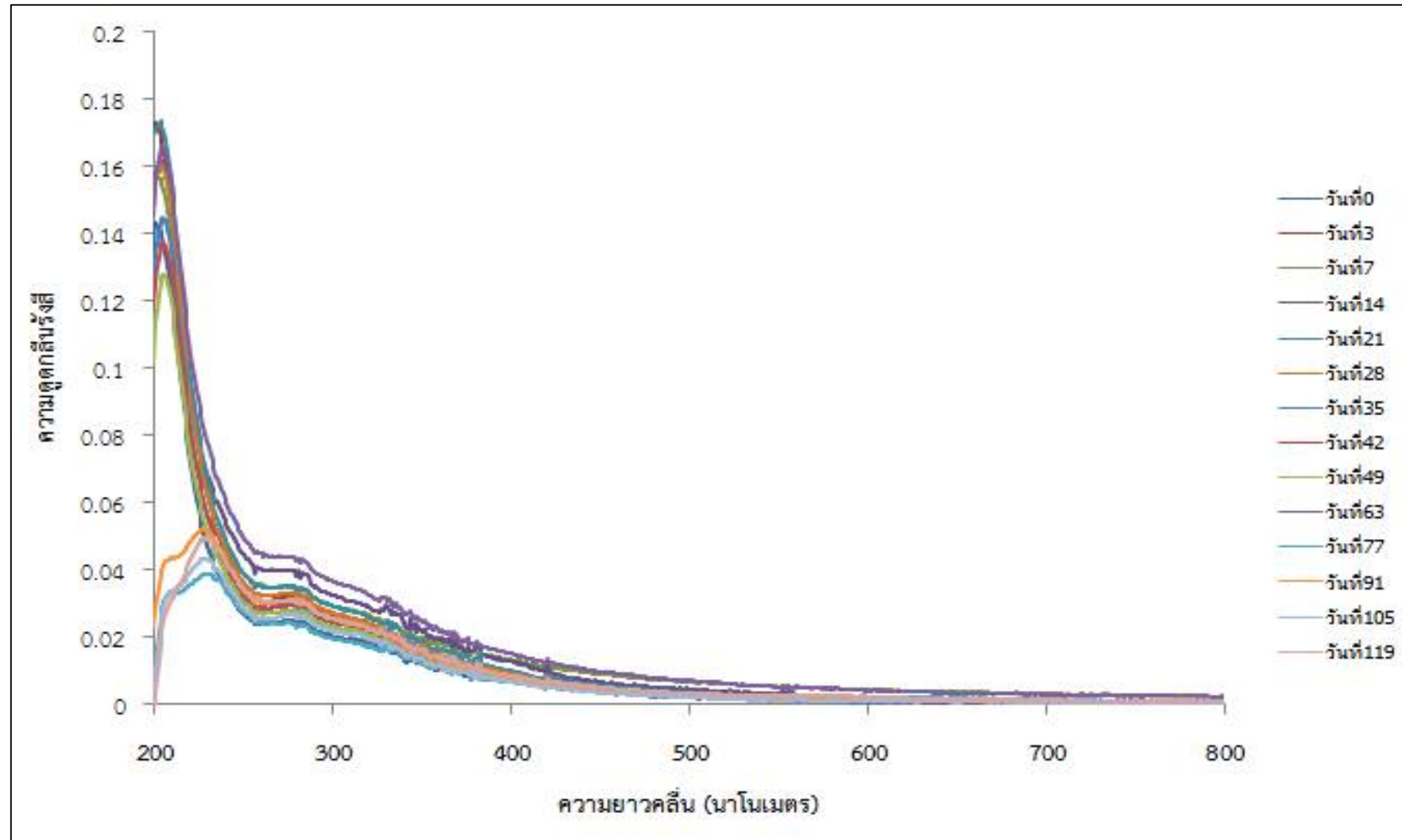
ตารางที่ 27 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของกรดฮิวมิกจากปุ๋ยหมักมูลวัวด้วยช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

day	abs205	abs207	abs215	abs220	abs230	abs 260	abs280	abs460	abs480	abs472	abs465	abs665
0	0.1395	0.1337	0.0986	0.0756	0.0473	0.0242	0.024	0.0032	0.0024	0.0029	0.0031	0.0006
3	0.1671	0.1606	0.1213	0.0959	0.0631	0.031	0.0311	0.0039	0.0031	0.0035	0.0037	0.0007
7	0.155	0.1505	0.1162	0.0935	0.0626	0.0357	0.0339	0.0085	0.0075	0.0081	0.0084	0.0037
14	0.1617	0.1591	0.1231	0.0968	0.0686	0.0404	0.038	0.0062	0.0052	0.0057	0.0059	0.0014
21	0.1721	0.1677	0.1284	0.1018	0.0674	0.0352	0.0342	0.0051	0.0041	0.0048	0.005	0.0014
28	0.1605	0.1573	0.1209	0.095	0.0627	0.0327	0.0321	0.0045	0.0036	0.0041	0.0044	0.0012
35	0.1447	0.1439	0.1111	0.0866	0.0566	0.0287	0.0287	0.0036	0.0028	0.0032	0.0036	0.0008
42	0.1373	0.1364	0.1066	0.0843	0.0563	0.0288	0.0288	0.0036	0.0028	0.0032	0.0036	0.0007
63	0.1659	0.1643	0.1316	0.1084	0.0783	0.045	0.0426	0.0091	0.0078	0.0084	0.0088	0.0034
77	0.0285	0.032	0.0337	0.0353	0.0387	0.0246	0.0231	0.0039	0.0033	0.0038	0.0039	0.0019
91	0.0402	0.0426	0.0444	0.0477	0.0515	0.0304	0.0303	0.0039	0.0031	0.0036	0.0037	0.001
105	0.0265	0.0312	0.0355	0.0389	0.0433	0.0256	0.0257	0.0032	0.0025	0.003	0.0032	0.0008
119	0.0221	0.0275	0.0357	0.0421	0.0492	0.0313	0.03	0.0046	0.0039	0.0044	0.0045	0.0015

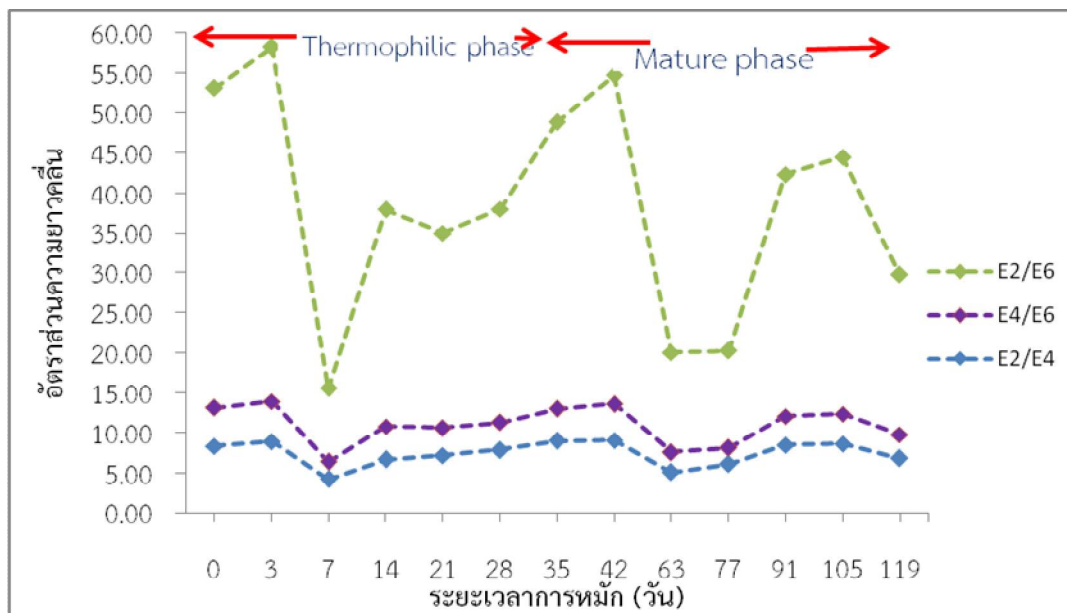
ตารางที่ 28 ค่าอัตราส่วนของการดูดกลืนคลื่นแสงตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลา การหมัก	อัตราส่วน			ค่า Log E	
	E2/E4	E4/E6	E2/E6	e400	e600
14	6.67	4.07	27.14	0.0128	0.0018
21	7.13	3.43	24.43	0.0101	0.0019
28	7.83	3.42	26.75	0.00094	0.0016
35	8.97	4.00	35.88	0.008	0.0013
42	9.00	4.57	41.14	0.0079	0.001
63	5.07	2.47	12.53	0.0153	0.0044
77	6.08	2.00	12.16	0.00666	0.0024
91	8.42	3.60	30.30	0.0083	0.0014
105	8.57	3.75	32.13	0.0068	0.0011
119	6.82	2.93	20.00	0.0086	0.0024





ภาพที่ 35 ผลการวิเคราะห์ความดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ตวิสเปคตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักมูลวัวที่ระยะเวลาต่างกัน



ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน E₂/E₄ E₄/E₆ E₂/E₆





ตารางที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	ระยะเวลา การหมัก
คาร์บอน	-0.880**
ไนโตรเจน	-0.799**
อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน	-0.782**

หมายเหตุ: ** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, n=13

