



การศึกษาดัชนีของกระบวนการอิทธิพลที่กระทบต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก

โดย

นางสาวอัญชลี ไชยเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาดัชนีของกระบวนการอิทธิพลที่สะท้อนต่อคุณภาพของปัญหามัก

โดย

นางสาวอัญชลี ไชยเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY OF HUMIFICATION INDICES ON THE QUALITY OF COMPOST

By

Anchalee Chainet

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

MASTER OF SCIENCE

Department of Environmental Science

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาดัชนีของ
กระบวนการอิทธิพลที่กระตุ้นต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก ” เสนอโดย นางสาวอัญชลี ไชยเนตร เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรพณี

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลชนก พานิชการ)

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

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงษ์พร)

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

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรพณี)

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

50311314 : สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก/กรดฮิวมิก/ปุ๋ยหมัก/ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

อัญชลี ไชยเนตร : การศึกษาดัชนีของกระบวนการฮิวมิฟิเคชันต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.นันทิรา สรรพณี. 97 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษากระบวนการเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification indices) ได้แก่ อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ร้อยละของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนในกรดฮิวมิกต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด เรียกร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI) ร้อยละของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนในสารฮิวมิกต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด เรียกร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และร้อยละของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (Percentage of humic acid; PH) ความสัมพันธ์ของดัชนีเหล่านี้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS

อัตราส่วน H/C และ C/N มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป บ่งชี้ได้ว่าเกิดสารประกอบอะโรมาติกเพิ่มขึ้นในโครงสร้างของกรดฮิวมิก และอัตราส่วนทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.749$) สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนในกรดฮิวมิกที่สัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณออกซิเจน ($p < 0.01$; $r = -0.998$) บอกเป็นนัยถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟีนอลิกที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบมากในโครงสร้างของกรดฮิวมิก

ระดับของการเกิดกรดฮิวมิกที่สูงสุดแสดงไว้ด้วยอัตราส่วนที่สูงที่สุดของค่า HI และ HR ในวันที่ 91 อัตราส่วนทั้งสองสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$; $r = 0.938$) ทำให้ค่า PH ส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เป็นผลให้วันที่เหมาะสมสำหรับการใช้ปุ๋ยนี้เพื่อเพาะปลูกควรเป็นวันที่ 35 เมื่อปริมาณของกรดฮิวมิกสูงที่สุดอย่างน้อย 5 ถึง 20 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาอื่น ๆ

พารามิเตอร์อื่น เช่น ค่าพีเอช ปริมาณความชื้น และค่าความนำไฟฟ้า ของปุ๋ยหมักได้รับอิทธิพลจากกระบวนการเกิดสารฮิวมิกอย่างมากและแสดงไว้ด้วยสมการเส้นตรง จากเหตุนี้พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถถูกนำมาใช้เพื่อทำนายกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาของการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนและค่าสารเคมีที่มีราคาแพงอีกด้วย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

50311314 : MAJOR : ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORDS : HUMIFICATION INDICES/HUMIC ACID/COMPOST/ELEMENTAL COMPONENT

ANCHALEE CHAINET : STUDY OF HUMIFICATION INDICES ON THE QUALITY OF COMPOST. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.NATDHERA SANMANEE, Ph.D. 97 pp.

The objective of this research was to study the humification process of the compost by using varieties of humification indices which were oxygen by carbon (O/C), hydrogen by carbon (H/C), carbon by nitrogen (C/N), percentage of the amount of carbon in humic acid by total organic carbon called humification index (HI), percentage of the amount of carbon in humic substances by total organic carbon called humification ratio (HR), and percentage of the amount of carbon in humic acid by the amount of carbon in humic substances (PH). Their relationships were analyzed by SPSS program.

H/C and C/N ratio declined over period of time indicating the appearance of more aromatic compounds in humic acid structure and they were also positively correlated to each other ($p < 0.01$; $r^2 = 0.561$). This was in accordance with the increasing of carbon in humic acid which was correlated to the reduction of the amount of oxygen ($p < 0.01$; $r = 0.995$) implying the increasing of phenolic groups, the most common functional group found in humic acid structures.

The highest degree of humification was shown by the highest ratio of HI and HR at 91 days. Both ratio were significantly correlated ($p < 0.01$; $r = 0.938$) making the PH slightly change most of the times. As a result, the appropriate day of using this compost for cultivation should be at 35 days where the amounts of humic acid was the highest at least 5-20 times comparing to the others.

Other parameters such as pH, moisture content and electrical conductivity of the compost received the highly influence from the humification process and showed as some linear regressions. As a result, they could be employed to predict the humification process as well. This would save time of elaborating analysis and cost of expensive expense of many chemical agents.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความเมตตา กรุณา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งในส่วนของการทดลองและให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์เพื่อแก้ไขงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้การเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ยังได้รับคำแนะนำและชี้แนะทางการแก้ไขข้อบกพร่องจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลชนก พานิชการ และรองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษพงษ์ ซึ่งทางผู้วิจัยก็ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนส่วนหนึ่งจากโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการเกษตรอินทรีย์: การฟื้นฟูคุณภาพดินด้วยวิธีเศรษฐกิจพอเพียง” จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร มา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณสมาชิกองค์การบริหารส่วนตำบลหนองงูเห่ล้อม อำเภอเมือง จังหวัด นครปฐม และชาวบ้านทุกคน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปฎิบัติครั้งนี้ อีกทั้งขอขอบพระคุณ คุณศุภโชค กำภูพงษ์ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คุณผ่องศรี เผ่าภูรี คุณนที ส่งบุญ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกท่าน ซึ่งให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนพระคุณของคุณพ่อธัญพิสิษฐ์ และคุณแม่อารมณ ไซยเนตร คุณพ่อปริญญา และคุณแม่ณัฐภัทร ใจทา คุณพ่อณรงค์ และคุณแม่สาวลักษณ์ แก้วหน่อ ที่ได้ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจเสมอมา และเพื่อตอบแทนบูรพคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการศึกษา	3
ขั้นตอนการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 บทตรวจเอกสาร	5
ปัญหา.....	5
ความหมายของปัญหา.....	5
ประโยชน์ของปัญหา.....	6
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	6
ประโยชน์ด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช	7
ประโยชน์ด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม	7
การผลิตปัญหา	8
การหมักในหลุม.....	8
การหมักในของเหลว	9
การหมักแบบกองบนพื้น	9
การหมักแบบใส่กระสอบ	10
การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ย	11
หลักในการพิจารณาความพร้อมของปุ๋ยจากกระบวนการหมัก	11

บทที่	หน้า
ลักษณะทางกายภาพ.....	12
ลักษณะทางเคมี.....	12
มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์.....	13
สารฮิวมิก (Humic substances).....	13
คำนิยามของสารฮิวมิก.....	13
ทฤษฎีการเกิดสารฮิวมิก.....	15
ทฤษฎีลิกนิน (Lignin Theory).....	15
ทฤษฎีโพลีฟีนอล (Polyphenol Theory).....	17
ทฤษฎีการรวมตัวกันของซูการ์-เอมีน (Sugar-Amine Condensation Theory).....	18
การจัดจำแนกและโครงสร้างของสารฮิวมิก.....	19
การจัดจำแนกสารฮิวมิก.....	19
โครงสร้างของสารฮิวมิก.....	19
ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	24
ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก.....	24
การพิจารณาจากธาตุองค์ประกอบโดยตรง.....	24
การพิจารณาจากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ.....	25
หมู่ฟังก์ชันและผลรวมของความเป็นกรดของกรดฮิวมิก.....	28
ดัชนีของร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI)	
ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR)	
และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid; PH)	30
การดูดกลืนคลื่นแสง.....	32
อิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อการเกิดสารฮิวมิก.....	35
ระยะเริ่มผสม (Initial phase).....	35
ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase).....	35
ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase).....	35
ระยะคงสภาพ (Mature phase).....	36

บทที่	หน้า
3	วิธีการทดลอง..... 37
	สารเคมีและรีเอเจนท์ (chemicals and reagents) 39
	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (instrumentation) 39
	วิธีการทดลอง..... 40
	การหมักและเตรียมตัวอย่างปฏึก..... 40
	ขั้นตอนการหมักปฏึก..... 41
	ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปฏึก..... 41
	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์..... 42
	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 42
	การสกัดสารฮิวมิก..... 42
	การวิเคราะห์คาร์บอนอนินทรีย์ (inorganic carbon) หรือ คาร์บอเนต (carbonate)..... 43
	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (organic carbon) 44
	ความเป็นกรดทั้งหมด (total acidity) 45
	หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic (COOH) groups)..... 45
	ฟีนอลิก (phenolic-OH groups)..... 46
	การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง..... 46
	การหาดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก..... 46
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 47
	ลักษณะพื้นฐานของปฏึกและการพิจารณาเทียบกับมาตรฐานของปฏึกอินทรีย์..... 47
	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของปฏึก..... 47
	คุณลักษณะมาตรฐานของปฏึกอินทรีย์..... 50
	ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก..... 51
	ธาตุองค์ประกอบ..... 51
	การพิจารณาจากธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยตรง..... 51
	การพิจารณาจากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก.. 54
	หมู่ฟังก์ชันและผลรวมของความเป็นกรดของกรดฮิวมิก..... 57
	การดูดกลืนคลื่นแสง..... 61

บทที่	หน้า
อิทธิพลและความสัมพันธ์ของดัชนีกระบวนการเกิดสารชีวมีก	
ที่มีต่อการเกิดกรดชีวมีก.....	62
อิทธิพลและความสัมพันธ์ของอัตราส่วน O/C, H/C	
และ C/N ที่มีต่อการเกิดกรดชีวมีก	63
อิทธิพลและความสัมพันธ์ของดัชนีร้อยละการเกิดกรดชีวมีก	
(HI) ร้อยละการเกิดสารชีวมีก (HR) และร้อยละของกรดชีวมีก	
ต่อสารชีวมีก (PH) ที่มีผลต่อการเกิดกรดชีวมีก	65
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับการเกิดกรดชีวมีก..	70
พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับดัชนีร้อยละการเกิดกรดชีวมีก	
(HI) ร้อยละการเกิดสารชีวมีก (HR) และร้อยละของกรด	
ชีวมีกต่อสารชีวมีก (PH)	71
พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนออกซิเจนต่อ	
คาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ	
คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	76
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก	
กับอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)	76
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก	
กับอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)	77
ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก	
กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....	79
5 สรุปผลการทดลอง.....	81
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก และ	
ข้อมูลเกี่ยวกับดัชนีของกระบวนการเกิดสารชีวมีก	91

บทที่	หน้า
ประวัติผู้วิจัย.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตเพื่อจำหน่ายตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548.....	14
2 คุณสมบัติบางประการและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิกและกรดฟัลลิก .	23
3 ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ.....	25
4 อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ	28
5 ความเข้มข้นของผลรวมความเป็นกรด หมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ฟีนอลิกของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ.....	29
6 ดัชนีของร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก(humification ratio, HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid, PH) ในระหว่างหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ	32
7 แสดงวิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Methodologies and instruments).....	37
8 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต	39
9 ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก	42
10 ลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ย	49
11 การเปรียบเทียบมาตรฐานตัวอย่างปุ๋ยหมักกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548	52
12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก (n=12)	60
13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิก (n=12)	64
14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของปุ๋ยหมัก (TOC) ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) และปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC) (n = 12)	66

ตารางที่		หน้า
15	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของ ปุ๋ยหมักกับดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio, HR) และร้อยละของ กรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of humic acid, PH) (n = 12).....	72
16	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของ ปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจน ต่อคาร์บอน (H/C) และ คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (n = 12).....	77
17	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก.....	92
18	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ และหมู่ฟังก์ชัน ของกรดฮิวมิก.....	94
19	ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก.....	95

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปุ๋ยหมักและวัสดุที่นำมาใช้ทำปุ๋ยหมัก	5
2	การหมักปุ๋ยในหลุม.....	8
3	น้ำหมักที่ได้จากปลา	9
4	การหมักปุ๋ยแบบกองฟืน	10
5	การหมักแบบใส่กระสอบ	11
6	ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้ว	12
7	หน่วยโครงสร้างของลิกนิน	15
8	ทฤษฎีลิกนิน (Lignin Theory)	16
9	ทฤษฎีโพลีฟีนอล (Polyphenol Theory)	18
10	ทฤษฎีซูการ์-เอมีน (Sugar-Amine Condensation Theory).....	19
11	การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิกในดิน	20
12	การจำแนกชนิดของสารฮิวมิกจากสีของสารฮิวมิก.....	21
13	โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid).....	21
14	โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic acid).....	22
15	ค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลของกรดฮิวมิก	33
16	ค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก 2 ชนิดที่ระยะเวลาต่างกัน	34
17	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ย.....	36
18	แสดงแผนผังการทดลองโดยรวมของการศึกษา	38
19	การทำปุ๋ยหมัก.....	48
20	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักระหว่างการหมักปุ๋ย.....	50
21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	54
22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของกรดฮิวมิกกับ ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	55
23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	56

ภาพที่		หน้า
24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	57
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	58
26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดฮิวมิก (HA) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	59
27	สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิลิเบิลของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่ระยะเวลาในการหมักต่างกัน	63
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) ในระหว่างการหมักปุ๋ย	65
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ในปุ๋ยหมักและปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	67
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ในปุ๋ยหมัก และปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	68
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) กับปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC)	69
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH) ในระหว่างการหมักปุ๋ย	70
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	73
34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	74
35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	75
36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย	75

บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีสภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ และปัจจัยแวดล้อมอื่นที่เอื้อต่อการทำการเกษตร คนไทยส่วนใหญ่จึงมีอาชีพเป็นเกษตรกรและทำสืบทอดต่อกันมาอย่างช้านาน ส่งผลทำให้ดินในพื้นที่เกษตรกรรมเสื่อมโทรมลงอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากการถูกรบกวนทั้งการพรวนดิน การใส่ปุ๋ยเคมี หรือการใช้สารปราบศัตรูพืช ทำให้เกิดผลกระทบต่อการปลูกพืชในระยะยาว ส่งผลให้ผลผลิตตกต่ำ ไม่มีคุณภาพ ด้วยเหตุนี้ทำให้รัฐบาลเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้น จึงมีการสนับสนุนให้ใช้สารอินทรีย์ทดแทนสารเคมี และแสดงเจตนารมณ์ในการขับเคลื่อนเกษตรอินทรีย์เป็นวาระแห่งชาติ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) โดยมีวัตถุประสงค์ให้ทุกภาคส่วนร่วมกันปฏิบัติอย่างจริงจัง และต่อเนื่อง เพื่อให้มีการปรับเปลี่ยนระบบการผลิตที่พึ่งพาการใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมี มาเป็นการพึ่งพาตนเองจากภูมิปัญญาของชาวบ้านในการผลิตปุ๋ยหมักและสารชีวภาพเพื่อใช้เองและจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้ให้กับครอบครัว ซึ่งจะทำขึ้นเฉพาะภายในประเทศตามแนวเศรษฐกิจพอเพียง

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยที่ได้จากอินทรีย์วัตถุต่างๆ โดยผ่านกรรมวิธีเพื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันในระยะเวลาหนึ่งนั้น จะมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินให้ดีขึ้น ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ด้วยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จนได้สารอินทรีย์ที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัส สลายตัวช้าและไม่มีการชะล้าง มีสีน้ำตาลปนดำ (อดุลย์, 2546) ฮิวมัสที่มีบทบาทสำคัญในดินเรียกว่า สารฮิวมิก ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนที่ถูกรวบรวมมาจากวัสดุต่างๆ ผ่านกระบวนการทางชีวภาพและเคมีในระหว่างเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปของเศษซากพืชซากสัตว์และชีวมวล โดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification process) (Zech et al., 1997) สารฮิวมิกแบ่งเป็น 3 ชนิดตามความซับซ้อนของโครงสร้าง ได้แก่ กรดฟัลวิก → กรดฮิวมิก → ฮิวมิน ชนิดที่มีบทบาทในดินมากที่สุดคือ กรดฮิวมิก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างอะโรมาติกที่มีความเสถียร มีหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่เป็นหมู่ฟีนอลิกสามารถยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะอื่น ๆ ได้ กรดฮิวมิกละลายน้ำน้อยจึงไม่ถูกชะได้ง่าย รวมทั้งยังเป็นตัวที่สำคัญในการปรับปรุงโครงสร้างดิน เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชอีกด้วย โดยกระบวนการเกิดกรดฮิวมิกนั้นอาจเกิดจากการรวมตัวกันของกรดฟัลวิกก็ได้ (Stevenson, 1994)

การเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นสามารถพิจารณาจากดัชนีที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ การเกิดและการเปลี่ยนแปลงสารฮิวมิก ที่สำคัญคือ การหาอัตราส่วนระหว่างธาตุองค์ประกอบของ กรดฮิวมิก (อัตราส่วน O/C H/C และ C/N) ร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ร้อย ละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio, HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of humic acid, PH) ซึ่งถ้าค่าเหล่านี้มีค่าสูงแสดงว่าเกิดกรดฮิวมิกมาก และยังช่วยประเมินอายุของ ปุ๋ยหมักเพื่อให้ได้มาซึ่งปุ๋ยหมักคุณภาพสูงในระยะเวลาการหมักอันสั้น โดยสามารถพิจารณาได้จาก กรดฮิวมิกที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้าหมักปุ๋ยนานเกินไปกระบวนการเกิดสารฮิวมิกอาจถูกรบกวนได้ (Prudent et al., 1995) ประกอบกับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมภายในปุ๋ยหมักที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสาร ฮิวมิก เช่น ความชื้น pH ค่าความนำไฟฟ้า ธาตุอาหารพืช เป็นต้น เพื่อให้เกิดกรดฮิวมิกที่สำคัญและ ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพต่อไป

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเกิดแนวความคิดที่จะติดตามการเกิดกรดฮิวมิกที่เป็นตัวกำหนดคุณภาพ และอายุของปุ๋ยหมักที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ตลอดระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 4 เดือน โดยพิจารณาจากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก จากการศึกษาสามารถนำไปเผยแพร่ ให้ประชาชนได้นำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตปุ๋ยหมักคุณภาพสูงได้เองเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตทาง การเกษตร อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุน เพิ่มรายได้ให้กับครอบครัวและส่งเสริมเศรษฐกิจของประเทศ ในอนาคตอีกด้วย

2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 2.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตลอด ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย
- 2.2 เพื่อศึกษาปริมาณของกรดฮิวมิกและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาใน การหมักปุ๋ย
- 2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพของกรดฮิวมิก โดยใช้ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก ซึ่ง ได้แก่ อัตราส่วน O/C H/C และ C/N ของกรดฮิวมิก และร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการ เกิดสารฮิวมิก (HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH)
- 2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับการเกิดกรด ฮิวมิกจากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

3. สมมติฐานของการศึกษา

ระยะเวลาในการหมักปุ๋ยมีผลต่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น

4. ขอบเขตการศึกษา

ปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษาเป็นปุ๋ยหมักที่ทำขึ้นเองโดยใช้พื้นที่หมู่ 4 ตำบลหนองงูเห่ล้อมอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐมเป็นพื้นที่ในการทำ โดยทำการหมักปุ๋ยที่มีส่วนผสมของวัตถุดิบที่สามารถหาได้โดยทั่วไปในท้องถิ่น และเก็บตัวอย่างปุ๋ยมาวิเคราะห์ในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ที่เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมักตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ได้แก่ ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ย่อยได้ ค่า pH ค่า C/N ratio ค่าการนำไฟฟ้า ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด และโลหะต่างๆ และตัวชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ปริมาณและคุณลักษณะบางประการของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่เป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของสารอินทรีย์ในปุ๋ยหมัก ซึ่งจะพิจารณาจากองค์ประกอบภายในกรดฮิวมิกและดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย จากนั้นจึงนำผลการศึกษาที่ได้ทั้งหมดมารวบรวม และสรุปผลการทดลอง

5. ขั้นตอนการศึกษา

- 5.1 รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทำปุ๋ยหมักและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 5.2 เตรียมส่วนผสมและทำปุ๋ยหมัก
- 5.3 เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเป็นระยะเวลา 4 เดือน
- 5.4 เตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก วิธีการ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
- 5.5 เตรียมการทดลอง
- 5.6 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ศึกษา
- 5.7 เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผลทางสถิติ
- 5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 5.9 เขียนรายงาน

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 6.1 สามารถทราบปริมาณและคุณลักษณะบางประการของสารฮิวมิกจากกระบวนการเกิดสารฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย ซึ่งนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกอายุปุ๋ยหมักเพื่อนำไปใช้ตลอดจนการประเมินคุณภาพโดยรวมของปุ๋ยหมัก ณ เวลาต่าง ๆ
- 6.2 เกษตรกรได้ปุ๋ยหมักคุณภาพสูงที่มีปริมาณกรดฮิวมิกที่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืชและการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยไม่ต้องพึ่งสารเคมี ส่งผลให้ผลผลิตและรายได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งสภาพแวดล้อมดีขึ้นในระยะยาวอีกด้วย

6.3 สามารถทราบปัจจัยภายในผู้ป่วยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดกรดฮิวมิก และใช้เป็นตัวทำนายการเปลี่ยนแปลงกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้น จากสมการที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับการเกิดกรดฮิวมิกจากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

6.4 เกษตรกรสามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ และสามารถนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับการเกิดกรดฮิวมิกจากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่ได้ไปประเมินการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักเบื้องต้นได้ โดยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์

บทที่ 2

บทตรวจเอกสาร

1. ปุ๋ยหมัก

1.1 ความหมายของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก คือปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการหมักสารอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ต่าง ๆ เช่น ใบไม้ ฟางข้าว หญ้าแห้ง มูลสัตว์ต่างๆ ขยะมูลฝอยตามบ้านเรือน ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ รวมกันแล้วให้เกิดการผุพังตามธรรมชาติภายใต้กระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระยะเวลาหนึ่ง จนกระทั่งสารอินทรีย์วัตถุตั้งต้นเปลี่ยนสภาพเป็นสีน้ำตาลปนดำ คงทนต่อการย่อยสลาย จึงนำไปใช้ปรับปรุงดินและเป็นแหล่งธาตุอาหารให้แก่พืชได้ (ธงชัย, 2550; มุกดา, 2548; ราเชนทร์ และคณะ, 2550) ดังภาพที่ 1 ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดน้ำก็ถือว่าเป็นปุ๋ยหมักอีกชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการหมักพืชผัก ผลไม้ ปลา หอยเชอร์รี่ เศษอาหาร โดยนำมาหมักกับกากน้ำตาลในสภาพไร้อากาศเป็นเวลา 45 ถึง 60 วัน จนเกิดการย่อยสลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดน้ำ (ราเชนทร์ และคณะ, 2550) โดยอาจมีการใส่ปุ๋ยเคมีลงไปในช่วงการหมักปุ๋ยเพื่อช่วยเร่งกิจกรรมของจุลินทรีย์และเพิ่มธาตุอาหารของปุ๋ยหมักด้วย (มุกดา, 2548)



ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักและวัสดุที่นำมาใช้ทำปุ๋ยหมัก
ที่มา : ฉัตรชัย, 2552

ปุ๋ยหมักมีความสำคัญและมีคุณค่าสูงในทางการเกษตร แต่ไม่ได้รับความสนใจหรือนิยมเท่าที่ควร เนื่องจากสาเหตุหลายประการ

- เกษตรกรส่วนใหญ่ยังไม่เห็นความสำคัญที่แท้จริงของปุ๋ยหมักว่ามีคุณค่าเพียงใดในการปรับปรุงหรือช่วยรักษาสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดินให้ดียู่เสมอ
- เกษตรกรขาดความรู้และความเข้าใจในการทำปุ๋ยหมักอย่างถูกวิธี ทำให้ประสบความล้มเหลวหรือได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร มีผลให้หมดกำลังใจ เสียความตั้งใจในการทำปุ๋ยหมักไปได้
- การขาดความเข้าใจในการใช้ปุ๋ย การใช้ปุ๋ยหมักอย่างเดียวยังปรับปรุงดินจนต้องใช้ในปริมาณที่มากและมักไม่เห็นผลอย่างชัดเจนในระยะเวลาอันสั้น (ธงชัย, 2550)
- การจะทำปุ๋ยหมักให้ได้ผลดีนั้นต้องใช้แรงงานและต้องการพื้นที่ทำค่อนข้างมาก ต้องเอาใจใส่ดูแลอยู่เสมอ ดังนั้นเกษตรกรจึงต้องมีความรู้และเข้าใจในการทำปุ๋ยหมักตลอดจนคุณสมบัติที่แท้จริงของปุ๋ยหมัก ต้องมีความตั้งใจจริงที่จะปรับปรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพในการเพาะปลูก จึงจะทำให้การส่งเสริมการผลิตปุ๋ยหมักบรรลุเป้าหมายได้ (Martin, 2005)
- ในการทำปุ๋ยหมักนั้นจะทำในปริมาณมากจึงทำให้ควบคุมสภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในกองปุ๋ยได้ยากจากการเปลี่ยนแปลงของอากาศ อุณหภูมิ และแก๊สแอมโมเนีย เป็นต้น (Nelson, 2004; Bernal et al., 2008)
- ในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ไม่มีเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานจะใช้วิเคราะห์ได้ (Lasaridi and Stentiford, 1998)
- ต้องมีการควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคจากการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน เมื่อกองปุ๋ยมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Cornell Waste Management Institute., 2007)

1.2 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ 1) ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช 2) ประโยชน์ในด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช และ 3) ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

1.2.1 ประโยชน์ด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ปุ๋ยหมักจะมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมต่อการนำธาตุอาหารไปใช้ของพืช ทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกร ปุ๋ยหมักจะทำให้คุณสมบัติของดินดีขึ้นโดยทำให้ดินร่วนซุย ไม่แน่นทึบ ลดความหนาแน่นของดินอุ้มน้ำหรือดูดความชื้นไว้ให้พืชได้มากขึ้น ทำให้ดินมีการระบายน้ำและอากาศถ่ายเทได้ดี ช่วยลดการจับตัว

เป็นก้อนแข็งของหน้าดิน โดยเฉพาะดินเหนียว ทำให้การงอกของเมล็ดหรือการซึมของน้ำลงไปในดินสะดวกขึ้น ส่งผลให้รากพืชสามารถชอนไช แตะแขนง มีระบบรากที่สมบูรณ์และสามารถดูดอาหารและน้ำไปใช้ได้มีประสิทธิภาพ ปุ๋ยหมักจะช่วยเพิ่มการเกิดเม็ดดิน (soil aggregation) โดยฮิวมัสที่มีอยู่ในปุ๋ยหมักซึ่งมีประจุลบจึงช่วยดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวก ส่งผลให้อนุภาคดินเกาะตัวกัน ปุ๋ยหมักจะช่วยเพิ่มค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC) ของดิน เนื่องจากปุ๋ยหมักมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างสูงกว่าในดินจึงช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารประจุบวกไว้ไม่ให้สูญเสียหรือชะล้างไปได้ง่าย และพืชก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ปุ๋ยหมักจะช่วยลดความเป็นพิษของธาตุอาหารบางชนิดได้ เช่น การใส่ปุ๋ยหมักในดินที่เป็นกรดสามารถช่วยบรรเทาความเป็นพิษของอลูมิเนียมและแมงกานีสได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความจุความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงระดับความเป็นกรดเป็นด่างในดินอีกด้วย สำหรับในด้านคุณสมบัติทางชีวภาพนั้นการใส่ปุ๋ยหมักจะเป็นการเพิ่มอาหารของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นและเกิดการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2552)

1.2.2 ประโยชน์ในด้านการเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืช

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารที่จะปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ เพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะธาตุอาหารหลักอย่างไนโตรเจนทั้งหมดประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 2.5 ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชประมาณร้อยละ 0.2 ถึง 2.5 และโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.8 ซึ่งปริมาณธาตุเหล่านี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาหมัก ในปุ๋ยหมักยังมีธาตุอาหารรองที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม นอกจากนี้ยังสามารถพบจุลธาตุอาหารในปุ๋ยหมักได้ด้วย เช่น เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส โบรอน โมลิบดีนัม เป็นต้น ปุ๋ยหมักยังมีส่วนในการช่วยแปรสภาพของธาตุอาหารให้อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ ช่วยดูดซับธาตุอาหารเอาไว้ไม่ให้ถูกชะไปกับน้ำฝน ปุ๋ยหมักจะปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านี้ออกมาให้แก่ต้นพืชอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ (สุพจน์, 2544) สำหรับในดินเหนียว (ดินทรายและดินร่วนปนทราย) นั้นส่วนใหญ่จะมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ อุ้มน้ำได้น้อย ปุ๋ยหมักจะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์วัตถุให้แก่ดินทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ให้พืชได้มากขึ้น จึงควรใส่ปุ๋ยหมักให้มากกว่าปกติ (ธงชัย, 2550)

1.2.3 ประโยชน์ในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อม

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักในด้านการปรับปรุงสภาพแวดล้อมนั้นมีหลายประการ คือช่วยรักษาสภาพแวดล้อมโดยเป็นการนำเศษวัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งแล้วกลับมาใช้เป็นประโยชน์ได้อีก ลดขยะมูลฝอย ทำให้ที่อยู่อาศัยดูสะอาดตา ช่วยลดอากาศเสียจากการเผาตอซังข้าว เศษหญ้า เศษขยะ เป็นการกำจัดวัชพืชน้ำทั้งหลายให้หมดไป ทำให้สัตว์น้ำได้รับแสงแดดเต็มที่และ

เจริญเติบโตขึ้น ลดปัญหาในเรื่องของกลิ่นจากเศษขยะหรือสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ อีกทั้งของเสียจากการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร

1.3 การผลิตปุ๋ยหมัก

การผลิตปุ๋ยหมักนั้นเป็นการหมักวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ ที่สามารถหาได้ง่ายภายในท้องถิ่นแล้วนำมาหมักรวมกันในระยะเวลาช่วงหนึ่ง โดยรูปแบบการหมักก็จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความสะดวกและวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งถ้าแบ่งการผลิตปุ๋ยหมักตามลักษณะการหมักสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ (ธงชัย, 2550) คือ

1.3.1 การหมักในหลุม

การหมักในหลุมเป็นการนำเศษวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ มาหมักในหลุม อาจเป็นหลุมดิน หลุมซีเมนต์ หรือหลุมคอนกรีตก็ได้ เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับสภาพพื้นที่ไม่เรียบ ไม่มีน้ำขังหรือน้ำท่วมถึง และจะต้องมีการทำหลุมวางเปล่าไว้ 1 หลุมเพื่อใช้เป็นที่พลิกกลับปุ๋ยในขณะการหมัก นอกจากนี้จะต้องวางท่อระบายน้ำชะ เพราะถ้ามีน้ำขังในหลุมปุ๋ยหมัก จะทำให้กระบวนการย่อยสลายเศษพืชเป็นไปได้ช้า ทำให้การหมักใช้ระยะเวลานานขึ้น (มุกดา, 2543) หรืออาจเป็นแบบหลุมปิดที่ไม่ต้องมีการพลิกกองปุ๋ยก็ได้ อากาศจึงถ่ายเทได้น้อย อุณหภูมิในกองปุ๋ยจะไม่ค่อยสูงมากนัก ดังนั้นการสลายตัวของสารอินทรีย์จนกระทั่งได้ปุ๋ยก็จะใช้เวลาาน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การหมักปุ๋ยในหลุม

ที่มา : โรงเรียนชีวาคอร์, 2009

1.3.2 การหมักในของเหลว

เป็นการนำเอาเศษวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ มาหมักในภาชนะที่ปิดมิดชิด และเติมน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะ และเติมสารเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย เช่น กากน้ำตาล และจุลินทรีย์เร่งการย่อยสลาย วัสดุที่นำมาหมักจะเป็นวัสดุที่เปียกแฉะ เช่น ผลไม้ เศษปลา เป็นต้น จะเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ และใช้ระยะเวลาประมาณ 30 ถึง 45 วัน มีกลิ่นเหม็น น้ำหมักรู้จักกันมากที่สุดคือน้ำหมักที่ได้จากปลา (วิฑูรย์, 2546) ดังภาพที่ 3 ซึ่งจะมีกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ มากกว่าจากผลไม้และยังเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 21 วัน เมื่อหมักสมบูรณ์แล้วจะมีกลิ่นเปรี้ยว มีธาตุอาหารพืชเกือบครบ โดยเฉพาะไนโตรเจนมีค่าสูงมาก ถ้านำไปผสมกับปุ๋ยหมักจากเศษพืชและมูลสัตว์จะช่วยส่งเสริมกระบวนการของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากน้ำหมักปลามีองค์ประกอบหลักคือกรดอะมิโนที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ และยังช่วยจับกับธาตุอาหารพืชอยู่ในรูปอะมิโนคีเลต ช่วยให้พืชดูดซึมไปใช้ได้ดี (อานันท์, 2549)



ภาพที่ 3 น้ำหมักที่ได้จากปลา

ที่มา : Suthus, 2009

1.3.3 การหมักแบบกองบนพื้น

เป็นการหมักแบบใช้อากาศ ปุ๋ยหมักจะวางอยู่บนพื้นโดยจะมีการกลับกองปุ๋ยอยู่เสมอเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้แก่จุลินทรีย์และลดอุณหภูมิเนื่องจากมีความร้อนสูง ถ้ากองปุ๋ยแห้งจนเกินไปควรรดน้ำเพื่อเพิ่มความชื้น การหมักด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 3 เดือน (ทิพวรรณ และ Takayuki, 2544) ความร้อนในกองปุ๋ยหมักจะช่วยทำลายจุลินทรีย์ ตลอดจนเมล็ดวัชพืชที่ปะปนมา อีกทั้งเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็วและไม่ค่อยมีกลิ่น อาจมีการเติมจุลินทรีย์ลงไปก็ได้ เช่น หัวเชื้อจุลินทรีย์ พด.1 ของกรมพัฒนาที่ดิน (วิฑูรย์, 2546) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การหมักปุ๋ยแบบกองพื้น

ที่มา : เกษตรแผ่นดินทอง, 2553

1.3.4 การหมักแบบใส่กระสอบ

การหมักแบบใส่กระสอบเป็นการนำวัสดุต่าง ๆ เช่น เศษพืช มูลสัตว์ มากองซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แล้วคลุกเคล้าจนเข้ากัน แล้วรดด้วยสายละลาย พด.1 น้ำเปล่า และกากน้ำตาล จากนั้นคลุกเคล้ากันให้มีความชื้นพอหมาด ๆ อย่าให้แห้งหรือชื้นเกินไป แล้วนำปุ๋ยหมักใส่ในกระสอบ ในอัตราส่วน 3 ใน 4 ของกระสอบ ปิดกระสอบ (ไม่ต้องแน่นมาก) ตั้งกระสอบทิ้งไว้ โดยทำการพลิกกระสอบทุกวันเพื่อเป็นการถ่ายเทอากาศช่วยให้เกิดการหมักที่สมบูรณ์ อุณหภูมิในระหว่างการหมักที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 40-50 องศาเซลเซียส และมีความชื้นประมาณ 30% เมื่อปุ๋ยหมักย่อยสลายสมบูรณ์แล้วจึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งปุ๋ยหมักที่ได้จะมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เปื่อยยุ่ย ละเอียด ไม่มีกลิ่นเหม็น และความร้อนในกระสอบจะลดลง วิธีการทำปุ๋ยหมักในกระสอบนี้ใช้ได้ดีกับเกษตรกรที่ไม่มีเวลาในการกลับกองปุ๋ยหมักแบบกอง การพลิกกระสอบจึงเป็นวิธีที่สะดวกที่ ทำได้ง่ายและประหยัดพื้นที่ในการตั้งกองปุ๋ยหมักได้อีกด้วย (ศูนย์ปฏิบัติการเกษตรอินทรีย์ จังหวัดสุรินทร์, 2548)

จากการที่ผู้วิจัยได้ไปศึกษาและดูวิธีการผลิตปุ๋ยหมักจากศูนย์การเรียนรู้ชุมชนโครงการ SML หมู่ 5 ตำบลบางช้าง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม จึงพบว่าวิธีการหมักปุ๋ยแบบใส่กระสอบนี้เป็นวิธีที่สะดวก สามารถทำและดูแลด้วยวิธีที่ง่าย จึงได้เลือกวิธีนี้มาใช้กับงานวิจัยครั้งนี้ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การหมักแบบใส่กระสอบ

ที่มา : นัทธีรา และคณะ, 2551

1.4 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ย

เมื่อมีการผลิตปุ๋ยหมักจากวัสดุอินทรีย์แล้ว จะมีการดูแลกองปุ๋ยโดยอาจมีการกลับกองปุ๋ยรดน้ำ เพื่อให้เกิดสภาพในกองปุ๋ยที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ติดมากับเศษวัสดุต่าง ๆ จะเริ่มเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนขึ้นมา จากการกินสารอินทรีย์วัตถุที่นำมาหมักและจะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะสังเกตเห็นเส้นใยสีขาวที่ผิวของกองปุ๋ยหมักทำให้เกิดความร้อนภายในกองปุ๋ยเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ภายใน 3 ถึง 5 วัน อุณหภูมิอาจสูงถึง 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ความร้อนนี้จะช่วยให้เกิดการย่อยสลายเศษพืชได้อย่างรวดเร็วและทำลายจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ รวมทั้งเมล็ดพืชที่ปนมา กองปุ๋ยจะร้อนระอุอยู่ประมาณ 5 ถึง 20 วัน หลังจากนั้นความร้อนจะค่อย ๆ ลดลงไป เส้นใยสีขาวจะลามเข้าไปในชั้นกลางของปุ๋ยหมัก ขณะเดียวกันเนื้อของเศษพืชหรือวัสดุต่าง ๆ ก็จะเริ่มเปื่อยยุ่ย และมีสีดำมากขึ้น สุดท้ายกองปุ๋ยจะเย็นลง เศษวัสดุจะมีลักษณะร่วนซุย มีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ยุบตัวลงเหลือประมาณ 1/3 ถึง 1/4 ส่วนของกองเดิม ภาษชาวบ้านจะเรียกว่าปุ๋ยหมักสุกแล้ว ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยกระบวนการทั้งหมดอาจใช้เวลา 2 ถึง 3 เดือน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้หมัก วิธีการกอง และการดูแลรักษา (ทิพวรรณ, 2542 ; ทิพวรรณ และ Takayuki, 2544 ; มุกดา, 2548 ; ธงชัย, 2550)

1.5 หลักในการพิจารณาความพร้อมของปุ๋ยจากกระบวนการหมัก

เมื่อหมักปุ๋ยจนได้ที่หรือปุ๋ยหมักสุกแล้วนั้น จะสามารถสังเกตลักษณะของกองปุ๋ยได้ทั้งทางกายภาพที่วัดได้ในภาคสนาม และทางเคมีที่วัดได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ดังนี้

1.5.1 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักจะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จาก

- สีของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้เศษพืชในการหมัก
- กลิ่นของวัสดุ ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้วจะไม่มีกลิ่นฉุน แต่จะมีกลิ่นคล้ายกลิ่นดินธรรมชาติ ถ้ายังมีกลิ่นฉุนแสดงว่ายังเกิดการย่อยสลายไม่สมบูรณ์
- ลักษณะของวัสดุ ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้วจะมีเนื้ออ่อนนุ่ม ร่วนซุย ขาดออกจากกันได้ง่ายไม่แข็งกระด้างเหมือนวัสดุเริ่มต้น
- ความร้อนในกองปุ๋ย ในระยะที่ปุ๋ยหมักเริ่มจะได้ที่นั้น อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก จึงจะถือว่าปุ๋ยหมักได้ที่หรือสมบูรณ์แล้ว
- มีพืชเจริญบนกองปุ๋ยหมัก ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้วบางครั้งจะสังเกตว่ามีพืชที่มีระบบรากลึกหรือเห็ดเจริญบนกองปุ๋ยหมักได้ แสดงว่าปุ๋ยหมักไม่เป็นอันตรายต่อพืช สามารถนำไปใส่ลงดินได้ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้ว

ที่มา : PII BANTEN, 2010

1.5.2 ลักษณะทางเคมี

ลักษณะทางเคมีจะสามารถดูได้จากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในปุ๋ยหมักที่มีค่าประมาณ 20:1 จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (อานัฐ, 2549) จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ความพร้อมของปุ๋ยหมัก โดยจะมีค่าลดลงในระหว่างการหมักปุ๋ย (Li et al., 2000) การที่ต้องพิจารณาอัตราส่วนนี้เนื่องจากในการเพิ่มเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์นั้นจำเป็นต้องใช้คาร์บอนและ

ไนโตรเจนเป็นหลัก ซึ่งคาร์บอนและไนโตรเจนในปุ๋ยหมักนั้นได้มาจากวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยหมักและวัสดุที่แตกต่างกันก็จะมีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนไม่เท่ากัน และถ้ามีอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ ในบางครั้งอัตราส่วนนี้อาจสูงถึง 40:1 นั้นขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์วัตถุที่นำมาทำปุ๋ยหมักและสภาพในกองปุ๋ย ปุ๋ยหมักที่ใช้เศษไม้ในปริมาณมากจะทำให้ค่านี้สูงขึ้นเนื่องจากเศษไม้มีปริมาณลิกนินมากทำให้การย่อยสลายเป็นไปได้ช้า อีกทั้งยังส่งผลให้มีความชื้นสูงขึ้นในช่วงร้อยละ 45 ถึง 70 (Martin, 2005)

1.6 มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์

ในปัจจุบันได้มีการผลิตและใช้ปุ๋ยอินทรีย์กันอย่างแพร่หลาย และภาครัฐก็ได้มีการส่งเสริมให้เกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการปรับปรุงคุณภาพดินแทนการใช้ปุ๋ยเคมี ดังนั้นทางกรมวิชาการเกษตรจึงได้มีการควบคุมมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตเพื่อจำหน่ายเพื่อรักษาผลประโยชน์ของเกษตรกร โดยออกเป็นประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

2. สารฮิวมิก (Humic substances)

2.1 คำนิยามของสารฮิวมิก

สารฮิวมิก (Humic substances) เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ (natural organic matter, NOM) ทั้งในดิน น้ำ ตะกอนดิน (MacCarthy, 2001) ถ่านหิน (Cavani et al., 2003) ของเสียชุมชน (Polak et al., 2005) หรือแม้กระทั่งในปุ๋ยหมัก (Sanchez-Monedero et al., 1999) อันเกิดจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ โดยกระบวนการของจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้หน้าดินหรือผิวน้ำบริเวณนั้น กลายเป็นสีน้ำตาลดำ สำหรับในปุ๋ยหมักนั้นจะมีสีเหลืองปนน้ำตาลจนถึงดำขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ยและความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้น (International humic substances society, 2007) สารฮิวมิกเป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนที่ถูกรวบรวมมาจากวัสดุต่างๆ ผ่านกระบวนการทางชีวภาพและเคมีในระหว่างเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงของเศษซากพืชซากสัตว์และชีวมวล โดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification process) (Zech et al., 1997)

ในระหว่างการหมักปุ๋ยสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และน้ำ ในขณะที่อีกส่วนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารฮิวมิก ซึ่งลักษณะโครงสร้างจะคล้ายกับสารฮิวมิกที่อยู่ในดิน (Hernandez-Apaolaza et al., 2000) การใส่ปุ๋ยหมักจึงเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณและศักยภาพของสารฮิวมิกในดินได้ด้วย อีกทั้งการเปลี่ยนรูปของ

สารอินทรีย์ไปเป็นสารฮิวมิคในปุ๋ยจะใช้ระยะเวลาสั้นกว่าในดิน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจกระบวนการต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปดังกล่าว (Trubetskaya et al., 2001)

ตารางที่ 1 คุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตเพื่อจำหน่ายตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิเมตร
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
3	ปริมาณหินและกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20:1
8	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก	-ไนโตรเจน (total N) ไม่น้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก -ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก -โพแทสเซียม (total K ₂ O) ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
10	การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์
11	สารหนู (Arsenic)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
	แคดเมียม (Cadmium)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
	โครเมียม (Chromium)	ไม่เกิน 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
	ทองแดง (Copper)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
	ตะกั่ว (Lead)	ไม่เกิน 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
	ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

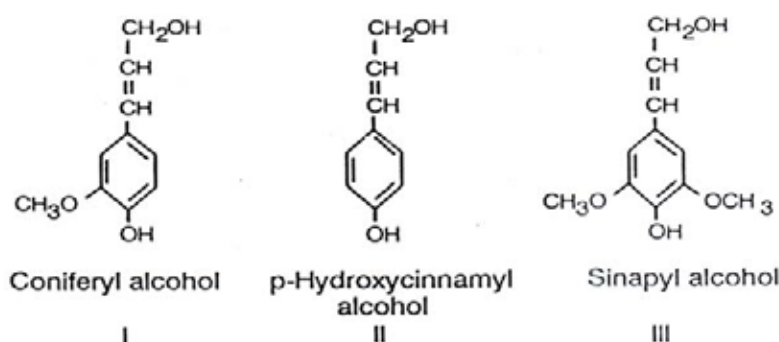
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร, 2548

2.2 ทฤษฎีการเกิดสารฮิวมิก

การเกิดสารฮิวมิกในสิ่งแวดล้อมหรือที่เรียกว่า กระบวนการฮิวมิฟิเคชันนั้นมีขั้นตอนการเกิดที่ซับซ้อน แต่เนื่องจากว่าสารฮิวมิกมีบทบาทสำคัญหลายประการ โดยเฉพาะบทบาทในดินทั้งทางด้านกายภาพและเคมี จึงจำเป็นที่จะต้องทราบและเข้าใจถึงกระบวนการชีวเคมีของการเกิดสารฮิวมิก โดยได้มีการเสนอทฤษฎีการเกิดสารฮิวมิกที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.2.1 ทฤษฎีลิกนิน (Lignin Theory)

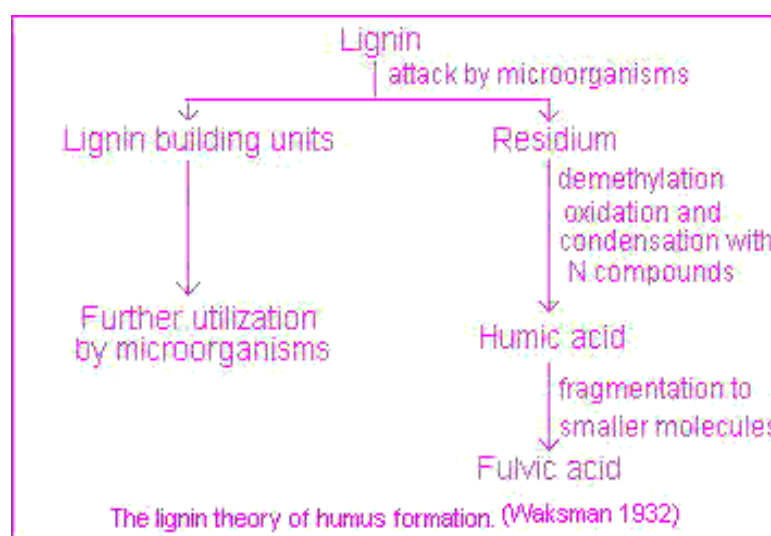
ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เป็นสารอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่ละลายน้ำ และมีความยืดหยุ่น ทำให้พืชที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบมีความแข็งแรงทนทาน (รำไพ, 2543) ในทฤษฎีนี้เชื่อว่าลิกนินเป็นแหล่งกำเนิดของสารฮิวมิก เนื่องจากทั้งลิกนินและสารฮิวมิกมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันหลายประการคือ ถูกย่อยสลายโดยเชื้อราและแบคทีเรียค่อนข้างยากในธรรมชาติ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของกรด สามารถละลายได้ในสารละลายเบสและตกตะกอนในสารละลายกรด ส่วนหนึ่งของสารทั้งสองจะละลายได้ในแอลกอฮอล์และไพรีดีน และในโครงสร้างจะมีหมู่ OCH_3 เหมือนกัน โดยหมู่ OCH_3 นี้จะลดลงตามระยะเวลาของการย่อยสลาย นอกจากนี้ยังอธิบายว่าธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในสารฮิวมิกเป็นผลมาจากปฏิกิริยากอนเดนเซนชันของลิกนินกับโปรตีน แม้ลิกนินจะถูกย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ แต่ในการย่อยสลายลิกนินเพียงบางส่วนโดยจุลินทรีย์ก็จะทำให้เกิดสารฮิวมิกเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นแก๊สออกซิเจนจึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการย่อยสลายลิกนินในระยะแรก ลิกนินมีหลายชนิดและจะมีหน่วยของโครงสร้างที่ซ้ำกันอยู่ 3 หน่วย คือ coniferyl alcohol, p-hydroxycinnamyl alcohol และ sinapyl alcohol ดังภาพที่ 7 ซึ่งในพืชจำพวกสน หรือปรงจะพบหน่วยของลิกนินชนิด coniferyl alcohol อยู่สูง ขณะที่ไม้ยืนต้นจะพบ sinapyl alcohol ส่วนไม้ล้มลุกจะพบทั้งสามหน่วยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน (Tan, 2003)



ภาพที่ 7 หน่วยโครงสร้างของลิกนิน

ที่มา : Stevenson, 1994

การเปลี่ยนแปลงที่บ่งชี้ว่าสารฮิวมิกสร้างมาจากลิกนินคือการสูญหายไปของหมู่ OCH_3 ในลิกนิน เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ของฟีนอล และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ขึ้น แบคทีเรียจำนวนมากสามารถช่วยกำจัดหมู่เมทิลได้โดยไม่ทำให้โครงสร้างนี้เปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลและฟีนอลิกด้านข้างของหมู่เมทิลเดิม ปฏิกิริยาการกำจัดหมู่เมทิลและปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพลีเมอร์สายข้าง ๆ ของลิกนินจะเป็นตัวหลักในการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นกรด (COOH และ phenolic OH) ซึ่งจะไปเพิ่มคุณสมบัติความเป็นกรดและการละลายในเบสให้กับสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น สารฮิวมิกที่ได้จากการย่อยสลายลิกนินจะมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ภายในโครงสร้างจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ แต่จะมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าลิกนินดั้งเดิม นั่นคือได้จากหมู่ COOH , C=O และ OH ที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการย่อยสลายมากขึ้นก็จะเป็นเหมือนการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกให้มากขึ้นเรื่อย ๆ และยังเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลมากขึ้นด้วย ส่วนสารในกลุ่มลิกนิน คิวติน และซูเบอร์ินที่ไม่ถูกย่อยสลายจะกลายเป็นสารฮิวมิกชนิดฮิวมินที่มีความคงทน อย่างไรก็ตาม หมู่ COOH ที่มีจำนวนมากในสารฮิวมิก (โดยเฉพาะสารฮิวมิกชนิดกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก) นั้นนอกจากจะได้จากการถูกออกซิไดซ์ของหมู่เมทิลที่บริเวณปลายสายแล้ว ยังอาจได้จากการเติมหมู่ COOH ในบริเวณวงแหวนที่แตกออกของโครงสร้างอะโรมาติกที่เป็นองค์ประกอบของลิกนินอีกด้วย ส่วนโครงสร้างอะโรมาติกบางส่วนที่ถูกกำจัดหมู่เมทิลไปแล้วอาจถูกออกซิไดซ์ต่อไปกลายเป็นควิโนนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชันกับสารประกอบ NH_3 และอะมิโนได้ (Stevenson, 1994) ดังภาพที่ 8



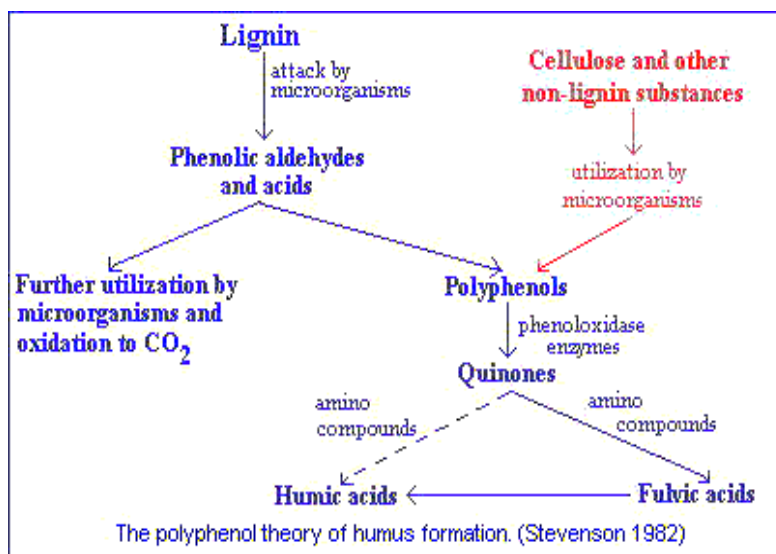
ภาพที่ 8 ทฤษฎีลิกนิน (Lignin Theory)

ที่มา : Stevenson, 1982 อ้างตาม Waksman, 1932

2.2.2 ทฤษฎีโพลิฟีนอล (Polyphenol Theory)

ฟีนอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ต่ออยู่กับหมู่แอริล (Ar) หรือวงอะโรมาติก มีสูตรทั่วไปคือ $ArOH$ มีสูตรเป็น C_6H_5OH สามารถละลายน้ำได้ สารประกอบของฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีหลายชนิด บางชนิดเป็นน้ำมันหอมระเหย บางชนิดนำมาใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในห้องผ่าตัด ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด

การเกิดสารชีวโมเลกุลจากทฤษฎีนี้ในเบื้องต้นจะคล้ายกับทฤษฎีลิกนิน นั่นคือลิกนินที่เป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารชีวโมเลกุลจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทำให้โครงสร้างแตกย่อยออกเป็นหน่วยฟีนอลโมเลกุลเดี่ยวหลาย ๆ โมเลกุล เช่น อนุพันธ์ของ phenylpropane ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะรวมเข้ากับสารอินทรีย์อื่นจากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นควิโนน ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่แตกหักออกจากปลายสายข้าง ๆ ของโครงสร้างลิกนินที่ถูกออกซิไดซ์จากปฏิกิริยา demethylation ที่เกิดขึ้น และจะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสที่มีอยู่ในจุลินทรีย์ทำให้กลายเป็นควิโนนเช่นกัน ต่อมาจะเกิดปฏิกิริยา polymerization ได้เป็นสารชีวโมเลกุล โดยการกำจัดหมู่เมทิลออกเพื่อสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้หมู่ OCH_3 ลดลง แต่ปริมาณหมู่ OH ของฟีนอลในกรดชีวโมเลกุลและกรดฟัลวิกจะมากขึ้น อีกทั้งควิโนนบางส่วนยังเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดอะมิโน โดยจะทำปฏิกิริยากับควิโนนในส่วนที่เป็นหมู่ $C=O$ เกิดเป็นสารชีวโมเลกุลที่ในโครงสร้างมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย บางชนิด เช่น ราในกลุ่ม Imperfecti ยังมีส่วนในการช่วยเติมหมู่ OH ลงในวงแหวนอะโรมาติกขณะสร้างสารชีวโมเลกุลจากควิโนนโดยจะทำให้เกิดการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลและเกิดการออกซิไดซ์หมู่เมทิลอีกด้วย นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ ขึ้นอีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอัลดีไฮด์ ($R-CHO \rightarrow R-COOH$) ปฏิกิริยาการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลและปฏิกิริยาการเติมหมู่ไฮดรอกซิลและการรวมตัวกันของสารอินเตอร์มีเดียต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลมาจากการย่อยสลายองค์ประกอบของลิกนิน ซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นควิโนนและสารชีวโมเลกุลต่อไป ดังภาพที่ 9 ส่งผลให้สารชีวโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นไปอีก ส่วนลำดับการสร้างสารชีวโมเลกุลสำหรับทฤษฎี โพลิฟีนอลจะเป็นดังนี้: กรดฟัลวิก $\rightarrow$ กรดชีวโมเลกุล $\rightarrow$ ชีวโมเลกุล จึงนำไปสู่การพิจารณาการแยกส่วนของสารชีวโมเลกุลในสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน (Stevenson, 1994)

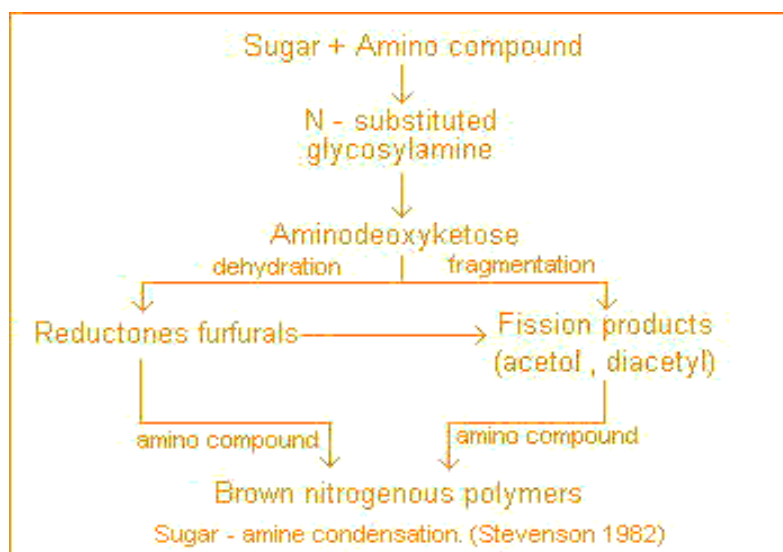


ภาพที่ 9 ทฤษฎีโพลีฟีนอล (Polyphenol Theory)

ที่มา : Stevenson, 1982

2.2.3 ทฤษฎีการรวมตัวกันของซูการ์-เอมีน (Sugar-Amine Condensation Theory)

การสร้างสารฮิวมิกจากทฤษฎีนี้เชื่อว่าจะเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันด้วยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันระหว่างน้ำตาลและเอมีน เช่น กรดอะมิโน ที่ได้จากปฏิกิริยาการกำจัดน้ำระหว่างเกิดกระบวนการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้จะมีส่วนสำคัญในการสร้างสารฮิวมิกในดิน เนื่องจากสารตั้งต้น (น้ำตาล, กรดอะมิโน ฯลฯ) เป็นผลิตภัณฑ์ที่พบมากในดินจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายรูปแบบของสารฮิวมิกในสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าการเกิดสารฮิวมิกจากกลินิน แต่กระบวนการรวมตัวกันของน้ำตาลกับเอมีนจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ภายใต้อุณหภูมิในดินทั่วไป อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของดิน (การละลายของหิมะ การเปียกและการแห้งของดิน) ประกอบกับการผสมกันระหว่างตัวทำปฏิกิริยา (น้ำตาลหรือเอมีน) กับแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันได้ง่ายขึ้น ปฏิกิริยานี้จะเริ่มต้นโดยการเติมหมู่เอมีนเข้าไปในกลุ่มอัลดีไฮด์ของน้ำตาลและจากนั้นจึงเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไกลโคซิดามีน ต่อมาไกลโคซิดามีนจะจัดเรียงตัวใหม่ในรูปของสารประกอบ N-substituted-1-amino-1-deoxy-2-ketose ซึ่งสารประกอบนี้จะมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบอะมิโนน้ำตาล นั่นคือสารฮิวมิกนั่นเอง ดังภาพที่ 10 สำหรับหน่วยโครงสร้างที่เป็นสารอะโรมาติกของสารฮิวมิกที่ได้จากการรวมตัวนี้จะมาจากสารในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต



ภาพที่ 10 ทฤษฎีซูการ์-เอมีน (Sugar-Amine Condensation Theory)

ที่มา : Stevenson, 1982

2.3 การจัดจำแนกและโครงสร้างของสารฮิวมิก

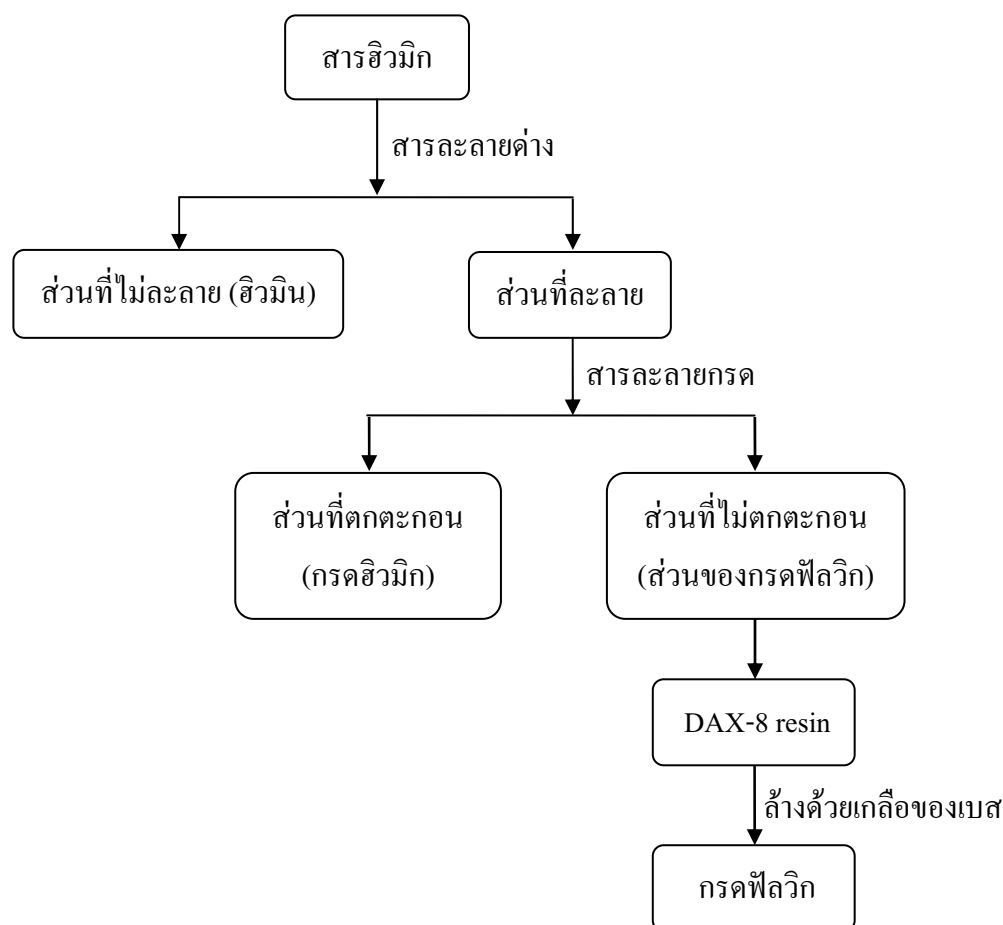
2.3.1 การจัดจำแนกสารฮิวมิก

สารฮิวมิกสามารถจำแนกได้ตามคุณสมบัติในการละลายในกรดและด่างที่ต่างกัน ได้เป็น 3 ชนิด ซึ่งถ้านำสารอินทรีย์วัตถุในดินหรือปุ๋ยมาละลายในสารละลายต่างจะได้ตะกอนเกิดขึ้น โดยส่วนที่เกิดเป็นตะกอนนี้เรียกว่าฮิวมิน (Humin) ส่วนสายละลายนั้นจะนำมาตกตะกอนกับ สารละลายกรดที่มีค่า pH = 1 จะได้ตะกอนเกิดขึ้นและตะกอนที่ได้เรียกว่ากรดฮิวมิก (Humic acid) ส่วนสารละลายที่ได้จากการตกตะกอนเรียกว่ากรดฟัลวิก (Fulvic acid) ซึ่งในส่วนของกรด ฟัลวิกนี้จะต้องปรับสภาพโดยการผ่านเรซิน DAX-8 ก่อน (MacCarthy, 2001; Tan, 2003) ดังภาพที่

11

2.3.2 โครงสร้างของสารฮิวมิก

คุณสมบัติในการละลายของสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด เช่นเดียวกันกับสารฮิวมิกทั้ง 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติการละลายและสมบัติบางประการที่ต่างกัน นั้น เป็นเพราะมีโครงสร้างที่ต่างกันไป ในโครงสร้างของกรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และ ฮิวมินจะมี ธาตุองค์ประกอบที่เหมือนกันคือคาร์บอน (carbon, C) และออกซิเจน (oxygen, O) ส่วนธาตุอื่นก็จะมีไฮโดรเจน (hydrogen, H) ไนโตรเจน (nitrogen, N) และซัลเฟอร์ (sulfur, S) แต่สารฮิวมิกทั้ง 3 ชนิด จะมีธาตุองค์ประกอบเหล่านี้ในปริมาณที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้



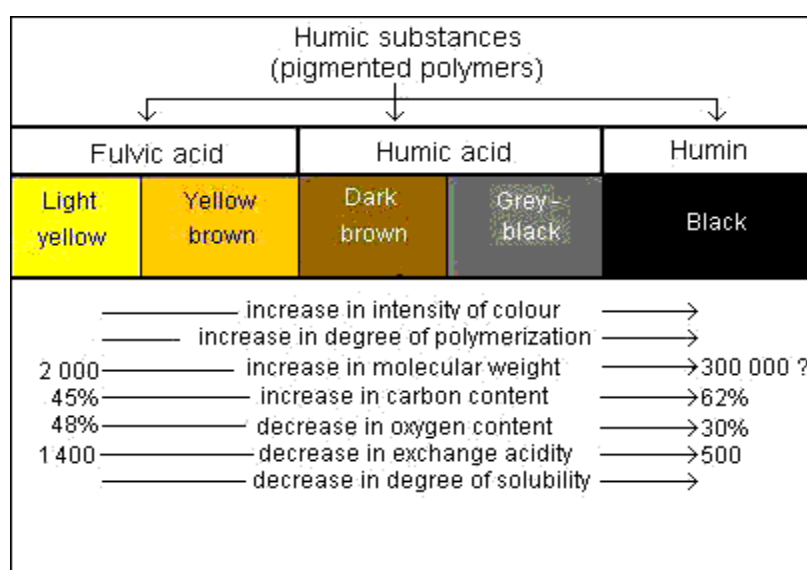
ภาพที่ 11 การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิกในดิน

ที่มา : ปรับปรุงจาก Stevenson, 1994

2.3.2.1 กรดฮิวมิก (humic acid, HA)

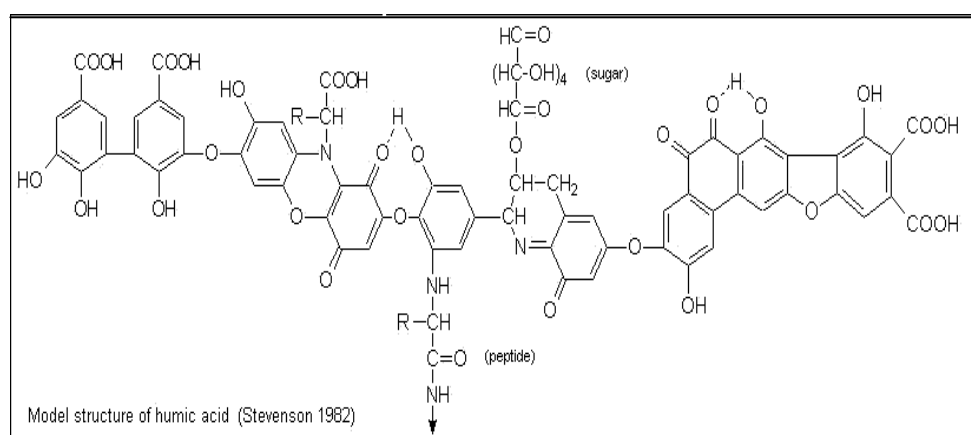
กรดฮิวมิกสามารถละลายได้ดีในสารละลายต่าง แต่ตกตะกอนในสารละลายกรด ละลายน้ำได้บ้าง สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยของกรดฮิวมิกจะเป็น $C_{10}H_{12}O_5N$ กรดฮิวมิกสามารถพบได้ในดิน ในน้ำ และในปุ๋ย จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ สีของกรดฮิวมิก สามารถบ่งบอกถึงคุณลักษณะบางประการของกรดฮิวมิกในเบื้องต้นได้ ดังภาพที่ 12 นั่นคือ สีน้ำตาลเข้มถึงดำจะชี้ให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันในการสร้างกรดฮิวมิกค่อนข้างสูง มีน้ำหนักโมเลกุลมาก มีปริมาณคาร์บอนในโครงสร้างค่อนข้างมาก แต่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย ประมาณร้อยละ 30 ค่าความเป็นกรดและการละลายน้ำค่อนข้างต่ำ กรดฮิวมิกจะไม่มีกลิ่น ในธรรมชาติจะเป็นคอลลอยด์หรือของแข็งที่สภาพเป็นกรด มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากอยู่ในหลักร้อยถึงหลักพันดอลตัน ค่อนข้างเสถียร ทำให้เกิดความคงทนในดินได้ดี มีเสถียรภาพสูง เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ กรดฮิวมิกจะมีโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก มีหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่เป็นหมู่ฟีนอลิก OH ดังภาพ

ที่ 13 สามารถยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะอื่นๆ ได้ ในโครงสร้างของกรดฮิวมิก จะมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์มากกว่ากรดฟัลวิก คือประมาณร้อยละ 50 ถึง 60, 2 ถึง 4 และ 1 ถึง 2 ตามลำดับ ส่วนธาตุไฮโดรเจนนั้นจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน กรดฮิวมิกมักมีปริมาณน้อย ในการสกัดจึงต้องทำให้บริสุทธิ์ด้วยสารละลายกรดอ่อนระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และกรดฟลูออริกก่อน การสกัดแยกกรดฮิวมิกจากสารฮิวมิกในดิน น้ำ หรือปุ๋ยนั้น อาจสกัดโดยใช้สารละลายไพโรฟอสเฟต (Huang et al., 2006) แต่ไม่ค่อยนิยมเนื่องจากกรดฮิวมิกที่ได้จะมีค่ามากกว่าการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Stevenson, 1994)



ภาพที่ 12 การจำแนกชนิดของสารฮิวมิกจากสีของสารฮิวมิก

ที่มา : Stevenson, 1982

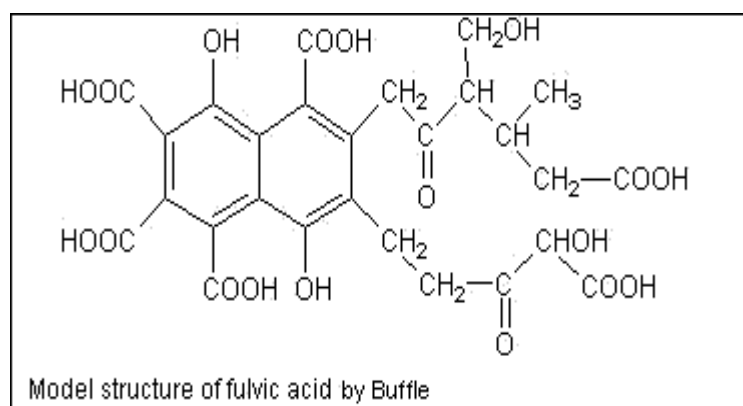


ภาพที่ 13 โครงสร้างของกรดฮิวมิก (humic acid)

ที่มา : Stevenson, 1994

2.3.2.2 กรดฟัลวิก (fulvic acid, FA)

กรดฟัลวิกเป็นสารฮิวมิกชนิดที่ละลายทั้งในด่าง กรด และน้ำ สูตรโพลิเมอร์โดยเฉลี่ยของกรดฟัลวิกจะเป็น $C_{12}H_{12}O_9N$ จะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์หรือของแข็งสีเหลืองถึงน้ำตาล ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันค่อนข้างต่ำถึงต่ำมาก มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย มีปริมาณคาร์บอนน้อยประมาณร้อยละ 45 แต่มีออกซิเจนมาก ค่าความเป็นกรดและค่าการละลายน้ำสูง ดังภาพที่ 12 กรดฟัลวิกเป็นสารประกอบที่มีขั้วและความเป็นกรดสูง ยึดจับโลหะได้ดี มักพบในน้ำมากกว่าในดิน และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารฮิวมิกชนิดอื่นๆ จะอยู่ในช่วงน้อยกว่าหลักร้อยถึงหลักพัน ประมาณ 175 ถึง 3,570 ดอลตัน (Tan, 2003 อ้างจาก Schnitzer and Skinner, 1968) เสถียรน้อยกว่ากรดฮิวมิก เนื่องจากละลายน้ำได้ดีจึงไม่คงทนในดินและมีเสถียรภาพต่ำกว่ากรดฮิวมิกแต่เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายอลิฟาติก มีหมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่เป็นหมู่ $COOH$ ดังภาพที่ 14 สามารถยึดจับและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชและโลหะได้เป็นอย่างดี ส่วนหมู่ฟังก์ชันอื่น เช่น แอลกอฮอล์ คาร์บอนิล และเมทอกซิล จะมีปริมาณใกล้เคียงกันกับกรดฮิวมิก ในโครงสร้างของกรดฟัลวิกจะมีปริมาณธาตุออกซิเจนมากกว่ากรดฮิวมิกคือประมาณร้อยละ 44 ถึง 50 แต่ปริมาณธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์จะน้อยกว่า กรดฟัลวิกสามารถสกัดแยกได้ในระหว่างการสกัดกรดฮิวมิก จากนั้นจะนำไปผ่าน DAX-8 resin และ H^+ exchange resin อีกที กรดฟัลวิกสามารถรวมตัวหรือถูกย่อยสลายต่อกลายเป็นกรดฮิวมิกได้



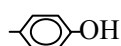
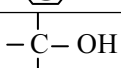
ภาพที่ 14 โครงสร้างของกรดฟัลวิก (fulvic acid)

ที่มา : Stevenson, 1994

2.3.2.3 ฮิวมิน (Humin, HM)

ฮิวมินเป็นสารฮิวมิกชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการฮิวมิฟิเคชันผ่านปฏิกิริยา polymerization (Mecozzi et al., 2001) ไม่สามารถละลายได้โดยทั้งในน้ำและสารละลายไม่ว่าที่ pH ใด ๆ ก็ตาม (Rice, 2001) ในโครงสร้างมีองค์ประกอบเป็นพวกเอสเทอร์ และกรดต่าง ๆ อีกทั้งสายไฮโดรคาร์บอนที่ยาวต่อกันไปเรื่อย ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่มีขั้วของสารอินทรีย์ตั้งต้น ก่อนถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เช่น โพลีแซคคาไรด์และโกลมาลิน ฮิวมินมีสีดำ มีความคงทนมาก ยากต่อการย่อยสลายจึงไม่ค่อยทำปฏิกิริยาหรือมีบทบาทในดิน (Hays and Clapp., 2001) จึงไม่นิยมกล่าวถึงฮิวมิน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติบางประการและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

คุณสมบัติ		กรดฮิวมิก	กรดฟัลวิก
องค์ประกอบโดยน้ำหนัก (% by weight)			
C		50 – 60	40 – 50
H		4 – 6	4 – 6
O		30 – 35	44 – 50
N		2 – 4	< 1 – 3
S		1 – 2	0 – 2
ละลายในกรดแก่ (pH 1)		ไม่ละลาย	ละลาย
น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง		ประมาณ 100 – หลายล้าน	180 – 10,000
หมู่ functional group (ปริมาณออกซิเจนในหมู่ functional group)			
คาร์บอกซิล	–COOH	14 – 45	58 – 65
ฟีนอล		10 – 38	9 – 19
แอลกอฮอล์		13 – 15	11 – 16
คาร์บอนิล	–C=O	4 – 23	4 – 11
เมทอกซิล	–O–CH ₃	1 – 5	1 – 2

ที่มา : นัทธีรา, 2541 อ้างจาก Schnitzer and Khan, 1972

2.4 ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

จากกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นเรื่อย ๆ โดยทำให้เกิดกรดฟัลวิก กรดฮิวมิก และฮิวมิน ตามลำดับ ในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างให้อยู่ในรูปที่เสถียรขึ้นในระหว่างการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่ากรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกจะมีธาตุองค์ประกอบที่เหมือนกันแต่ในปริมาณที่ต่างกัน นั้นเป็นเพราะระดับการเกิดสารทั้งสองชนิดหรือระดับการย่อยสลายไม่เท่ากัน นั้นส่งผลให้เกิดกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกในระหว่างการหมักปุ๋ยที่เวลาต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ในปุ๋ยหมักนั้นการเกิดกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกจะเป็นตัวกำหนดอายุและคุณภาพของปุ๋ยหมัก (Fukushima et al., 2009) โดยเฉพาะคุณลักษณะของกรดฮิวมิกที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการหมักปุ๋ยจะมีผลต่ออายุหรือความพร้อมของปุ๋ยหมักต่อการนำไปใช้ประโยชน์ (Wei et al., 2007) ซึ่งจะพิจารณาผ่านดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification indices) ในปุ๋ยหมัก (Huang et al., 2006; Bernal et al., 2008) กรดฮิวมิกยังสามารถใช้บ่งชี้คุณภาพของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ยได้อีกด้วย และดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกจะมีดังต่อไปนี้

2.4.1 ธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

2.4.1.1 การพิจารณาจากธาตุองค์ประกอบโดยตรง

การประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นสามารถประเมินจากสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะกรดฮิวมิก ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีบทบาทมากในดิน การพิจารณาการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักนั้นอาจพิจารณาได้จากปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยตรง จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักที่ได้จากการศึกษาของ Huang et al. (2006) พบว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้น ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนจะลดลง และปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนจะเพิ่มขึ้น การที่ปริมาณคาร์บอนลดลงนี้อาจเป็นเพราะเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างการหมักปุ๋ย ส่วนปริมาณไฮโดรเจนที่ลดลงจะชี้ให้เห็นถึงการถูกแทนที่หรือการแตกออกของสายอลิฟาติกเพื่อจะรวมเป็นกลุ่มอะโรมาติก โดยจะสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการที่ลิแก็นรวมตัวกับโปรตีนในกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Stevenson, 1994) และการที่ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้เห็นว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนมากขึ้น เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก-คีโตนิก ($C=O$) และหมู่ฟีนอลิก โดยเหตุการณ์นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wei et al. (2007) ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ Chai et al. (2007) และ Spaccini et al. (2009) ที่พบว่าปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป อีกทั้งธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักยังมีค่าใกล้เคียงกับในดินอีกด้วย

ตารางที่ 3 ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ของกรดฮิวมิก
ในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งที่มา	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ปริมาณ (%)			
		C	H	O	N
Huang et al. ¹	0	52.70	6.23	34.70	4.88
	63	47.90	5.51	40.00	5.28
Chai et al. ²	365	51.36	5.80	36.82	6.02
	2190	53.3	6.35	33.51	6.84
Wei et al. ³	0	48.40	6.40	38.40	2.80
	63	45.30	5.80	42.10	2.70
Spaccini et al. ⁴	60	44.70	4.80		5.40
	90	44.10	4.93		5.45
	150	44.80	5.32		5.32
Soil HA ⁵		56.25	4.70	35.55	2.55

ที่มา : ¹ Huang et al., 2006

² Chai et al., 2007

³ Wei et al., 2007

⁴ Spaccini et al., 2009

⁵ Stevenson, 1994

2.4.1.2 การพิจารณาจากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ

การพิจารณาการเกิดกรดฮิวมิกจากปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยตรงนั้นจะไม่สามารถบ่งชี้ปริมาณและชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่บรรจุอยู่ในโครงสร้างของกรดฮิวมิก รวมทั้งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ย ดังนั้นการที่จะทราบสิ่งเหล่านี้ต้องอาศัยดัชนีที่ได้จากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ ดังตารางที่ 4 ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio)

อัตราส่วน O/C จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนที่เป็นกรดฮิวมิกมากขึ้น (Wei et al., 2007) อัตราส่วนนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการมีหมู่ O-alkyl และหมู่ COOH ในสารฮิวมิก ซึ่งจะลดลงถ้าเกิดกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นกรด

ฮิวมิกจะมีค่าประมาณ 0.5 ส่วนกรดฟัลวิกมีค่าประมาณ 0.7 (Stevenson, 1994; Sparks., 2003; Tan, 2003) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำธาตุองค์ประกอบจากการศึกษาของ Huang et al. (2006) จากตารางที่ 3 มาหาอัตราส่วน O/C พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบรรจุอยู่ (C=O) จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังจากมีการหมักปุ๋ย นั่นคือการเกิดกรดฮิวมิกจะลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับการศึกษาของ Chai et al. (2007) และ Wei et al. (2007) ที่พบว่าอัตราส่วนนี้จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป นั่นแสดงว่าเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน เช่น คาร์โบไฮเดรต ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างอะโรมาติกที่ซับซ้อนมากขึ้น หรือมีหมู่ O-alkyl และคาร์บอกซิลิกลดลงนั่นเอง อีกทั้งอัตราการเกิดโครงสร้างอะโรมาติกและกระบวนการเกิดกรดฮิวมิกนี้จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงระยะสุดท้ายของการหมักปุ๋ย จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนนี้ยังไม่แน่นอนนักเนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น วัสดุที่ใช้และวิธีการหมักปุ๋ย ซึ่ง Huang et al. จะหมักด้วยมูลสุกรและขี้เลื่อย แต่ Wei et al. หมักด้วยของเสียชุมชนที่มีโลหะและพลาสติกอยู่ด้วย โดยใช้ระยะเวลาในการหมัก 63 วัน เท่ากัน และหมักแบบกองบนพื้นเหมือนกัน แต่พบว่าอัตราส่วน O/C ของ Huang et al. เพิ่มขึ้น ในขณะที่ของ Wei et al. จะลดลง ส่วน Chai et al. นั้นใช้ปุ๋ยหมักที่ได้จากหลุมฝังกลบที่ประกอบด้วยของเสียชุมชนที่มีโลหะและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษคล้ายกับของ Wei et al. แต่ใช้ระยะเวลาการหมักต่างกัน กลับพบว่าอัตราส่วนนี้ลดลงเหมือนกัน ซึ่งให้เห็นว่าระยะเวลาที่เป็นปัจจัยอย่างหนึ่ง

- อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C ratio)

อัตราส่วน H/C มีความสำคัญมากในการบ่งชี้อัตราการเกิดโครงสร้างอะโรมาติกและการเกิดสารฮิวมิก เมื่ออัตราส่วน H/C ลดลงจะบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอะโรมาติกในระหว่างการหมักปุ๋ยและทำให้ทราบถึงความพร้อมของคุณภาพของปุ๋ยหมักต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งดูจากการเกิดสารฮิวมิก โดยเฉพาะการสร้างกรดฮิวมิก อัตราส่วนนี้จะอยู่ในช่วง 0.90 ถึง 1.35 แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า 1.3 จะบ่งชี้ถึงปริมาณ non-humic substance (Tan, 2003) อัตราส่วน H/C จากการศึกษานี้ของ Huang et al. (2006) พบว่าค่านี้ลดลงจาก 1.43 เป็น 1.39 บ่งชี้ได้ว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยจะเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว (โครงสร้างอะโรมาติก) มากกว่าโครงสร้างที่อิ่มตัว และยังมีความสัมพันธ์กับผลรวมของความเป็นกรด หมู่คาร์บอกซิลิก และฟีนอลิก โดยจะแปรผันตามโครงสร้างอะโรมาติกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wei et al. (2007) ที่ใช้ระยะเวลาการหมักเท่ากัน ก็พบว่าค่านี้จะลดลงเช่นกัน แม้ว่าจะใช้วัสดุต่างกันก็ตาม แต่จะขัดแย้งกับการศึกษาของ Chai et al. (2007) และของ Spaccini et al. (2009) ที่พบว่าอัตราส่วนนี้จะมีการเพิ่มขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ย ซึ่งให้เห็นว่าเกิดสารประกอบที่มีหมู่อัลคิลเพิ่มขึ้นในกรดฮิวมิก ส่งผลให้สารประกอบอะโรมาติกลดลง อาจเป็นเพราะ Chai et al. และ Spaccini et al. ใช้ปุ๋ยหมักจากของ

เสียชุมชนที่ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบที่ย่อยสลายยาก เช่น พลาสติกและโลหะ เป็นต้น อีกทั้งยังหมักปุ๋ยนานเกินไปคือ 2190 และ 150 วัน ตามลำดับ ทำให้เกิดการย่อยสลายกรดฮิวมิกเป็นแร่ธาตุขนาดเล็กเพิ่มขึ้น (Domeizel et al., 2004) นอกจากนี้อัตราส่วน H/C ที่มีค่ามากกว่า 1 อาจเป็นไปได้ว่ากรดฮิวมิกที่ได้จะมาจากสารอินทรีย์ที่เป็นจุลินทรีย์ (bacterial organic matter) (Belzile et al., 1997) และอัตราส่วนนี้ในปุ๋ยจะมีค่าสูงกว่าในดิน

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

การย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักจะทำให้คาร์บอนและไนโตรเจนเปลี่ยนรูปไป ส่วนหนึ่งของคาร์บอนและไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกรวมเข้าไปในโมเลกุลของสารฮิวมิก เมื่อเกิดสารฮิวมิกมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนนี้ลดลง ในกรดฮิวมิกจะมีค่าอยู่ในช่วง 20.83 ถึง 12.99 และกรดฟัลวิกมีประมาณ 45.45 ถึง 21.74 (Tan, 2003) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน C/N ของกรดฮิวมิกจากการศึกษาโดยส่วนใหญ่จะมีค่าลดลงจาก แสดงว่าในระหว่างการเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกไปเรื่อย ๆ นั้น สารอินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในโมเลกุลของสารฮิวมิกมีความคงทนต่อการย่อยสลายมาก จึงถูกรวมเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของกรดฮิวมิก (Huang et al., 2006; Chai et al., 2007; Wei et al., 2007) จะสังเกตว่าอัตราส่วนนี้ในการศึกษาของ Huang et al. จะมีค่าต่ำกว่า Wei et al. เนื่องจากจุลินทรีย์จะย่อยสลายมูลสัตว์ได้ดีกว่าพลาสติกและโลหะ จึงทำให้อัตราส่วนนี้มีค่าต่ำกว่า หรือเกิดกรดฮิวมิกได้มากกว่านั่นเอง แต่ในการศึกษาของ Spaccini et al. (2009) กลับพบว่าอัตราส่วนนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Veeken et al. (2000) รวมทั้งอัตราส่วนนี้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าในดิน (Wei et al., 2007)

กระบวนการเกิดสารฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมหลายอย่าง ทั้งวัสดุที่ใช้ ซึ่งปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดฮิวมิกได้ดีกว่าพวกพืชหรือพลาสติกและโลหะ ระยะเวลาในการหมักก็เป็นสิ่งจำเป็นมากที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากถ้าหมักปุ๋ยด้วยระยะเวลาที่สั้นเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดฮิวมิกเกิดได้ไม่สมบูรณ์ รวมทั้งปุ๋ยหมักยังมีอุณหภูมิและความร้อนสูงอยู่ ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ แต่ถ้าหมักปุ๋ยนานเกินไปก็จะเกิดการย่อยสลายปุ๋ยหมักด้วยกระบวนการ Mineralization นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวิธีการหมักเพราะจะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอากาศ ปริมาณความชื้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักแทบทั้งสิ้น

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งที่มา	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ		
		O/C	H/C	C/N
Huang et al. ¹	0	0.50	1.43	12.60
	63	0.63	1.39	10.60
Chai et al. ²	365	0.53	1.35	9.95
	2190	0.47	1.43	9.09
Wei et al. ³	0	0.70	1.43	20.1
	63	0.60	1.25	16.2
Spacini et al. ⁴	60	-	1.27	9.66
	90	-	1.34	9.44
	150	-	1.43	9.82
Soil HA ⁵		0.50	0.90	20.83 - 12.99

ที่มา : ¹ Huang et al., 2006

² Chai et al., 2007

³ Wei et al., 2007

² Spacini et al., 2009

⁵ Stevenson, 1994

2.4.1.3 หมู่ฟังก์ชันและผลรวมของความเป็นกรดของกรดฮิวมิก

หมู่ฟังก์ชันที่นิยมวิเคราะห์เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นกรด (Acidic functional groups) เนื่องจากว่ากรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกในธรรมชาติมีสภาพเป็นกรด และที่นิยมพิจารณาคือหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในรูปคาร์บอกซิลิก (COOH) และฟีนอลิก (phenolic-OH) ส่วนหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ มักพบในความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกัน เช่น แอลกอฮอล์ คาร์บอนิล และเมทอกซิล โดยผลรวมของหมู่ COOH และหมู่ phenolic-OH จะเป็นค่าความเป็นกรดทั้งหมด เมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดความเป็นกรดเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์แล้วได้เป็นหมู่ phenolic-OH, quinone, ketone และ COOH ซึ่งเหล่านี้ส่งผลในการเพิ่มความเป็นกรดให้กับ

สารฮิวมิกทั้งสี่ (Sanchez-Modero et al., 2003) ดังตารางที่ 5 จะเห็นว่าถึงแม้ปุ๋ยหมักจะมาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันแต่ปุ๋ยหมักโดยส่วนใหญ่จะมีการเพิ่มขึ้นของผลรวมของค่าความเป็นกรด หมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ฟีนอลิก เหมือนกัน แต่อาจเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยแตกต่างกันไป (Sanchez-Modero et al., 2003; Huang et al., 2006; Brunetti et al., 2007) บางครั้งอาจต้องใช้การทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติเพื่อดูนัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (Brunetti et al., 2007) การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในกรดฮิวมิกจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงธาตุองค์ประกอบเป็นสำคัญ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะค่าต่ำกว่าในดิน Spodosol ที่อ้างโดย Tan (2003) เล็กน้อย

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของผลรวมความเป็นกรด หมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ฟีนอลิกของกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งที่มา	อายุปุ๋ยหมัก	ผลรวมความ	คาร์บอกซิลิก	ฟีนอลิก
		เป็นกรด	mmol g ⁻¹	
Brunetti et al. ¹	120	3.71	0.54	3.17
	210	6.21	2.51	3.70
Sanchez- Monedero et al. ²	0	3.08	1.83	1.25
	112	6.66	3.96	2.70
Huang et al. ³	0	4.81	3.65	1.16
	63	5.20	3.95	1.25
Soil HA ⁴	-	8.90	5.40	3.50

ที่มา : ¹ Brunetti et al., 2007

² Sanchez-Modero et al., 2003

³ Huang et al., 2006

⁴ Tan, 2003

2.4.1.4 ดัชนีของร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid; PH)

สารฮิวมิกที่เป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์ในดินนั้นมีบทบาทสำคัญมากที่จะช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน และเป็นสารอินทรีย์ที่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย ดังนั้นการศึกษาหาปริมาณสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ยจึงมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก ซึ่งการพิจารณาปริมาณสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นนี้ทำได้จากการพิจารณาธาตุองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ฟีนอลิก เป็นต้น นอกจากนี้ดัชนีของร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ซึ่งได้มาจากอัตราส่วนของคาร์บอนในกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio, HR) ได้มาจากอัตราส่วนของคาร์บอนในสารฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid, PH) ได้มาจากอัตราส่วนของคาร์บอนในกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนในสารฮิวมิก ดังสมการด้านล่างก็สามารถนำมาใช้ได้ (Sanchez-Monedero et al., 1999; Brunetti et al., 2007; Bustamante et al., 2008; Dias et al., 2010) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (Humification Index; HI)} \quad \text{HAC/TOC} \times 100 \quad [1]$$

$$\text{ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (Humification Ratio; HR)} \quad \text{HSC/TOC} \times 100 \quad [2]$$

$$\text{ร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of Humic acid; PH)} \quad \text{HAC/HSC} \times 100 \quad [3]$$

ในระหว่างการหมักปุ๋ยถ้าค่าเหล่านี้เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกของสารอินทรีย์ขึ้น โดยถ้า HI มีค่าสูงแสดงว่าเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกโดยปฏิกิริยาการรวมตัวที่จะทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ที่เป็นกรดฮิวมิกมาก เช่นเดียวกับค่า HR มีค่าสูงแสดงว่าเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิก (กรดฮิวมิก + กรดฟัลวิก) ของสารอินทรีย์มาก นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันการเกิดกรดฮิวมิกได้จากร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิกจากค่า PH ได้อีกด้วย จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า Dias et al. (2010) ได้ศึกษาปุ๋ยหมักที่ได้จากมูลเป็ดและไก่ผสมกับขี้เลื่อย พบว่าทั้งค่า HI HR และ PH มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในระหว่างการหมักปุ๋ย อาจเป็นเพราะขี้เลื่อยอาจมีองค์ประกอบบางอย่างที่มีข้อจำกัดต่อการเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิก เช่น สาร non-humic เป็นต้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Benito et al. (2003) แต่ในการศึกษาของ Jouraiphy et al. (2005) พบว่าค่าเหล่านี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยผ่านไปจนถึงวันที่ 135 ซึ่งมีค่า HI HR และ PH เท่ากับร้อยละ 19.20, 27.9 และ 68.9 ตามลำดับ นั่นแสดงว่าเกิดสารฮิวมิกมากขึ้นในระหว่างการหมักปุ๋ย

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้กับดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกอื่น ๆ ได้อีกด้วย Fukushima et al. (2009) ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างค่า HI กับอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกพบว่า ค่า HI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราส่วน H/C ($r = -0.798$) อาจเป็นเพราะในขณะหมักปุ๋ยนั้นหมู่เมทอกซิลและหมู่แอลคิล (methoxyl and alkyl groups) ที่เกาะบนวงแหวนอะโรมาติกของลิกนินถูกย่อยสลายกลายเป็นหมู่ฟีนอลและหมู่คาร์บอกซิลิก (phenol and carboxylic groups) โดยผ่านกระบวนการดีเมทิลเลชัน (demethylation) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) นั่นคือมีการเติมหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเพิ่มเข้าไปเมื่อเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกนั่นเอง และค่า HI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราส่วน O/C และหมู่คาร์บอกซิลิก ($r = 0.951$, $r = 0.855$ ตามลำดับ) แต่สัมพันธ์เชิงลบกับหมู่ฟีนอลิก ($r = -0.571$) แสดงว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นเมื่อค่า HI เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดหมู่ฟีนอลิกเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วน C/N ในกรดฮิวมิกนั้นจะพบว่ามีค่าลดลง นั่นแสดงว่ามีการเติมสารประกอบไนโตรเจนลงในกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย ดังจะเห็นได้จากเกิดความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างค่า HI กับอัตราส่วน C/N ($r = -0.789$) ทำให้ไนโตรเจนลดลงในระหว่างการหมักปุ๋ย

Iqbal et al. (2010) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของปุ๋ยหมัก เช่น คาร์บอนทั้งหมด ไนเตรต และค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก เป็นต้น กับดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) โดยใช้สถิติ Pearson correlation พบว่าค่า HI HR ไนเตรต และค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณคาร์บอนทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$; $r = -0.95, -0.97, -0.96$ และ -0.90 ตามลำดับ) เนื่องจากปริมาณคาร์บอนทั้งหมดจะลดลงจากการถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แล้วจึงเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคาร์บอนของกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรมากขึ้น

ตารางที่ 6 ดัชนีของร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid; PH) ในระหว่างการหมักปุ๋ยจากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งที่มา	อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	HI (%)	HR (%)	PH (%)
Dias et al. ¹	0	9.00	17.32	51.80
	30	6.41	8.88	72.30
	60	7.97	10.85	73.00
	120	7.00	11.90	58.80
Jouraiphy et al. ²	15	8.5	14.8	57.6
	60	12.9	16.5	77.8
	135	19.2	27.9	68.9
Benito et al. ³	0	6.02	10.18	59.38
	9	9.81	13.08	75.00
	23	7.90	11.07	66.67
	33	8.12	13.11	62.16
	81	5.38	9.74	55.56
	120	7.19	10.33	69.23

ที่มา : ¹ Dias et al., 2010

² Jouraiphy et al., 2005

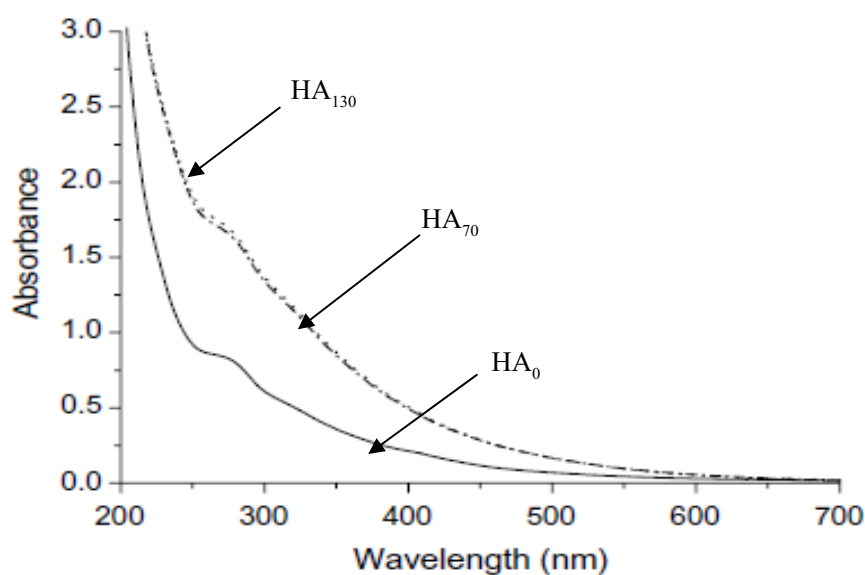
³ Benito et al., 2003

2.4.2 การดูคลิ่นคลิ่นแสง

จากโครงสร้างของสารฮิวมิกจะเห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันบรรจุอยู่มากมายและหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้นอกจากจะวิเคราะห์ได้โดยตรงแล้วยังมีคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถดูคลิ่นคลิ่นแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้ จึงได้มีการนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้ติดตามตรวจสอบดัชนีของกระบวนการสารฮิวมิก (Tan, 2003) ที่เกิดในระหว่างการหมักปุ๋ยเพื่อกำหนดอายุของปุ๋ยหมักและหา

คุณภาพของสารฮิวมิกที่ดีที่สุดโดยใช้เทคนิคนี้ (Prudent et al., 1995) สำหรับเทคนิคที่นิยมใช้กันมากคือเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) (Stevenson, 1994)

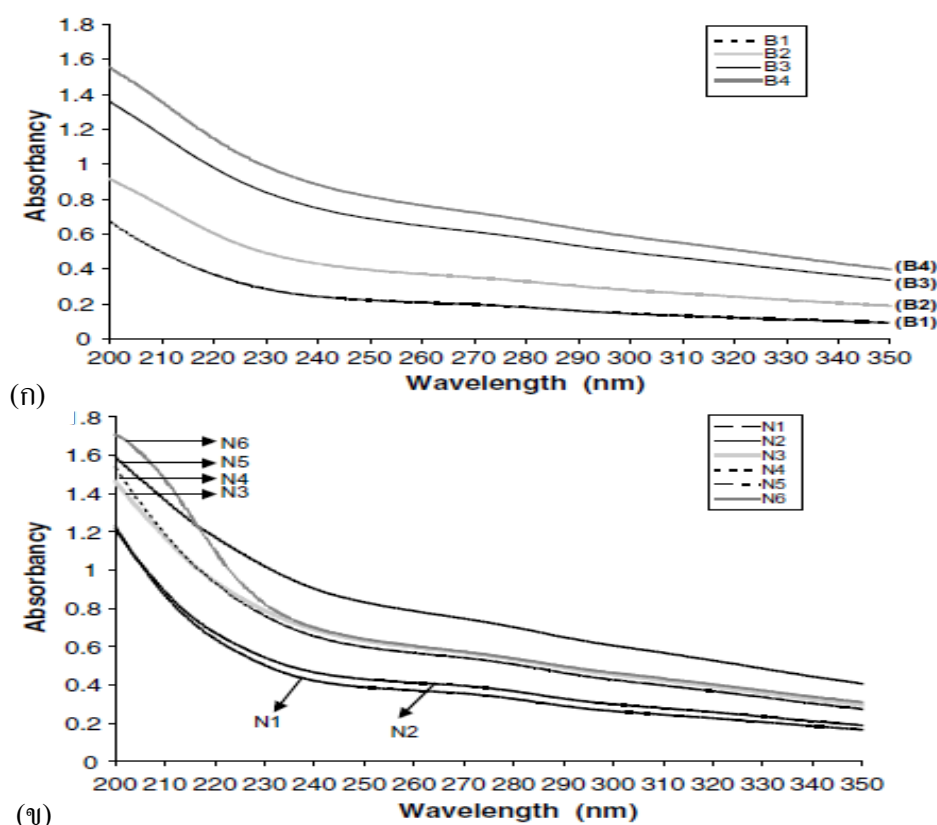
การวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลจะสามารถบอกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิกได้ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 210 นาโนเมตร บ่งบอกได้ถึง การเปลี่ยนสถานะอิเล็กตรอนชนิด $\pi - \pi$ ของหมู่อะโรมาติก ในช่วง 260 ถึง 280 นาโนเมตร จะบ่งบอกถึงลิกนิน (lignin) และไควโนน (quinone) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์วัตถุเริ่มต้นก่อนการเปลี่ยนรูปที่จะเปลี่ยนไปเป็นกรดฮิวมิก โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่าเกิดสารอะโรมาติกขึ้น (Wei et al., 2007) ช่วง 460 ถึง 480 นาโนเมตร บ่งชี้ถึงการเริ่มกระบวนการเกิดสารฮิวมิก และช่วง 600 ถึง 670 นาโนเมตร บ่งชี้ถึงอัตราการเกิดสารประกอบอะโรมาติก (Zbytniewski and Buszewski, 2005) และที่ความยาวคลื่น 254 และ 465 นาโนเมตร จะบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของคาร์บอนที่ละลายน้ำ (dissolved organic carbon) ในสารฮิวมิก (Zmora-Nahum et al., 2005) จากภาพที่ 15 เป็นการศึกษาของ Amine-Khodja et al. (2006) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล (200 ถึง 700 นาโนเมตร) ของกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักที่หมักจากเศษของเสียชุมชนเป็นระยะเวลา 130 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากวันที่ 0 ถึง 70 แต่ในช่วงวันที่ 70 ถึง 130 จะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและขนานกันไป สเปกตรัมที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และจะสูงสุดที่ 450 นาโนเมตร และลาดลงมาที่ 420 และ 520 นาโนเมตร ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลของกรดฮิวมิก

ที่มา : Amine-Khodja et al., 2006

ในการศึกษาของ Domeizel et al. (2004) ดังภาพที่ 16 ได้ทำการศึกษาปุ๋ยหมัก 2 ชนิด คือปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับพืชสดและหมักกลางแจ้ง (B) ซึ่งพบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุได้ 21 วัน จะมีค่าการดูดกลืนแสงของกรดฮิวมิกในช่วงนี้ต่ำสุดเมื่อเทียบกับระยะเวลาการหมักอื่น ๆ และปุ๋ยที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับเศษซากพืชที่หมักมาแล้วและหมักในร่ม (N) พบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุได้ 120 วัน จะมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 200 ถึง 220 นาโนเมตร สูงที่สุด หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งให้เห็นว่าเกิดกระบวนการ mineralization ทำให้เกิดสารโมเลกุลเล็กๆ ขึ้น เช่น ไนเตรต กรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น ซึ่งจะไปรบกวนการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก



ภาพที่ 16 ค่าดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก 2 ชนิดที่ระยะเวลาต่างกัน

(ก) ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับพืชสดและหมักกลางแจ้ง (B) ที่มีอายุได้ 21 (B1), 50 (B2), 80 (B3) และ 110 (B4) วัน

(ข) ปุ๋ยหมักที่ได้จากการผสมระหว่างของเสียชุมชนกับเศษซากพืชที่หมักมาแล้วและหมักในร่ม (N) ที่มีอายุได้ 2 (N1), 10 (N2), 21 (N3), 30 (N4), 50 (N5) และ 120 (N6) วัน

ที่มา : Domeizel et al., 2004

2.5 อิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อการเกิดสารชีวมิค

การย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยโดยกระบวนการของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง โดยเฉพาะปัจจัยในด้านระยะเวลาของการย่อยสลาย ระยะเวลาในการสัณสีอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์จะมีผลต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลายในด้านต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อปริมาณและรูปแบบของสารชีวมิค ในการสะสมสารชีวมิคในปุ๋ยจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์นั้นสามารถแบ่งระยะเวลาของการย่อยสลายตามอุณหภูมิที่วัดได้เป็น 4 ระยะ (Bernal et al., 1997; Zeng et al., 2009) ดังภาพที่ 17 มีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะนี้เป็นช่วงแรกของการเริ่มหมักปุ๋ย ซึ่งปุ๋ยมีอายุได้ 0 วัน ดังนั้นอุณหภูมิของปุ๋ยหมักจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศภายนอก เนื่องจากยังไม่เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ ดังนั้นสารอินทรีย์วัตถุที่นำมาทำปุ๋ยหมักก็จะมีสภาพเหมือนเดิม สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้ได้ง่าย เช่น คาร์โบไฮเดรตและกรดอินทรีย์ เป็นต้น

2.5.2 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะนี้เป็นระยะที่จุลินทรีย์เริ่มทำงานได้อย่างเต็มที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักได้อย่างรวดเร็ว มีผลทำให้อุณหภูมิในระยะนี้สูงมากกว่า 45 องศาเซลเซียส โดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายจะเป็นกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนและทนกับอุณหภูมิสูงได้ (Aerobic and thermophilic microorganism) อีกทั้งยังมีในกลุ่มแบคทีเรีย เชื้อรา และโปรโตซัว อีกด้วย จุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ในเลกกุลของสารอินทรีย์วัตถุในการหายใจแล้วปล่อยออกไปในรูปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความชื้นในปุ๋ยหมักในช่วงนี้จะมีค่าสูงมากกว่าที่ควรจะเป็นคืออยู่ในช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และร้อยละ 50 ถึง 60 ตามลำดับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกลับกองปุ๋ยเพื่อลดอุณหภูมิและความชื้นลง เนื่องจากความชื้นที่สูงขึ้นนี้มีผลทำให้ออกซิเจนลดลง ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่จะลดลงด้วย แต่ถ้าความชื้นที่ต่ำเกินไปจะมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาก ช่วงเวลาที่ใช้ในระยะอุณหภูมิสูงนี้จะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์วัตถุดั้งเดิม อุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก และวิธีการหมักปุ๋ยด้วย

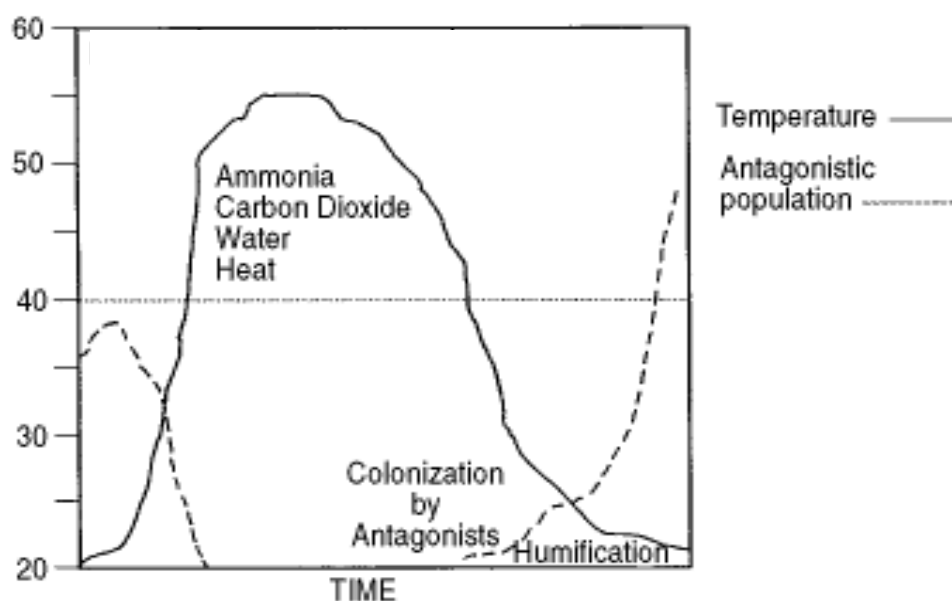
2.5.3 ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase)

ระยะนี้เป็นระยะที่เกิดขึ้นหลังจากระยะอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์วัตถุส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หมดจนไม่เหลือสภาพเดิมแล้ว ค่า HI และ HR ในระยะนี้เริ่มจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากสารอินทรีย์จะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารชีวมิค (Veeken et al., 2000) อุณหภูมิค่อนข้างจะคงที่ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 40 องศาเซลเซียส ในระยะนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องกลับกองปุ๋ยแล้วเนื่องจากยังคงมีอากาศหลง

เหลืออยู่ ปุ๋ยหมักที่อยู่ในระยะนี้จะยังใช้ไม่ได้เนื่องจากยังคงมีระดับกรดอินทรีย์ที่สูง และอัตราส่วน C/N ของปุ๋ยหมักก็จะมีค่าสูง อีกทั้งมีค่า pH ที่รุนแรงหรือปริมาณของเกลือสูงซึ่งจะเป็นอันตรายต่อพืชหรืออาจทำให้พืชตายได้ ในระยะนี้ใช้เวลาอย่างน้อย 3 เดือน หรือมากที่สุดถึง 1 ปี

2.5.4 ระยะคงสภาพ (Mature phase)

ระยะนี้เป็นอุณหภูมิที่ปุ๋ยได้ที่แล้ว จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก (ราเซนทร์ และคณะ, 2550) สารประกอบอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายจะเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารฮิวมิก ดังนั้นจะเกิดเป็นสารฮิวมิกที่เสถียร ในระยะนี้บางครั้งอาจต้องใช้เวลานานถ้ากองปุ๋ยหมักมีออกซิเจนน้อย หรือมีความชื้นมากหรือน้อยเกินไป การที่ปุ๋ยมีความพร้อมที่จะนำไปใช้ประโยชน์นั้นไม่สามารถกำหนดระยะเวลาที่แน่ชัดได้ โดยทั่วไปในทางการค้า ปุ๋ยหมักจะหมักปุ๋ยเป็นระยะ 1 ถึง 4 เดือน ชาวบ้านจะพิจารณาจากอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ และอีกอย่างหนึ่งคือจากการเกิดสารอินทรีย์ที่คงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือการเกิดสารฮิวมิกในระยะนี้นั่นเอง (Cooperband, 2002)



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ย

ที่มา : Smith, 1995

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

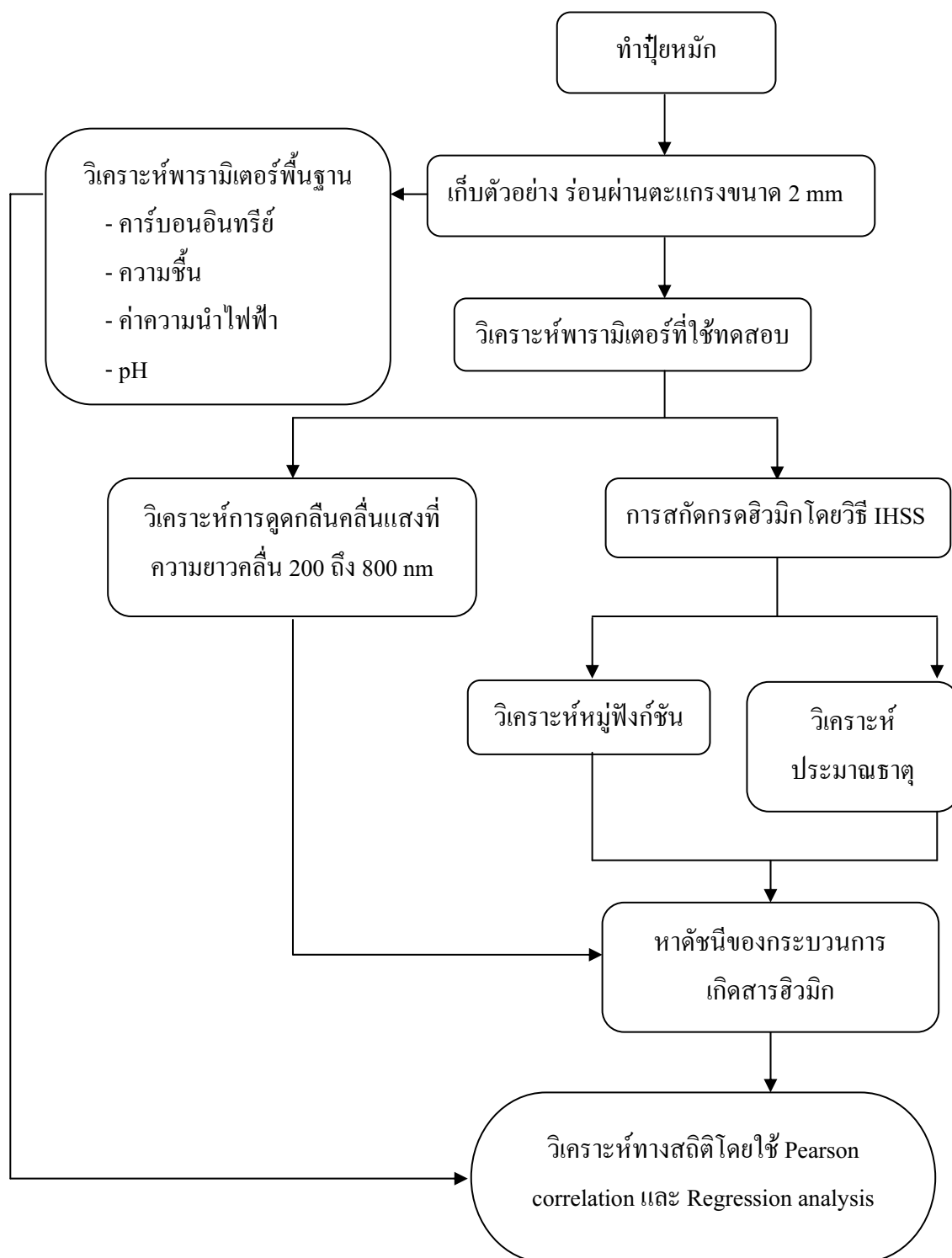
สำหรับวิธีการทดลองในการศึกษาหัวข้อดังกล่าวนี้ได้แบ่งกระบวนการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ การหมักและเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ และการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยแสดงแผนผังการทดลองโดยรวมของการศึกษาครั้งนี้ดังภาพที่ 18 และตารางที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ วิธีการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 7 แสดงวิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (Methodologies and instruments)

พารามิเตอร์หรือการทดลอง	วิธีการทดลอง†	เครื่องมือที่ใช้‡
ปุ๋ย		
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด	Dry combustion method (difference between TC and TIC)	Total organic carbon analyzer
สารฮิวมิก		
การสกัดแยกกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก	Isolation of IHSS soil fulvic and humic acid	shaker & centrifuge
ปริมาณธาตุต่างๆ		
- คาร์บอน	Elemental analysis	Elemental analyzer
- ไฮโดรเจน	Elemental analysis	Elemental analyzer
- ออกซิเจน	Elemental analysis	Elemental analyzer
- ไนโตรเจน	Elemental analysis	Elemental analyzer
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	Indirect titrations method	-
การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน	UV-VIS spectroscopy	UV-VIS spectrophotometer

† TC, total carbon; TIC, total inorganic carbon; IHSS, international of humic substances society

‡ UV-VIS, ultraviolet-visible



ภาพที่ 18 แสดงแผนผังการทดลองโดยรวมของการศึกษา

1. สารเคมีและรีเอเจนท์ (chemicals and reagents)

สารเคมีและรีเอเจนท์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 8 โดยได้มีการระบุถึง Chemical Abstracts Service (CAS) number ของสารเคมีและบริษัทผู้ผลิตสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 8 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS number และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS No.	บริษัท
คาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon)		
Sucrose		
คาร์บอนอินทรีย์ (inorganic carbon)		
Acetic acid	64-19-7	J.T. Baker
สารอิวมิก		
Hydrochloric acid	7647-01-0	Merck
Sodium hydroxide	1310-73-2	Merck
Hydrofluoric acid	7664-39-3	Univar
DAX-8 resin		Supelco
DOWEX ion exchange resin	69011-20-7	Sigma-Aldrich
Sodium bicarbonate	144-55-8	Univar
Barium hydroxide	17194-00-2	Univar
Calcium acetate	5743-26-0	Univar

2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (instrumentation)

2.1 เครื่องชั่ง (analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204 ของบริษัท Mettler Toledo

2.2 เซนตริฟิวจ์ (centrifuge)

เครื่องเซนตริฟิวจ์รุ่น ROTANTA 46R D78532 Tullingen 4810 เป็นของบริษัท Hettich zentrifugen สามารถปรับความเร็วในการเหวี่ยงสูงสุด 4500 RPM และตั้งเวลาได้

2.3 เครื่องเขย่าแนวนอน (horizontal shaker)

เครื่องเขย่าแนวนอนของบริษัท Gallenkamp สามารถเขย่าได้ที่ความเร็วรอบ 20-400 RPM พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 4-60°C และตั้งเวลาในการเขย่าได้ด้วย

2.4 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (conductivity meter)

เครื่องวัดความนำไฟฟ้ารุ่น Professional Meter PP-50 ของบริษัท Sartorius AG Gottingen Germany

2.5 sieve ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ใช้ Standard Test Sieve B.S.410: 1986 / I.S.O. 3310 ขนาดรู 2 มิลลิเมตร ของบริษัท ELE International

2.6 ตู้อบ (dry oven)

ตู้อบใช้สำหรับอบเครื่องแก้วและสารเคมี โดยเป็นเครื่องมือของบริษัท Medcenter ยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtungen GmbH MMM-group ซึ่งรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 80°C

2.7 ตู้เย็น (refrigerator)

ตู้ทำความเย็นใช้เก็บรักษาสารเคมีที่เตรียมไว้ใช้ในการทดลองและเก็บรักษาตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อรักษาคุณภาพของสารเคมีให้คงเดิม

2.8 Hotplate stirrer

Hotplate stirrer ของบริษัท Daihan Lab Tech รุ่น LMS-1003

2.9 pH meter

pH meter เป็นของบริษัท Metrohm รุ่น 713 ปรับเทียบโดยใช้ buffer pH 4 และ buffer pH 7 ของบริษัท Metrohm

2.10 Total organic carbon analyzer

เครื่อง Total organic carbon analyzer รุ่น Phoenix 8000 ผลิตโดย Tekmar-Dohrmann

2.11 Vortex stirrer

Vortex-2 GENIE รุ่น G-560E ของบริษัท Scientific Industries, Inc.

2.12 Ultraviolet-Visible Spectrophotometer

Ultraviolet-Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530

2.13 Elemental analyzer

Elemental analyzer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PE2400

3. วิธีการทดลอง

3.1 การหมักและเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ในการผลิตปุ๋ยหมักจะใช้วัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมจากวัสดุเหลือใช้ที่สามารถหาได้ทั่วไปในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ดังตารางที่ 9 ซึ่งจะแบ่งส่วนผสมออกเป็น 3 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 ประกอบด้วย

- มูลหมู จำนวน 80 กิโลกรัม
- มูลวัว จำนวน 80 กิโลกรัม
- มูลไก่เกลบ จำนวน 40 กิโลกรัม
- กระดิน จำนวน 50 กิโลกรัม

ชุดที่ 2 ประกอบด้วย

- มูลค่างาว จำนวน 10 กิโลกรัม
- รำละเอียด จำนวน 120 กิโลกรัม
- ธาตุอาหารรอง จำนวน 20 กิโลกรัม (ยี่ห้อมหาจักร)
- โดโลไมท์ จำนวน 50 กิโลกรัม

ชุดที่ 3 ประกอบด้วย

- สอร์โม่ซากสัตว์ เช่น ปลาหมัก หอยเชอรี่หมัก จำนวน 10 ลิตร
- กากน้ำตาล จำนวน 10 กิโลกรัม
- น้ำเปล่า จำนวน 200 ลิตร
- หัวเชื้อจุลินทรีย์ จำนวน 0.5 กิโลกรัม

3.1.1 ขั้นตอนการหมักปุ๋ย

การทำปุ๋ยหมักจะต้องทำในพื้นที่ที่ห่างไกลชุมชนเพื่อป้องกันกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนการทำปุ๋ยหมักนั้นจะเริ่มจากการผสมคลุกเคล้าส่วนผสมในแต่ละชุดเตรียมไว้ โดยชุดที่ 3 จะผสมกันแล้วหมักทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นนำน้ำหมักที่ได้ประมาณ 200 ลิตรไปผสมลงบนส่วนผสมชุดที่ 1 เมื่อได้แล้วนำไปผสมกับส่วนผสมชุดที่ 2 ทำการคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปบรรจุในกระสอบ ๆ ละ 25 กิโลกรัม ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบให้แน่นเพื่อหมักปุ๋ยไว้ แล้วตั้งกระสอบขึ้นเรียงกันไป จะไม่ตั้งกระสอบปุ๋ยหมักชิดกันจนเกินไปเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก

3.1.2 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก

เมื่อทำการหมักปุ๋ยเสร็จแล้วจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากกระสอบที่บรรจุปุ๋ยหมักแต่ละกระสอบ ๆ ละ 200 กรัม โดยเก็บบริเวณตรงกลางของกระสอบปุ๋ยเพื่อเป็นตัวแทนของปุ๋ยทั้งหมด และจะเก็บตัวอย่างเมื่อปุ๋ยหมักมีอายุ 0, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่างด้วยทุกครั้ง

ตารางที่ 9 ปริมาณ แหล่งที่มา และอายุของส่วนผสมที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก

ส่วนผสม	หน่วยที่ ชั่ง	ปริมาณ	แหล่งที่มา	อายุ ส่วนผสม
มูลไก่เกลบ	กิโลกรัม	40	ฟาร์มเลี้ยงไก่ ต.หนองงูเหลือม	>5 เดือน
มูลหมู	กิโลกรัม	80	ฟาร์มเลี้ยงหมู ต.หนองงูเหลือม	>3 เดือน
มูลวัว	กิโลกรัม	80	ฟาร์มเลี้ยงวัว ต.หนองงูเหลือม และพื้นที่ใกล้เคียง	>5 เดือน
มูลค่างควา	กิโลกรัม	10	ถ้ำ อ.เมืองกาญจนบุรี	1 ปี
รำละเอียด	กิโลกรัม	120	โรงสีใกล้ชุมชนหนองงูเหลือม	>2 เดือน
โดโลไมท์	กิโลกรัม	50	กลุ่มเกษตรอินทรีย์บางช้าง	3 เดือน
ธาตุอาหารรอง	กิโลกรัม	20	กลุ่มเกษตรอินทรีย์บางช้าง	3 เดือน
หัวเชื้อ จุลินทรีย์	กิโลกรัม	0.5	โรงปุ๋ยอินทรีย์ ต.ทุ่งคอก อ.สองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี	3 เดือน
กากน้ำตาล	กิโลกรัม	10	ตลาดหน้า ม.เกษตรศาสตร์ กำแพงแสน	3 เดือน
น้ำหมักปลา	กิโลกรัม	10	บ้านคุณอภิชาติ ต.หนองงูเหลือม	>4 เดือน
กระดินสับ	กิโลกรัม	50	ต.หนองงูเหลือม	
รวม	กิโลกรัม	650		

3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์

นำตัวอย่างปุ๋ยที่เก็บมาตากให้แห้ง (air dry) ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ.2548 ได้แก่ การคัดแยกพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ ออก และคัดแยกขนาดอนุภาคปุ๋ยโดยใช้ sieve ขนาด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำขนาดดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด โดยแต่ละพารามิเตอร์จะทำ 3 ซ้ำ

3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 การสกัดสารฮิวมิก

ทำการสกัดสารฮิวมิกเพื่อแยกชนิดและหาปริมาณของกรดฮิวมิก (humic acid; HA) และกรดฟัลวิก (fulvic acid; FA) ในปุ๋ยหมัก ด้วยเทคนิค Isolation of IHSS Soil Fulvic and Humic Acid ของ Methods of Soil Analysis, Part3 Chemical methods (Sparks et al., 1996) โดยชั่งปุ๋ย 5.0 กรัม

ใส่ขูดรูปขมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร ปรับ $\text{pH} \leq 2$ ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 M เป็น 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าแนวระนาบความเร็วรอบ 150 RPM เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปปั่นตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 2500 RPM เป็นเวลา 5 นาที สารละลายใสที่ได้จะเป็นกรดฟัลวิก Extract 1 นำตะกอนมาปรับ $\text{pH} \geq 7$ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1.0 M ปรับปริมาตรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 M เป็น 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าและความเร็วรอบเท่าเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปปั่นตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 2500 RPM 10 นาที ทิ้งตะกอนที่เป็นส่วนของฮิวมิกกับดินทิ้งไป นำสารละลายใสมาตกตะกอนกรดฮิวมิกด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 6 M นำไปปั่นตริฟิวจ์ 5 นาที เพื่อแยกสารละลายใสที่เป็นกรดฟัลวิก Extract 2 ออกมา จากนั้นจะทำการสกัดให้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์อีกครั้ง (redissolve the humic acid fraction) โดยการนำตะกอนฮิวมิกมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เข้มข้น 0.1 M HCl/0.3 M HF 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ที่ทำด้วยเทฟลอน เขย่าสารละลายทิ้งไว้ข้ามคืน นำไปปั่นตริฟิวจ์จะได้กรดฮิวมิกบริสุทธิ์ บันทึคน้ำหนักเปียก (wet weight) นำไป Freeze dry แล้วจึงบันทึกน้ำหนักแห้ง (dry weight)

ส่วนกรดฟัลวิก Extract 1 และ Extract 2 ที่ได้จากการสกัดข้างต้น จะทำให้บริสุทธิ์โดยการนำกรดฟัลวิกแต่ละ Extract มาผ่าน XAD-8 resin แล้วสกัดกรดฟัลวิกออก (back elute) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 M นำมาสารละลายที่ได้มารวมกันแล้วผ่าน XAD-8 resin แล้วสกัดกรดฟัลวิกออกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 M อีกครั้ง จึงนำไปผ่าน H^+ -saturate cation exchange resin ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

จากนั้นนำกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Elemental component) คือ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน โดยเครื่อง Elemental Analyzer

3.2.2 การวิเคราะห์คาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมด (total inorganic carbon) หรือ คาร์บอเนต (carbonate)

วิเคราะห์คาร์บอเนตด้วยวิธี acetic acid dissolution method (Loeppert and Saurez, 1996) โดยทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ความเข้มข้น 0, 50, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) จากนั้นชั่งตัวอย่างปุ๋ย 0.5 กรัม ใส่ใน vial แล้วเติมกรดอะซิติกเข้มข้น 0.40 M 25 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่าแนวระนาบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมาตรฐาน

แคลเซียมคาร์บอเนต และสารละลายตัวอย่างมาวัด pH ถ้าค่า pH ของสารละลายตัวอย่างเกิน 5.00 ต้องวิเคราะห์ใหม่โดยลดตัวอย่างปูลง

สามารถคำนวณโดยพล็อตกราฟระหว่างค่า pH ของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตกับ $\log\left(\frac{mgCaCO_3}{T - mgCaCO_3}\right)$ เมื่อ T คือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดอะซิติกเข้มข้น 0.40 M ที่สภาวะสมดุล เนื่องจากการวิเคราะห์นี้ใช้กรดอะซิติกเข้มข้น 0.40 M 25 มิลลิลิตร ดังนั้น T มีค่า 480 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการคำนวณหาปริมาณคาร์บอเนตของตัวอย่าง คำนวณจากสมการเส้นตรงที่ได้จากการพล็อตของสารละลายมาตรฐาน

$$pH = a \log\left(\frac{mgCaCO_3}{T - mgCaCO_3}\right) + b \quad [4]$$

โดย a และ b คือค่าคงที่ที่ได้จากการพล็อตกราฟ

จากนั้นได้ค่าปริมาณของคาร์บอเนตในหน่วย mg $CaCO_3$ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดย

$$TIC(mgg^{-1} compost) = \frac{mgCaCO_3 \times 12.0107}{100.0869} \quad [5]$$

เมื่อ TIC คือ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด

12.0117 คือ มวลอะตอมของคาร์บอน

100.0869 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

3.2.3 คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon)

คาร์บอนอินทรีย์จะวิเคราะห์โดยวิธี difference between total carbon and inorganic carbon method (Nelson and Sommers, 1996) ซึ่งวิธีนี้ต้องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (total carbon, TC) ในปุ๋ยจากเครื่อง total organic carbon analyzer (TOC analyzer) ก่อน แล้วนำค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total inorganic carbon, TIC) มาลบออก จึงได้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด สำหรับวิธีการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดสามารถทำได้โดย ชั่ง boat เมื่อน้ำหนักคงที่แล้วใส่ปุ๋ยหมักลงไป ชั่งน้ำหนัก (ไม่ควรเกิน 1 กรัม) บันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำปุ๋ยหมักไปออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 1000°C ด้วยเครื่อง TOC analyzer ค่าที่ได้เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานจะเป็นปริมาณค่าคาร์บอนรวม ในหน่วย $mg\ g^{-1} compost$ แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด โดย

$$\text{TOC (mg g}^{-1} \text{ compost)} = \text{TC} - \text{TIC} \quad [6]$$

- เมื่อ TOC คือ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด ($\text{mg g}^{-1} \text{ compost}$)
 TC คือ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ($\text{mg g}^{-1} \text{ compost}$)
 TIC คือ ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมด ($\text{mg g}^{-1} \text{ compost}$)

3.2.4 ผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมด (total acidity)

ค่าความเป็นกรดทั้งหมด (total acidity) ในกรดฮิวมิกของปุ๋ยวิเคราะห์ได้โดยวิธี Indirect titrations method (Stevenson, 1994; Swift, 1996) โดยการชั่งกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร บันทึกล้างน้ำหนัก เติมสารละลายเบเรียมไฮดรอกไซด์ (Ba(OH)_2) อิ่มตัว 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบที่ความเร็วรอบ 100 RPM เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมารองผ่านกระดาษกรอง GFC ขนาดรู 45 ไมครอน (ทำโดยหลีกเลี่ยงการถูกออกซิไดซ์จากแก๊สออกซิเจน) จากนั้นนำไปไตเตรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.5 M แล้วจึงหาค่าความเป็นกรดทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{Total acidity (mmol g}^{-1}) = (V_{\text{blank}} - V_{\text{sample}}) \times M_{\text{acid}} / W_{\text{sample}} (\text{g}) \quad [7]$$

- เมื่อ V_{blank} คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรต blank
 V_{sample} คือ ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง
 M_{acid} คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้จริง
 W_{sample} คือ ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (g)

3.2.5 หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic (COOH) groups)

หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) ในกรดฮิวมิกของปุ๋ยวิเคราะห์ได้โดยวิธี Indirect titrations method (Stevenson, 1994; Swift, 1996) โดยการชั่งกรดฮิวมิก 50 มิลลิกรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร บันทึกล้างน้ำหนัก เติมสารละลายแคลเซียมอะซิเตต (Ca(HCOO)_2) เข้มข้น 0.5 M 40 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบที่ความเร็วรอบ 100 RPM เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมารองผ่านกระดาษกรอง GFC ขนาดรู 45 ไมครอน (ทำโดยหลีกเลี่ยงการถูกออกซิไดซ์จากแก๊สออกซิเจน) จากนั้นนำไปไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 M แล้วจึงหาค่าความเป็นกรดทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{COOH acidity (mmol g}^{-1}\text{)} = (V_{\text{sample}} - V_{\text{blank}}) \times M_{\text{base}} / W_{\text{sample}} (\text{g}) \quad [8]$$

เมื่อ V_{sample} คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง
 V_{blank} คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต blank
 M_{base} คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จริง
 W_{sample} คือ ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (g)

3.2.6 ฟีนอลิก (phenolic-OH groups)

ฟีนอลิก (phenolic-OH groups) ในกรดฮิวมิกจะวิเคราะห์โดยวิธี difference between total acidity and carboxylic (COOH) groups method (Stevenson, 1994; Swift, 1996) ซึ่งวิธีนี้ต้องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดทั้งหมด (total acidity) ก่อน แล้วนำค่าของหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic groups) มาลบออก จึงได้ค่าของหมู่ฟีนอลิกที่มีอยู่ในกรดฮิวมิกของปุ๋ย ดังสมการ

$$\text{Phenolic-OH groups (mmol g}^{-1}\text{)} = \text{total acidity (mmol g}^{-1}\text{)} - \text{COOH (mmol g}^{-1}\text{)} \quad [9]$$

3.2.7 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

กรดฮิวมิกที่สกัดได้จากปุ๋ยหมักจะนำมาละลายในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เข้มข้น 0.05 M จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร (Domeizel et al., 2004; Amine-Khodja et al., 2006)

3.2.8 การหาดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

ในการพิจารณาการเกิดกรดฮิวมิกนอกจากจะพิจารณาจากปริมาณธาตุองค์ประกอบอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชัน และการดูดกลืนแสงแล้ว ยังสามารถหาได้จากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่สำคัญอีก 3 ดัชนี (Sanchez-Monedero et al., 1999; Brunetti et al., 2007; Bustamante et al., 2008; Dias et al., 2010) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (Humification Index; HI)} = (\text{HAC/TOC}) \times 100 \quad [10]$$

$$\text{ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (Humification Rate; HR)} = (\text{HAS/TOC}) \times 100 \quad [11]$$

$$\text{ร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of Humic acid; PH)} = (\text{HAC/HAS}) \times 100 \quad [12]$$

เมื่อ HAC คือ ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (mg g^{-1})
 TOC คือ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของปุ๋ยหมัก (mg g^{-1})
 HAS คือ ปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (mg g^{-1})

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

1. ลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักและการพิจารณาเทียบกับมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์

1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก

ในการหมักปุ๋ยครั้งนี้ได้มีการตรวจติดตามลักษณะของปุ๋ยหมักที่หมักในกระสอบตลอดระยะเวลาในการหมักเป็นเวลา 119 วัน ซึ่งจะตรวจติดตามทั้งลักษณะพื้นฐานทางกายภาพและลักษณะเฉพาะที่เป็นการวิเคราะห์ด้านเคมี ดังตารางที่ 10 เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดอายุของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ โดยลักษณะของปุ๋ยหมักในแต่ละช่วงเวลาจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระสอบปุ๋ยหมัก ดังภาพที่ 20 ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาอายุของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ (Bernal et al., 1997; Zeng et al., 2009) ได้เป็น 4 ระยะ ดังนี้

1.1.1 ระยะเริ่มผสม (Initial phase)

ระยะเริ่มผสมคือวันแรก (0 วัน) ของการทำปุ๋ยหมัก ปุ๋ยหมักจะมีสีดำเข้มที่เกิดจากมูลสัตว์ต่าง ๆ และส่วนผสมอื่นที่ถูกรดด้วยกากน้ำตาลและน้ำหมักปลาที่มีสีดำเข้ม และมีสีเขียวของกระดินสับ ดังภาพที่ 19 มีกลิ่นของส่วนผสมต่าง ๆ ที่คลุกเคล้ากันอยู่ โดยเฉพาะกลิ่นของน้ำหมักปลาและกากน้ำตาล เมื่อวัดอุณหภูมิจะได้ 27.0 องศาเซลเซียส ภายในกองปุ๋ยหมักยังไม่เกิดความร้อน และมีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 79.94 ที่ความชื้นค่อนข้างสูงอาจเป็นเพราะส่วนผสมที่มีลักษณะเป็นของเหลวถึง 3 ชนิด คือ น้ำปลา กากน้ำตาล และน้ำหมักปลา อุณหภูมิของปุ๋ยในระยะนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอก เนื่องจากยังไม่เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อนำมาวิเคราะห์อัตราส่วน C/N พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.9 : 1

1.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงจะเริ่มเกิดกระบวนการหมักขึ้นในกระสอบปุ๋ยหมัก ซึ่งจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 34 วัน อุณหภูมิที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 34.0-39.0 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าหลังจากทำการหมักปุ๋ยแล้ว อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และสูงสุดเท่ากับ 39.0 องศาเซลเซียส ในวันที่ 21 และความชื้นจะลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 50.70 ถึง 63.75 อาจเป็นเพราะปุ๋ยหมักอยู่ในกระสอบในลักษณะที่ต้งไว้ ทำให้อากาศถ่ายเทได้สะดวกทำให้ความชื้นไม่สูงมากนักในระยะนี้ ในระยะนี้จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุอย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์ในกระสอบปุ๋ย จึงต้องกลับกระสอบปุ๋ย สัปดาห์ละ 2 ถึง 3 ครั้งเพื่อลดอุณหภูมิ ความชื้น และความหนาแน่นลง ปุ๋ยหมักในระยะนี้จะมีสีดำ

ซึ่งสีจะอ่อนลงมากกว่าในระยะเริ่มผสม และสีเขียวของกระถินสับก็เริ่มเป็นสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นของแอมโมเนียที่ฉุนมาก เนื้อปุ๋ยหมักเริ่มแห้งเพราะความร้อนที่สูงขึ้น ปุ๋ยหมักจะเกาะกันเป็นก้อนและเกิดเส้นใยราสีขาว อีกทั้งยังพบหนอนและแมลงวันด้วย ไม่มีพืชเจริญบนกองปุ๋ย และเมื่อนำมาวิเคราะห์อัตราส่วน C/N พบว่ามีค่าสูงอยู่ในช่วง 9.3:1 ถึง 19.4:1

1.2.3 ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase)

ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาเป็นระยะที่อุณหภูมิเริ่มลดลง ซึ่งอยู่ในช่วง 35 ถึง 48 วัน วัดอุณหภูมิได้ประมาณ 30.0 องศาเซลเซียส ในระยะนี้จะไม่มีการกลับกระสอบปุ๋ยแล้ว ส่วนลักษณะของเนื้อปุ๋ยนั้นจะไม่คงเหลือสภาพของสารอินทรีย์วัตถุเดิมแล้วเนื่องจากถูกย่อยสลายจนหมด ปุ๋ยหมักจะมีสีดำน้อยลง กลิ่นแอมโมเนียจะเริ่มลดลง ในกองปุ๋ยยังมีเศษก้านกระถินชิ้นใหญ่ ๆ เหลืออยู่ เนื้อปุ๋ยจะแห้งคล้ายดิน เกาะกันเป็นก้อนบ้าง ร่วนซุยบ้าง มีแมลงวันและเริ่มมีเห็บตัวเล็ก ๆ ขึ้นบนกองปุ๋ยหมักด้วย ความชื้นจะลดลงเหลือร้อยละ 48.21 และเมื่อนำมาวิเคราะห์อัตราส่วน C/N พบว่ามีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ 14.4

1.2.4 ระยะที่อุณหภูมิคงที่ (Mature phase)

ระยะที่อุณหภูมิคงที่คือระยะที่อุณหภูมิในกระสอบปุ๋ยหมักเริ่มคงที่ จะอยู่ในช่วงวันที่ 49 ถึง 119 วัดอุณหภูมิได้ ในช่วง 27.7-28.3 องศาเซลเซียส วัดความชื้นได้ในช่วงร้อยละ 26.03 ถึง 47.62 ปุ๋ยหมักจะมีสีน้ำตาลถึงเทาและไม่มีลักษณะของส่วนผสมตั้งต้นเหลืออยู่แล้ว เนื่องจากถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างเสถียรเนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น ไม่มีกลิ่นของแอมโมเนีย ไม่มีความร้อนเหลืออยู่ ลักษณะของเนื้อปุ๋ยจะร่วนคล้ายดิน มีเห็บเจริญในกองปุ๋ยมากขึ้น และเมื่อนำมาวิเคราะห์อัตราส่วน C/N พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 10.0 ถึง 14.7 ปุ๋ยในระยะนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช

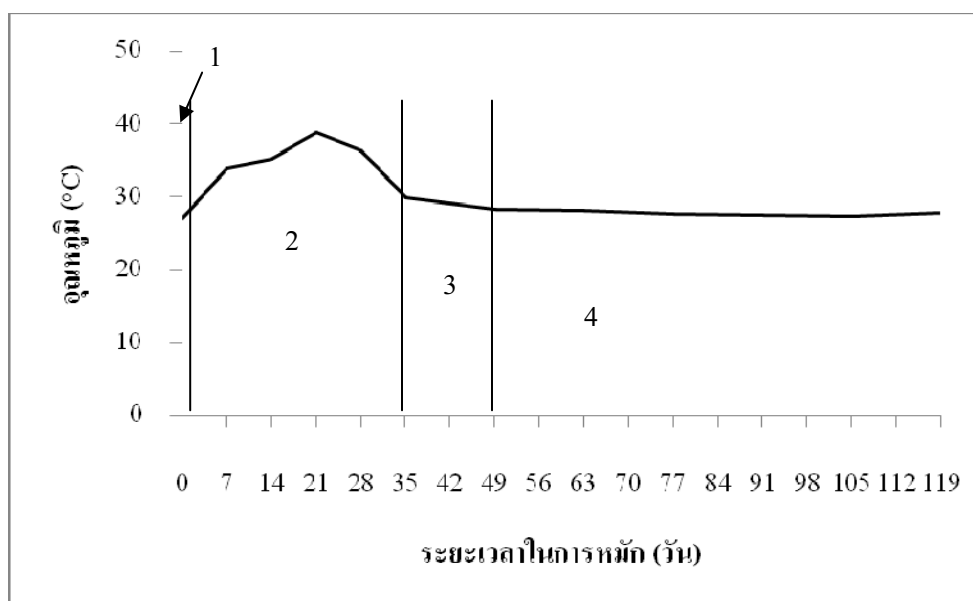


ภาพที่ 19 การทำปุ๋ยหมัก

อัญชลี : ถ่ายภาพ

ตารางที่ 10 ลักษณะพื้นฐานของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมักปุ๋ย

อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	หลักในการพิจารณาพื้นฐาน					
	สี	กลิ่น	อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะ	การเจริญของพืช	C/N ratio
0	สีดำเข้ม, เขียว	ส่วนผสมต่างๆ	27.0	ตามส่วนผสม ขึ้น	ไม่มี	8.9:1
7	สีดำ	แอมโมเนีย	34.0	เหลือเศษกระถินสับ เริ่มแห้ง มีเส้นใยราสีขาว	ไม่มี	19.4:1
14	สีดำ	แอมโมเนีย	35.3	เหลือเศษกระถินสับ เริ่มแห้ง เส้นใยราสีขาว	ไม่มี	9.3:1
21	สีดำ	แอมโมเนีย	39.0	เหลือก้านกระถิน แห้ง เป็นก้อน มีหนอน ไม่มีรา	ไม่มี	15.4:1
28	สีดำ	แอมโมเนีย	36.3	ไม่เห็นส่วนผสม แห้ง เป็นก้อน มีแมลงวัน	ไม่มี	13.6:1
35	สีดำอ่อน	แอมโมเนียน้อยมาก	30.0	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งคล้ายดิน เป็นก้อน มีแมลงวัน	มี	14.4:1
49	สีดำอ่อน	ไม่มีกลิ่น	28.3	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งคล้ายดิน เริ่มร่วน มีแมลงวัน	มี	12.1:1
63	สีน้ำตาล	ไม่มีกลิ่น	28.2	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งมาก ร่วนและเป็นก้อนบ้าง	มี	10.9:1
77	สีน้ำตาล	ไม่มีกลิ่น	27.7	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งมาก ร่วนและเป็นก้อนบ้าง	มี	10.0:1
91	สีน้ำตาล	ไม่มีกลิ่น	27.5	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งมาก ร่วนและเป็นก้อนบ้าง	มี	10.5:1
105	สีเทา	ไม่มีกลิ่น	27.3	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งมาก ร่วนและเป็นก้อนบ้าง	มี	12.0:1
119	สีเทา	ไม่มีกลิ่น	27.8	ไม่เห็นส่วนผสม แห้งมาก ร่วนและเป็นก้อนบ้าง	มี	14.7:1



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักระหว่างการหมักปุ๋ย

หมายเหตุ : 1, ระยะเริ่มผสม; 2, ระยะอุณหภูมิสูง; 3, ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา; 4, ระยะที่อุณหภูมิคงที่

1.2 คุณลักษณะมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์

เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของปุ๋ยหมักจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้ง 119 วัน แล้วนำมาเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 เพื่อจำหน่าย ดังตารางที่ 11 พบว่าคุณลักษณะทางด้านขนาดของปุ๋ย ปริมาณหินและกรวด เศษพลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่น ๆ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจนและโพแทสเซียม อยู่ในเกณฑ์ที่ผ่านมาตรฐาน ส่วนพารามิเตอร์ที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ย่อยได้ ตั้งแต่วันที่ 0 ถึง 63 ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะไม่ผ่านค่ามาตรฐานในวันที่ 14, 28 และช่วงท้ายของระยะเวลาการหมักคือหลัง 63 วันเป็นต้นไป รวมทั้งการย่อยสลายของส่วนผสมทั้งหมดอย่างสมบูรณ์นั้นจะไม่ผ่านมาตรฐานในช่วงแรกของการหมักจนถึงวันที่ 28 หลังจากนั้นการย่อยสลายของส่วนผสมปุ๋ยหมักทั้งหมดจะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ส่วนปริมาณธาตุอาหารหลักคือฟอสฟอรัสจะไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในวันที่ 0, 7 และ 21

จากการเปรียบเทียบปุ๋ยหมักที่ศึกษากับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์จะพบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุได้ 35 และ 49 วัน จะเป็นวันที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่าน

เกณฑ์มาตรฐาน โดยเฉพาะสารอินทรีย์ อย่างไรก็ดี หากประสงค์จะนำปุ๋ยหมักนี้เพื่อการจำหน่าย จะต้องมีการควบคุมความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดด้วย

2. ดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

การที่จะบ่งชี้ได้ว่าปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แล้ว นอกจากจะทราบจากคุณลักษณะทั่วไปตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์แล้ว ยังสามารถดูได้จากการเกิดสารฮิวมิกทั้ง 3 ชนิด โดยเริ่มจากกรดฟัลวิก กรดฮิวมิก และฮิวมิน ตามลำดับ ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า humification ซึ่งกรดฮิวมิกจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีบทบาทสำคัญที่สุดในดิน นั่นคือถ้าปุ๋ยหมักมีสารฮิวมิก มากแสดงว่าเกิดสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรมาก โดยเฉพาะการเกิดกรดฮิวมิก ซึ่งสามารถหาได้จากดัชนีต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ธาตุองค์ประกอบ

2.1.1 การพิจารณาจากธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยตรง

เมื่อนำกรดฮิวมิกมาวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ย ดังภาพที่ 21 พบว่า ในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นกรดฮิวมิกจะมีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ก่อนข้างคงที่ แต่ในวันที่ 14 จะสังเกตเห็นว่าปริมาณธาตุองค์ประกอบทุกธาตุมีค่าต่ำที่สุด และหลังจากวันที่ 91 เป็นต้นไปพบว่าปริมาณธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ นั่นอาจเป็นเพราะว่าเมื่อปล่อยให้ปุ๋ยที่หมักได้ที่หรือพร้อมใช้แล้วเป็นเวลานานเกินไป จะเกิดแร่ธาตุขนาดเล็กขึ้นเป็นจำนวนมากจากกระบวนการ mineralization ทำให้รบกวนกระบวนการเกิดสารฮิวมิก ส่งผลให้ปริมาณกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักลดลง (Prudent et al., 1995) การพิจารณาธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกเพียงอย่างเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอต่อการบ่งชี้คุณภาพปุ๋ยในระหว่างการหมักปุ๋ยที่ได้ เนื่องจากจะต้องทราบถึงรูปแบบโครงสร้างของกรดฮิวมิกเพื่อนำไปสู่การแสดงถึงคุณลักษณะอื่น ๆ ประกอบด้วย

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบมาตรฐานตัวอย่างปุ๋ยหมักกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548

คุณสมบัติ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)											
		0	7	14	21	28	35	49	63	77	91	105	119
ขนาดของปุ๋ย	≤ 12.5×12.5 มม.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
อุณหภูมิ	ไม่มีค่ามาตรฐาน	27	34	35.3	39	36.3	30	28.3	28.2	27.7	27.5	27.3	27.8
ปริมาณความชื้น และสิ่งที่ระเหยได้	≤ 35 % โดยน้ำหนัก	79.94	63.75	59.55	53.99	50.7	48.21	47.62	43.91	26.03	25.86	26.03	26.03
ปริมาณหินและกรวด	ขนาด 5 มม. ≤ 5 % โดยน้ำหนัก	2	2	2.3	3	3	2	3	2.5	3	2	2	1.5
พลาสติก แก้ว วัสดุมี คม และโลหะอื่น ๆ	ต้องไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	≥ 30 % โดยน้ำหนัก	38.62	41.15	21.11	35.74	26.95	36.5	30.74	26.59	9.41	8.45	12.36	16.62
pH	5.5-8.5	6.69	6.64	6.76	6.91	6.9	7.23	7.27	7.63	7.68	7.7	7.51	7.47
C/N ratio	≤ 20:1	8.9:1	19.4:1	9.3:1	15.4:1	13.6:1	14.4:1	12.1:1	10.9:1	10.0:1	10.5:1	12.0:1	14.7:1

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบมาตรฐานตัวอย่างปุ๋ยหมักกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 (ต่อ)

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)											
		0	7	14	21	28	35	49	63	77	91	105	119
EC	≤ 6 dS/m	2.85	3.37	4.86	5.06	4.8	4.95	4.93	4.26	4.28	4.18	4.13	4.15
ปริมาณธาตุอาหารหลัก													
N (total N)	≥ 1.0 % โดยน้ำหนัก	2.79	1.75	2.47	1.93	1.87	2.08	2.33	2.19	2.15	2.08	2.03	1.61
P (P ₂ O ₅)	≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก	0.14	0.22	13.99	0.28	25.50	15.79	10.24	29.67	16.50	13.50	18.66	17.50
K (K ₂ O)	≥ 0.5 % โดยน้ำหนัก	42.93	53.62	81.01	53.62	24.21	44.6	36.92	31.02	50.95	34.75	31.11	30.45
การย่อยสลายที่สมบูรณ์	≥ 80%	< 80%	< 80%	< 80%	< 80%	< 80%	> 80%	> 80%	> 80%	> 80%	> 80%	> 80%	> 80%

* หมายเหตุ สำหรับปริมาณสารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ทองแดง (Copper) ตะกั่ว (Lead) และปรอท (Mercury) ไม่ได้ทำ

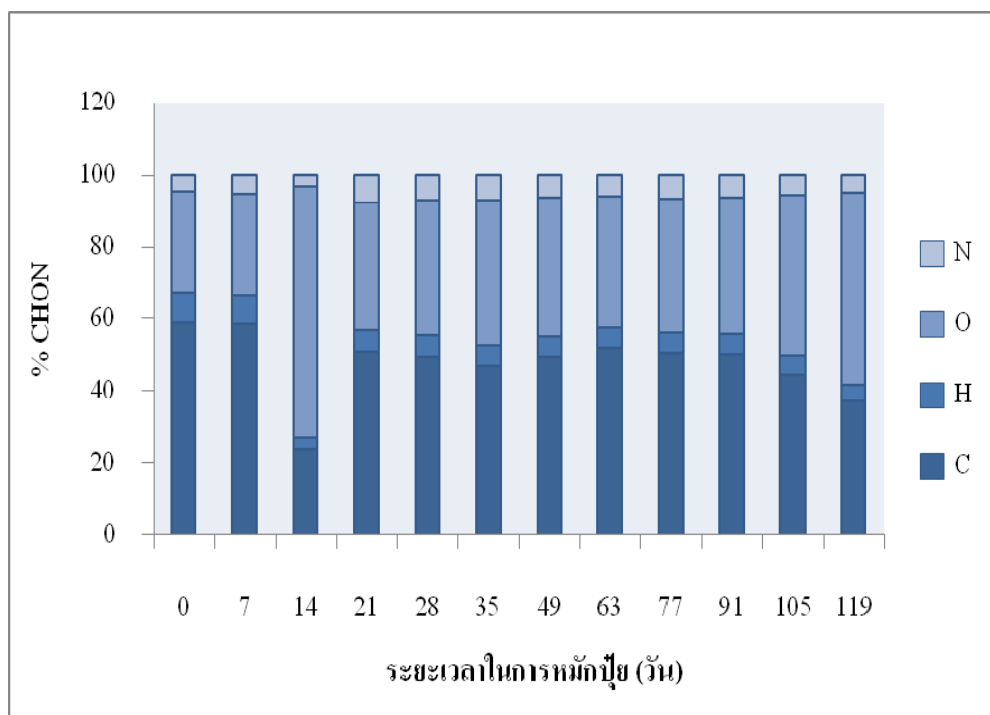
การวิเคราะห์ในการทดลองนี้



ผ่านค่ามาตรฐาน



ไม่ผ่านค่ามาตรฐาน



ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

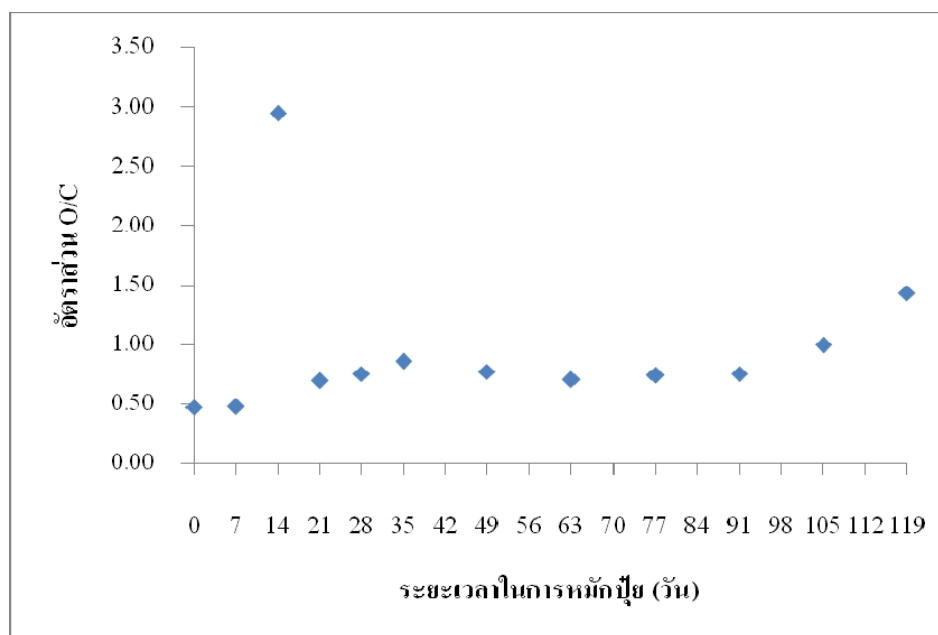
2.1.2 การพิจารณาจากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

การพิจารณาอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบในสารฮิวมิกนั้นมักใช้บ่งชี้เกี่ยวกับรูปแบบโครงสร้างของสารฮิวมิก และตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิกในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน อีกทั้งยังสามารถใช้ในการจำแนกชนิดของสารฮิวมิกจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกันได้อีกด้วย (Chai et al., 2007) การพิจารณาอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน 3 อัตราส่วน ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio)

อัตราส่วน O/C ของกรดฮิวมิก ดังภาพที่ 22 พบว่ามีค่าสูงที่สุดเมื่อปุ๋ยมีอายุได้ 14 วัน เป็นผลมาจากที่ปริมาณธาตุองค์ประกอบมีค่าต่ำที่สุด (ภาพที่ 20) หลังจากนั้นจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักจะย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต เกิดเป็นโมเลกุลที่มารวมตัวกันใหม่ กลายเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อน โดยมีโครงสร้างอะโรมาติกที่เด่นชัดขึ้น นั่นคือเกิดกรดฮิวมิกขึ้นนั่นเอง ส่งผลให้อัตราส่วนนี้มีค่าลดลงในวันที่ 21 แต่ในการศึกษาของ Wei et al. (2007) นั้นจะพบเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในวันที่ 63 โดยพบเหมือนกันทั้งในปุ๋ยหมักที่ไม่ได้เติมจุลินทรีย์และปุ๋ยหมักที่มีการเติมจุลินทรีย์ลงไปในช่วงหมักปุ๋ย ในการทดลองนี้กรดฮิวมิกจะมีการ

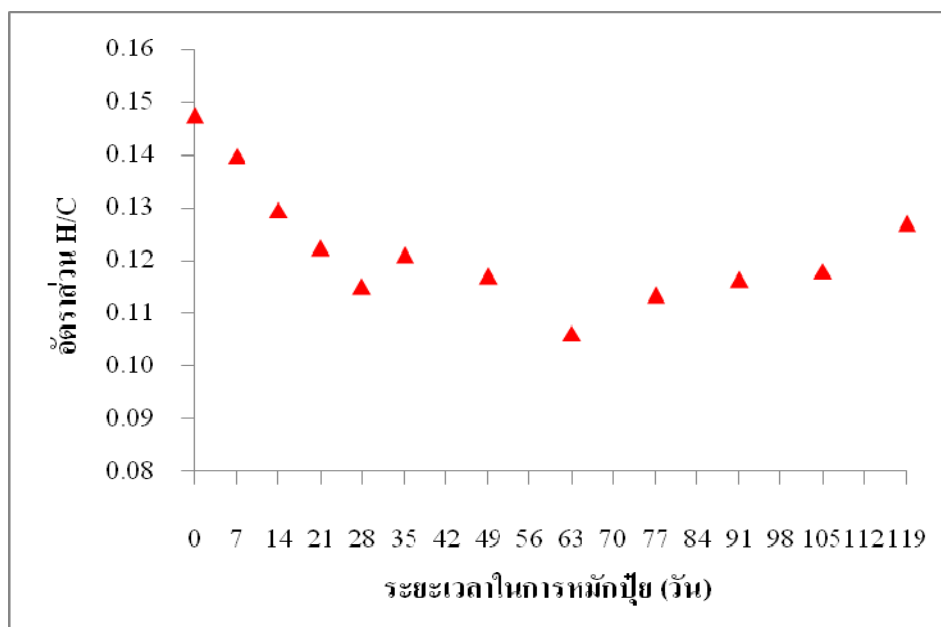
เพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น C=O หลังจากวันที่ 21 ทำให้อัตราส่วนนี้มีแนวโน้มค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 119 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Huang et al. (2006) ที่พบว่าอัตราส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันสุดท้ายของการหมักปุ๋ย



ภาพที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

- อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C ratio)

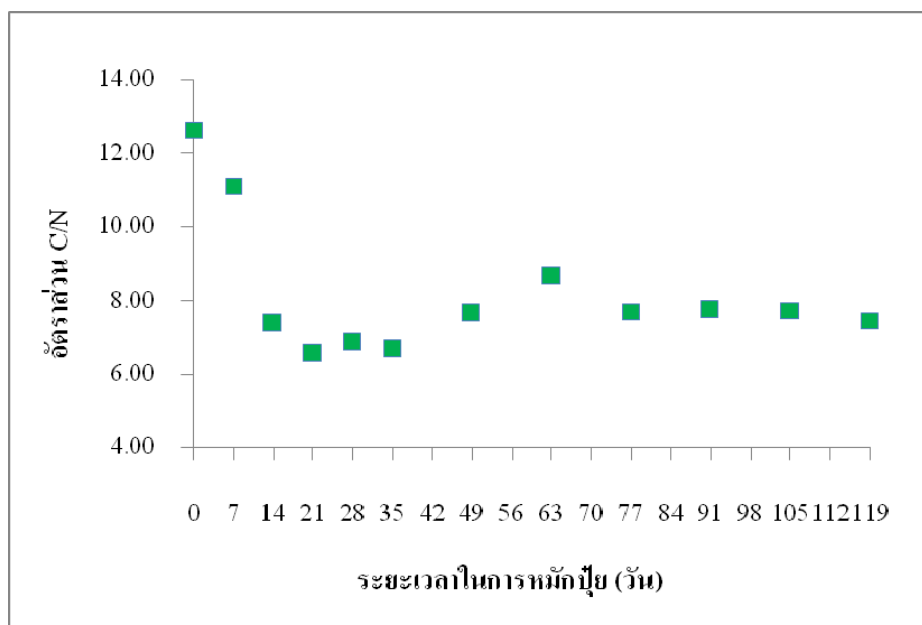
อัตราส่วน H/C ของกรดฮิวมิก ดังภาพที่ 23 พบว่าในการหมักปุ๋ยระยะแรกจะมีแนวโน้มที่ลดลงและต่ำสุดในวันที่ 63 ซึ่งการลดลงของอัตราส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว นั่นคือโครงสร้างอะโรมาติกที่เป็นโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ของกรดฮิวมิก เช่นเดียวกับการทดลองของ Huang et al. (2006) ที่พบว่าอัตราส่วนนี้จะลดลงจาก 1.43 ในวันที่ 0 จนเหลือ 1.39 ในวันที่ 63 และหลังจากวันที่ 63 อัตราส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 119 ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวในกรดฮิวมิกจะมีปริมาณลดลงแต่จะเกิดโครงสร้างที่อิ่มตัวมากขึ้น นั่นเป็นผลมาจากสารประกอบอัลคิลที่เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวนี้ยังสามารถเห็นได้จากการศึกษาของ Spaccini et al. (2009) ที่พบว่าในการหมักปุ๋ยอัตราส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 60 จนถึงวันที่ 150 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการหมักปุ๋ย อีกทั้งสามารถยืนยันได้ว่าการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นอลิฟาติกขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างของกรดฮิวมิกลดลงด้วย (Polak et al., 2005)



ภาพที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วน C/N ของกรดฮิวมิก ดังภาพที่ 24 พบว่าในการหมักปุ๋ยในระยะแรกจะมีค่าลดลงและต่ำสุดในวันที่ 21 ซึ่งให้เห็นว่าเกิดสารประกอบไนโตรเจนขึ้นในกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย เช่น การเกิดยูเรีย ซึ่งจะทำให้กระบวนการเกิดสารฮิวมิกเกิดได้เร็วขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษากระบวนการเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักโดยส่วนใหญ่ (Polak et al., 2005; Huang et al., 2006; Wei et al., 2007; Fukushima et al., 2009) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ง่าย เช่น มูลสัตว์ต่าง ๆ ส่งผลให้คาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่านี้จะเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 63 นั้นอาจเป็นเพราะว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยในช่วงหลังวันที่ 21 จนถึงวันที่ 63 นั้นเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยากอย่างพวกพืช นั่นคือกระดิ่งสับ ไนโตรเจนจึงถูกย่อยสลายได้รวดเร็วกว่าคาร์บอน จึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงอย่างรวดเร็ว (Huang et al., 2006) สารฮิวมิกที่ได้ในช่วงนี้จึงมาจากพืช (Chai et al., 2007) จากนั้นค่านี้จะลดลงในวันที่ 77 นั้นคือการย่อยสลายเศษพืชใกล้สมบูรณ์แล้ว และค่อย ๆ สมบูรณ์จนถึงวันที่ 119

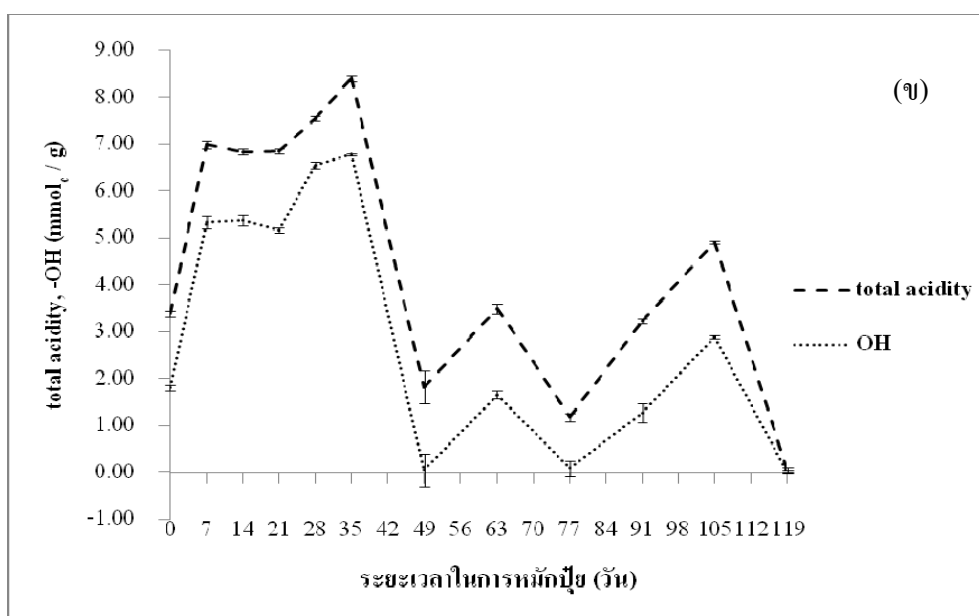
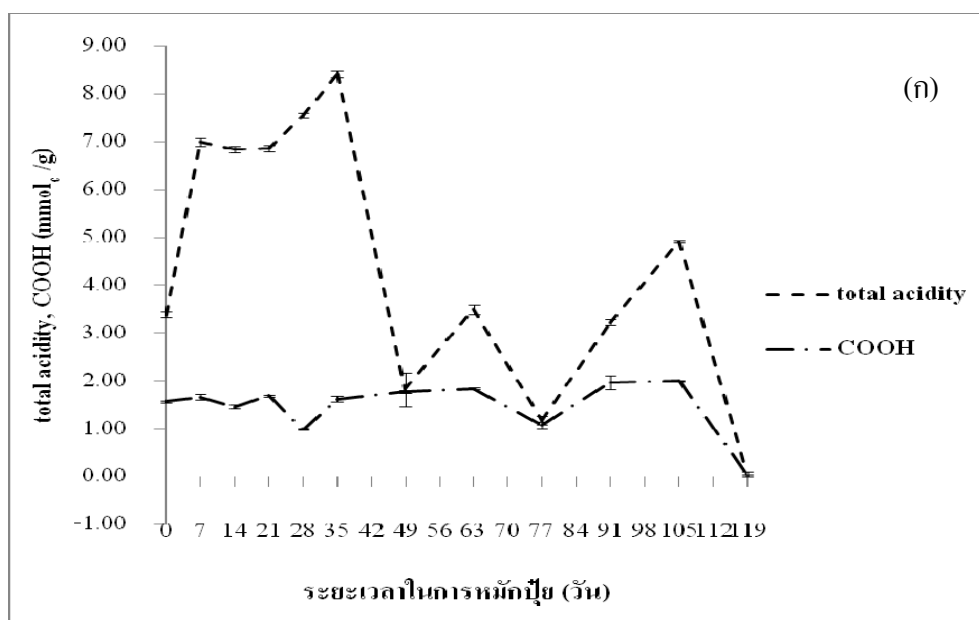


ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

2.2 หมู่ฟังก์ชันและผลรวมของความเป็นกรดของกรดฮิวมิก

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญทั้งหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) หมู่ฟีนอลิก (phenolic-OH) และผลรวมของความเป็นกรดของกรดฮิวมิก ดังภาพที่ 25 พบว่าหมู่ฟีนอลิกจะแปรผันตามผลรวมของความเป็นกรดในระหว่างการหมักปุ๋ย และหมู่ฟีนอลิกจะมีค่ามากกว่าหมู่คาร์บอกซิลิก แสดงว่าผลรวมของความเป็นกรดส่วนใหญ่ได้มาจากหมู่ฟีนอลิก ซึ่งเป็นลักษณะที่พบส่วนใหญ่ในโครงสร้างของกรดฮิวมิก หมู่ฟีนอลิกและผลรวมของความเป็นกรดจะเพิ่มขึ้นในการหมักปุ๋ยช่วงแรกและมีค่าสูงสุดในวันที่ 35 นั้นชี้ให้เห็นว่าจะเกิดกรดฮิวมิกมากเมื่อปุ๋ยมีอายุได้ 35 วัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดฮิวมิกที่สกัดได้ ดังภาพที่ 26 โดยพบว่าปริมาณของกรดฮิวมิกในวันที่ 35 มีค่ามากกว่าวันอื่น ๆ ประมาณ 5 ถึง 20 เท่า หลังจากนั้นจะลดลงในวันที่ 49 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 63 และ 105 ตามลำดับความยากง่ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุ ซึ่งในการเพิ่มขึ้นครั้งสุดท้ายอาจมาจากการย่อยสลายเศษพืชจากกระถินสับ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วน C/N ที่ลดลง ส่วนหมู่คาร์บอกซิลิกนั้นค่อนข้างคงที่ในช่วงแรกและลดลงในวันที่ 28 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นในวันที่ 35 ตามการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟีนอลิกและผลรวมของความเป็นกรด และคงที่อีกครั้งจนถึงวันที่ 63 หลังจากวันนี้อย่างไปการเปลี่ยนแปลงจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟีนอลิกและผลรวมของความเป็นกรดแต่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจากปริมาณของหมู่ฟีนอลิกที่แสดงถึงการเพิ่มของโครงสร้างอะโรมาติกในกรดฮิวมิกและปริมาณของกรดฮิวมิกที่สกัดได้

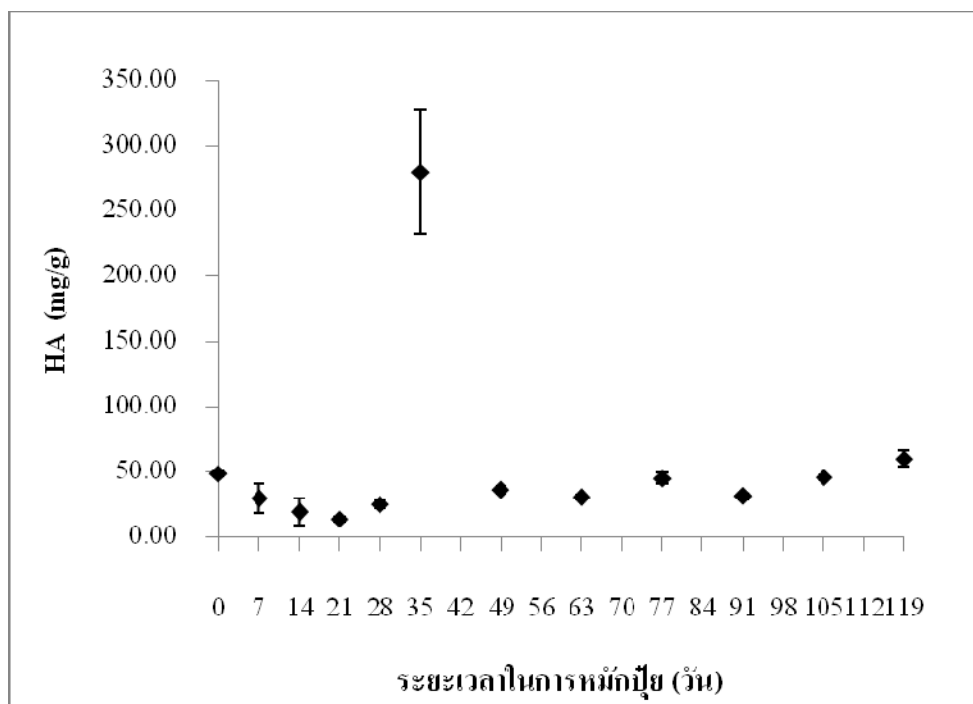
สามารถใช้บ่งชี้คุณภาพของปุ๋ยหมักได้ นั่นคืออายุที่เหมาะสมของปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการเพาะปลูกจะเป็นวันที่ 35



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของค่าความเป็นกรด (total acidity) และหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของค่าความเป็นกรด (total acidity) และหมู่ฟีนอลิก (OH) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดฮิวมิก (HA) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดกับหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH groups) และหมู่ฟีนอลิก (phenolic-OH groups) พบว่าปริมาณผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณหมู่ฟีนอลิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.981$) และปริมาณของผลรวมของความเป็นกรดทั้งหมดสัมพันธ์กับหมู่คาร์บอกซิลิกอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.01$) นั่นแสดงว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดส่วนใหญ่มาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่ฟีนอลิก ซึ่งหมู่ฟีนอลิกเป็นหมู่ที่พบเป็นส่วนใหญ่ในกรดฮิวมิก จากความสัมพันธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเกิดกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อนำความสัมพันธ์มาวิเคราะห์โดยวิธี multiple regression โดยใช้การเลือกตัวแปรแบบ stepwise selection เพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการยืนยันว่าหมู่ฟีนอลิกเป็นตัวกำหนดผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมด โดยใช้ผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดเป็นตัวแปรตาม ส่วนตัวแปรอิสระได้แก่หมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิกของกรดฮิวมิก จะได้สมการดังนี้

$$\text{total acidity} = 1.366 + 1.036 \text{ phenolic-OH} \quad R^2 = 0.962, n = 12 \quad [13]$$

โดย total acidity = ผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมด และ phenolic-OH = หมู่ฟีนอลิก

จากสมการ [13] ปริมาณหมู่ฟีนอลิกของกรดฮิวมิกสามารถทำนายผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดได้สูงถึง 96.2% นั่นชี้ให้เห็นว่าผลรวมของค่าความเป็นกรดทั้งหมดแปรผันตามปริมาณหมู่ฟีนอลิก ซึ่งสอดคล้องตามความสัมพันธ์ของ Pearson correlation อีกทั้งสมการ [13] ยังสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกที่สกัดได้จากปุ๋ยในระหว่างการหมัก ดังตารางที่ 12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนจะตรงข้ามกับปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจน นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนลดลง โดยปริมาณคาร์บอนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.998$) และปริมาณไฮโดรเจนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.895$) นั้นแสดงว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดโครงสร้างที่มีหมู่ฟีนอลิกมากขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในโครงสร้างของกรดฮิวมิก (Brunetti et al., 2007) ในการทดลองนี้พบว่าในกรดฮิวมิกมีหมู่ฟีนอลิกโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยประมาณ 3.08% แต่มีหมู่คาร์บอกซิลิกเพียง 1.48% เท่านั้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Brunetti et al. (2007) ที่พบว่ามีหมู่ฟีนอลิกและหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.44 และ 1.52% ตามลำดับ และ Fukushima et al. (2009) พบว่ามีเท่ากับ 78.38 และ 20.58% ตามลำดับ

ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก (n=12)

พารามิเตอร์	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน
คาร์บอน (C)	1.000	0.903**	-0.998**	0.501
ไฮโดรเจน (H)		1.000	-0.895**	0.186
ออกซิเจน (O)			1.000	-0.548
ไนโตรเจน (N)				1.000

หมายเหตุ : ** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed).

* มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ (2-tailed).

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกจากตารางที่ 12 ไปวิเคราะห์โดยใช้วิธี multiple regression โดยใช้การเลือกตัวแปรแบบ stepwise selection เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สามารถทำนายการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก โดยใช้การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ

คาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในโครงสร้างของกรดฮิวมิกเป็นตัวแปรตาม และมีตัวแปรอิสระคือ ธาตุไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน จะได้สมการดังนี้

$$C = 81.148 - 0.826 O \quad R^2 = 0.995, n = 12 \quad [14]$$

โดย C = คาร์บอน และ O = ออกซิเจน

จากสมการ [14] ปริมาณออกซิเจนสามารถทำนายปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักได้สูงถึง 99.5% เมื่อดูเปรียบเทียบระหว่างตารางที่ 12 กับสมการ [14] ทำให้เห็นได้ว่าทั้งปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนแต่ละตัวจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนที่พบในกรดฮิวมิก ($r = -0.998$ และ -0.895 ตามลำดับ) และเมื่อนำทั้งสองธาตุมาพิจารณาอิทธิพลรวมที่มีต่อปริมาณคาร์บอนจะพบว่าปริมาณออกซิเจนสามารถเป็นตัวแทนในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) มากกว่า อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของธาตุทั้งสองเป็นไปในทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นปริมาณออกซิเจนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นจากการเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของกรดฮิวมิกมากขึ้นเรื่อย ๆ

2.3 การดูดกลืนคลื่นแสง

เมื่อนำกรดฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยที่มีอายุได้ 0, 35, 77 และ 119 วัน มาวัดหาค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ดังภาพที่ 27 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงในความยาวคลื่นที่สำคัญ ดังนี้

2.3.1 ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร

เมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้นสเปกตรัมของค่าการดูดกลืนคลื่นแสงจะเพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 210 นาโนเมตร ซึ่งบ่งบอกได้ถึงการเปลี่ยนสถานะอิเล็กตรอนชนิด $\pi - \pi$ ของหมู่อะโรมาติก การดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตรนี้มาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในหมู่ $-NH_2$ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสร้างสายพอลิเมอร์ที่สูงขึ้น นั่นเป็นไปได้ว่าเกิดกระบวนการที่เพิ่มน้ำหนักโมเลกุลให้มากขึ้น และการที่ค่าดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตเพิ่มขึ้นนั้นเป็นไปได้ว่ามาจากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในพันธะ π เช่น ในสารประกอบที่ไม่อิ่มตัวหรือสารประกอบอะโรมาติก (Wei et al., 2007) ในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเกิดโครงสร้างอะโรมาติกมากขึ้น นั่นคือเกิดกรดฮิวมิกมากขึ้นนั่นเอง แต่ค่านี้จะลดลงในวันที่ 119 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเมื่อเวลาระยะเวลาผ่านไปนาน ๆ จะเกิดปรากฏการณ์ที่มีโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น ไนเตรต กรดคาร์บอกซิลิก เกิดขึ้นมาก

และไปรบกวนการเกิดกรดไขมันเป็นผลทำให้การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตต่ำลง ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นถึงระดับการเกิดกระบวนการ mineralization (Prudent et al., 1995)

2.3.2 ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร นั้นจะเป็นการดูดกลืนแสงของสารกลุ่มที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมัน โดยเฉพาะลิพิด ที่มีโครงสร้างอะโรมาติก พันธะส่วนใหญ่เป็นพันธะที่อิ่มตัว จึงดูดกลืนคลื่นแสงได้น้อย เมื่อลิพิดถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมัน ซึ่งมีโครงสร้างอะโรมาติก มีพันธะคู่ที่ดูดกลืนคลื่นแสงได้มากขึ้น เช่น $C=O$ และ $C=C$ เป็นต้น จึงทำให้สเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตรนี้ลดลง ในการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่าสเปกตรัมนี้มีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาในการหมักปุ๋ยเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึงวันที่ 77 นั้นแสดงถึงปริมาณลิพิดที่ลดลงหรือเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันมากขึ้นนั่นเอง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือแสดงถึงลักษณะของการถูกดูดกลืนโดยพันธะคู่ของสารประกอบอะโรมาติกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป (Domeizel et al., 2004)

2.3.3 ความยาวคลื่น 460 ถึง 480 นาโนเมตร

ในช่วงความยาวคลื่น 460 ถึง 480 นาโนเมตร จะบ่งชี้ถึงการเริ่มต้นของกระบวนการเกิดสารไขมัน โดยถ้าสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นนี้เพิ่มขึ้น แสดงว่าได้เริ่มเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันขึ้นแล้ว และในการทดลองนี้จะเห็นการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากวันที่ 0 ไปยังวันที่ 14 และจากวันที่ 35 ไปยังวันที่ 77 นั้นแสดงว่าในระหว่างวันที่ดังกล่าวเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อปุ๋ยมีอายุได้ 119 วัน พบว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 400 นาโนเมตร ต่ำกว่าวันที่ 77 นั้นแสดงว่าการเกิดกรดไขมันถูกรบกวน

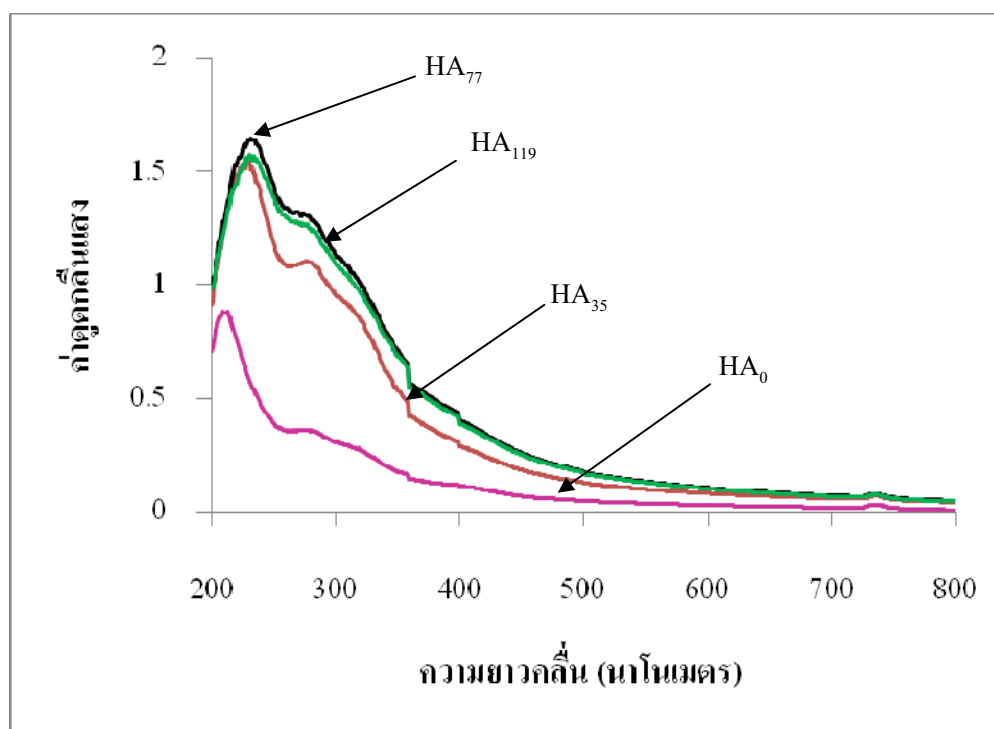
2.3.4 ความยาวคลื่น 600 ถึง 670 นาโนเมตร

ค่าดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง 600 ถึง 670 นาโนเมตร จะบ่งชี้ถึงสารไขมันที่ได้จากสารประกอบอะโรมาติกที่ชัดเจนขึ้น เนื่องจากพันธะคู่ของหมู่ $C=O$ และแสดงถึงความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนใหญ่ของกรดไขมัน (Domeizel et al., 2004) ในระหว่างการหมักปุ๋ยจะพบว่าค่านี้จะเพิ่มขึ้น นั้นแสดงว่าเกิดกรดไขมันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ที่ค่าการดูดกลืนจะลดลง นั่นคือปริมาณลิพิดลดลงนั่นเอง

2.4. อิทธิพลและความสัมพันธ์ของดัชนีกระบวนการเกิดสารไขมันที่มีต่อการเกิดกรดไขมัน

การเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันที่เกิดขึ้นในปุ๋ยหมักนั้นนอกจากสามารถวิเคราะห์และประเมินผลจากผลการทดลองที่ได้โดยตรงแล้ว ยังสามารถนำพารามิเตอร์เหล่านั้นมาทดสอบทางสถิติถึงอิทธิพลและความสัมพันธ์ที่มีต่อการเกิดกรดไขมันได้อีกด้วย โดยในที่นี้จะดู

เฉพาะอิทธิพลและความสัมพันธ์ที่ได้จากดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่สำคัญ 6 ดัชนี ได้แก่ อัตราส่วน O/C H/C และ C/N ค่า HI HR และ PH ที่เป็นตัวบ่งชี้การเกิดกรดฮิวมิก ดังนี้



ภาพที่ 27 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสเปกตรัมของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่ระยะเวลาในการหมักต่างกัน

2.4.1 อิทธิพลและความสัมพันธ์ของอัตราส่วน O/C, H/C และ C/N ที่มีต่อการเกิดกรดฮิวมิก

ในการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างอัตราส่วน O/C, H/C และ C/N ของกรดฮิวมิก ดังตารางที่ 13 พบว่ามีเพียง H/C และ C/N ที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.749$) โดย H/C ที่ลดลงจะบ่งชี้ถึงการรวมตัวหรือการแทนที่ของวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างกรดฮิวมิก (Huang et al., 2006) สอดคล้องกับ C/N ที่ลดลงเช่นกัน ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าธาตุไนโตรเจนที่มีในปุ๋ยหมักในรูปแบบที่คงทน เมื่อเกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกจึงมีแนวโน้มที่จะคงเหลือในกรดฮิวมิกได้มาก และส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 แสดงว่าสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นไม่ได้มาจากพืช (Chai et al., 2007)

ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของกรดฮิวมิก (n = 12)

พารามิเตอร์	O/C	H/C	C/N
O/C	1.000	0.053	-0.333
H/C		1.000	0.749**
C/N			1.000

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed).

* มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ (2-tailed).

จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนโครงสร้างประเภทลิกนินไปเป็น สารฮิวมิก (Stevenson, 1994) เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยวิธี stepwise regression เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สามารถทำนายการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก โดยตัวแปรตามคือ อัตราส่วน C/N และตัวแปรอิสระได้แก่ อัตราส่วน O/C และ H/C ได้สมการดังนี้

$$C/N = -6.497 + 118.330 H/C \quad R^2 = 0.561, n = 12 \quad [15]$$

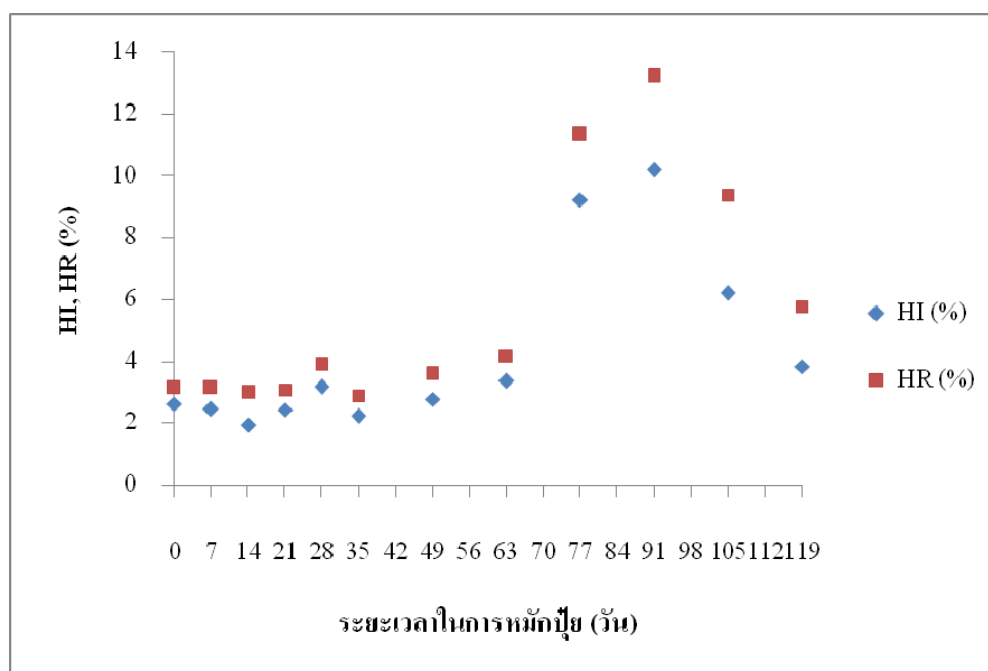
โดย C/N = อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และ H/C = อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน

จากสมการ [15] อัตราส่วน H/C สามารถทำนายอัตราส่วน C/N ได้ 56.1% ผลที่ได้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จาก Pearson correlation เหตุการณ์นี้จะทำให้กระบวนการเกิดสารฮิวมิกเกิดได้เร็วขึ้น (Polak et al., 2005) ทำให้ปุ๋ยหมักมีความพร้อมที่จะนำไปใช้ได้เร็วขึ้นนั่นเอง ส่วน O/C ไม่มีความสัมพันธ์ใดเด่นชัด เพราะยังมีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (C=O) อยู่ตลอดระหว่างการหมักปุ๋ย

2.4.2 อิทธิพลและความสัมพันธ์ของดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH) ที่มีผลต่อการเกิดกรดฮิวมิก

การพิจารณาการเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นสามารถพิจารณาจากดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนคาร์บอนของสารฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of humic acid; PH) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนของสารฮิวมิก ทั้งสามดัชนีเป็นดัชนีสำคัญที่ใช้ติดตามการเกิดกรดฮิวมิกได้

จากภาพที่ 28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า HI และ HR กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย พบว่า ค่า HI และ HR นั้น กราฟจะมีลักษณะที่สัมพันธ์กันคือจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนสูงที่สุดในวันที่ 91 บ่งชี้ว่ามีกระบวนการเปลี่ยนคาร์บอนอินทรีย์ไปเป็นกรดฮิวมิกมาก จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงวันที่ 119 อาจเนื่องมาจากการย่อยสลายกรดฮิวมิกให้เกิดเป็นแร่ธาตุขนาดเล็กจะมีมากขึ้นจากการหมักปุ๋ยไว้นานเกินไป (Prudent et al., 1995; Domeizel et al., 2004)



ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) ในระหว่างการหมักปุ๋ย

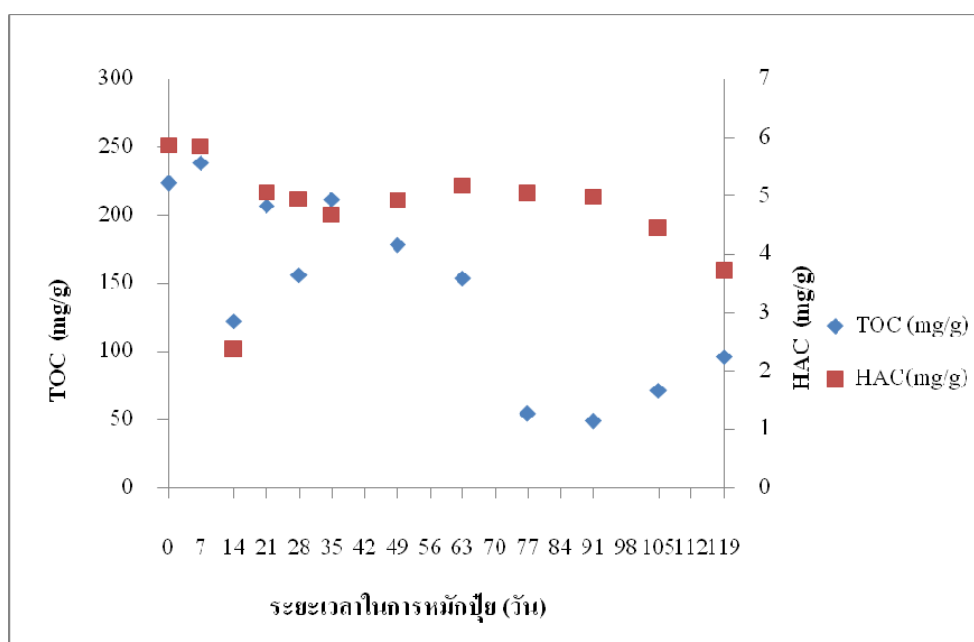
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ใช้หาค่า HI และ HR ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของปุ๋ยหมัก ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก และปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก แสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของปุ๋ยหมัก (TOC) ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) และปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC) (n = 12)

พารามิเตอร์	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด	คาร์บอนของกรดฮิวมิก	คาร์บอนของสารฮิวมิก
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	1.000	0.423	0.319
คาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC)		1.000	0.938**
คาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC)			1.000

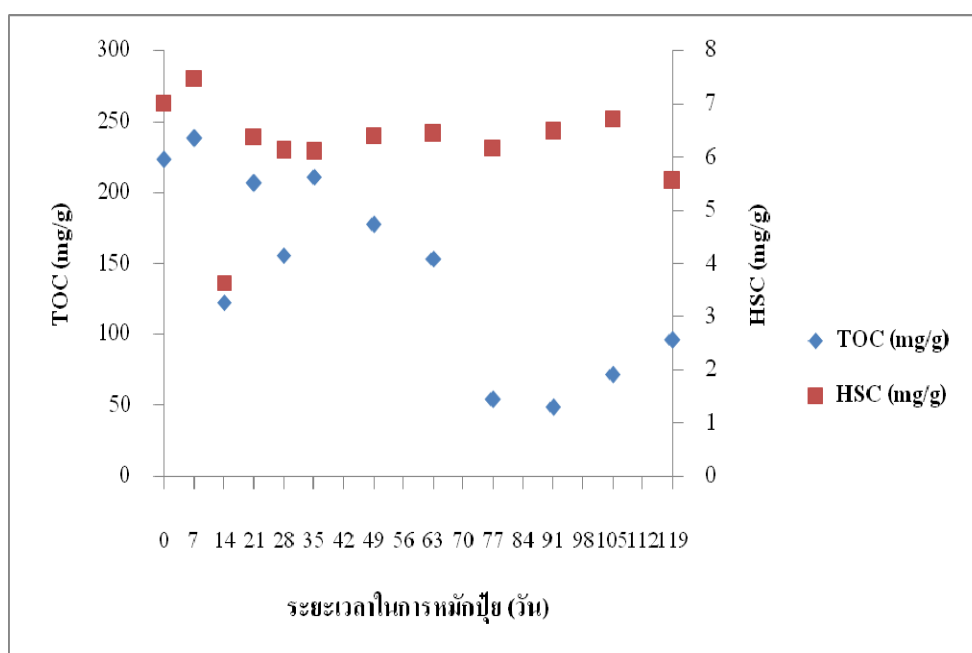
** มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed).

จากสูตรของค่า HI เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักกับปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก พบว่าปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.01$) แสดงถึงปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ที่อาจมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์ทั้งสองที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนของกรดฮิวมิกและคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของการหมักปุ๋ยโดยนำมาพลอตกราฟกับระยะเวลา ดังภาพที่ 29 จะพบว่าทั้งปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักส่วนใหญ่จะมีค่าสูงในช่วง 35 วันแรก ซึ่งในวันที่ 35 นี้จะอยู่ในระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (End of active phase) อินทรีย์วัตถุส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หมดจนไม่เหลือสภาพเดิมแล้ว และจะเกิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้นคือกรดฮิวมิกนั่นเอง (Veeken et al., 2000) หลังจากนั้นปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักจะเริ่มลดลง สาเหตุส่วนหนึ่งอาจมาจากการกระบวนการ mineralization ของโครงสร้างสารอินทรีย์อื่น ๆ (Sanchez-Monedero et al., 1999) ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของกรดฮิวมิกค่อนข้างคงที่ ซึ่งให้เห็นว่ากรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมาก คงทนต่อการย่อยสลาย



ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ในปุ๋ยหมักและปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักตามสูตรของค่า HR พบว่าปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.01$) เช่นเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของค่า HI และเมื่อนำปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมักและคาร์บอนของสารฮิวมิกมาพลอต กราฟกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย ดังภาพที่ 30 ก็จะพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับภาพที่ 29



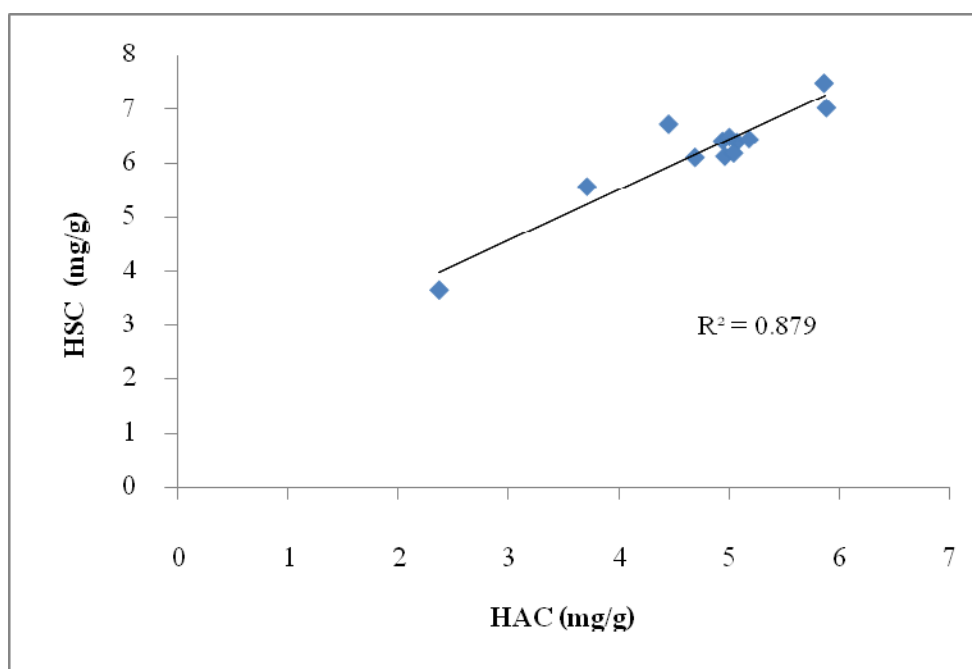
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ในปุ๋ยหมัก และ ปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกกับปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก พบว่าปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.938$) ดังภาพที่ 31 โดย ปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกกับปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกสามารถเขียนเป็นสมการ Linear regression ได้ดังนี้

$$\text{HSC} = 1.775 + 0.933 \text{ HAC} \quad R^2 = 0.879, n = 12 \quad [16]$$

โดย HSC = ปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก และ HAC = ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก

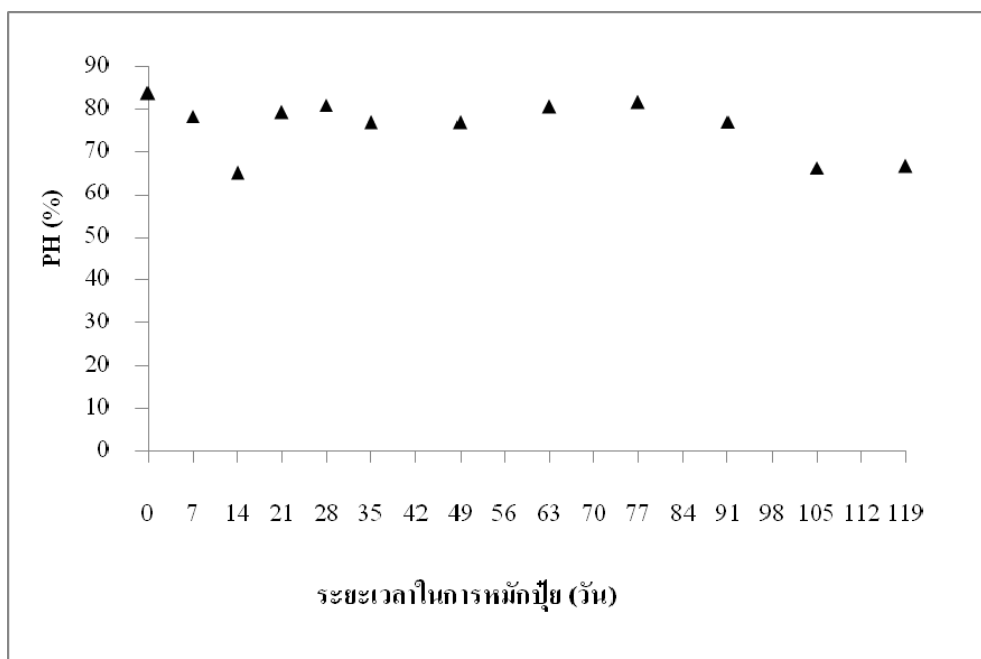
จากสมการ [16] ปริมาณกรดฮิวมิกสามารถทำนายปริมาณสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นในปุ๋ยหมักได้สูงถึง 87.9% บ่งชี้ได้ว่าสารฮิวมิกที่ได้ในระหว่างการหมักปุ๋ยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดฮิวมิกที่มีความเสถียรและเป็นตัวสำคัญในการบ่งชี้คุณภาพ รวมทั้งกำหนดอายุที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก ดังนั้นในการคาดการณ์ปริมาณสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักสามารถพิจารณาได้จากปริมาณกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นก็ได้



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก (HAC) กับปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก (HSC)

เมื่อพิจารณาค่า PH ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก ดังภาพ 32 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากตัวแปรคาร์บอนของกรดฮิวมิกและคาร์บอนของสารฮิวมิกค่อนข้างคงที่ในระหว่างการหมักปุ๋ย แสดงให้เห็นถึงระดับการเกิดกรดฮิวมิกที่ไม่ผันแปรมากนัก โดยเฉพาะในช่วงหลังจากวันที่ 35 ถึง 91 ที่ปุ๋ยหมักเจริญเต็มที่แล้ว

จากการพิจารณาค่า HI, HR และ PH ในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นจะเห็นได้ว่าระดับการเกิดกรดฮิวมิกจะเริ่มในระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาในวันที่ 35 และค่อนข้างเสถียร คงทนต่อการย่อยสลายตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย เห็นได้จากที่ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกและปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดลดลงจากการที่สารอินทรีย์ชนิดอื่นถูกย่อยสลาย นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกยังสามารถทำนายปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกได้ถึง 87.9% บ่งชี้ได้ว่าสารฮิวมิกที่ได้ในระหว่างการหมักปุ๋ยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดฮิวมิก ซึ่งการพิจารณาระดับการเกิดกรดฮิวมิกจากค่า HI HR และ PH ร่วมกับปริมาณและความสัมพันธ์ของตัวแปรนี้ ทำให้การอธิบายการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเป็นไปอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH) ในระหว่างการหมักปุ๋ย

3. ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับการเกิดกรดฮิวมิก

กระบวนการเกิดสารฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นอาจมีปัจจัยหลายประการที่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น pH ความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นในการหมักปุ๋ยแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านี้ไปพร้อม ๆ กับการติดตามการเกิดสารฮิวมิกด้วย (Iqbal et al., 2010)

ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับค่าดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิกโดยใช้ตัวแบบทางสถิติเช่นกัน ตัวแปรที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักนั้นจะเลือกใช้ดัชนีชี้วัดการเกิดกรดฮิวมิกที่สำคัญ 6 ดัชนี ได้แก่ อัตราส่วน O/C, H/C และ C/N ค่าดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH) ส่วนพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักที่ใช้ ได้แก่ ค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดดังนี้

3.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (PH)

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index; HI) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนคาร์บอนของสารฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of humic acid; PH) ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนคาร์บอนของกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนของสารฮิวมิก แสดงผลดังตารางที่ 15 จะพบว่าค่า pH ของปุ๋ยหมักมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า HI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.725$) นั่นหมายความว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นเมื่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นด้วย และค่าความชื้นของปุ๋ยหมักยังมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า HI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$; $r = -0.690$) แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นเมื่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นลดลง ผลที่ได้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และความชื้นของปุ๋ยหมักกับค่า HR โดยค่า pH ของปุ๋ยหมักมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า HR อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = 0.740$) และค่าความชื้นจะมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า HR อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.752$) ซึ่งค่า HR จะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ดังกล่าวมากกว่าค่า HI นั้นแสดงว่าค่า pH และความชื้นของปุ๋ยหมักได้รับอิทธิพลจากค่า HR มากกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสารฮิวมิก ($HSC = HAC + FAC$) มีอิทธิพลต่อค่า pH และความชื้นของปุ๋ยหมักมากกว่ากรดฮิวมิกเพียงอย่างเดียว นั่นอาจเป็นผลกระทบจากกรดฟัลลิกก็เป็นได้ ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ของปุ๋ยหมักนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า HI และ HR อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่า PH พบว่ามีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นกัน

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับดัชนี ร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio, HR) และร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (Percentage of humic acid, PH) (n = 12)

พารามิเตอร์	HI†	HR‡	PH
ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	0.561	0.570	-0.172
ความนำไฟฟ้า (EC)	-0.118	-0.111	-0.221
ไนโตรเจนทั้งหมด (N _t)	-0.273	-0.319	0.383
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (P _t)	0.219	0.240	-0.180
โพแทสเซียมทั้งหมด (K _t)	-0.224	-0.258	-0.221
pH	0.725**	0.740**	-0.112
ความชื้น	-0.690*	-0.752**	0.414
อุณหภูมิ	-0.487	-0.505	0.034
คาร์บอนทั้งหมด (TC)	NA	NA	0.384
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	NA	NA	-0.348
คาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมด (TIC)	NA	NA	0.424

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed).

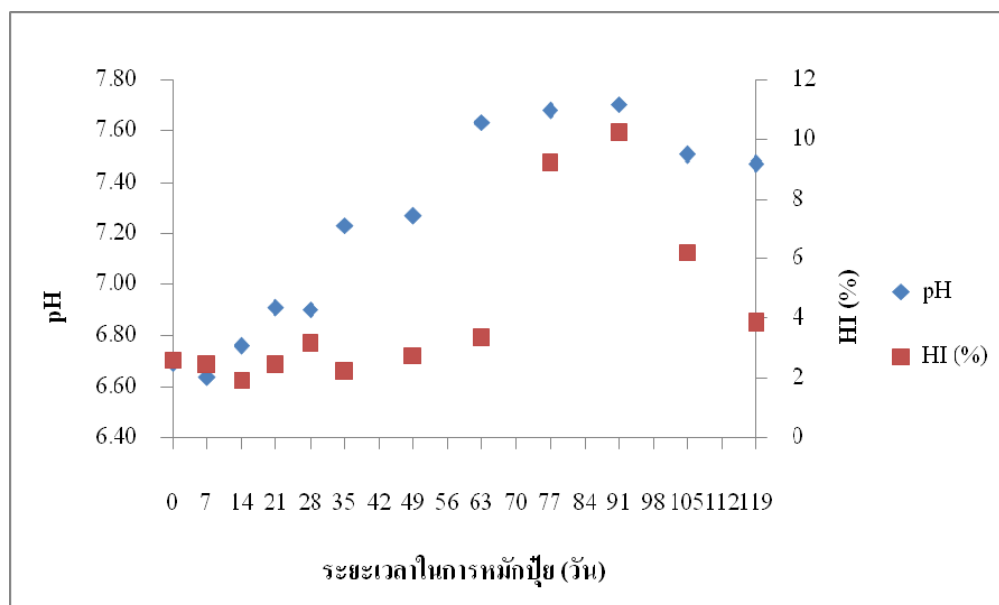
* มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ (2-tailed).

หมายเหตุ : † HI ได้พิจารณาความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดไปแล้วในภาพที่ 29

‡HR ได้พิจารณาความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดไปแล้วในภาพที่ 30

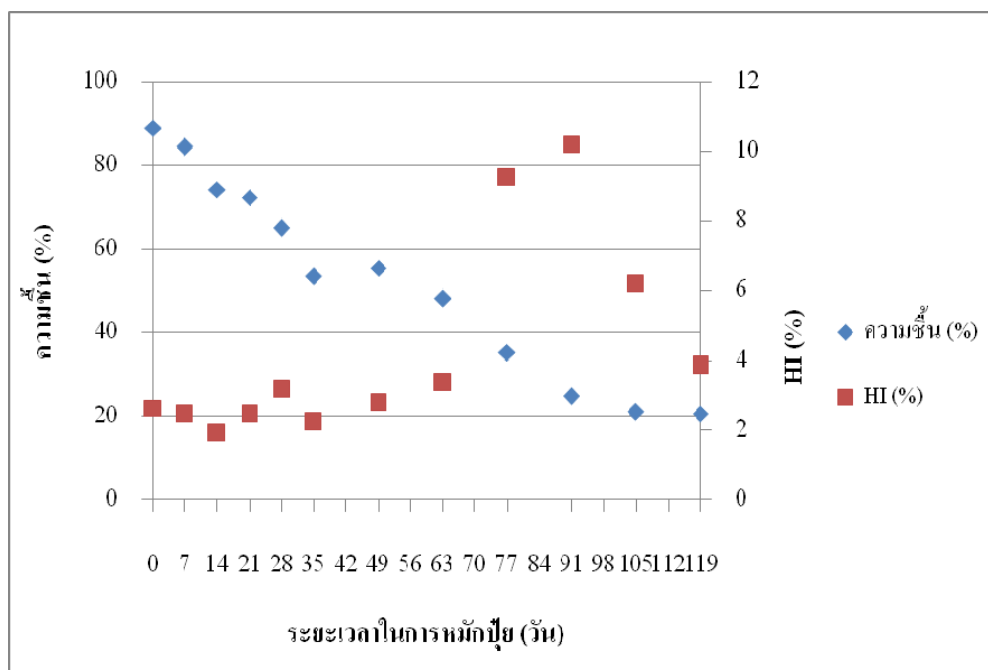
NA, not applicable

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมักและค่า HI มาพลอตกราฟกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ยก็จะเห็นได้ว่าในระหว่างการหมักปุ๋ย ค่า pH จะแปรผันไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า HI การที่ค่า pH ในปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นเป็นเพราะเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์แล้วจะปลดปล่อยสารประกอบแอมโมเนียออกมาเมื่อมีการย่อยโปรตีน จึงทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น (Iqbal et al., 2010; Ofosu-Budu et al., 2010) ในขณะเดียวกันเมื่อสารประกอบอินทรีย์ถูกย่อยสลายก็จะกลายเป็นกรดฮิวมิกเพิ่มไปพร้อม ๆ กัน จากนั้นค่า pH จะลดลงเมื่อสารประกอบแอมโมเนียเริ่มหมดไป ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

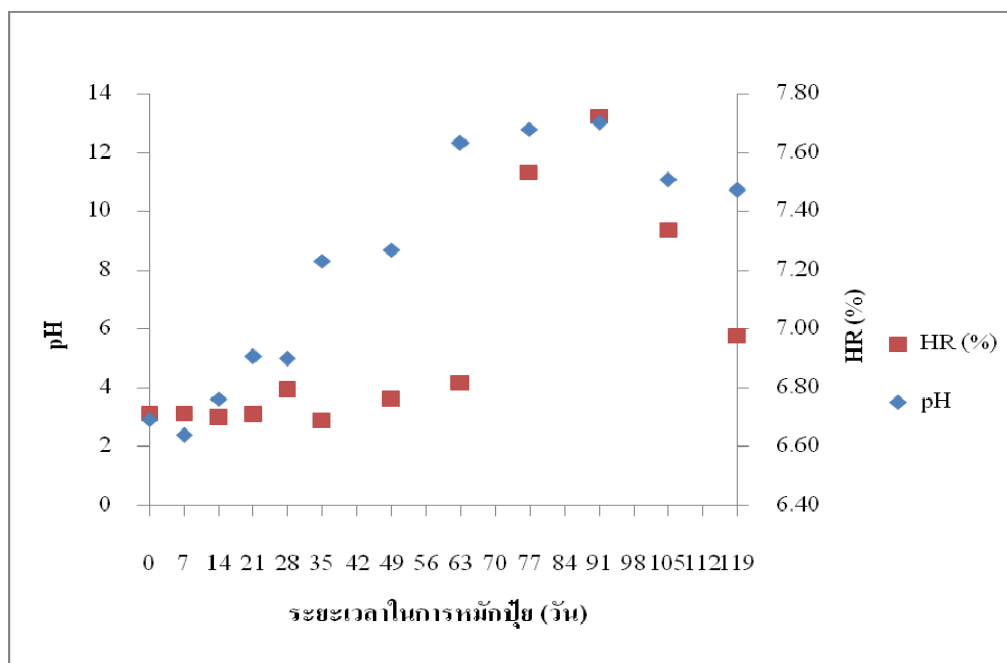
นอกจากนี้เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของปุ๋ยหมักและค่า HI มาพลอตกราฟกับระยะเวลาในการหมักปุ๋ยก็จะเห็นได้ว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยค่า HI จะแปรผกผันกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของปุ๋ยหมัก นั่นหมายความว่าเมื่อเกิดกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นลดลง โดยทั่วไปเมื่อความชื้นลดลงจะบ่งชี้ได้ว่ากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ได้เสร็จสิ้นลงแล้ว โดยจะเข้าสู่ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา และกรดฮิวมิกจะเริ่มเกิดมากขึ้นในระยะนี้ ดังภาพที่ 34



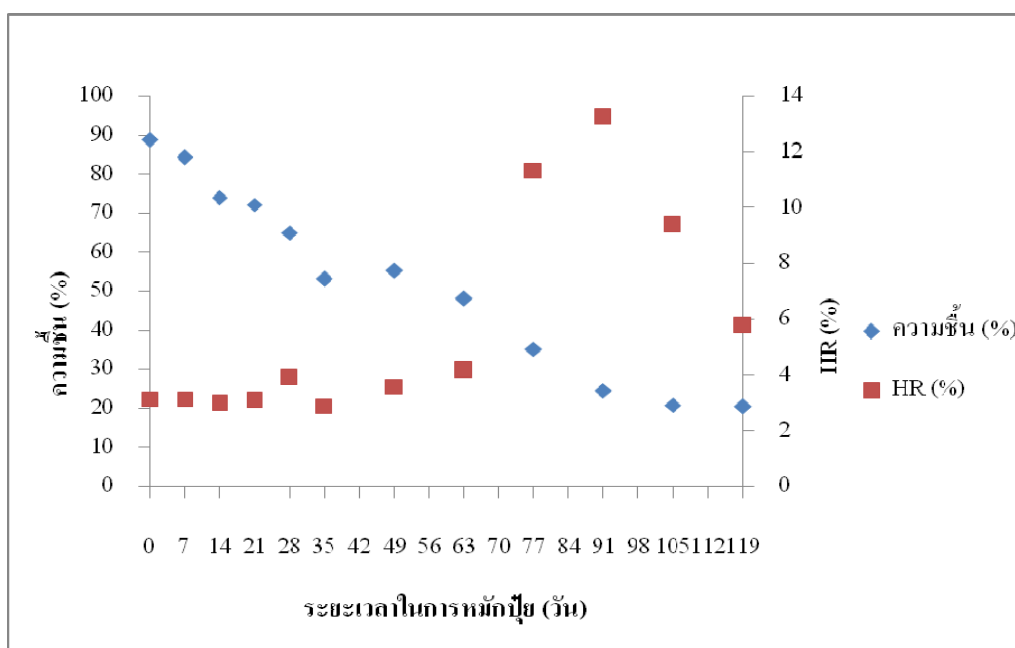
ภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (HI) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมักและค่า HR กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของปุ๋ยหมักและค่า HR กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย ดังภาพที่ 35 และ 36 พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับค่า HI ที่พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนของกรดฮิวมิกข้างต้น แต่ HR จะเป็นการพิจารณาปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิก โดยจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่า pH และความชื้นของปุ๋ยหมักมากกว่าการเกิดกรดฮิวมิก ซึ่งอาจเป็นผลกระทบที่เกิดกับสารฮิวมิกชนิดอื่นก็ได้ เนื่องจากการที่ค่า pH เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นกรด เช่น หมู่คาร์บอกซิลิกและฟีนอลิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบทั่วไปในสารฮิวมิก (Bustamante et al., 2008)

จากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับค่า HI HR และ PH ที่เป็นดัชนีของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก สามารถสรุปได้ว่าค่า pH และปริมาณความชื้นสามารถใช้อธิบายความเป็นไปของดัชนีเหล่านี้ได้ จากความสัมพันธ์นี้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์การเกิดกรดฮิวมิกในการหมักปุ๋ยครั้งต่อไปได้ โดยถ้าปุ๋ยหมักมีค่า pH เพิ่มขึ้น หรือมีปริมาณความชื้นลดลง บ่งชี้ได้ว่าเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักและปุ๋ยหมักนั้นจะมีคุณภาพต่อการนำไปใช้มากขึ้น



ภาพที่ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดสารชีวมิค (HR) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย



ภาพที่ 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของปุ๋ยหมัก และดัชนีร้อยละการเกิดสารชีวมิค (HR) กับระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

3.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับดัชนีของกระบวนการเกิดกรดฮิวมิก ได้แก่ O/C H/C และ C/N ดังตารางที่ 16 พบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วน O/C พบว่าอัตราส่วน O/C มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (total potassium, K_t) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$; $r = 0.602$) นั้นแสดงว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยเมื่อปริมาณอัตราส่วน O/C ของกรดฮิวมิกจะทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย โดยถ้าอัตราส่วนนี้เพิ่มขึ้นจะบ่งชี้ได้ว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุออกซิเจนเพิ่มขึ้น เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก-คีโตนิก ($C=O$) และหมู่ฟีนอลิก-แอลกอฮอล์ (OH) เป็นต้น (Huang et al., 2006) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เมื่อแตกตัวจะสามารถดูดซับธาตุโพแทสเซียมไว้ ทำให้ปริมาณธาตุโพแทสเซียมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ นัทธีราและคณะ (2553) ที่พบว่าดินที่มีธาตุโพแทสเซียมสูงจะเป็นดินในจังหวัดสมุทรสงครามที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์มาก จากการทดสอบทางสถิติโดยใช้ simple regression เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สามารถทำนายการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก โดยใช้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเป็นตัวแปรตาม และมีตัวแปรอิสระคืออัตราส่วน O/C จะได้สมการดังนี้

$$K_t = 294.519 + 138.874 \text{ O/C} \quad R^2 = 0.363, n = 12 \quad [17]$$

โดย K_t = ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด และ O/C = อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน

จากสมการ [17] จะเห็นได้ว่าจากอัตราส่วน O/C สามารถทำนายปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดได้ 36.3% โดยปริมาณโพแทสเซียมอาจเพิ่มขึ้นจากการดูดซับกับหมู่ฟังก์ชันของกรดฮิวมิกที่แตกตัวออกมา ดังนั้นการคาดการณ์เบื้องต้นของการเกิดและการเปลี่ยนแปลงกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักสามารถดูจากปริมาณของโพแทสเซียมทั้งหมดได้ ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์กรดฮิวมิกโดยตรงได้

ตารางที่ 16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (n = 12)

พารามิเตอร์	O/C	H/C	C/N
ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	0.012	0.216	0.174
ความนำไฟฟ้า (EC)	0.352	-0.676*	-0.923**
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (P _t)	0.180	-0.665*	-0.484
โพแทสเซียมทั้งหมด (K _t)	0.602*	0.256	0.055
pH	-0.137	-0.723**	-0.410
ความชื้น	-0.025	0.575	0.492
อุณหภูมิ	0.224	0.050	-0.277
คาร์บอนทั้งหมด (TC)	-0.446	0.602*	0.567
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	-0.299	0.490	0.414
คาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมด (TIC)	-0.019	-0.162	-0.048

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed).

* มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ (2-tailed).

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วน H/C พบว่าเกิดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เกิดขึ้นหลายคู่ด้วยกัน ดังนี้

- อัตราส่วน H/C มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความนำไฟฟ้า (electric conductivity, EC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$; -0.676) เมื่อเริ่มหมักปุ๋ยนั้นค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าสูงเนื่องจากวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการหมักปุ๋ยจะมีแร่ธาตุรวมอยู่ด้วย โดยเฉพาะโคโลไมท์ ที่เป็นธาตุอาหารรอง ประกอบไปด้วย แคลเซียมและแมกนีเซียม แต่เมื่อหมักปุ๋ยนานไปแร่ธาตุเหล่านี้จะถูกชะไปกับน้ำชะปุ๋ยหมัก หรือเกิดเป็นสารประกอบอื่นที่ละลายได้ยากขึ้น จึงไม่ค่อยมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้านัก แต่ค่าความนำไฟฟ้าที่สูงนั้นจะมาจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เสถียรขึ้น นั่นคือกรดฮิวมิก โดยกรดฮิวมิกจะมีหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างที่มีการแตกตัวและมีการแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนอื่น จึงทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น

- อัตราส่วน H/C มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus, P) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$; $r = -0.665$) โดยอัตราส่วน H/C ที่ลดลง แสดงว่าเกิดกรดฮิวมิกมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก และฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบ เมื่อแตกตัวจะสามารถดูดซับธาตุฟอสฟอรัสไว้ได้ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Iqbal et al. (2010) ที่พบว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้น ฟอสฟอรัสจะยึดจับกับสารอินทรีย์ด้วยพันธะที่แข็งแรง ทำให้ละลายได้ยากขึ้น และที่ pH สูง ฟอสฟอรัสจะเข้ารวมกับแคลเซียมและแมกนีเซียมเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต และแมกนีเซียมฟอสเฟต ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ปุ๋ยหมักเพื่อช่วยตรึงธาตุฟอสฟอรัสไว้ให้พืชได้นำไปใช้ในระยะยาว

- อัตราส่วน H/C มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า pH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.723$) ซึ่งเมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักจะทำให้เกิดแก๊สแอมโมเนีย ส่งผลให้ค่า pH สูงขึ้น และสารอินทรีย์เหล่านี้ก็จะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนขึ้นเนื่องจากคาร์บอนอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราส่วน H/C ที่ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือทำให้เกิดกรดฮิวมิกมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของปุ๋ยหมักกับค่า HI และ HR ที่พบว่าเพิ่มขึ้นถ้าค่า pH ของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นในหัวข้อ 3.1

- อัตราส่วน H/C มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (total carbon, TC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$; $r = 0.602$) ในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นคาร์บอนทั้งหมดจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์ที่เสถียรขึ้น ซึ่งก็คือกรดฮิวมิกนั่นเอง ดังนั้นคาร์บอนจึงอยู่ในรูปคาร์บอนของกรดฮิวมิก ทำให้คาร์บอนทั้งหมดลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราส่วน H/C ที่ลดลง เช่นเดียวกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนทั้งหมดกับค่า HI และ HR ของ Iqbal et al. (2010) ที่พบว่ามีความสัมพันธ์กันเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.950$ และ -0.970 ตามลำดับ)

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วน H/C ไปวิเคราะห์ simple regression เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของการเกิดกรดฮิวมิกที่มีต่อพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยมีค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าเป็นตัวแปรตาม และมีตัวแปรอิสระคืออัตราส่วน H/C จะได้สมการดังนี้

$$\text{pH} = 10.301 - 24.978 \text{ H/C} \quad R^2 = 0.552, n = 12 \quad [18]$$

$$\text{EC} = 9.173 - 39.095 \text{ H/C} \quad R^2 = 0.457, n = 12 \quad [19]$$

โดย EC = ค่าความนำไฟฟ้า และ H/C = อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน

จากสมการ [18] จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน H/C สามารถอธิบายค่า pH ในปุ๋ยหมักได้ 55.2% โดยอัตราส่วน H/C จะแปรผกผันกับค่า pH บ่งชี้ได้ว่าถ้าเกิดกรดฮิวมิกมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนนี้ลดลง และค่า pH จะเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่า HI และ HR กับค่า pH ในหัวข้อ 3.1 ซึ่งเป็นข้อสรุปได้ว่าสามารถทำนายการเกิดฮิวมิกจากค่า pH ได้ในระดับหนึ่ง

จากสมการ [19] จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน H/C สามารถอธิบายค่าความนำไฟฟ้าในปุ๋ยหมักได้ 45.7% โดยอัตราส่วน H/C จะแปรผกผันกับค่าความนำไฟฟ้า การที่ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารประกอบลิกโน-เซลลูโลสให้กลายเป็นกรดฮิวมิกจากปฏิกิริยา polymerization (Brunetti et al., 2007) และจากสมการ [19] สามารถนำไปใช้ทำนายการเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยได้โดยพิจารณาค่าความนำไฟฟ้า โดยถ้าค่านี้เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดฮิวมิกเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ นั้นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน H/C อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วน C/N พบว่าเกิดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เกิดขึ้น 2 คู่ด้วยกัน ดังนี้

- ค่าความนำไฟฟ้า (electric Conductivity, EC) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราส่วน C/N อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$; $r = -0.923$) การที่ค่าความนำไฟฟ้าในปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นอาจมาจากเมื่อมีการหมักปุ๋ยไปเรื่อย ๆ ทำให้เกิดโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่ซับซ้อนขึ้น โครงสร้างเหล่านี้ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนประจุอยู่ตลอด จึงส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับอัตราส่วน H/C ในหัวข้อ 3.2.2

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักกับอัตราส่วน C/N ไปวิเคราะห์ simple regression เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายการเกิดกรดฮิวมิกจากการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้า โดยใช้ค่าความนำไฟฟ้าเป็นตัวแปรตาม และมีตัวแปรอิสระคืออัตราส่วน C/N จะได้สมการดังนี้

$$EC = 7.089 - 0.338 \text{ C/N} \quad R^2 = 0.852, n = 12 \quad [20]$$

โดย EC = ค่าความนำไฟฟ้า และ C/N = อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

จากสมการ [20] จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน C/N สามารถทำนายค่าความนำไฟฟ้าในปุ๋ยหมักได้สูงถึง 85.2% โดยค่าความนำไฟฟ้าจะแปรผกผันกับอัตราส่วน C/N ซึ่งถ้าเกิดกรดฮิวมิกมากจะทำให้อัตราส่วน C/N ลดลง ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น เหตุการณ์นี้จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน H/C กับค่าความนำไฟฟ้า ในหัวข้อ 3.2.2 แต่อัตราส่วน C/N จะสามารถทำนายค่าความนำไฟฟ้าได้มากกว่าอัตราส่วน H/C จากสมการ [20] สามารถนำไปใช้ทำนายการเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยจากค่าความนำไฟฟ้าได้ในเบื้องต้นให้แก่เกษตรกรเพื่อประหยัดเวลาและทุนทรัพย์ในการวิเคราะห์ ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ นั้นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน C/N อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จะเห็นได้ว่าการเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นจะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์พื้นฐานต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักหลายพารามิเตอร์ด้วยกัน ซึ่งในการพิจารณาการเกิดกรดฮิวมิกในการหมักปุ๋ยครั้งต่อไปของเกษตรกร สามารถใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ทำนายการเกิดกรดฮิวมิกได้ อีกทั้งอาจใช้เป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เหล่านี้ให้เอื้อต่อการเกิดกรดฮิวมิกได้อีกด้วย ซึ่งจะเป็นการประหยัดทุนทรัพย์และเวลาในการวิเคราะห์จากปริมาณกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นโดยตรง แต่การวิเคราะห์ปริมาณกรดฮิวมิกโดยตรงก็จะทำให้ทราบความเป็นไปที่ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะการพิจารณาจากดัชนีของกระบวนการเกิดกรดฮิวมิก จากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางให้เกษตรกรได้ผลิตปุ๋ยหมักคุณภาพดีในระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะมีกรดฮิวมิกที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดินและการนำไปใช้ของพืชอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกร ส่งผลให้มีรายได้เพิ่มขึ้นตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปุ๋ยหมักที่ทำการหมักเป็นเวลา 4 เดือน โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 0, 7, 14, 21, 28, 35, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 รวมทั้ง 12 ตัวอย่าง เพื่อติดตามคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของปุ๋ยหมักตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ระยะ คือ ระยะเริ่มผสม (0 วัน) วัดอุณหภูมิได้ 27.0 องศาเซลเซียส ระยะอุณหภูมิสูง (1-34 วัน) วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 34.0-39.0 องศาเซลเซียส ระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (35-48 วัน) วัดอุณหภูมิได้ 30.0 องศาเซลเซียส และระยะที่อุณหภูมิคงที่ (49 วันเป็นต้นไป) วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 27.7-28.3 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามระยะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะพบว่าปุ๋ยหมักที่เริ่มจะมีความพร้อมต่อการนำไปใช้ประโยชน์จะเป็นปุ๋ยหมักที่มีอายุได้ตั้งแต่ 35 วัน เป็นต้นไป เนื่องจากลักษณะของเนื้อปุ๋ยนั้นจะไม่คงเหลือสภาพของสารอินทรีย์วัตถุเดิมแล้วเนื่องจากถูกย่อยสลายจนหมด เนื้อปุ๋ยจะแห้งคล้ายดิน ความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 48.21 และวิเคราะห์อัตราส่วน C/N พบว่ามีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ 14.4 และยังพบว่าปุ๋ยหมักที่มีอายุได้ 35 และ 49 วัน ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 เพื่อการจำหน่าย อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของปุ๋ยหมักในระหว่างนี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ฉะนั้นหากประสงค์จะนำปุ๋ยหมักนี้เพื่อการจำหน่ายจะต้องมีการควบคุมความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดด้วย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก พบว่าการเกิดกรดฮิวมิกที่พิจารณาจากเปลี่ยนแปลงธาตุองค์ประกอบนั้นยังไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ก่อนข้างคงที่ แต่มีแนวโน้มว่าจะลดลงตั้งแต่วันที่ 91 เป็นต้นไป การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบนี้จะไม่สามารถบ่งชี้รูปแบบโครงสร้างของกรดฮิวมิกได้ ทำให้มองเห็นบทบาทที่ออกมาไม่ชัดเจน จึงต้องมีการพิจารณาจากอัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบดังกล่าวร่วมด้วย โดยพบว่าอัตราส่วน O/C จะมีค่าลดลงในวันที่ 21 บ่งชี้ได้ว่าเกิดโครงสร้างอะโรมาติกมากขึ้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เป็นโครงสร้างหลักเพิ่มขึ้น หรือเกิดกรดฮิวมิกในวันนี้ นั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วน H/C กลับพบว่าค่านี้จะลดลงในวันที่ 63 แสดงว่าเกิดโครงสร้างอะโรมาติกมากในวันนี้ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วน C/N เพื่อดูการเกิดกรดฮิวมิกจากการรวมตัวของลิกนินกับเอมีน นั่นคือถ้าค่านี้ลดลงแสดงว่าเกิดกรดฮิวมิกมากขึ้น จึงพบว่าผลที่ได้สอดคล้อง

กับอัตราส่วน O/C นั่นคือเกิดกรดฮิวมิกมากในวันที่ 21 จะเห็นได้ว่าการใช้อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในการบ่งชี้รูปแบบโครงสร้างจะสามารถทำให้ทราบแนวโน้มการเกิดกรดฮิวมิกและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังไม่ชัดเจนนักเพราะยังมีบางอัตราส่วนที่ขัดแย้งกันอยู่ เนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมหลายประการที่มีผลต่อการเกิดกรดฮิวมิกในระหว่างการหมักปุ๋ย เช่น วัตถุดิบที่ใช้ ระยะเวลาในการหมัก วิธีการหมัก การดูแลในระหว่างการหมัก ความชื้น เป็นต้น

การพิจารณาหมู่ฟังก์ชันจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยอธิบายการเกิดกรดฮิวมิกและกรดฮิวมิกจะมีหมู่ฟีนอลิกในโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ ซึ่งพบว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นจะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่ฟีนอลิกเป็นส่วนมาก เนื่องจากผลค่าความเป็นกรดส่วนใหญ่มาจากหมู่ฟีนอลิก และมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\text{total acidity} = 1.366 + 1.036 \text{ phenolic-OH}$, $R^2 = 0.962$) แสดงว่าเกิดกรดฮิวมิกขึ้นระหว่างการหมักปุ๋ย ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิก ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($C = 81.148 - 0.826 O$, $R^2 = 0.995$) นอกจากนี้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสเบิล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันจากวิธีนี้จะบ่งชี้ได้ว่ากรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 35 วันแรก แต่ในวันที่ 119 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการหมักปุ๋ย กลับพบว่ากรดฮิวมิกลดลงเนื่องจากการดูดกลืนคลื่นแสงลดลง อาจเป็นเพราะว่าเมื่อหมักปุ๋ยนานเกินไปอาจจะทำให้มีการย่อยสลายกรดฮิวมิกเกิดเป็นแร่ธาตุขนาดเล็กมากขึ้น (Prudent et al., 1995) หรือเป็นเพราะอินทรีย์วัตถุที่เป็นสารตั้งต้นของกรดฮิวมิกนั้นถูกย่อยสลายจนหมดแล้ว

เมื่อศึกษาอิทธิพลและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เป็นดัชนีสำคัญในการบ่งชี้ระดับการเกิดกรดฮิวมิก ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน O/C H/C และ C/N โดยพบว่าอัตราส่วน H/C สัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราส่วน C/N อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($C/N = -6.497 + 118.330 H/C$, $R^2 = 0.561$) หมายความว่าในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นค่าของอัตราส่วนทั้งสองจะเป็นไปในทางเดียวกัน นั่นคือเมื่ออัตราส่วน H/C ลดลง อัตราส่วน C/N ก็จะลดลงด้วย โดยอัตราส่วน H/C ที่ลดลงจะบ่งชี้ถึงการรวมตัวหรือการแทนที่ของวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างกรดฮิวมิก ส่วนอัตราส่วน C/N ที่ลดลงหมายความว่าเกิดกรดฮิวมิกที่มาจากการรวมตัวกันของลิกนินกับเอมีน และอีก 3 ดัชนี ที่เป็นดัชนีสำคัญคือ ร้อยละการเกิดกรดฮิวมิก (humification index, HI) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของคาร์บอนในกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก ร้อยละการเกิดสารฮิวมิก (กรดฮิวมิก+กรดฟัลวิก) (humification ratio, HR) หาได้จากอัตราส่วนของคาร์บอนในสารฮิวมิกต่อคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในปุ๋ยหมัก และดัชนีตัวสุดท้ายคือร้อยละของกรดฮิวมิกต่อสารฮิวมิก (percentage of humic acid, PH) หาได้จากอัตราส่วนของคาร์บอนในกรดฮิวมิกต่อคาร์บอนในสารฮิวมิก และผลที่ได้

พบว่าค่า HI, HR และ PH ในระหว่างการหมักปุ๋ยนั้นจะเห็นได้ว่าระดับการเกิดกรดฮิวมิกจะเริ่มในระยะสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาในวันที่ 35 และค่อนข้างเสถียร คงทนต่อการย่อยสลายตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ย เห็นได้จากที่ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกและปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดลดลงจากการที่สารอินทรีย์ชนิดอื่นถูกย่อยสลาย นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนของกรดฮิวมิกยังสามารถทำนายปริมาณคาร์บอนของสารฮิวมิกได้ถึง 87.9% บ่งชี้ได้ว่าสารฮิวมิกที่ได้ในระหว่างการหมักปุ๋ยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดฮิวมิก ซึ่งการพิจารณาระดับการเกิดกรดฮิวมิกจากค่า HI HR และ PH ร่วมกับปริมาณและความสัมพันธ์ของตัวแปรนี้ ทำให้การอธิบายการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเป็นไปอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

ในการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักครั้งนี้มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ภายในปุ๋ยหมักคือค่า pH และความชื้น เนื่องจากค่า pH มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า HI และ HR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$, $r = 0.725$, 0.740 ตามลำดับ) และปริมาณความชื้นมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า HI และ HR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$, -0.690 ; $p < 0.01$, $r = -0.752$ ตามลำดับ) นั่นแสดงว่าค่า pH จะแปรผันตามการเกิดกรดฮิวมิกและสารฮิวมิกในปุ๋ยหมัก การที่ค่า pH ในปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นเป็นเพราะเกิดกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์แล้วจะปลดปล่อยสารประกอบแอมโมเนียออกมาเมื่อมีการย่อยโปรตีน จึงทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น (Iqbal et al., 2010; Ofosu-Budu et al., 2010) ในขณะเดียวกันเมื่อสารประกอบอินทรีย์ถูกย่อยสลายก็จะกลายเป็นกรดฮิวมิกด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วน O/C H/C และ C/N พบว่าปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดจะแปรผันตามอัตราส่วน O/C ($K_t = 294.519 + 138.874 \text{ O/C}$, $R^2 = 0.363$) นั่นเป็นเพราะกรดฮิวมิกมีหมู่คาร์บอกซิลิก-คีโตนิก (C=O) และหมู่ฟีนอลิก-แอลกอฮอล์ (OH) ที่ยึดจับกับธาตุโพแทสเซียมได้ ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าจะแปรผกผันกับอัตราส่วน H/C ($\text{pH} = 10.301 - 24.978 \text{ H/C}$, $R^2 = 0.552$ และ $\text{EC} = 9.173 - 39.095 \text{ H/C}$, $R^2 = 0.457$ ตามลำดับ) การเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของกรดฮิวมิกส่งผลให้ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้นได้ และค่าความนำไฟฟ้ายังแปรผกผันกับอัตราส่วน C/N ($\text{EC} = 7.089 - 0.338 \text{ C/N}$, $R^2 = 0.852$) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วน H/C ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเกิดกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักด้วยกระบวนการที่เรียกว่า humification processes จะมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์อื่น ๆ หลายพารามิเตอร์ ในการหมักปุ๋ยครั้งต่อไปจึงสามารถใช้พารามิเตอร์พื้นฐานเหล่านี้ทำนายการเกิดกรดฮิวมิกได้ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการปรับปรุงปัจจัยเหล่านี้ให้เอื้อต่อการเกิดกรดฮิวมิก เพื่อให้ได้มาซึ่งปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพที่พร้อมจะปรับปรุงคุณภาพดินและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ของพืช อีกทั้งใช้ระยะเวลาในการหมักไม่ยาวนานนัก เพื่อส่งเสริมผลผลิตให้เพิ่มขึ้น ดินคุณภาพดี และเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้ด้วย

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. วาระแห่งชาติเกษตรอินทรีย์. แหล่งที่มา: http://www.ddd.go.th/link_fertilizer/home.htm. 25 มีนาคม 2553
- _____. 2552. ปุ๋ยหมักคืออะไร. แหล่งที่มา: http://www.ddd.go.th/link_fertilizer/home.htm. 27 มกราคม 2553
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการขอรับรองการผลิตปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐาน พ.ศ. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2548/00172708.PDF>. 2 มกราคม 2553
- เกษตรแผ่นดินทอง. 2553. วิธีทำปุ๋ยหมักพืชสดสีเขียว. แหล่งที่มา: <http://www.rakbankerd.com/agriculture/open.php?id=782&s=tblrice>. 21 กุมภาพันธ์ 2553
- ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. 2552. การทำปุ๋ยหมัก (Composting). ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/38803>. 12 มกราคม 2553
- ทิพวรรณ สิทธิรังสรรค์. 2542. ปุ๋ยหมัก ดินหมัก และปุ๋ยน้ำชีวภาพ : เพื่อการปรับปรุงดินโดยวิธีเกษตรธรรมชาติ. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- _____. 2544. เกษตรธรรมชาติ : ที่ศูนย์ฝึกและพัฒนาอาชีพเกษตรกร กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. กรุงเทพฯ : ส.วีรัชการพิมพ์.
- ธงชัย มาลา. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ : เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัทธีรา สรรพณี. 2541. เคมี่สิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- _____, กนกพร สว่างแจ้ง, มยุรา อารีกิจเสรี และ กมลชนก พานิชการ. 2551. สารอินทรีย์กับคุณภาพดินเกษตร. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- _____, กนกพร สว่างแจ้ง, มยุรา อารีกิจเสรี และ กมลชนก พานิชการ. 2553. รายงานวิจัยเรื่องบทบาทของกรดฮิวมิกและกรดฟัลลิกในดินของพื้นที่เกษตรกรรมต่อการดูดซับจุลธาตุอาหารในดินและโลหะที่เป็นพิษ: กรณีศึกษาภูมิภาคตะวันตกของประเทศไทย. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2548. ปุ๋ยอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 4-5. กรุงเทพฯ : บ้านและสวน.
- ราชนนท์ วิสุทธิแพทย์. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพ ทางเลือกใหม่เพื่อการเกษตร. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

- โรงเรียนบ้านชีวาเดอ. 2552. กิจกรรมในชีวิตประจำวันของเด็กและการรักษาสภาพแวดล้อม.
แหล่งที่มา: http://ziwarder.blogspot.com/2008/09/blog-post_07.html. 7 เมษายน 2553
- ราไพ สิริมนกุล. 2543. **เคมีอินทรีย์เบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- วิฑูรย์ ปัญญากุล. 2546. **การตลาดเกษตรอินทรีย์**. กรุงเทพฯ : มูลนิธิสายใยแผ่นดิน.
- สุพจน์ ชัยวิมล. 2544. **เทคโนโลยีด้านดินปุ๋ย และเครื่องจักรกลการเกษตร เนื่องในโอกาสครบรอบ 10 ปี สถาบันพัฒนาและส่งเสริมปัจจัยการผลิต**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมการเกษตร สถาบันพัฒนาและส่งเสริมปัจจัยการผลิต.
- อดุลย์ สิทธิวงศ์. 2546. **ผลของปุ๋ยเคมีและหินฟอสเฟตต่อการเติบโตผลผลิตและคุณภาพของข้าวพันธุ์ กข10**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อานัฐ ตันโช. 2549. **เกษตรธรรมชาติประยุกต์ : หลักการ แนวคิด เทคนิคปฏิบัติในประเทศไทย**. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- 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.
- Belzile, N., H.A. Joly and H. Li. 1997. Characterization of humic substances extracted from Canadian lake sediment. **Can. J. Chem** 75 : 14-27.
- Benito, M., A. Masaguer and A. Moliner. 2003. Chemical and microbiological parameters for the characterization of the stability and maturity of pruning waste compost. **Biol Fertil Soils** 37 : 184-189.
- Bernal, M.P., C. Paredes, M.A. Sanchez-Monedero and J. Cegarra. 1997. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. **Bioresource technology** 63 : 91-99.
- Bernal, M.P., J.A. Alburquerque and R. Moral. 2008. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource technology** 11.
- Brunetti, G., N. Senesi and C. Plaza. 2007. Effect of amendment with treated and untreated olive oil mill wastewaters on soil properties, soil humic substances and wheat yield. **Geoderma** 138 : 144-152.

- Bueno, P., R. Yanez, A. Rivera and M.J. Diaz. 2009. Modelling of parameters for optimization of maturity in composting trimming residues. **Bioresource Technology** 100 : 5859–5864.
- Bustamante M.A., C. Paredes, F.C. Marhuenda-Egea, A. Prez-Espinosa, M.P. Bernal, R. Moral. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. **Chemosphere** 72 : 551–557.
- Cavani, L., C. Ciavatta and C. Gessa. 2003. Identification of organic matter from peat, leonardite and lignite fertilizers using humification parameters and electrofocusing. **Bioresource Technology** 86 : 45-52.
- Chai, X., S. Takayuki, X. Cao, Q. Guo and Y. Zhao. 2007. Spectroscopic studies of the progress of humification processes in humic substances extracted from refuse in a landfill. **Chemosphere** 69 : 1446-1453.
- Cooperbrand, L. 2002. Art and Science of Composting. **Ministry of Agriculture and Food Factsheet, Univ. of Wisconsin**. Ontario.
- Cornell Waste Management Institute. 2007. HOME COMPOSTING. Available Source: <http://cwmi.css.cornell.edu/compostbrochure.pdf>, September 3, 2009.
- Dias, B.O., C.A. Silva, F.S. Higashikawa, A. Roig and M.A. Sanchez-Monedero. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. **Bioresource Technology** 101 :1239–1246.
- 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.
- Fukushima, M., K. Yamamoto, K. Ootsuka, T. Komai, T. Aramaki, S. Ueda and S. Horiya. 2009. Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids. **Bioresource Technolog** 100 : 791–797.
- Hays, Michael H.B. and C.E. Clapp. 2001. Humic substances: Consideration of composition, aspect of structure, and environmental influences. **Soil Science** 166(11) :723-737.
- Hernandez-Apaolaza, L., J.M. Gasco and F. Guerrero. 2000. Initial organic matter transformation of soil amended with composted sewage sludge. **Biol Fertil Soils** 32 : 421-426.

- Huang, G.F., Q.T. Wu, J.W.C. Wong, and B.B. Nagar. 2006. Transformation organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. **Bioresource Technology** 97:1834-1842.
- Iqbal, M.K., T. Shafiq, A. Hussain and K. Ahmed. 2010. Effect of enrichment on chemical properties of MSW compost. **Bioresource Technology**.
- International humic substances society. 2007. What are Humic Substance? Available Source: <http://ihss.gatech.edu/ihss2/>, April 8, 2010.
- Jouraiphy, A., S. Amir, M. E. Gharous, J. Revel and M. Hafidi. 2005. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. **International Biodeterioration & Biodegradation** 56 : 101–108.
- Lasaridi, K.A. and E.I. Stentiford. 1998. A simple respirometric technique for assessing compost stability. **Water Research** 32 : 3717.
- MacCarthy, P. 2001. The principles of humic substances. **Soil Science** 166(11) : 738-751.
- Martin, H. 2005. Agricultural Composting Basics. Original Factsheet. **Ministry of Agriculture Food & Rural Affairs**. Ontario.
- 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 mucilage samples and the insoluble fraction of marine humic substances. **Chemosphere** 44 : 709-720.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Chapter 34 total carbon, organic carbon, and organic matter, pp. 961-1010. *In* D.L. Spark, J.M. Bartels and J.M. Bingham, eds. **Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods**. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Nelson, V. 2004. Composting Benefits and Disadvantages. Focus on compost. Agtech Centre. Available Source: [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/eng4464/\\$file/comp_benefits.pdf?OpenElement](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/eng4464/$file/comp_benefits.pdf?OpenElement), March 5, 2010.
- Ofosu-Budua G.K., J.N. Hogarh, J.N. Fobil, A. Quaye, S.K.A. Danso and D. Carboo. 2010. Harmonizing procedures for the evaluation of compost maturity in two compost types in Ghana. **Resources, Conservation and Recycling** 54 : 205–209.

- PII BANTEN. 2010. การทำปุ๋ยหมัก Super. Available Source: [http://piibanten.org/2010/01 / pembuatan-kompos-super/](http://piibanten.org/2010/01/pembuatan-kompos-super/), March 13, 2010.
- Polak, J., W.W. Sulkowski, M. Bartoszek and W. Papiez. 2005. Spectroscopic studies of the progress of humification processes in humic acid extracted from sewage sludge. **Journal of Molecular Structure** 744–747 : 983–989.
- Prudent, P., M. Domeizel, C. Massiani and O. Thomas. 1995. Gel chromatography separation and U.V. spectroscopic characterization of humic-like substances in urban compost. **The Science of Total Environment** 172 : 229-235.
- Rice, J.A. 2001. Humin. **Soil Science** 166(11) : 848-857.
- Sanchez-Monedero, M.A., A. Roig, J. Cegarra and M.P. Bernal. 1999. Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. **Bioresource Technology** 70 : 193-201.
- Sanchez-Monedero, M.A., J. Cegarra, D. Garcia and A. Roig. 2003. Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting. **Biodegradation** 13 : 361–371.
- Smith, R.C. 1995. Composting Practices. North Dakota State University. Available Source: <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/hortcrop/h885.pdf>, April 6, 2010.
- Spaccini, R. and A. Piccolo. 2009. Molecular characteristic of humic acids extracted from compost at increasing maturity stages. **Soil Biology & Biochemistry** 41 : 1164-1172.
- Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnson, and M.E. Sumner. 1996. **Methods of Soil Analysis Part 3 : Chemical Methods**. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Wisconsin.
- Spark, D.L. 2003. **Environmental Soil Chemistry**. 2nd ed. : Academic Press, Amsterdam.
- Stevenson, F.J. 1982. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction**. 1st ed. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- _____. 1994. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, Inc.

- Swift, R.S. 1996. Organic matter characterization, pp. 1011-1069. *In* D.L. Sparks ed. **Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods**. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Tan, K.H. 2003. **Humic Matter in Soil and the Environment : Principle and Controversies**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Tejada, M., A.M. García-Martínez and J. Parrado. 2009. Relationships between biological and chemical parameters on the composting of a municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 100 : 4062–4065.
- Trubetskaya, O.E., O.A. Trubetskoj and C. Ciavatta. 2001. Evaluation of the transformation of organic matter to humic substances in compost by coupling sec-page. *Bioresource Technology*. 77 : 51-56.
- Veeken, A., K. Nierop, V. de Wilde, B. Hamelers. 2000. Characterization of NaOH extracted humic acids during composting of a biowaste. *Bioresource Technology*. 72 : 33-42.
- Wei, Z., B. Xi, Y. Zhao, S. Wang, H. Liu and Y. Jiang. 2007. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristic 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. *Bioresour. Technol.* 96: 471-478.
- Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehmann, T. M. Miano, A. Miltner and G. Schroth. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79 : 117-161.
- Zeng, G.M., H.L. Huang, D.L. Huang, X.Z. Yuan, R.Q. Jiang, M. Yu, H.Y. Yu, J.C. Zhang, R.Y. Wang and X.L. Liu. 2009. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochemistry*. 44 : 396–400.
- Zmora-Nahum, S., 2005. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biology & Biochemistry*. 37 : 2109–2116.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก และ
ข้อมูลเกี่ยวกับดัชนีของกระบวนการเกิดสารชีวมีก

ภาคผนวก ก

1. ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก†

อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	CEC (cmol/kg)	EC (dS/m)	N (mg/g) ±SD	P (mg/g) ±SD	K (mg/g) ±SD	pH±SD
0	8.95	2.85	35.95±3.72	0.14±0.07	429.35±41.73	6.69±0.20
7	12.21	3.37	18.33±0.55	0.22±0.10	536.20±32.58	6.64±0.47
14	8.97	4.86	23.60±0.51	13.99±2.50	810.12±20.25	6.76±0.17
21	6.65	5.06	19.08±0.08	0.28±0.17	536.21±81.60	6.91±0.01
28	9.15	4.80	18.54±0.22	25.50±0.00	242.13±26.07	6.90±0.12
35	8.49	4.95	20.63±0.22	15.79±0.29	446.04±10.43	7.23±0.62
49	7.14	4.93	22.52±0.32	10.24±0.43	369.22±46.55	7.27±0.46
63	6.10	4.26	22.35±0.21	29.67±3.51	310.24±10.48	7.63±0.21
77	12.65	4.28	21.60±0.08	16.50±1.32	509.51±27.58	7.68±0.07
91	11.59	4.18	18.87±0.99	13.50±4.77	347.51±9.92	7.70±0.09
105	9.67	4.13	19.76±0.20	18.66±2.31	311.10±2.88	7.51±0.46
119	12.00	4.15	16.30±0.29	17.50±2.18	304.49±7.57	7.47±0.36

† CEC, ค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก; EC, ค่าการนำไฟฟ้า; N, ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด; P, ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด; K, ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด; TC, ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด; TOC, ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์; TIC, ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานของปุ๋ยหมัก† (ต่อ)

อายุปุ๋ยหมัก (วัน)	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C) ±SD	TC (mg/g)	TOC (mg/g)	TIC (mg/g)	C/N ratio
0	88.82	27.0±0.00	319.93	223.99	95.94	8.9
7	84.27	34.0±0.00	355.63	238.70	116.93	19.4
14	74.12	35.3±0.58	219.46	122.42	97.04	9.3
21	72.27	39.0±2.65	293.83	207.30	86.53	15.4
28	65.04	36.3±3.21	252.10	156.30	95.80	13.6
35	53.22	30.0±1.00	297.00	211.73	85.27	14.4
49	55.37	28.3±0.58	272.44	178.27	94.17	12.1
63	48.14	28.2±0.76	243.60	154.24	89.36	10.9
77	35.21	27.7±0.29	216.03	54.56	161.46	10.0
91	24.66	27.5±0.50	198.11	49.00	149.11	10.5
105	20.84	27.3±0.58	237.14	71.67	165.47	12.0
119	20.49	27.8±1.04	239.65	96.37	143.27	14.7

† CEC, ค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก; EC, ค่าการนำไฟฟ้า; N_t, ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด; P, ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด; K, ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด; TC, ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด; TOC, ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์; TIC, ปริมาณคาร์บอนอนินทรีย์

2. ข้อมูลเกี่ยวกับดัชนีของกระบวนการเกิดสารชีวโมล

21. ปริมาณธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ และหมู่ฟังก์ชันของกรดชีวโมล

ตารางที่ 18 ปริมาณธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ และหมู่ฟังก์ชันของกรดชีวโมล

อายุผู้ป่วย หมัก (วัน)	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (%)				อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ			ผลรวมความเป็นกรด ทั้งหมด (mmol/g) ±SD	COOH (mmol/g) ±SD	Phenolic- OH (mmol/g) ±SD
	C	H	N	O	O/C	H/C	C/N			
0	58.77	8.68	4.65	27.9	0.47	0.15	12.64	3.45±0.06	1.57±1.57	1.89±0.06
7	58.58	8.2	5.27	27.95	0.48	0.14	11.12	6.98±0.08	1.67±1.66	5.30±0.14
14	23.74	3.08	3.21	69.97	2.95	0.13	7.4	6.86±0.07	1.46±1.47	5.41±0.10
21	50.67	6.21	7.71	35.41	0.7	0.12	6.57	6.82±0.06	1.67±1.69	5.14±0.06
28	49.57	5.71	7.2	37.52	0.76	0.12	6.88	7.54±0.06	0.98±0.99	6.56±0.08
35	46.94	5.69	7.02	40.35	0.86	0.12	6.69	8.45±0.07	1.64±1.63	6.81±0.02
49	49.41	5.79	6.44	38.36	0.78	0.12	7.67	2.20±0.35	1.78±1.78	0.42±0.35
63	51.83	5.51	5.97	36.69	0.71	0.11	8.68	3.45±0.10	1.82±1.84	1.63±0.08
77	50.42	5.73	6.53	37.32	0.74	0.11	7.72	1.18±0.09	1.09±1.09	0.09±0.16
91	49.98	5.82	6.43	37.77	0.76	0.12	7.77	3.23±0.06	1.97±1.97	1.26±0.20
105	44.53	5.26	5.75	44.46	1.00	0.12	7.74	4.93±0.03	2.00±2.01	2.93±0.04
119	37.05	4.71	4.96	53.28	1.44	0.13	7.47	0.05±0.06	0.04±0.04	0.01±0.03

2.2 คำนวณของกระบวนการเกิดสารชีวมีก
ตารางที่ 19 คำนวณของกระบวนการเกิดสารชีวมีก†

อายุปฏึก (วัน)	TOC (mg/g)	HAC (mg/g) ±SD	FAC (mg/g)	HSC (mg/g)	HI (%)	HR (%)	PH (%)
0	223.99	5.88±4.45	1.16	7.03	2.62	3.14	83.58
7	238.7	5.86±1.52	1.63	7.49	2.45	3.14	78.24
14	122.42	2.37±9.95	1.28	3.65	1.94	2.98	65.01
21	207.3	5.07±2.13	1.33	6.4	2.44	3.09	79.18
28	156.3	4.96±2.97	1.17	6.13	3.17	3.92	80.9
35	211.73	4.69±47.56	1.42	6.11	2.22	2.89	76.82
49	178.27	4.94±2.97	1.48	6.42	2.77	3.6	76.91
63	154.24	5.18±2.01	1.26	6.45	3.36	4.18	80.42
77	54.56	5.04±4.14	1.15	6.19	9.24	11.34	81.47
91	49.00	5.00±2.38	1.50	6.49	10.2	13.25	76.96
105	71.67	4.45±1.92	2.28	6.73	6.21	9.39	66.14
119	96.37	3.71±6.29	1.86	5.57	3.84	5.78	66.54

† TOC, ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์; HAC, ปริมาณคาร์บอนของกรดชีวมีก; FAC, ปริมาณคาร์บอน
ของกรดฟัลลิก; HSC, ปริมาณคาร์บอนของสารชีวมีก; HI, Humification Index =
(HAC/TOC)*100; HR, Humification Ratio = (HSC/TOC)*100; PH = (HAC/HSC)*100

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวอัญชลี ไชยเนตร
 ที่อยู่ 110 บ้านห้วยโป่ง หมู่ 19 ตำบลคำ อำเภอนาดูน จังหวัดเขียงราย 57340
 โทรศัพท์ 085-8476135
 E-mail address anchalee_c@windowslive.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต วิชาเอกวิทยาศาสตร์
 สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
 พ.ศ. 2550 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการฝึกงานและอบรม

พ.ศ. 2548 ฝึกงานที่บริษัทอีสเทิร์นไทย คอนซัลตัง 1992 จำกัด อำเภอสรีราชา
 จังหวัดชลบุรี
 พ.ศ. 2549 ผ่านการอบรมความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรม
 จัดโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับ สำนักงาน
 สวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน จังหวัดนครปฐม
 พ.ศ. 2549 ผ่านการอบรมระบบการจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม (Environmental
 Management System) จากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ
 วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์และเผยแพร่

อัญชลี ไชยเนตร และนัทธีรา สรรพณี. 2552. ผลของการหมักปุ๋ยต่อการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์:
 คุณสมบัติทางเคมีและทางสเปกโตรสโคปี. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ
 สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 8. 25-27 มีนาคม 2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.
 นครราชสีมา. หน้า 267-268

Chainet, A., and Sanmanee, N. 2009. Maturity assessment of compost derived from mix manures using UV-Vis. In *Soil and Water Assessment Tool-South East Asia*, 7-8 January, 2009. Chiangmai, Thailand. p. 64