



อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถูงถ่ายเทอากาศต่อกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรด้วย
เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิชเบิลสเปกโทรสโกปี



โดย
นางสาวพรรณนิภา เปี้ยชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถ่วงถ่ายเทอากาศต่อกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและ
มูลสุกรด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบลสเปกโทรสโกปี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

INFLUENCING OF COMPOSTING PROCESS USING AIR-FLOW BAG ON HUMIC
ACID IN MIXED BOVINE AND SWINE MANURE COMPOST BY ULTRAVIOLET-
VISIBLE SPECTROSCOPY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science ENVIRONMENTAL SCIENCE
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE
Academic Year 2024
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถ่วงถ่ายเทอากาศต่อกรดฮิวมิกใน ปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิธี เบิลสเปกโทรสโกปี
โดย	นางสาวพรรณนิภา เปียชาติ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. กนกพร สว่างแจ้ง)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี)	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธรรมเรศ เชื้อสาวลี)	

640720074 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : กรดฮิวมิก, ปุ๋ยหมัก, ดัชนีการงอกของเมล็ด, อัลตราไวโอเล็ต-วีซีบีเอสเปกโทรสโกปี

นางสาว พรรณนิภา เปียชาติ: อิทธิพลของกระบวนการหมักแบบถูถ่ายเทอากาศต่อกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักผสมมูลโคและมูลสุกรด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วีซีบีเอสเปกโทรสโกปี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักปุ๋ยด้วยถูถ่ายเทอากาศต่อกรดฮิวมิกจากการศึกษาปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรตลอดระยะเวลาการหมัก 4 เดือน ปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ภายใน 14 วัน มีอัตราการย่อยสลายเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับ 1 ที่ 0.0278 กรัม/วัน เนื่องจากแหล่งคาร์บอนส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 70 มาจากมูลสัตว์ที่ย่อยสลายได้ง่าย สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่ลดลงตลอดระยะเวลาการหมัก ($p < 0.01$) ขณะที่ปริมาณสารฮิวมิก (HS) ค่อนข้างแปรปรวนโดยปริมาณสารฮิวมิกสัมพันธ์กับสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (HR) และดัชนีการงอกของเมล็ด (GI) ($r = 0.975$, $p < 0.01$ และ 0.319 , $p < 0.05$ ตามลำดับ) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารฮิวมิกจึงบ่งบอกถึงกระบวนการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นพิษต่อพืชลดลง สารฮิวมิกประกอบด้วยกรดที่ลิวิกเป็นส่วนใหญ่มีปริมาณร้อยละ 62.12 – 86.01 ขณะที่พบกรดฮิวมิกปริมาณร้อยละ 13.99 – 37.85 โดยมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้าม ($r = 0.862$, $p < 0.01$) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบซึ่งกันและกัน อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H) ลดลงอย่างช้า ๆ สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.726$, $p < 0.01$) บ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างมีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งสนับสนุนความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก และระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (PD) ($r = 0.981$ และ 0.589 , ตามลำดับ) อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.60 – 0.73 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอนไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่เกิดพันธะกับโครงสร้างแอลิแฟติก และอัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C) และระดับออกซิเดชันภายในที่สูงขึ้น (ω) แสดงถึงการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น คาร์บอกซิลิก การดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต-วีซีบีเอสในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึงวันที่ 105 และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 119 ที่บ่งชี้ว่ากระบวนการย่อยสลายปลดปล่อยแร่ธาตุมีความเด่นกว่ากระบวนการสร้างพอลิเมอร์ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงสุดท้ายของการศึกษา (77 – 119 วัน) ส่งผลให้ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้นด้วย อัตราส่วน E_2/E_3 ที่บ่งบอกการย่อยสลายวัตถุตั้งต้นต่อโครงสร้างที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 35 ในระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยภายหลัง ขณะที่อัตราส่วน E_2/E_4 ที่บ่งบอกการย่อยสลายวัตถุตั้งต้นต่อโครงสร้างแอลิแฟติกของกรดฮิวมิกมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 42 ดังนั้นปุ๋ยหมักในช่วงวันที่ 35 – 49 จึงเป็นวันที่มีคุณภาพดีที่สุดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตรและมีคุณภาพกรดฮิวมิกดี

640720074 : Major ENVIRONMENTAL SCIENCE

Keyword : Humic Acid, Compost, Germination Index, Ultraviolet-Visible Spectroscopy

MISS Pannipa PIACHART : Influencing of composting process using air-flow bag on humic acid in mixed bovine and swine manure compost by ultraviolet-visible spectroscopy Thesis advisor : Associate Professor Natdhera Sanmanee, Ph.D.

The purpose of this study was to investigate the influencing of composting process on the humic acid using air-flow bag technique. Compost derived from mixed bovine and swine manures were studied for 4 months. The compost reached the mature stage within 14 days following first rate law order with the decomposition rate of 0.0278 g/day. This was because the carbon sources were mainly more than 70% manures and easy to decompose. Organic matter (OM) and C/N ratio also decreased gradually with time ($p < 0.01$) while humic substances (HS) fluctuated. The amounts of humic substances correlated with humification ratio (HR) and germination index (GI) ($r = 0.975$, $p < 0.01$ and 0.319 , $p < 0.05$). Therefore, increasing humic substances implied to higher degree of composting process leading to less toxicity to plants. The humic substances contained mostly fulvic acid around 62.15-86.01% while humic acid was found around 13.99-37.85% with the opposite change between each other ($r = -0.862$, $p < 0.01$) showing interchange among them. The C/H atomic ratio of humic acid slowly decreased corresponding to time ($r = 0.726$, $p < 0.01$) indicating more stability structure which was supporting the correlation in the same direction with HR and polymerization degree (PD) ($r = 0.981$ and 0.589 , $p < 0.01$). The range of C/H, 0.60-0.73 usually implied the change of alicyclic hydrocarbon to aromatic bonding with aliphatic structure and the higher O/C and internal oxidation (ω) showed more oxygen functional group, such as carboxylic. The absorption of UV-Visible intensity between 200-800 nm increased till day 105 and slightly declined on day 119, indicating the mineralization process was more prominent than the polymerization. The high electrical conductivity (EC) at the last period of study (77-119 days) was also supported causing more toxicity to seed germination. The E_2/E_3 , the degradation of initial materials by the higher molecular weight structure showed the lowest number during the mature stated at day 35 and slightly increased later mean while the E_2/E_4 , the degradation of initial materials by the aliphatic structures of humic acid showed the lowest number of on day 42. Therefore, the composting range during days 35-49 was considered as the best quality within the standard of Thai Department of Agriculture's criteria and good quality of humic acid.

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษารวมถึงข้อแนะนำต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย และที่สำคัญคือให้ความรู้และเทคนิควิธีการเขียนรายงานวิจัยจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จผลสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมเรศ เชื้อสาวถี และรองศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สว่างแจ้ง เป็นอย่างสูงที่คอยแนะนำและตรวจทานการเขียนรายงานวิจัยให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกศาสตร์จนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยตลอดมาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านทั้งหลายมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบเพื่อตอบแทนพระคุณแต่บิดา พันตรีไพศาล เปียชาติ, มารดา นางทัศนีย์ เปียชาติ, น้องสาว นางสาวพิชชาพร เปียชาติ และเพื่อน ๆ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาตลอดถือเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จ



พรธรรณิภา เปียชาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนในการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณลักษณะของสารฮิวมิกและประโยชน์.....	8
2.1.1 กรดฟัลวิก.....	8
2.1.2 กรดฮิวมิก.....	10
2.1.3 ฮิวมิน.....	12
2.2 ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก.....	13
2.2.1 สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (Humification Ratio: HR).....	14
2.2.2 ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Humification Index: HI).....	14

2.2.3	ระดับพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization Degree: PD).....	15
2.3	ธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ และระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิก..	15
2.3.1	ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก.....	15
2.3.2	อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก	18
2.3.3	ระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิก	22
2.4	อัตราไวโอเลต-วิชิเบลสเปกโทรสโกปี.....	23
2.4.1	ดัชนีเชิงแสงและการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิก	26
2.4.2	อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงและการประเมินเสถียรภาพเชิงโครงสร้าง.....	27
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1	สารเคมีและรีเอเจนต์	42
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	43
3.3.1	การหมักปุ๋ยตัวอย่าง.....	43
3.3.2	การเก็บตัวอย่าง.....	45
3.3.3	การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์	46
3.4	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	46
3.4.1	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ความชื้น	46
3.4.2	การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	46
3.4.3	การวัดอุณหภูมิ.....	47
3.4.4	การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....	47
3.4.5	การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ.....	47
3.4.6	การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด	47
3.4.7	อัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก (decomposition rate)	48

3.4.8 การย่อยสลายสมบูรณ์	48
3.4.9 การสกัดสารชีวมีก	49
3.4.10 ดัชนีการเกิดสารชีวมีก	49
3.4.11 ปริมาณธาตุและองค์ประกอบกรดชีวมีก	52
3.4.12 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง	52
3.4.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	52
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา	53
4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเกณฑ์ มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร	53
4.1.1 ระยะเริ่มผสม (initial phase).....	54
4.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic phase).....	55
4.1.3 ระยะปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (mature phase)	55
4.2 ความเป็นพิษต่อพืชของปุ๋ยหมักและการประเมินการย่อยสลายสมบูรณ์ตามมาตรฐานกรม วิชาการเกษตร.....	59
4.3 ปริมาณสารชีวมีกและธาตุองค์ประกอบ	60
4.3.1 ปริมาณสารชีวมีก	60
4.3.2 ธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในโครงสร้างกรดชีวมีก	67
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดชีวมีกด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิชีเปิลสเปกโทรสโกปี	72
4.4.1 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ	73
4.4.2 อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	76
4.5 แนวทางการพิจารณาเลือกใช้ปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพ.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	82
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก.....	94

ภาคผนวก ก	95
ภาคผนวก ข	100
ภาคผนวก ค	103
ประวัติผู้เขียน	112



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณลักษณะปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร เพื่อการจำหน่าย	9
ตารางที่ 2 ประโยชน์ของกรดฮิวมิก	13
ตารางที่ 3 ร้อยละปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักโดยน้ำหนักอะตอม	17
ตารางที่ 4 อัตราส่วนอะตอมธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก	21
ตารางที่ 5 ระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิก (w).....	24
ตารางที่ 6 ปริมาณและอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก	29
ตารางที่ 7 ปริมาณสารฮิวมิกและดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเปรียบเทียบระหว่างระยะเริ่มผสม และสิ้นสุดกระบวนการหมัก	34
ตารางที่ 8 ปริมาณวัตถุตั้งต้นของปุ๋ยหมัก 5 สูตร (น้ำหนักเปียก)	36
ตารางที่ 9 อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของปุ๋ยหมัก 5 สูตรในวันเริ่มต้นและ สิ้นสุดกระบวนการหมัก	38
ตารางที่ 10 ส่วนผสมในการหมักปุ๋ยแต่ละชนิดและระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่	39
ตารางที่ 11 สัดส่วนกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิค (HAFVA) และอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงของปุ๋ยหมัก 7 ชนิด.....	41
ตารางที่ 12 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS NO. และบริษัทผู้ผลิต	42
ตารางที่ 13 ส่วนผสมและปริมาณที่ใช้ผลิตปุ๋ยหมัก.....	45
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร..	56
ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลา อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็น กรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) อินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N).....	57
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity) ด้วยเมล็ดผักกาดขาว (<i>Brassica rapa</i> subsp. <i>Pekinensis</i>) ได้แก่ ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดเทียบกับชุดควบคุม (relative seed germination; RSG) ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์เทียบกับชุดควบคุม (relative root germination; RRG) และดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI).....	61

ตารางที่ 17 ร้อยละปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยน้ำหนักอะตอมตลอดระยะเวลา
 กระบวนการหมัก 70

ตารางที่ 18 อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยน้ำหนักอะตอม และระดับออกซิเดชัน
 ภายในของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลากระบวนการหมัก (ω) 71

ตารางที่ 19 อัตราส่วนความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ต่อ 367 นาโนเมตร (E_2/E_3) และ อัตราส่วน
 ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ต่อ 465 นาโนเมตร (E_2/E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก..... 77



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักหลังจากการหมักเสร็จสิ้น.....	4
ภาพที่ 2 การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิคในดิน	10
ภาพที่ 3 คุณลักษณะของสารฮิวมิค.....	11
ภาพที่ 4 โครงสร้างกรดฟัลวิก	11
ภาพที่ 5 โครงสร้างกรดฮิวมิค.....	12
ภาพที่ 6 โครงสร้างโครโมฟอร์ (chromophore) ของกรดฮิวมิค.....	25
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดฮิวมิคและอินทรีย์วัตถุตลอดระยะเวลาการหมัก	28
ภาพที่ 8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลในปุ๋ยหมักวันที่ 0 ถึง 119	31
ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 472 นาโนเมตร (E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	32
ภาพที่ 10 อุณหภูมิปุ๋ยหมัก (windrow) และอุณหภูมิบรรยากาศ (Room T) ตลอดระยะเวลากระบวนการหมัก 161 วัน.....	33
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) (ก) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (ข) ตลอดระยะเวลาการหมัก 6 เดือน โดย T_0 = วันเริ่มผสม, T_1 = 1 เดือน, T_2 = 2 เดือน, T_3 = 3 เดือน, T_4 = 4 เดือน, T_5 = 5 เดือน และ T_6 = 6 เดือน ตามลำดับ	33
ภาพที่ 12 ความเป็นพิษต่อพืชแครอท (Cress) หัวผักกาด (Turnip) ลูเซอร์น่า (Lucerna) และผักกาดหอม (Lettuce) ตลอดระยะเวลาการหมัก 6 เดือน โดย T_0 = วันเริ่มผสม, T_1 = 1 เดือน, T_2 = 2 เดือน, T_3 = 3 เดือน, T_4 = 4 เดือน, T_5 = 5 เดือน และ T_6 = 6 เดือน ตามลำดับ	35
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วย ยาสูบ ตะกอนน้ำเสีย ชี้เสี้ยว และกิ่งไม้ใบไม้ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ W_1 = 30.0: 85.5: 47.5: 0.0, W_2 = 15.5: 17.5: 47.5: 0.0, W_3 = 15.0: 17.5: 95.0: 0.0, W_4 = 25.0: 30.0: 0.0: 30.0 และ W_5 = 3.0: 2.0: 0.0: 36.0 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศ (Environment) ตลอดระยะเวลาการหมัก 180 วัน	36

ภาพที่ 14 ดัชนีการงอกของเมล็ดวอเตอร์เครสของปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วย ยาสูบ ตะกอนน้ำเสีย ขี้ เถี่ยว และกิ่งไม้ใบไม้ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ W1 = 30.0: 85.5: 47.5: 0.0, W2 = 15.5: 17.5: 47.5: 0.0, W3 = 15.0: 17.5: 95.0: 0.0, W4 = 25.0: 30.0: 0.0: 30.0 และ W5 = 3.0: 2.0: 0.0: 36.0 ตลอดระยะเวลาการหมัก 180 วัน.....	37
ภาพที่ 15 สัดส่วนปริมาณกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิค (HA/FA) ของปุ๋ยหมัก 5 ชนิด ได้แก่ C1 = ปุ๋ยหมัก ซากปลา, C2 = ปุ๋ยหมักมูลม้า, C3 = ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย, C4 = ปุ๋ยหมักกิ่งไม้ใบไม้, C5 = ปุ๋ย หมักขยะจากครัว, C6 = ปุ๋ยหมักมูลตัวอ่อนแมลงวันลายดำ และ C7 = ปุ๋ยหมักจากมูลไส้เดือน	39
ภาพที่ 16 การดูดกลืนคลื่นแสงอัตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลในช่วงคลื่น 230 – 670 นาโนเมตร ของปุ๋ยหมัก 7 ชนิด ได้แก่ C1 = ปุ๋ยหมักซากปลา, C2 = ปุ๋ยหมักมูลม้า, C3 = ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย, C4 = ปุ๋ย หมักกิ่งไม้ใบไม้, C5 = ปุ๋ยหมักขยะจากครัว, C6 = ปุ๋ยหมักมูลตัวอ่อนแมลงวันลายดำ และ C7 = ปุ๋ย หมักจากมูลไส้เดือน.....	40
ภาพที่ 17 แผนผังการดำเนินการทดลองการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยและการหาข้อมูลคุณลักษณะของ ปุ๋ย หมัก การวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายความสัมพันธ์เชิงสถิติ.....	44
ภาพที่ 18 ปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรก่อนและหลังหมัก.....	45
ภาพที่ 19 วิธีการสกัดสารฮิวมิก	50
ภาพที่ 20 วิธีการสกัดสารฮิวมิก (ต่อ).....	51
ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิปุ๋ยหมักและอุณหภูมิบรรยากาศตลอดระยะเวลาการหมัก	54
ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = -0.515, p < 0.01$ และ $r = -0.674, p < 0.01$ ตามลำดับ).....	58
ภาพที่ 23 อัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก.....	59
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI) และอุณหภูมิปุ๋ย หมัก ตลอดระยะเวลาการหมัก	62
ภาพที่ 25 ปริมาณสารฮิวมิก (humic substances; HS) และสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	62
ภาพที่ 26 สัดส่วนปริมาณสารฮิวมิก (กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิค) ตลอดระยะเวลาการหมัก.....	64
ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI)	66
ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของระดับพอลิเมอไรเซชัน (polymerization degree; PD).....	68

ภาพที่ 29 การดูดกลืนคลื่นแสงของกรตฮิวมิคในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร..... 74

ภาพที่ 30 คุณสมบัติเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักวันที่ 21 28 35 42 และ 49 79



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การดูแลปรับปรุงดินเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะดินที่ใช้ในการทำเกษตรกรรม ในประเทศไทยมีการทำการเกษตรเป็นจำนวนมาก แต่ยังคงมีเกษตรกรยังขาดความรู้ความเข้าใจในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยส่วนมากมักจะนำปุ๋ยเคมีเข้ามาใช้ซึ่งเห็นผลเร็วกว่า แต่จะส่งผลให้ดินเสื่อมโทรมในระยะยาว เช่น หน้าดินแข็ง ดินแน่นทึบ และสารเคมีตกค้างเป็นต้น จึงมีการนำวัสดุอินทรีย์และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาทำการหมัก ปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่าปุ๋ยหมัก จะมีลักษณะ นุ่ม ยุ่ย มีกลิ่นคล้ายดิน สีดำ หรือน้ำตาลอ่อน (กรมวิชาการเกษตร, 2548) เมื่อนำปุ๋ยหมักไปสกัดตามคุณสมบัติการละลายในกรดและด่าง จะได้ตะกอนสีดำไปจนถึงสีน้ำตาล เรียกว่า สารฮิวมิก (humic substances) (Stevenson, 1994)

สารฮิวมิกสามารถแบ่งตามคุณสมบัติการละลายน้ำออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ กรดฟัลวิก (Fulvic acid, FA) กรดฮิวมิก (Humic acid, HA) และฮิวมิน (Humin, HM) มีตั้งแต่สีเหลืองอ่อน จนถึงสีน้ำตาลดำ โดยกรดฟัลวิกโครงสร้างเล็กที่สุดสามารถละลายน้ำได้ดีทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง จึงมักจะถูกชะล้างจากแหล่งกำเนิดออกไปได้ไกล ในขณะที่ฮิวมินมีโครงสร้างใหญ่ที่สุดแต่มีหมู่ฟังก์ชันน้อยที่สุด จึงไม่พบบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดิน ทำให้กรดฮิวมิกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเสถียร และมีหมู่ฟังก์ชันมาก ดูดซับประจุที่เป็นธาตุอาหารพืชได้ดี จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้ และไม่ถูกชะล้างจากแหล่งกำเนิดได้ง่าย (Hafez et al., 2021) อย่างไรก็ตามกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดและกระบวนการหมักที่แตกต่างกัน (Amir et al., 2010; Hanc et al., 2019; Zhou et al., 2014) ส่งผลให้คุณสมบัติในการตรึงธาตุอาหารตลอดจนศักยภาพในการปรับปรุงดินมีความแตกต่างกันไป การศึกษาเชิงโครงสร้างและกระบวนการเกิดกรดฮิวมิก จึงมีความสำคัญต่อการศึกษาเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมัก ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักมูลโคและมูลสุกรผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-Visible Spectroscopy) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นร่วมกับการศึกษาเชิงปริมาณของธาตุองค์ประกอบในกรดฮิวมิกและสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบกับข้อมูลเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมัก อันจะเป็นแนวทางในการประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักและเสถียรภาพของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่ง

นำไปสู่การเลือกระยะเวลาการหมักและการเก็บรักษา ไว้เพื่อนำไปใช้เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน อันเป็นแนวทางให้เกษตรกร นำไปพัฒนากระบวนการหมักเชิงคุณภาพได้ในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อกระบวนการสร้างสารฮิวมิก

1.2.2 เพื่อศึกษาการพัฒนาเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี

1.2.3 เพื่อประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักและอิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมัก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อิทธิพลของกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการหมักที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณลักษณะเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของกรดฮิวมิกที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ปุ๋ยหมัก (compost) ที่นำมาศึกษาเป็นปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรที่จัดทำขึ้นเอง โดยใช้ส่วนผสมที่หาได้ตามท้องถิ่นทั่วไปในพื้นที่ตำบลอนพุทรา อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ซึ่งสัดส่วนการหมักปุ๋ยเป็นไปตามสูตรของ รองศาสตราจารย์ ดร. นันทิรา สรรมณี ใช้ระยะเวลาในการหมัก 4 เดือน ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานเปรียบเทียบกับ มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2557 ได้แก่ อุณหภูมิ (temperature) ปริมาณความชื้น (moisture) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter: OM) และปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) นอกจากนี้วิเคราะห์การย่อยสลายสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (decomposition rate) ปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ธาตุองค์ประกอบและอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) และระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิก (Internal oxidation; **w**) จากนั้นศึกษาโครงสร้างของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพปุ๋ยหมักด้วยวิธีทางสถิติสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's corelation) และความแตกต่างเชิงปริมาณของสารฮิวมิกด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (one-way

ANOVA) และเรียงลำดับความแตกต่างด้วยสถิติทดสอบของดันแคน (Duncan's test) โดยใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Science (SPSS)

1.5 ขั้นตอนในการศึกษา

- 1.5.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 วางแผนการทดลอง
- 1.5.3 เขียนโครงร่างงานวิจัยและเสนอหัวข้อโครงการวิจัย
- 1.5.4 เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก และทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผล
- 1.5.5 รวบรวมและสรุปผลการทดลอง
- 1.5.6 ค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม
- 1.5.7 เขียนรายงานโครงการวิจัยและสอบโครงการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบตัวแปรที่มีอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อกระบวนการสร้างสารฮิวมิก
- 1.6.2 ทราบลักษณะการพัฒนาเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกจากเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิธีเบิลสเปกโทรสโกปี
- 1.6.3 สามารถประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักและอิทธิพลของระยะเวลาการหมักต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากการนำอินทรีย์วัตถุ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร นำมาผ่านกรรมวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจนวัตถุตั้งต้น แปรสภาพจากเดิม อินทรีย์วัตถุที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีขนาดเล็ก ลง ลักษณะนุ่มยุ่ย สีนํ้าตาล-ดำและมีกลิ่นคล้ายดิน มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิอากาศ เหมาะที่จะใส่ บำรุงดิน (Cooperband, 2002; กรมวิชาการเกษตร, 2548) ดังภาพที่ 1 โดยมีปัจจัยที่เอื้อต่อความ ยากง่ายในการย่อยสลายของจุลินทรีย์และส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปุ๋ยหมักดังนี้



ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักหลังจากการหมักเสร็จสิ้น

ที่มา: Raleigh (2024)

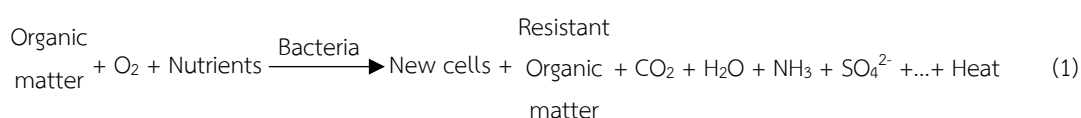
1) ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้นมีหลายประเภท กลุ่มที่มีลักษณะเด่น เช่น กลุ่มซากพืชชนิดที่มี เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ ค่อนข้างแข็งย่อยสลายได้ยากกว่าวัตถุดิบกลุ่มมุลสัตว์ที่ผ่านการย่อยสลายจากระบบย่อยอาหารของ สัตว์ จึงมีน้ำตาลขนาดเล็กในรูปที่ละลาย (soluble sugar) และกรดอะมิโน (amino acid) ที่เป็น พลังงานที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงทำให้ย่อยสลายได้ง่ายกว่า (Wang et al., 2019; Wei et al., 2007)

2) ขนาดของวัตถุตั้งต้น หากวัตถุมีขนาดใหญ่จะทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง เนื่องจากมีผิวสัมผัสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัตถุขนาดเล็กในปริมาตรเท่ากัน แต่หากวัตถุมีขนาดเล็กมากเกินไปวัสดุขนาดเล็กจะเบียดชิดกันทำให้อากาศถ่ายเทไม่สะดวกส่งผลให้ออกซิเจนลดลงด้วย โดยขนาดของวัตถุที่ใช้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 33.0 – 50.5 มิลลิเมตร (Pace et al., 1995) และเมื่อผ่านกระบวนการหมักแล้วควรมีขนาดไม่เกิน 12.5 มิลลิเมตร (กรมวิชาการเกษตร, 2557)

3) อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เป็นข้อบ่งชี้กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และบ่งบอกระยะเวลาการหมักและระยะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังต่อไปนี้

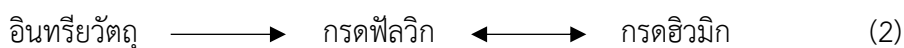
- ระยะอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic phase) เป็นระยะแรกของกระบวนการหมัก อุณหภูมิของปุ๋ยหมักอยู่ที่ประมาณ 10 – 40 องศาเซลเซียส (Ho et al., 2022; Pace et al., 1995) พื้นที่เขตหนาวหรือเขตอบอุ่นที่มีอุณหภูมิบรรยากาศค่อนข้างเย็นระยะนี้อาจจะมีระยะเวลาจนถึง 2 สัปดาห์หรือมากกว่า (El Fels et al., 2014; Lahsaini et al., 2017) สำหรับพื้นที่เขตร้อนหรือบริเวณที่อุณหภูมิบรรยากาศสูง ระยะนี้มักพบค่อนข้างสั้นเพียง 1 – 3 วัน จึงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ระยะเริ่มผสม (initial phase) (Ming et al., 2023; Wang et al., 2019) ในระยะแรกนี้มักเป็นช่วงการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายยังไม่มากนัก ย่อยสลายธาตุอาหารโมเลกุลเล็ก ๆ ที่ละลายน้ำหรือที่ย่อยสลายง่าย (Trautmann & Krasny, 1997) ลักษณะของวัตถุตั้งต้นหลักที่มีขนาดใหญ่จึงยังมองเห็นได้อย่างชัดเจน

- ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic phase) มีอุณหภูมิประมาณ 40 – 70 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะนี้เกิดกระบวนการย่อยโครงสร้างที่ย่อยสลายยาก จำพวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้อินทรีย์วัตถุที่มีความเสถียรมากขึ้นจำพวกสารฮิวมิก (Yu et al., 2019) จุลินทรีย์ขยายพันธุ์ปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ และคายพลังงานในรูปแบบความร้อนทำให้อุณหภูมิของปุ๋ยสูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายยังปลดปล่อยโมเลกุลขนาดเล็ก และไอออนอื่น ๆ เช่น แอมโมเนีย (NH₃) และซัลเฟต (SO₄²⁻) เป็นต้น (สมการที่ 1) (Ho et al., 2022)

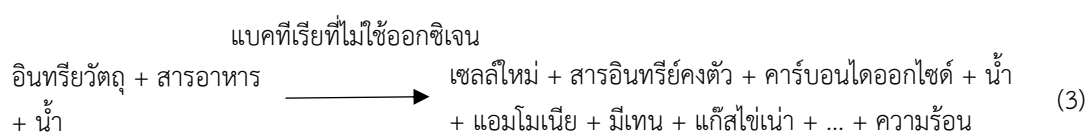


เมื่ออุณหภูมิสูงว่า 50 องศาเซลเซียส จะสามารถฆ่าไข่นอนแมลง ปรสิตร และเชื้อโรคที่ปะปนมาจากวัตถุคิบัได้ (Tai et al., 2022) นอกจากนี้อุณหภูมิบรรยากาศที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ชอบเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 40 – 60 องศาเซลเซียส (Trautmann & Krasny, 1997) ดังนั้นในเขตร้อนหรือในฤดูที่มีอุณหภูมิบรรยากาศสูง ระยะเวลาที่อาจค่อนข้างสั้นประมาณ 2 – 6 สัปดาห์ (Ming et al., 2023; Tong et al., 2019; Zhang et al., 2024; Zhao et al., 2016) ขณะที่ในเขตหนาวหรือเขตอบอุ่นที่อากาศหนาวเย็นจะมีระยะอุณหภูมิสูงยาวนานอาจเป็นหลายเดือนได้ (Amir et al., 2010; El Fels et al., 2014; Fukushima et al., 2009; Lahsaini et al., 2017)

- ระยะปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (mature phase) เกิดหลังจากที่ปุ๋ยผ่านกระบวนการหมักในระยะอุณหภูมิสูงในระยะนี้อุณหภูมิลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศและเป็นช่วงที่ปุ๋ยสามารถนำไปใช้งานได้ ในระยะนี้ปริมาณความชื้นและความเป็นกรด-ด่างลดลง สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากหมดไป ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงจากการย่อยสลายคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon) และปลดปล่อยไนโตรเจนของจุลินทรีย์ โดยในระยะนี้จุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูงลดบทบาทลงขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางกลับมามีบทบาทอีกครั้ง โดยกระบวนการสร้างและสลายสารฮิวมิคยังคงดำเนินต่อไป เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งกันและกันระหว่างสารฮิวมิคชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กมีความเสถียรน้อย ได้แก่ กรดฟัลวิกกับสารฮิวมิคที่มีโครงสร้างที่ใหญ่และมีความเสถียรมากกว่า เช่น กรดฮิวมิค จึงทำให้สารฮิวมิคทั้ง 2 ชนิดเป็นที่นิยมนำมาใช้ตรวจติดตามเพื่อประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก (Lahsaini et al., 2017; Ming et al., 2023; Wang et al., 2019) กระบวนการสร้างพอลิเมอร์ได้กรดฮิวมิคที่มีโครงสร้างที่เสถียร จะเกิดจากโมเลกุลขนาดเล็กของกรดฟัลวิกมาต่อเชื่อมกัน อย่างไรก็ตามหากวัตถุคิบัตั้งต้นหมดไป ทำให้กระบวนการสร้างกรดฟัลวิกลดลง จุลินทรีย์จะนำสารฮิวมิคมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแทน และมักเห็นได้ชัดจากการลดลงของปริมาณกรดฮิวมิคที่ถูกย่อยสลายกลายเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ของกรดฟัลวิกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระยะการสร้างและสลายกรดฮิวมิคนี้อาจสั้นและยาวแตกต่างกันไปตามสภาวะการหมักและวัตถุคิบัตั้งต้นที่แตกต่างกัน (Wang et al., 2019; Yu et al., 2019; Zhou et al., 2014) แสดงการเปลี่ยนรูประหว่างอินทรีย์วัตถุ กรดฟัลวิก และกรดฮิวมิค ดังสมการที่ 2



4) ปริมาณออกซิเจนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน (aerobic) หากออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic) ซึ่งเป็นกระบวนการหมักที่ดำเนินช้ากว่า (Cooperband, 2002) และเกิดกลิ่นเหม็น จากแก๊สไข่เน่า มีเทน และแอมโมเนีย (Cooperband, 2002; Trautmann & Krasny, 1997; Yaser et al., 2022) ดังสมการที่ 3 จึงควรมีการระบายอากาศในกองปุ๋ยหมัก เช่น การพลิกกลับกองปุ๋ยเพื่อให้อากาศถ่ายเท หรือเติมอากาศด้วยเครื่องกลเข้าไปในกองปุ๋ย เป็นต้น เกิดกลิ่นรบกวนจากแก๊สไข่เน่า (hydrogen sulfide: H₂S)



5) ความชื้นมีความสำคัญในการช่วยให้จุลินทรีย์ทำงานได้ทั่วถึง หากปริมาณความชื้นน้อยเกินไปอาจทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับเนื้อปุ๋ยไม่ทั่วถึงทำให้กระบวนการย่อยสลายเป็นไปไม่เต็มที่ ดังนั้นความชื้นที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 50 – 60 (Trautmann & Krasny, 1997) ซึ่งหากมากเกินไปจะทำให้อากาศถ่ายเทได้ไม่ดีเกิดการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเป็นปัญหาเช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

6) ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ 6.5 – 8.0 (DeMoranville et al., 2000) โดยปุ๋ยหมักคุณภาพดีที่พร้อมนำไปใช้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 – 8.5 (ตารางที่ 1) ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมพัฒนาที่ดิน (2556) ในการสนับสนุนกิจกรรมของจุลินทรีย์เมื่อนำปุ๋ยหมักไปใช้เป็นธาตุอาหารในดินได้

7) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เป็นดัชนีสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์ใช้คาร์บอนในการสร้างพลังงานและเจริญเติบโต และไนโตรเจนจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีนและการสืบพันธุ์ (Pace et al., 1995) ปกติค่าเฉลี่ยของเนื้อเยื่อจุลินทรีย์จะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนประมาณ 8:1 (Troeh & Thompson, 2005; USDA, 2011) โดยเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายคาร์บอนไปเป็นพลังงานจะสูญเสียคาร์บอน 2 ใน 3 จากกระบวนการหายใจออกไปในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ดังนั้นเพื่อให้มีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนเพียงพอต่อการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ ปุ๋ยหมักจึงควรมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 24:1 โดยคาร์บอน 16 ส่วนจะถูกใช้เป็นพลังงานและอีก 8 ส่วนจะถูกใช้เป็นโครงสร้างร่างกายของจุลินทรีย์ (USDA, 2011) ดังนั้นช่วงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่าง 25:1 – 30:1

โดยมีสัดส่วนที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 20:1 – 40:1 ที่ยังคงทำให้เกิดการย่อยสลายที่ดีเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงดิน (Pace et al., 1995) เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุมีผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดต่ำลง โดยเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) กำหนดเกณฑ์นำไปใช้ให้มีค่าไม่เกิน 20:1 และช่วงที่ทำให้เกิดโครงสร้างสารฮิวมิกที่ดีควรมีค่าระหว่าง 10:1 – 15:1 (Tan, 2003)

จากปัจจัยที่กล่าวข้างต้นทำให้ปุ๋ยหมักแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหาร ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และความเป็นกรด-ด่าง แบ่งคุณภาพปุ๋ยหมักออกได้เป็น 2 เกรด ได้แก่ ปุ๋ยหมักคุณภาพดีเกรด 1 และปุ๋ยหมักที่ผ่านมาตรฐานในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เกรด 2 (ตารางที่ 1) โดยมีเกณฑ์อื่น ๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่ ขนาดของปุ๋ย ความชื้น ค่าการนำไฟฟ้า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน การย่อยสลายสมบูรณ์หรือดัชนีการงอกของเมล็ด วัสดุเจือปนอื่น ๆ และปริมาณโลหะหนัก โดยปุ๋ยหมักเกรด 1 เป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพดีต้องมีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ขณะที่ปุ๋ยหมักเกรด 2 ที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนดไว้เพียงไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 สำหรับปริมาณธาตุอาหารหลักไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ปุ๋ยหมักเกรด 1 ต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0, 0.5 และ 0.5 ตามลำดับ และค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.5 – 8.5 ขณะที่ปุ๋ยหมักเกรด 2 เพิ่มเกณฑ์กำหนดธาตุอาหารหลักรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 และไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยหมัก

2.1 คุณลักษณะของสารฮิวมิกและประโยชน์

องค์ประกอบในโครงสร้างของสารฮิวมิกส่งผลต่อคุณสมบัติการละลายของสารฮิวมิก สามารถจำแนกสารฮิวมิกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ส่วนที่ไม่ละลายในกรดและด่างเรียกว่าฮิวมิน ส่วนที่ตกตะกอนในกรดแต่ละลายในด่างเรียกว่ากรดฮิวมิก และส่วนที่ละลายทั้งในกรดและด่างเรียกว่ากรดฟัลวิก (ภาพที่ 2) ซึ่งคุณสมบัติการละลายนี้บ่งบอกถึงคุณลักษณะเชิงโครงสร้างที่มีสัดส่วนธาตุองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันในปริมาณแตกต่างกัน อันนำไปสู่คุณสมบัติในการปรับปรุงดินที่แตกต่างกันไปด้วย มีรายละเอียดเชิงโครงสร้างของสารฮิวมิกประเภทต่าง ๆ พร้อมคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการดังนี้

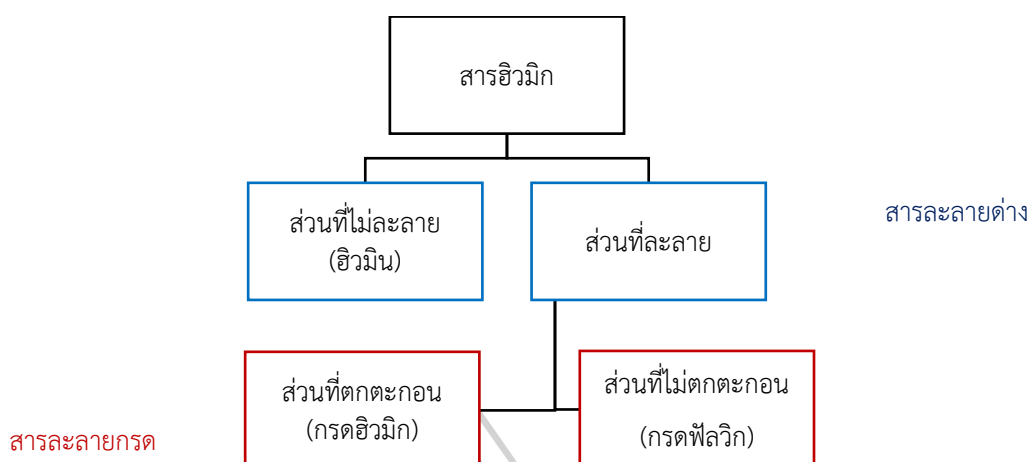
2.1.1 กรดฟัลวิก

กรดฟัลวิกมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กที่สุด มีจำนวนโมเลกุลอยู่ในช่วง 180 – 10,000 โมเลกุล ในสารละลายดินหรือปุ๋ยจึงมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ขนาดเล็กสีเหลืองถึงน้ำตาล

ตารางที่ 1 คุณลักษณะปุ๋ยหมักอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร เพื่อการจำหน่าย

ลำดับ	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด	
		ปุ๋ยหมักเกรด 1	ปุ๋ยหมักเกรด 2
1	ขนาดของปุ๋ย	≤ 12.5×12.5 มิลลิเมตร	
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	≤ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	
3	ปริมาณหิน และกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ≤ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ	ต้องไม่มี	
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	≥ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	≥ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
6	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5 – 8.5	ไม่กำหนด
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	≤ 20:1	
8	ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	≤ 10 เดซิซีเมน/เมตร	
9	ปริมาณโซเดียม (Na)	≤ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	
10	ปริมาณธาตุอาหารหลัก - ไนโตรเจน (total N) - ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅) - โพแทสเซียม (total K ₂ O)	- ≥ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก - ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก - ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	- ≥ ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก - ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก - ≥ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก - หรือรวมกัน ≥ ร้อยละ 2.0
11	การย่อยสลายที่สมบูรณ์	≥ ร้อยละ 80	
12	ปริมาณธาตุโลหะหนัก - สารหนู (As) - แคดเมียม (Cd) - โครเมียม (Cr) - ทองแดง (Cu) - ตะกั่ว (Pb) - ปรอท (Hg)	- ≤ 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม - ≤ 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม - ≤ 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม - ≤ 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม - ≤ 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม - ≤ 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม	

ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมพัฒนาที่ดิน (2556); กรมวิชาการเกษตร (2557)



ภาพที่ 2 การสกัดแยกส่วนของสารฮิวมิกในดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Stevenson (1994)

(ภาพที่ 3) มีสัดส่วนปริมาณคาร์บอนอะตอมต่อออกซิเจนอะตอมน้อยหมายถึงมีปริมาณออกซิเจนมาก โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายแอลิฟาติก (aliphatic) ที่มีโครงสร้างแโรแมติก (aromatic) ปะปนอยู่บ้าง ดังภาพที่ 4 มีสูตรโมเลกุลเฉลี่ยคือ $C_{12}H_{12}O_9N$ ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอกซิล (-COOH) เป็นส่วนใหญ่ จึงมีค่าความเป็นกรดสูงเมื่อแตกตัวจะละลายได้ทั้งในกรดและด่าง (Stevenson, 1994) มักถูกพาไปไกลจากแหล่งกำเนิด จึงจัดเป็นโครงสร้างที่ไม่คงทนในดิน มีความเสถียรน้อยที่สุดในกลุ่มสารฮิวมิก อย่างไรก็ตาม กรดฟัลวิกเป็นรูปแบบแรกที่เกิดขึ้นหลังการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนที่จะเกิดโครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่าได้แก่ กรดฮิวมิก และยังเป็นรูปแบบที่เมื่อสารตั้งต้นหมดไปกรดฮิวมิกจะสลายกลายเป็นโครงสร้างที่เล็กลงของกรดฟัลวิกก่อนที่สิ่งมีชีวิตจะนำไปใช้ในลักษณะของธาตุอาหาร (Wang et al., 2019; Yu et al., 2019; Zhou et al., 2014)

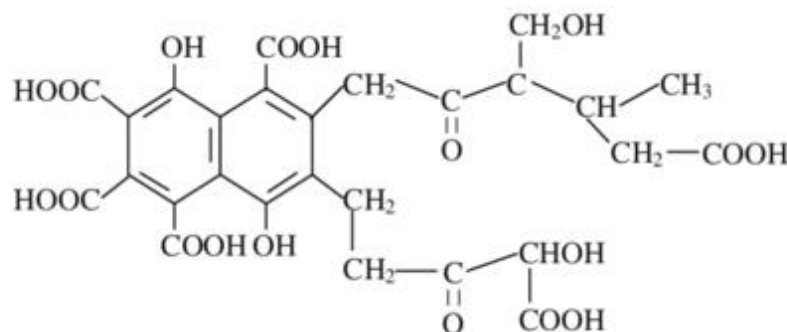
2.1.2 กรดฮิวมิก

กรดฮิวมิกมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่กว่ากรดฟัลวิกแต่เล็กกว่าฮิวมิน มีจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 100 – หลายล้าน โมเลกุล มีลักษณะเป็นคอลลอยด์สีน้ำตาลเข้มจนถึงสีเทา ดำ และมีปริมาณคาร์บอนมากแต่ปริมาณออกซิเจนน้อย โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวนแโรแมติก

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

ภาพที่ 3 คุณลักษณะของสารฮิวมิก

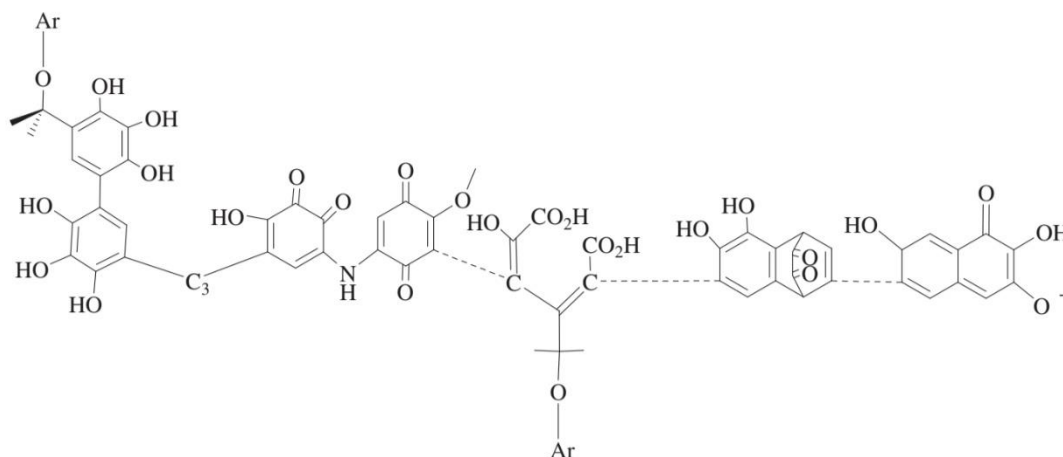
ที่มา: Stevenson (1994)



ภาพที่ 4 โครงสร้างกรดฟัลวิก

ที่มา: Wang and Mulligan (2006)

และแอลิแฟติก ดังภาพที่ 5 มีสูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยของสารฮิวมิก คือ $C_{10}H_{12}O_5N$ (Stevenson, 1994) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันฟีนอลิก (Ar-OH) ทำให้ละลายได้ดีในสารละลายต่างแต่ตกตะกอนในกรดจึงมีความคงทนในดินอยู่ช่วยในการบำรุงดินได้นานกว่ากรดฟัลวิก นอกจากนี้คุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนของธาตุอาหารพืชได้ จึงช่วยตรึงและทยอย



ภาพที่ 5 โครงสร้างกรดฮิวมิก

ที่มา: Al-Faiyz (2017)

ปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืช ทำให้กรดฮิวมิกมีบทบาทสำคัญในการศึกษาเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักและคุณภาพสารอินทรีย์ในดิน (Behravan et al., 2020; Gayathri et al., 2019; Machado et al., 2020; Song et al., 2018)

2.1.3 ฮิวมิน

ฮิวมินเป็นสารฮิวมิกชนิดหนึ่งที่มีสีดำและโครงสร้างขนาดใหญ่ที่สุดแต่ไม่ค่อยมีบทบาทในดินเหมือนสารฮิวมิกอื่น ๆ เพราะมีหมู่ฟังก์ชันน้อย โดยโครงสร้างมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับกรดฮิวมิกแต่มีวงแหวนแอโรแมติกน้อยกว่าและโครงสร้างภายในเป็นหมู่เอสเทอร์ อีกทั้งสายไฮโดรเจนคาร์บอนที่ยาวต่อกันไปเรื่อย ๆ ไม่สามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่างคงทนมากยากต่อการย่อยสลายจึงไม่ค่อยทำปฏิกิริยาและมีบทบาทในดิน (Stevenson, 1994) มักไม่นิยมนำมาศึกษาในเชิงศักยภาพในการปรับปรุงดิน

จากคุณสมบัติของสารฮิวมิกทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่ากรดฮิวมิกมีความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดินมากที่สุดเนื่องจากพบในปริมาณมากและมีความเสถียรในสิ่งแวดล้อมถูกชะออกได้ยาก กรดฮิวมิกมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน (ตารางที่ 2) เช่น ทางกายภาพจะรักษาเสถียรภาพและโครงสร้างของดินเพิ่มความพรุนในดินทำให้โครงสร้างในชั้นดินมีการระบายอากาศและน้ำได้ดี ทางเคมีหมู่ฟังก์ชันของสารฮิวมิกสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ตารางที่ 2 ประโยชน์ของกรดฮิวมิก

ประโยชน์ของกรดฮิวมิก	
ประโยชน์ทางกายภาพ	รักษาเสถียรภาพและโครงสร้างของดิน
	ทำให้โครงสร้างในชั้นดินมีการระบายอากาศได้ดีขึ้น
	ช่วยเพิ่มความสามารถการอุ้มน้ำในดินให้พืชไว้ใช้
ประโยชน์ทางเคมี	มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง และทำให้สามารถดูดซับธาตุอาหารไม่ให้ถูกชะล้างได้ง่าย
	มีความสามารถในการกระตุ้น และยับยั้งการดูดใช้ไอออนของพืช ซึ่งทั้งนี้จะเป็นผลมาจากความเข้มข้นของกรดฮิวมิก
	กรดฮิวมิกกระตุ้นการลำเลียงน้ำในพืชและลดการสูญเสียน้ำจากใบ
	กรดฮิวมิกมีอิทธิพลในการเพิ่มอัตราการหายใจของพืชบางชนิด เช่น ข้าวบาร์เลย์ มะเขือเทศ
	ช่วยเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดพืชหลายชนิด
	ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างอย่างฉับพลันของดิน
ประโยชน์ทางชีวภาพ	เป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชและจุลินทรีย์ในดิน
	ทำให้จุลินทรีย์ในดินเจริญอย่างรวดเร็ว
	เพิ่มปฏิกิริยาของน้ำย่อยในพืชโดยเฉพาะกิจกรรมของน้ำย่อย phosphorylase ในข้าวสาลี

ที่มา: ข้อมูลจาก ภาควิชาปฐพีวิทยา (2541); ยงยุทธ โอสดสภา (2564)

ได้ช่วยตรึงไอออนธาตุอาหารประจวบกับการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารให้แก่พืช นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่างในดิน ช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างได้ในช่วงแคบ ๆ ทำให้ปฏิกิริยาในดินดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง ทางชีวภาพเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชและจุลินทรีย์ในดิน ทำให้จุลินทรีย์เติบโตอย่างรวดเร็วซึ่งกรดฮิวมิกนี้เมื่อถูกย่อยสลายต่อดินจะให้ธาตุอาหารอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

2.2 ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก

ดัชนีการเกิดสารฮิวมิกเป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมักซึ่งมีทั้งโครงสร้างขนาดเล็ก ได้แก่ กรดฟลวิก และโครงสร้างขนาดใหญ่ ได้แก่ กรดฮิวมิกต่อสัดส่วนเชิงปริมาณของวัตถุดิบตั้งต้นในรูปปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่มักลดลงไปในกระบวนการหมักอย่างต่อเนื่อง โดยสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรมากต่อสัดส่วนที่มีความเสถียรน้อยยังนำมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพของปุ๋ยหมักที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ได้อีกด้วย

ดัชนีการเกิดสารฮิวมิกในงานวิจัยนี้ จึงประกอบด้วย 1) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก 2) ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก และ 3) ระดับการเกิดพอลิเมอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (Humification Ratio: HR)

สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกได้จากผลรวมของปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon; TOC) ดังสมการที่ 4 (Lahsaini et al., 2017) หมายถึงปริมาณสารฮิวมิกต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุตั้งต้น เมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงเกิดสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ที่มีความเสถียร เช่น สารฮิวมิกเพิ่มมากขึ้น

$$HR (\%) = \frac{HA+FA}{TOC} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ HR = สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (ร้อยละ)
 HA = ปริมาณกรดฮิวมิก (กรัม/กิโลกรัม)
 FA = ปริมาณกรดฟัลวิก (กรัม/กิโลกรัม)
 TOC = ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (กรัม/กิโลกรัม)

2.2.2 ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Humification Index: HI)

ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกบ่งบอกถึงสัดส่วนปริมาณกรดฮิวมิกที่เสถียรที่เกิดขึ้นต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด ดังสมการที่ 5 (Lahsaini et al., 2017) ซึ่งกรดฮิวมิกละลายได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด สำหรับสภาพแวดล้อมทางดินและปุ๋ยที่มีสภาวะเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อยทำให้กรดฮิวมิกค่อนข้างคงตัวและมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินไม่ถูกชะจากดินโดยง่าย (Tan, 2003)

$$HI (\%) = \frac{HA}{TOC} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ HI = ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (ร้อยละ)
 HA = ปริมาณกรดฮิวมิก (กรัม/กิโลกรัม)
 TOC = ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (กรัม/กิโลกรัม)

2.2.3 ระดับพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization Degree: PD)

ระดับพอลิเมอไรเซชันบ่งบอกถึงสัดส่วนปริมาณสารอิวมิกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีความเสถียรมากของกรดอิวมิกต่อสารอิวมิกที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและมีเสถียรภาพน้อยกว่าของกรดฟัลวิก ดังสมการที่ 6 (Lahsaini et al., 2017) หากมีค่าระดับพอลิเมอไรเซชันมากหมายถึงเกิดสารอิวมิกที่มีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมมาก ช่วยในการปรับปรุงดินได้นานไม่ถูกย่อยสลายได้ง่าย

$$PD (\%) = \frac{HA}{FA} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ PD = ระดับพอลิเมอไรเซชัน (ร้อยละ)
 HA = ปริมาณกรดอิวมิก (กรัม/กิโลกรัม)
 FA = ปริมาณกรดฟัลวิก(กรัม/กิโลกรัม)

2.3 ธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ และระดับออกซิเดชันภายในของกรดอิวมิก

กรดอิวมิกเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน ธาตุออกซิเจน และธาตุไนโตรเจน ผสมด้วยธาตุอื่นเล็กน้อย เช่น ซัลเฟอร์ เป็นต้น ในระหว่างกระบวนการหมักกรดอิวมิกมีการสร้างและสลายเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างและเสถียรภาพของโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป เช่น พันธะเดี่ยวเปลี่ยนเป็นพันธะคู่ โครงสร้างแอลิแพติกเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแอโรแมติก รวมถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งระดับออกซิเดชันที่เป็นการคำนวณสัดส่วนของอะตอมธาตุองค์ประกอบจะช่วยศึกษาแนวโน้มกระบวนการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดอิวมิกผ่านกระบวนการออกซิเดชันและ/หรือรีดักชัน อันสะท้อนถึงคุณภาพสารอิวมิก ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ในเชิงเปรียบเทียบได้อีกด้วย

2.3.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดอิวมิก

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดอิวมิกอธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดอิวมิกได้ โดยกระบวนการย่อยสลายโครงสร้างที่ย่อยสลายยาก เช่น ลิกนินปลดปล่อยปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการหมักช่วงระยะอุณหภูมิสูงอาจมีการนำไนโตรเจนไปใช้ทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงได้ ขณะที่ในปุ๋ยที่มีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอจะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนที่เสถียรในโครงสร้างในช่วงที่ปุ๋ยเย็นตัวลง ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนที่ลดลงในกระบวนการหมักมักบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างแอโรแมติกที่มี

ความเสถียรมากขึ้น และการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างที่มักแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Amir et al., 2010; Hanc et al., 2019; Liu et al., 2020; Zhu et al., 2018)

ในการศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของธาตุองค์ประกอบของปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ (Amir et al., 2010) ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย (Zhu et al., 2018) ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด (Han et al., 2022) และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบ (Liu et al., 2020) (ตารางที่ 3) พบว่าปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์และตะกอนน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักอะตอมค่อนข้างต่ำเฉลี่ยร้อยละ 29.59 และ 30.86 ตามลำดับแต่มีปริมาณไนโตรเจนโดยน้ำหนักอะตอมค่อนข้างสูงเฉลี่ยร้อยละ 3.76 และ 3.89 ตามลำดับ การเติมแกลบในตะกอนน้ำเสียเพิ่มปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนโดยน้ำหนักอะตอมเฉลี่ยร้อยละ 33.45 และ 4.52 ตามลำดับ ขณะที่ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักอะตอมเฉลี่ยร้อยละ 31.48 และมีปริมาณไนโตรเจนโดยน้ำหนักอะตอมเฉลี่ยต่ำที่สุดคิดเป็นร้อยละ 2.87

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปริมาณคาร์บอนโดยน้ำหนักอะตอมเพิ่มขึ้นในปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย และปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 1.68, 3.92 และ 9.33 ตามลำดับ และลดลงเล็กน้อยในปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียและแกลบร้อยละ 2.08 ซึ่งจากโครงสร้างของแกลบที่ย่อยสลายยากเมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายในช่วงแรกอาจเกิดโครงสร้างที่มีพฤติกรรมคล้ายสารชีวโมเลกุลสามารถถูกย่อยสลายต่อไปในช่วงที่ปุ๋ยเย็นตัวลง (Wang et al., 2019; Zhou et al., 2014) โดยเฉพาะในปุ๋ยที่มีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอ โดยในกระบวนการย่อยสลายส่วนใหญ่จะเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้าง ในปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนที่เสถียรในโครงสร้างมากกว่าปุ๋ยอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 24.04 โดยน้ำหนักอะตอมรองลงมาคือปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียมีปริมาณไนโตรเจนโดยน้ำหนักอะตอมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 9.86 และ 6.05 ตามลำดับ สำหรับปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพดในช่วง 15 วันแรกปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงจากสูญเสียไนโตรเจนอะตอมในรูปของแก๊สแอมโมเนียในระยะเวลาเริ่มต้นของกระบวนการหมัก โดยจะปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ในวันที่ 30 (Han et al., 2022)

สำหรับปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีปริมาณไนโตรเจนโดยน้ำหนักอะตอมเฉลี่ย 49.42, 50.75, 53.27 และ 46.13 ตามลำดับ และกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย และ

ตารางที่ 3 ร้อยละปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักโดยน้ำหนักอะตอม

ชนิดปุ๋ยหมัก	ระยะเวลา (วัน)	C	H	O	N	S
		ร้อยละโดยน้ำหนักอะตอม				
ปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ¹	0	29.12	49.99	17.16	3.55	0.18
	15	29.65	49.70	16.68	3.81	0.16
	60	29.99	49.33	16.67	3.79	0.23
	135	29.61	48.66	17.55	3.90	0.28
	เฉลี่ย	29.59	49.42	17.02	3.76	0.21
ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ²	0	30.30	51.35	14.55	3.80	-
	10	30.63	51.05	14.48	3.84	-
	30	31.00	50.63	14.48	3.89	-
	70	31.49	49.98	14.50	4.03	-
	เฉลี่ย	30.86	50.75	14.50	3.89	-
ปุ๋ยหมักมูลไก่+ต้นข้าวโพด ³	0	29.68	51.03	15.77	3.51	-
	2	32.80	55.53	8.32	3.35	-
	5	29.06	57.12	10.93	2.89	-
	10	33.06	54.47	9.88	2.59	-
	15	31.63	51.25	14.91	2.21	-
	22	31.67	51.53	14.49	2.31	-
	30	32.45	51.96	12.33	3.26	-
	เฉลี่ย	31.48	53.27	12.38	2.87	-
	ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย+แกลบ ⁴	0	34.06	47.91	14.12	3.91
7		33.65	48.59	14.03	3.72	-
18		32.38	46.43	15.77	5.42	-
27		33.83	44.17	17.31	4.69	-
45		33.35	43.53	18.27	4.85	-
เฉลี่ย		33.45	46.13	15.90	4.52	-

ที่มา: ข้อมูลจาก ¹Amir et al. (2010); ²Zhu et al. (2018); ³Han et al. (2022); ⁴Liu et al. (2020)

ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบลดปริมาณธาตุไนโตรเจนลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักถึงร้อยละ 2.66, 2.67 และ 9.14 ตามลำดับ แต่ปริมาณไนโตรเจนของปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพดกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 1.82 โดยน้ำหนักอะตอม

ขณะที่ปริมาณออกซิเจนอะตอมในปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีปริมาณเฉลี่ย 17.02, 14.50, 12.38 และ 15.90 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการหมักเพิ่มปริมาณออกซิเจนในปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบคิดเป็นร้อยละ 2.27 และ 29.39 ตามลำดับ และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียมีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างคงที่โดยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักมีปริมาณออกซิเจนโดยน้ำหนักอะตอมต่ำลงเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 0.34 แต่ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพดมีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างแปรปรวนในช่วงระยะอุณหภูมิสูง โดยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักวันที่ 30 ซึ่งเป็นวันที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ ปริมาณออกซิเจนโดยน้ำหนักอะตอมลดลงจากวันเริ่มกระบวนการหมักคิดเป็นร้อยละ 21.81

อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนส่วนใหญ่มักเป็นไปในทางเดียวกันคือเพิ่มมากขึ้นเมื่อกระบวนการหมักนานขึ้นและอาจมีบ้างที่ปุ๋ยบางชนิดมีค่าลดลง ดังนั้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงต้องนำไปเปรียบเทียบในเชิงอัตราส่วนของปริมาณออกซิเจนต่อคาร์บอนโดยน้ำหนักอะตอมเพื่อให้เกิดความชัดเจนมากขึ้น เช่นเดียวกับอัตราส่วนของคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอมที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างที่เสถียรเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนลดลง และอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอมที่แสดงถึงการเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนอะตอมในโครงสร้างที่มาจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น ซึ่งอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบเหล่านี้จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.3.2 อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก

การเพิ่มและลดลงของธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และไนโตรเจน แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิก โดยปริมาณคาร์บอนที่มีมากที่สุด ในสารอินทรีย์เฉลี่ยถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Tan, 2003) เป็นธาตุหลักในโครงสร้างที่สำคัญต่อการนำมาหาสัดส่วนเชิงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอะตอมเทียบกับอะตอมของธาตุในโครงสร้างที่เหลือ

โดยอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H) แสดงถึงแนวโน้มการเกิดโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้นเมื่อมีการสูญเสียไฮโดรเจนออกไปในการเกิดพันธะ ดังนั้นค่าที่เพิ่มขึ้นจึงหมายถึงการเกิดโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมที่มีความเสถียรมากขึ้น เช่น โครงสร้างแอมโรแมติก เป็นต้น (Amir et al., 2010) มีช่วงของอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม และลักษณะโครงสร้างที่พบ ดังนี้ (Wang et al. (2023) อ้างตาม Van Krevelen (1950))

อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H)	ลักษณะโครงสร้างที่เป็นลักษณะเด่น
~ 3.3	โครงสร้างแอมโรแมติก
~ 1.42	โครงสร้างโมโนไซคลิกแอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอน
0.7 – 1.42	โครงสร้างแอมโรแมติกที่ต่อกับโครงสร้างแอลิแพติกที่มีจำนวนคาร์บอนได้มากถึง 10 อะตอม
0.6 – 0.7	โครงสร้างอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน
~ 0.5	โครงสร้างพาราฟิน

อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C) มักหมายถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างกรดฮิวมิกที่มีการเพิ่มโครงสร้าง O-alkyl คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ฟังก์ชันที่มีปริมาณออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (COOH) และฟีนอลิก (OH) (Amir et al., 2010; Hanc et al., 2019; Zhu et al., 2018) ดังนั้นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนธาตุอาหารที่มีประจุ และคุณสมบัติการละลายได้ดียิ่งขึ้น (Domeizel et al., 2004; Gong et al., 2020) สำหรับกรดฮิวมิกที่ละลายได้ในน้ำต่างเท่านั้นพบว่าตัวอย่างในดินและปุ๋ยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 - 0.6 และกรดฟัลวิกที่ละลายได้ดีทั้งในกรดและด่างพบได้ในช่วงที่สูงกว่า 0.5 – 0.8 (Huang et al., 2006; Tan, 2003)

อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอม (C/N) หมายถึงการเพิ่มอะตอมไนโตรเจนที่เสถียรในโครงสร้างกรดฮิวมิกจากการย่อยสลายวัตถุดิบที่มีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบ มักเกิดได้ดีเมื่อมีในวัตถุดิบตั้งต้นที่มีไนโตรเจนเพียงพอ สำหรับวัตถุดิบตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เช่น เศษไม้ เปลือกไม้ ใบไม้ กระบวนการหมักจะทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง (Amir

et al., 2010; Fukushima et al., 2009) แต่วัตถุดิบตั้งต้นที่มีมลัสต์ว์เป็นองค์ประกอบหลักมักมียูเรียที่ปะปนมากับปัสสาวะ ทำให้สัดส่วนนี้มีค่าเริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำกว่า เมื่อย่อยสลายอาจทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้นได้ (Li et al., 2020)

ในการศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบ (ตารางที่ 4) พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอะตอมเฉลี่ย 0.59, 0.61, 0.59 และ 0.72 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอะตอมในปุ๋ยหมักทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการหมักร้อยละ 3.33, 7.94, 6.45 และ 5.33 ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้นแสดงถึงการเกิดโครงสร้างกรดฮิวมิกที่เสถียรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกรณีศึกษาปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย และปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพดจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากพาราฟินไปเป็นโครงสร้างโครงสร้างอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักทั้งสองสูตรจะเพิ่มจาก 0.58 ไปเป็น 0.60, 0.63 และ 0.62 ตามลำดับ ส่วนปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นสูงกว่า จะเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มโครงสร้างแอโรแมติกที่ต่อกับโครงสร้างแอลิแพติกมากขึ้น โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มจาก 0.71 เป็น 0.75 (Wang et al., 2023)

อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอมของปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีค่าเฉลี่ย 0.58, 0.47, 0.40 และ 0.48 ตามลำดับ โดยปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย และปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด มีปริมาณอัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอมลดลงโดยเฉพาะในช่วงแรกบ่งชี้ว่ามีการย่อยสลายของสารประกอบโพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนสูงในวัตถุดิบตั้งต้นโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้ในช่วงท้ายของกระบวนการหมัก เช่น ในปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ และแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตลอดกระบวนการหมักของปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25.45 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มออกซิเจนที่เสถียรในโครงสร้างสารฮิวมิก เช่น การเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกและฟีนอลิกในโครงสร้างแอโรแมติก (Amir et al., 2010; Hanc et al., 2019; Zhu et al., 2018)

อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอมของปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีค่าเฉลี่ย 7.91, 7.94, 11.29 และ 8.07 ตามลำดับ ซึ่งปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย และปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 4 อัตราส่วนอะตอมธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมัก

กรดฮิวมิก	อายุ (วัน)	C/H	O/C	C/N
ปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ¹	0	0.58	0.59	8.22
	15	0.59	0.56	7.82
	60	0.60	0.56	7.97
	135	0.60	0.59	7.62
	เฉลี่ย	0.59	0.58	7.91
ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ²	0	0.58	0.48	7.98
	10	0.60	0.47	7.97
	30	0.61	0.47	7.98
	70	0.63	0.46	7.81
	เฉลี่ย	0.61	0.47	7.94
ปุ๋ยหมักมูลไก่+ต้นข้าวโพด ³	0	0.58	0.53	8.46
	2	0.59	0.25	9.79
	5	0.51	0.38	10.06
	10	0.61	0.30	12.75
	15	0.62	0.47	14.31
	20	0.61	0.46	13.73
	30	0.62	0.38	9.95
	เฉลี่ย	0.59	0.40	11.29
	ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย+ แกลบ ⁴	0	0.71	0.41
7		0.69	0.42	9.05
18		0.69	0.49	8.55
27		0.75	0.51	7.23
45		0.75	0.55	6.77
เฉลี่ย		0.72	0.48	8.07

ที่มา: ข้อมูลจาก ¹Amir et al. (2010); ²Zhu et al. (2018); ³Han et al. (2022); ⁴Liu et al. (2020)

ตะกอนน้ำเสียผสมแกลบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นคิดเป็นร้อยละ 7.30, 2.13 และ 22.45 ตามลำดับ สำหรับปุ๋ยหมักมูลไก่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจากการสูญเสียไนโตรเจนอะตอม ในระยะอุณหภูมิสูงจากนั้นกระบวนการย่อยสลายเปลี่ยนไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่เสถียรเพิ่มขึ้นใน โครงสร้างของกรดฮิวมิคทำให้อัตราส่วนนี้มีค่าลดลงจากช่วงระยะอุณหภูมิสูงเหลือ 9.95 แต่ยังมีค่าสูง กว่าวันเริ่มผสมเล็กน้อยที่มีค่า 8.46 ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอัตราส่วนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น ร้อยละ 14.97 ดังนั้นปุ๋ยหมักที่มีปริมาณไนโตรเจนที่อุดมสมบูรณ์เพียงพอต่อความต้องการของ จุลินทรีย์จะทำให้เกิดการเพิ่มของปริมาณไนโตรเจนอะตอมที่เสถียรในโครงสร้างของกรดฮิวมิค แต่ หากวัตถุดิบตั้งต้นมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอหรือทิ้งปุ๋ยหมักไว้นานเกินไปจนจุลินทรีย์ใช้วัตถุดิบตั้ง ต้นหมดไป จุลินทรีย์จะยังคงนำไนโตรเจนของกรดฮิวมิคไปใช้และทำให้อัตราส่วนนี้ลดลงได้

2.3.3 ระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิค

ระดับออกซิเดชันภายใน (internal oxidation; ω) เป็นพารามิเตอร์สำคัญใน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิคช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายใน โครงสร้างของกรดฮิวมิคได้ โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณธาตุองค์ประกอบสัมพันธ์กับการ ย่อยสลายและปฏิกิริยาออกซิเดชันของโครงสร้างกรดฮิวมิค ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 4 (Tan, 2003) โดยระดับออกซิเดชันภายในมีค่า เพิ่มขึ้นหมายถึงการย่อยสลายวัตถุดิบตั้งต้นเกิดการสูญเสียหมู่เมทิล ($-CH_3$) ด้วยกระบวนการ ออกซิเดชันเพิ่มออกซิเจนในโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับออกซิเดชัน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ในกระบวนการหมัก ค่าที่เป็นบวกจึงมักหมายถึงปุ๋ยหมักมีการระบายอากาศที่ดี เกิด การเพิ่มออกซิเจนในโครงสร้างกรดฮิวมิคด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ขณะที่ค่าติดลบแสดงสภาวะ ไร้ดักชั้นซึ่งส่วนใหญ่มักพบได้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมัก และอาจต่อเนื่องไปในระยะอุณหภูมิ สูงจนไปมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่

$$\omega = \frac{(2O+3N)-H}{C} \quad (4)$$

การศึกษาเปรียบเทียบระดับการเกิดออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิคของปุ๋ยหมัก ขยะอินทรีย์ ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมักมูลไก่ผสมต้นข้าวโพด และปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสียผสม แกลบ พบว่าค่าเริ่มต้นมีค่าติดลบเล็กน้อย เป็น -0.17, -0.36, -0.30 และ -0.23 ตามลำดับ (ตารางที่ 5) จากโครงสร้างเริ่มต้นที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสูง เมื่อกระบวนการหมักมีระยะเวลานานขึ้น

ปริมาณไฮโดรเจนลดลงจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว เช่น $C=O$ และ $C=C$ ในขณะที่โครงสร้าง $C-H$ ลดลง สำหรับปฏิกิริยาอินทรีย์ ปฏิกิริยาตะกอนน้ำ และปฏิกิริยาตะกอนน้ำเสียผสม แกลบมีค่าระดับออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็น -0.07 , -0.28 และ 0.23 ตามลำดับ (ตารางที่ 5) จากการเพิ่มออกซิเจนอะตอมและไนโตรเจนอะตอมในโครงสร้าง (ตารางที่ 3) โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนปริมาณมาก สำหรับหมู่ไคโสมต้นข้าวโพดมีการสูญเสียของโครงสร้าง $-OH$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของพินอลและแอลกอฮอล์ในโครงสร้างเริ่มต้นของกระบวนการหมัก แม้จะมีการเพิ่มโครงสร้าง $C=O$ และ $C=C$ ในโครงสร้างแต่โครงสร้าง $C=C$ จะเป็นโครงสร้างที่เด่นและทำให้ปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 3) ทำให้ระดับออกซิเดชันลดลงเล็กน้อยเป็น -0.54 (ตารางที่ 5)

2.4 อัตรารังสีอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี

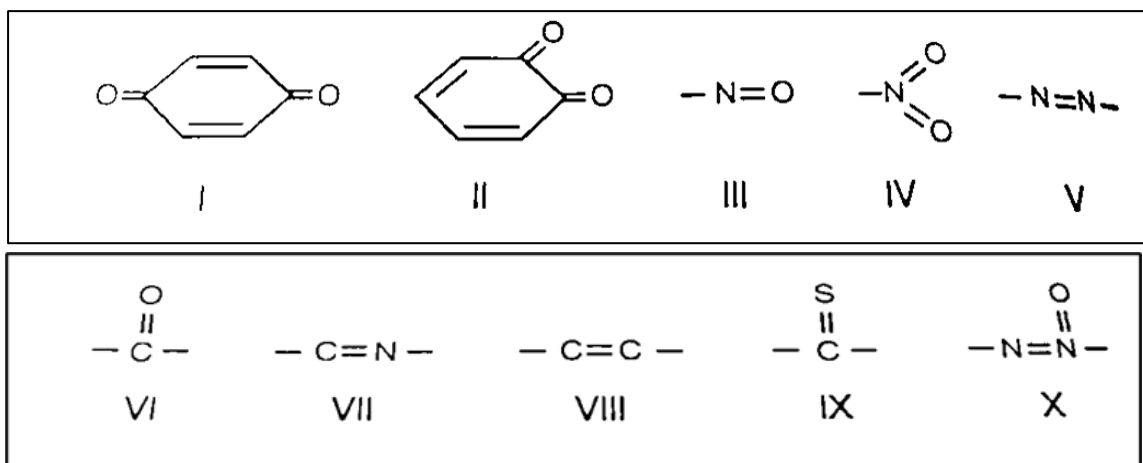
สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคการวัดการดูดกลืนสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาสารอินทรีย์ในดินโดยเฉพาะสารฮิวมิก เนื่องจากเทคนิคนี้ใช้ตัวอย่างในปริมาณน้อย และไม่ทำลายโครงสร้างของตัวอย่าง โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีที่พบได้ทั่วไป ได้แก่ อัตรารังสีอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-Visible Spectroscopy) ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Fluorescence Spectroscopy) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เป็นต้น

ในการศึกษานี้ใช้เทคนิคอัตรารังสีอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นการดูดกลืนคลื่นพลังงานของโมเลกุลช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิล ในช่วงความยาวคลื่น $200-800$ นาโนเมตร (nm) จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น (Stevenson, 1994) วัดปริมาณการดูดกลืนคลื่นแสงที่แปรตามปริมาณโครงสร้างที่มีลักษณะจำเพาะ ณ ช่วงคลื่นต่าง ๆ และเรียกโครงสร้างเหล่านี้ว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งโครงสร้างที่ดูดกลืนคลื่นแสงได้นี้ประกอบด้วยพันธะที่ไม่อิ่มตัวที่ เช่น $C=C$, $C\equiv C$, $C=O$, $N=O$, $C\equiv X$, ($X=Br, I$) และวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) เป็นต้น (Radwan et al., 2019) ดังภาพที่ 6 นอกจากนี้การเพิ่มของหมู่ฟังก์ชัน เช่น $-OH$, $-NH_2$ และ $-Cl$ แม้ไม่ดูดกลืนแสงแต่ส่งเสริมอิทธิพลของโครโมฟอร์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นและความเข้มของการดูดกลืนแสงได้เรียกหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ว่า ออกโซโครม (auxochrome) ดังนั้นการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างจึงควรควบคู่ไปกับการเปลี่ยนธาตุองค์ประกอบ และสัดส่วนธาตุองค์ประกอบเพื่ออธิบายแนวโน้มการเกิดหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวร่วมด้วย

ตารางที่ 5 ระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิก (ω)

กรดฮิวมิก	อายุ (วัน)	ω
ปุ๋ยหมักขยะอินทรีย์ ¹	0	-0.17
	15	-0.17
	60	-0.16
	135	-0.07
ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย ²	0	-0.36
	10	-0.34
	30	-0.32
	70	-0.28
ปุ๋ยหมักมูลไก่+ต้นข้าวโพด ³	0	-0.30
	2	-0.88
	5	-0.91
	10	-0.81
	15	-0.47
	20	-0.49
	30	-0.54
ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย+แกลบ ⁴	0	-0.23
	7	-0.28
	18	0.04
	27	0.13
	45	0.23

ที่มา: ข้อมูลจาก ¹Amir et al. (2010); ²Zhu et al. (2018); ³Han et al. (2022); ⁴Liu et al. (2020)



ภาพที่ 6 โครงสร้างโครโมฟอร์ (chromophore) ของกรดฮิวมิก

ที่มา: Stevenson (1994)

เทคนิคอัตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ความแตกต่างของความเข้มแสงก่อนและหลังที่ส่องผ่านตัวอย่าง โดยความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนไปจะแปรตามปริมาณความเข้มข้นของโครงสร้างโครโมฟอร์ที่สามารถดูดกลืนรังสี ณ ช่วงความยาวคลื่นนั้น ๆ คำนวนได้จากสมการของเบียร์และแลมเบิร์ต ดังสมการที่ 5

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon cb \quad (5)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance)

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนที่ผ่านไปยังตัวเซลล์ตัวอย่าง

I = ความเข้มของแสงหลังที่ผ่านไปยังตัวเซลล์ตัวอย่าง

c = ความเข้มข้นมีหน่วยเป็นโมลาร์ (molar) ของตัวถูกละลาย

b = ความยาวเป็นเซนติเมตร (cm) ของเซลล์ตัวอย่าง

ϵ = โมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของโมเลกุลของสารบ่งบอกถึงกำลังความสามารถในการดูดกลืนรังสี

I_0 หมายถึง ค่าการดูดกลืนคลื่นรังสี (absorbance) หรือ optical density มักใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น A สำหรับ molar absorptivity หรือ molar extinction coefficient มักใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น ϵ เป็นค่าคงที่เฉพาะของสารแต่ละชนิดโดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการ

เปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นหรือสภาวะอื่น ๆ ของสาร เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ชนิดของตัวทำละลาย เป็นต้น (ชัยวัฒน์ วามวรรรัตน์, 2564)

นอกจากนี้การศึกษาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญยังหมายถึงการเกิดขึ้นและ/หรือหายไปของโครงสร้างหนึ่งไปเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งซึ่งแสดงถึงวิวัฒนาการของสารชีวโมเลกุลในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ดัชนีเชิงแสงและการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดชีวโมเลกุล

การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซีเบิลของสารอินทรีย์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ที่ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและวิซีเบิลสามารถนำมาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดชีวโมเลกุลได้ โดยความยาวคลื่น 200 – 230 นาโนเมตร แสดงให้เห็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ ช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร แสดงถึงสารตั้งต้นในกระบวนการสร้างกรดชีวโมเลกุล ช่วงความยาวคลื่น 300 – 365 นาโนเมตร แสดงการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลในโครงสร้าง และช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร แสดงถึงโครงสร้างไม่อิ่มตัวและโครงสร้างเริ่มต้นของกรดชีวโมเลกุล มีรายละเอียดดังนี้

1) ช่วงความยาวคลื่น 200 - 230 นาโนเมตร (E_2)

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 200 - 230 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นที่แสดงถึงการย่อยสลายของสารอินทรีย์ให้เล็กลงเป็นสารอนินทรีย์ เช่น หมูไนเตรท ($-NO_2$) หมูไนไตรท์ ($-NO_3$) และหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) เป็นต้น (Domeizel et al., 2004; Li et al., 2014) นำไปสู่กระบวนการสร้างสารชีวโมเลกุลให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันในหมู่อะมิโน ($-NH_2$) (Wei et al., 2007)

2) ช่วงความยาวคลื่น 260 - 280 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 260 - 280 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่ามี การดูดกลืนของโครงสร้างแอรอแมติกและพันธะคอนจูเกต เช่น $C=C$, $C=O$ และ $N=N$ เพิ่มขึ้น (Albrecht et al., 2011; Biyada et al., 2020; Tai et al., 2022) บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลิแกนด์และควิโนน โดยเกิดการสร้างสายพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะอิเล็กทรอนิกส์ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของโครงสร้างแอรอแมติกหรือควิโนนไปเป็นโครงสร้างตั้งต้นของกระบวนการเกิดสารชีวโมเลกุล (Wei et al., 2007)

3) ช่วงความยาวคลื่น 300 - 370 นาโนเมตร (E_3)

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 300 - 365 นาโนเมตร ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลและความเป็นแอโรแมติกที่บ่งบอกการเกิดสารฮิวมิก (Amine-Khodja et al., 2006; Li et al., 2014; Peacock et al., 2014; Uyguner & Bekbolet, 2005)

4) ช่วงความยาวคลื่น 460 - 480 นาโนเมตร (E_4)

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 460 - 480 นาโนเมตร เกิดจากโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของโครงสร้างแอลิแพติกในสารฮิวมิกที่มักหมายถึงกระบวนการเริ่มต้นของการพอลิเมอร์สร้างสารฮิวมิก (Biyada et al., 2020)

2.4.2 อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงและการประเมินเสถียรภาพเชิงโครงสร้าง

ดัชนีเชิงแสงเป็นการนำอัตราส่วนความยาวคลื่นแสงศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารตั้งต้นต่อการเกิดโครงสร้างที่เสถียรมากกว่า เมื่อค่าอัตราส่วนลดลงแสดงว่ากรดฮิวมิกมีโครงสร้างเสถียรมากขึ้น โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) อัตราส่วน E_2/E_3

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 230 นาโนเมตรต่อการดูดกลืนคลื่นแสง 367 นาโนเมตร หรือเรียกว่า E_2/E_3 แสดงถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุของวัตถุดิบตั้งต้นรวมถึงการลดลงของโครงสร้างฟีนอล ซึ่งสัดส่วนที่น้อยกว่า 3.5 จะแสดงถึงการเกิดกรดฮิวมิกมากกว่ากรดฟัลวิก (Lanno et al., 2022) เมื่ออัตราส่วนมีค่าลดลงจึงบ่งบอมน้ำหนักโมเลกุลของสารฮิวมิกที่เพิ่มขึ้น (Li et al., 2014)

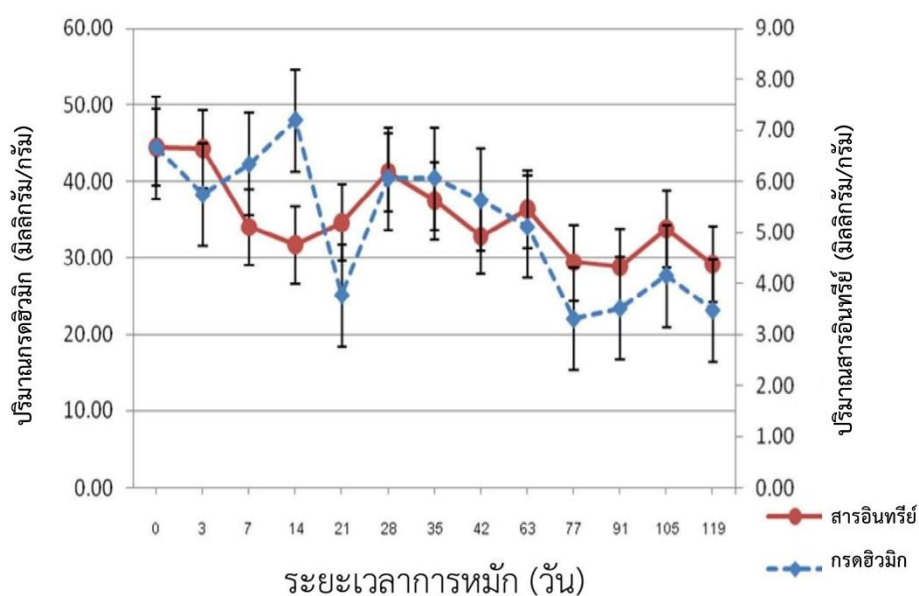
2) อัตราส่วน E_2/E_4

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 230 นาโนเมตรต่อการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 460 นาโนเมตร หรือเรียกว่าอัตราส่วน E_2/E_4 บ่งบอมน้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ไปเป็นโครงสร้างแอลิแพติก ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการเกิดกรดฮิวมิก โดยค่าที่น้อยลงแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น (Zbytniewski & Buszewski, 2005)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิริประภัสสร รัชชีย้อย (2558) ได้ทำการศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิกระหว่างการหมักปุ๋ยมูลโค ด้วยเทคนิคอัตราไวโอเลตวิชิเบลสเปกโทรสโกปี ปุ๋ยหมักมูลโคที่นำมาศึกษาเป็นปุ๋ยหมักที่จัดทำขึ้นเองโดยนำมูลโคผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หมักเป็นระยะเวลา 119 วัน จากการ

ทดสอบวัดอุณหภูมิพบว่าปุ๋ยมีระยะเจริญเต็มที่ในกระบวนการหมักวันที่ 35 ผู้วิจัยได้นำปุ๋ยมาสกัดกรดฮิวมิกเมื่อนำปุ๋ยหมักมาสกัดกรดฮิวมิกพบว่าปริมาณของกรดฮิวมิกสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุและระยะเวลาการหมัก เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุมากขึ้นทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกมีแนวโน้มลดลง ดังภาพที่ 7 แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดฮิวมิกและอินทรีย์วัตถุตลอดระยะเวลาการหมัก
ที่มา: สิริประภัสสร รัชชีย้อย (2558)

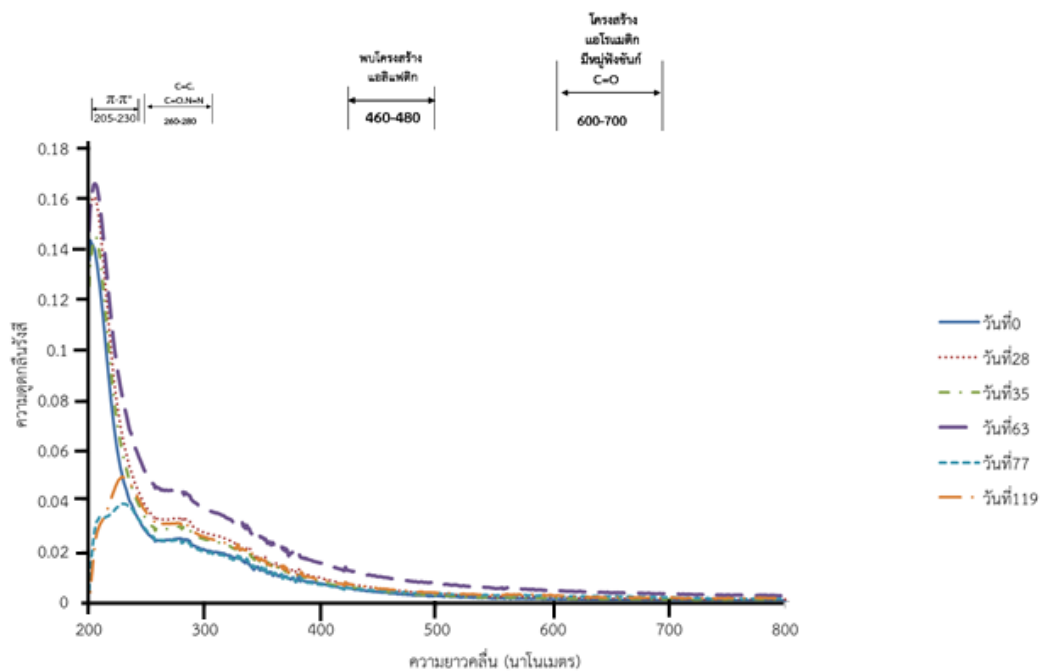
จากการศึกษาธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกพบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น (ตารางที่ 6) จากการที่จุลินทรีย์นำคาร์บอนและไนโตรเจนไปใช้ในกระบวนการย่อยสลาย ยิ่งเมื่อวัตถุดิบตั้งต้นหมดในช่วงท้ายกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไป จุลินทรีย์จะนำกรดฮิวมิกไปใช้เป็นแหล่งพลังงานแทนและทำให้ปริมาณกรดฮิวมิก (ภาพที่ 7) และปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนลดลงอย่างมาก โดยเมื่อวันสิ้นสุดกระบวนการหมักวันที่ 119 ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนเมื่อเทียบกับวันเริ่มผสมลดลงถึงร้อยละ 28.51 และร้อยละ 25.28 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) ซึ่งการลดลงของธาตุทั้งสองนี้ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9.11 - 11.26 ซึ่งกลุ่มที่มีค่าสูงจะพบในช่วงอุณหภูมิสูงและลดลงในช่วงที่อุณหภูมิเริ่มเย็นลงจนไปเข้าสู่ช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่

แตกตัวได้ดีในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 3.0 ขึ้นไป (Tan, 2003) ทำโครงสร้างกรดฮิวมิกสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น และเสถียรภาพลดลง

เมื่อพิจารณาคุณภาพปุ๋ยหมักจากคุณสมบัติและปริมาณธาตุองค์ประกอบพบว่าช่วงวันที่ 35 – 77 จะเป็นช่วงที่ปุ๋ยมีคุณภาพสารฮิวมิกที่ดีที่สุด โดยค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 7.21 - 7.70 ซึ่งไม่ลดต่ำลงมากนัก และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 9.11 – 10.23 และอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนอยู่ในช่วง 1.30 – 1.54 ซึ่งในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักที่อัตราส่วนนี้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั้นเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอกซิลที่ละลายน้ำได้ดีส่งผลให้เสถียรภาพเชิงโครงสร้างลดลง สอดคล้องกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงในช่วงวันที่ 91 – 119 ดังกล่าว

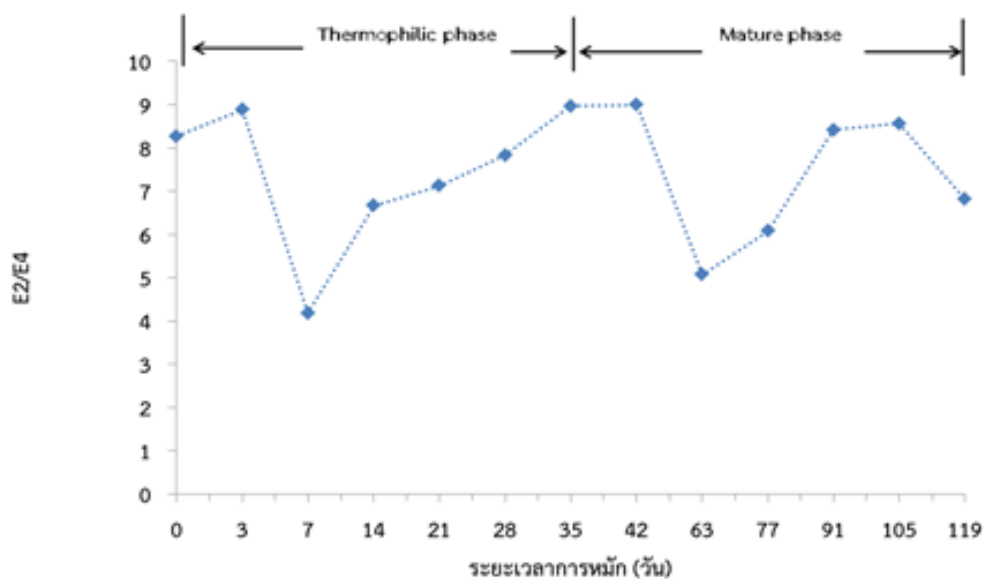
การศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคอัตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี ในช่วงการดูดกลืนคลื่นแสง 200-800 นาโนเมตร (ภาพที่ 8) พบว่า ในช่วงความยาวคลื่น 205 – 230 นาโนเมตร พลังงานมีการเปลี่ยนแปลง เกิดจากอิเล็กตรอนไปกระตุ้น π เปลี่ยนไปเป็น π^* ของโครงสร้างวงแหวนแอโรแมติก ซึ่งการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปสูงสุดในวันที่ 63 เช่นเดียวกับความยาวคลื่นช่วง 260 – 280 ที่แสดงถึงการดูดกลืนของโครงสร้างไม่อิ่มตัวที่ประกอบด้วยพันธะ C=C, C=O และ N=N และความยาวคลื่น 460 – 480 ที่โครงสร้างแอลิฟาติก ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการสร้างกรดฮิวมิก การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงทิศทางการเกิดโครงสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวมีปริมาณมากในช่วงระยะการหมัก 0 - 63 วัน จากนั้นจะค่อย ๆ ลดปริมาณลง เห็นได้จากการดูดกลืนแสงที่ลดลงตั้งแต่วันที่ 64 เป็นต้นไป

สำหรับการศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างการย่อยสลายของลิกนินเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแอลิฟาติกด้วยอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 280 นาโนเมตร ต่อ 465 นาโนเมตรหรือ E_2/E_4 มีความแปรปรวนในช่วงระยะอุณหภูมิสูง แต่เมื่อปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่อัตราส่วน E_2/E_4 มีค่าคงที่ในช่วงสั้น ๆ ของวันที่ 35 – 42 ดังภาพที่ 9 จากนั้นลดลงต่ำที่สุดในวันที่ 63 และค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นถูกใช้ป็นสารตั้งต้นแทนวัตถุดิบตั้งต้นที่ถูกย่อยสลายหมดไป และกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นใหม่มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบด้วยออกซิเจนจำนวนมากคล้ายกับกรดฟัลวิก สอดคล้องกับปริมาณออกซิเจน และอัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอมที่เพิ่มขึ้นหลังจากวันที่ 91 เป็นต้นไป (ตารางที่ 6)



ภาพที่ 8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลในปุ๋ยหมักวันที่ 0 ถึง 119
 ที่มา: สิริประภัสสร รัช่าย้อย (2558)

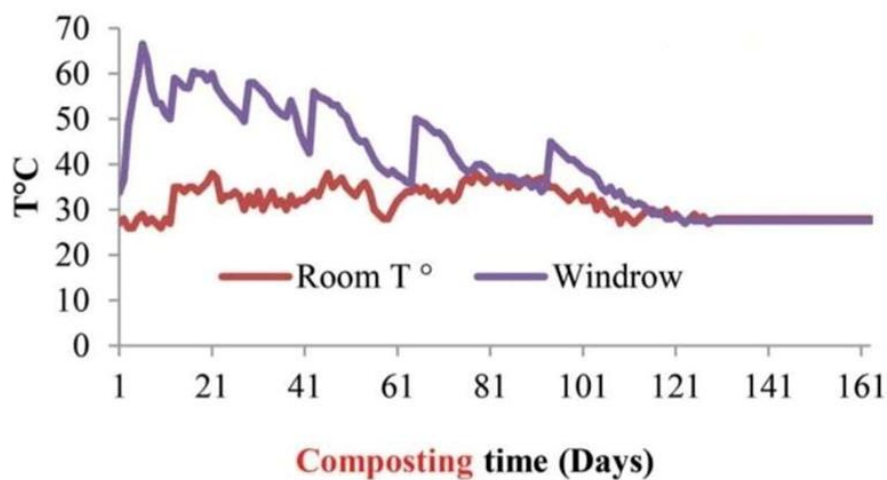
จากการศึกษากระบวนการหมักของปุ๋ยหมักมูลโคตลอดระยะเวลา 119 วัน พบว่าปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 35 เป็นต้นไป โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุและกรดฮิวมิกลดลงอย่างต่อเนื่องไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุแม้ในช่วงที่ปุ๋ยเย็นตัวลง โดยการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกก็ได้รับอิทธิพลเช่นเดียวกัน ซึ่งแม้ปริมาณธาตุองค์ประกอบและสัดส่วนธาตุองค์ประกอบแสดงให้เห็นช่วงระยะเวลาการหมักที่ปุ๋ยมีคุณภาพเหมาะสมแก่การนำไปใช้ในช่วงวันที่ 35 - 77 แต่คุณสมบัติเชิงแสงแสดงให้เห็นอัตราส่วน E_2/E_4 ที่มีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 63 ซึ่งหมายถึงคุณภาพเชิงโครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่มีความเสถียรในสัดส่วนเชิงปริมาณที่มากกว่าวันอื่น ๆ ดังนั้นเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปีจึงเป็นเทคนิคที่ประกอบในการตัดสินใจเลือกใช้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีที่สุดได้ นอกเหนือไปจากการศึกษาเชิงปริมาณของสารอินทรีย์ สารฮิวมิก และธาตุองค์ประกอบดังกล่าว



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร (E_2) ต่ออัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 472 นาโนเมตร (E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก
 ที่มา: สิริประภัสสร รัชชีย้อย (2558)

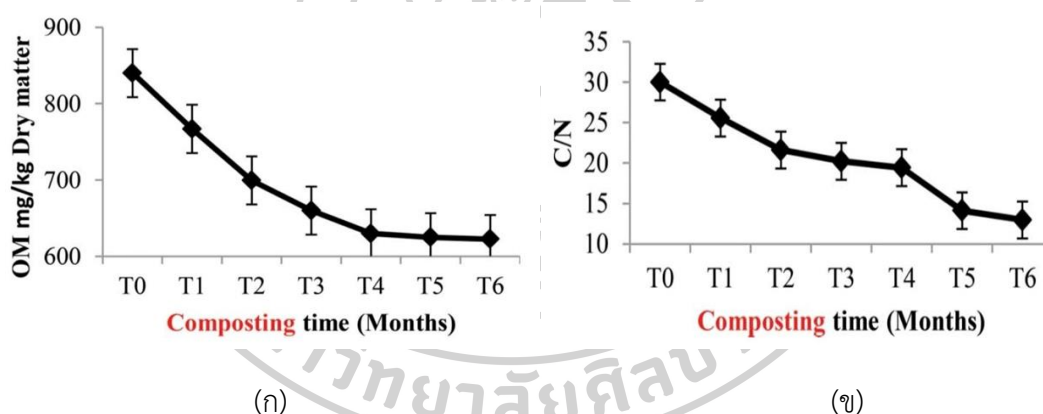
Lahsaini et al. (2017) ศึกษาวิวัฒนาการของอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยหมักจากวัชพืชและกากตะกอนการกลั่นน้ำมันพืชเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยมีส่วนประกอบเป็นกากตะกอนการกลั่นน้ำมันพืช หญ้า และฟางในอัตราส่วน 50, 40 และ 10 ตามลำดับ เมื่อประเมินคุณภาพปุ๋ยหมักจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่าระยะอุณหภูมิสูงมีระยะเวลาประมาณ 120 วัน (4 เดือน) โดยอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก และมีค่าสูงสุดในวันที่ 7 ถึง 67 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 10) ซึ่งในช่วงนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 11 (ก) จากนั้นอุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลงจนเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ซึ่งเป็นช่วงที่ปุ๋ยมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ ในระยะนี้ปริมาณอินทรีย์วัตถุจะลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุอย่างต่อเนื่องนั้นสอดคล้องกับการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และล้วนมีค่าต่ำที่สุดในวันสิ้นสุดกระบวนการหมักในเดือนที่ 6 ดังภาพที่ 11 (ข)

สำหรับการศึกษาเชิงปริมาณของสารฮิวมิก และดัชนีการเกิดสารฮิวมิก ได้แก่ สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก และระดับพอลิเมอไรเซชัน พบว่าปริมาณสารฮิวมิกระยะเริ่มผสมมีค่า 67.2 กรัม/กิโลกรัม ซึ่งประกอบด้วยกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก 32.0 และ 35.2 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 7) เมื่อผ่านไป 6 เดือน ปริมาณสารฮิวมิกเพิ่มขึ้นเป็น 151.7 กรัม/กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 125.74 เมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสม โดยเป็นปริมาณกรดฮิวมิกและ



ภาพที่ 10 อุณหภูมิปุ๋ยหมัก (windrow) และอุณหภูมิบรรยากาศ (Room T°) ตลอดระยะเวลากระบวนการหมัก 161 วัน

ที่มา: Lahsaini et al. (2017)



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) (ก) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) (ข) ตลอดระยะเวลาการหมัก 6 เดือน โดย T0 = วันเริ่มผสม, T1 = 1 เดือน, T2 = 2 เดือน, T3 = 3 เดือน, T4 = 4 เดือน, T5 = 5 เดือน และ T6 = 6 เดือน ตามลำดับ

ที่มา: Lahsaini et al. (2017)

กรดฟัลวิคที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสมถึงร้อยละ 142.81 และ 110.23 ตามลำดับ สอดคล้องกับสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกเมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสมที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 205.84 บ่งบอกถึงอินทรีย์วัตถุที่ถูกย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรขึ้น โดยปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น

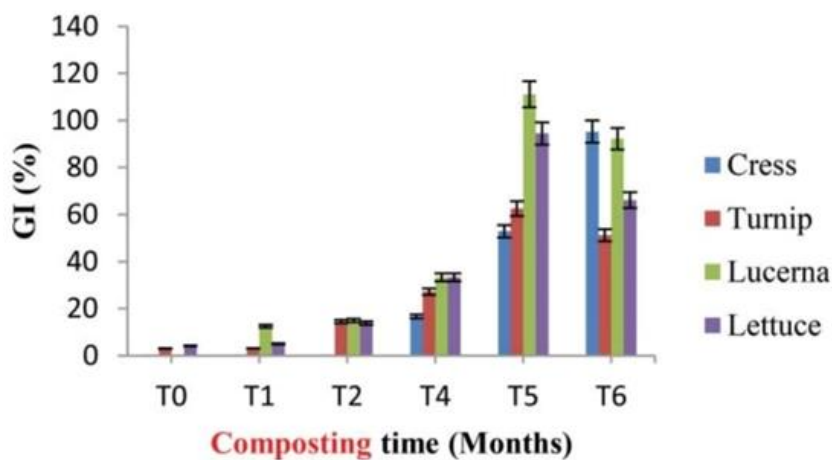
ตารางที่ 7 ปริมาณสารฮิวมิกและดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกเปรียบเทียบระหว่างระยะเริ่มผสม และสิ้นสุดกระบวนการหมัก

ดัชนี	หน่วย	ระยะเวลาการหมัก (เดือน)	
		0	6
สารฮิวมิก (HS)	กรัม/กิโลกรัม	67.2	151.7
กรดฮิวมิก (HA)	กรัม/กิโลกรัม	32.0	77.7
กรดฟัลวิก (FA)	กรัม/กิโลกรัม	35.2	74.0
สัดส่วนเกิดการสารฮิวมิก (HR)	ร้อยละ	160.00	489.35
ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (HI)	ร้อยละ	76.2	250.6
ระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซิล (PD)	ร้อยละ	90.9	105.0

ที่มา: ดัดแปลงจาก Lahsaini et al. (2017)

ใหม่นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่เมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสมเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 228.87 นอกจากนี้ระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซิลก็เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสมร้อยละ 15.51 ยังบ่งบอกถึงการสร้างพอลิเมอร์โครงสร้างขนาดใหญ่ของสารฮิวมิกที่มีความเสถียรมากขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของดัชนีต่าง ๆ ที่สอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักทำให้อินทรีย์วัตถุเปลี่ยนรูปเป็นสารฮิวมิกที่มีความเสถียรมากขึ้น

เมื่อทดสอบการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักโดยใช้ดัชนีการงอกของของพืช 4 ชนิด ได้แก่ แครส (Cress) หัวผักกาด (Turnip) ลูเซอร์น่า (Lucerna) และ ผักกาดหอม (Lettuce) (ภาพที่ 12) ในระยะอุณหภูมิสูงปุ๋ยจะแสดงความเป็นพิษต่อพืชทั้ง 4 ชนิด อย่างชัดเจน โดยมีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดไม่เกินร้อยละ 40 ต่ำกว่ามาตรฐานที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 (Gong et al., 2021; Yang et al., 2020; กรมวิชาการเกษตร, 2557) ซึ่งเมื่อปุ๋ยอยู่ในช่วงที่พัฒนาเต็มที่แล้วพบว่าดัชนีการงอกของเมล็ด เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 50 แสดงถึงแนวโน้มการลดลงต่อความเป็นพิษของพืช โดยเฉพาะลูเซอร์น่าและผักกาดหอมที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดในเดือนที่ 5 และแครสที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดในเดือนที่ 6 โดยมากกว่าร้อยละ 80 ขณะที่ผักกาดหอมกลับลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานในเดือนนี้ที่อาจเกิดจากค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้เกิดกระบวนการออสโมซิสกลับทาง (reverse osmosis) ดังนั้นนอกจากการพิจารณาความเป็นพิษโดยรวมต่อพืชชนิดต่าง ๆ แล้ว การเลือกอายุปุ๋ยที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิดก็มีความสำคัญจากการตอบสนองต่อความเป็นพิษของพืชที่แตกต่างกัน สำหรับหัวผักกาดที่ทนทานต่อความเป็นพิษของปุ๋ยชนิดนี้ได้น้อย มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดกระบวนการหมัก ก็อาจไม่



ภาพที่ 12 ความเป็นพิษต่อพืชเครส (Cress) หัวผักกาด (Turnip) ลูเซอร์น่า (Lucerna) และผักกาดหอม (Lettuce) ตลอดระยะเวลาการหมัก 6 เดือน โดย T0 = วันเริ่มผสม, T1 = 1 เดือน, T2 = 2 เดือน, T3 = 3 เดือน, T4 = 4 เดือน, T5 = 5 เดือน และ T6 = 6 เดือน ตามลำดับ

ที่มา: Lahsaini et al. (2017)

เหมาะที่จะนำปุ๋ยชนิดนี้ไปใช้ และในเดือนที่ 6 ที่ปุ๋ยมีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูงและทำให้ดัชนีการงอกของพืชหลายชนิดลดลง ก็ควรพิจารณานำปุ๋ยในช่วงอายุนี้ไปใช้แต่น้อย เพื่อให้ผลกระทบของความเป็นพิษลดลงด้วย

Almeida et al. (2021) ทำการศึกษากระบวนการบำบัดหรือรีไซเคิลยาสูบและกากตะกอนน้ำเสียโดยการทำปุ๋ยหมักผสมกับเศษกิ่งไม้ใบไม้หรือขี้เลื่อยทั้งหมด 5 สูตรในปริมาณที่แตกต่างกันดังตารางที่ 8 เป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยปุ๋ยหมักทุกสูตรเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วภายใน 2 วันและเข้าสู่ระยะอุณหภูมิปานกลาง (< 40 องศาเซลเซียส) ตั้งแต่วันที่ 12 - 18 เป็นต้นไป (ภาพที่ 13) โดยการลดลงของอุณหภูมಿಯังรวดเร็วจากการย่อยสลายโดยสมบูรณ์สอดคล้องกับดัชนีการงอกของเมล็ดที่เพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 14) มีลำดับการลดลงของอุณหภูมิจากดัชนีการงอกของเมล็ดวอเตอร์เครส (Watercress) ของปุ๋ยหมักทั้ง 5 สูตร ดังนี้

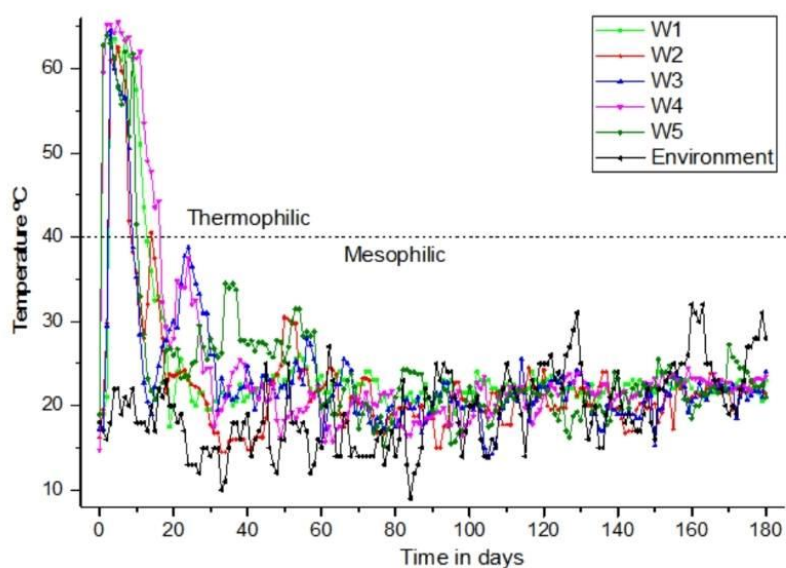
ช่วงระยะอุณหภูมิสูง $W2 < W3 < W5 < W1 < W4$

ดัชนีการงอกของเมล็ด $W2 > W3 > W5 > W1 > W4$

ตารางที่ 8 ปริมาณวัตถุดิบตั้งต้นของปุ๋ยหมัก 5 สูตร (น้ำหนักเปียก)

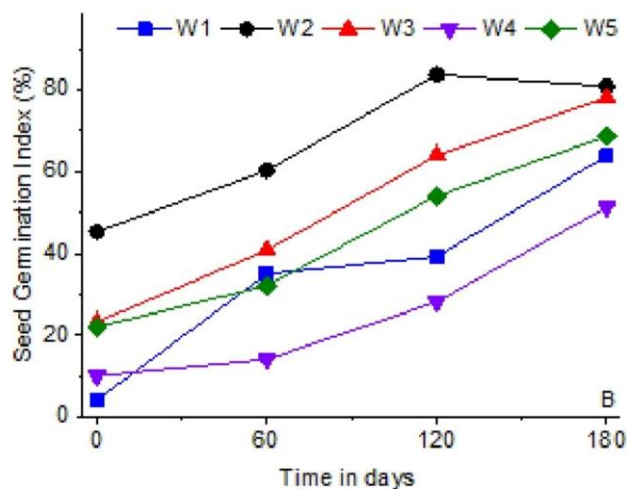
วัตถุดิบ	สูตรปุ๋ยหมัก				
	W1	W2	W3	W4	W5
ยาสูบ (กิโลกรัม)	30.0	15.0	15.0	25.0	3.0
ตะกอนน้ำเสีย (กิโลกรัม)	85.0	17.5	18.0	30.0	2.0
ขี้เลื่อย (กิโลกรัม)	47.5	47.5	95.0	0.0	0.0
กิ่งไม้ใบไม้ (กิโลกรัม)	0.0	0.0	0.0	30.0	36.0

ที่มา: Almeida et al. (2021)



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วย ยาสูบ ตะกอนน้ำเสีย ขี้เลื่อย และกิ่งไม้ใบไม้ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ W1 = 30.0: 85.5: 47.5: 0.0, W2 = 15.5: 17.5: 47.5: 0.0, W3 = 15.0: 17.5: 95.0: 0.0, W4 = 25.0: 30.0: 0.0: 30.0 และ W5 = 3.0: 2.0: 0.0: 36.0 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศ (Environment) ตลอดระยะเวลาการหมัก 180 วัน

ที่มา: Almeida et al. (2021)



ภาพที่ 14 ดัชนีการงอกของเมล็ดวอเตอร์เครสของปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วย ยาสูบ ตะกอนน้ำเสีย ซีลี้อย และกิ่งไม้ไปไม้ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ W1 = 30.0: 85.5: 47.5: 0.0, W2 = 15.5: 17.5: 47.5: 0.0, W3 = 15.0: 17.5: 95.0: 0.0, W4 = 25.0: 30.0: 0.0: 30.0 และ W5 = 3.0: 2.0: 0.0: 36.0 ตลอดระยะเวลาการหมัก 180 วัน

ที่มา: Almeida et al. (2021)

เมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 60 เป็นต้นไป ดัชนีการงอกของเมล็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มผสมไปจนถึงวันที่ 180 ในปุ๋ยทุกสูตร และมีปุ๋ยสูตร W2 ในวันที่ 120 มีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้การย่อยสลายอย่างสมบูรณ์และสามารถนำปุ๋ยหมักไปใช้ประโยชน์ได้

เมื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคอัตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าการย่อยสลายของลิกนินเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแอลิฟาติกจากอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 270 นาโนเมตรต่อการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 465 นาโนเมตร (E_2/E_4) ของปุ๋ยสูตร W1 และ W2 ลดลงในวันสิ้นสุดกระบวนการหมัก (วันที่ 180) เมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มผสม (ตารางที่ 9) โดยจุลินทรีย์นำพอร์ไฟรินซึ่งเป็นโมเลกุลแบบวงแหวนขนาดใหญ่ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเกิดขึ้นจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในช่วงอุณหภูมิสูงไปใช้ ซึ่งโครงสร้างนี้ยังเป็นโครงสร้างที่เด่นในปุ๋ยสูตร W3, W4 และ W5 ทำให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงลดลง อย่างไรก็ตามก็ตีการศึกษาสัดส่วนโครงสร้างแอลิฟาติกที่การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 465 นาโนเมตรต่อโครงสร้างแอโรแมติกที่การดูดกลืนคลื่นแสง 665 นาโนเมตร

ตารางที่ 9 อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของปุ๋ยหมัก 5 สูตรในวันเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการหมัก

อัตราส่วน	ระยะเวลา (วัน)	สูตรปุ๋ยหมัก				
		W1	W2	W3	W4	W5
E ₂ /E ₄	1	4.086	4.180	5.225	4.051	3.793
	180	4.602	4.478	3.446	3.820	3.573
E ₄ /E ₆	1	3.023	9.281	3.042	3.167	2.544
	180	3.214	5.352	3.481	3.921	2.561

หมายเหตุ: องค์ประกอบบยาสูบ ตะกอนน้ำเสีย ขี้เลื่อย และกิ่งไม้ไปไม้โดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ของปุ๋ยหมักแต่ละสูตร ดังนี้ W1 = 30.0: 85.5: 47.5: 0.0, W2 = 15.5: 17.5: 47.5: 0.0, W3 = 15.0: 17.5: 95.0: 0.0, W4 = 25.0: 30.0: 0.0: 30.0 และ W5 = 3.0: 2.0: 0.0: 36.0
ที่มา: Almeida et al. (2021)

(E₄/E₆) ของปุ๋ยสูตร W2 มีค่าลดลงแสดงถึงการเกิดโครงสร้างที่เสถียร ในขณะที่ปุ๋ยสูตร W1, W3, W4 และ W5 มีค่าเพิ่มขึ้นจากการเกิดโมเลกุลสารอินทรีย์ขนาดเล็กที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบปริมาณสูงในสัดส่วนที่มากกว่าการเกิดโครงสร้างแอมไคดิกขนาดใหญ่ ทำให้ปุ๋ยหมักสูตร W2 เป็นสูตรที่ดีที่สุดในการศึกษานี้ ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพและเคมีร่วมกับการศึกษาคูสมบัติเชิงโครงสร้างของสารฮิวมิกด้วยดัชนีเชิงแสงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักเป็นไปได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

Lanno et al. (2022) ศึกษาลักษณะของสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักที่แตกต่างกันทั้งหมด 7 ชนิด ดังตารางที่ 10 ซึ่งปุ๋ยหมัก C1, C2, C3, C4 และ C5 เป็นปุ๋ยหมักโดยระบบอุตสาหกรรม ส่วนปุ๋ยหมัก C6 เป็นปุ๋ยหมักมูลตัวอ่อนแมลงวันลายดำ (*H. illucens*) และ C7 เป็นปุ๋ยหมักจากมูลไส้เดือน (ปุ๋ยหมักสูตร C1, C2, C3, C4 และ C5 ซึ่งเป็นปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายโดยจุลินทรีย์) โดยทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักที่พัฒนาเต็มที่แล้วมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพและปริมาณของสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นจากปุ๋ยหมักที่วัสดุและวิธีการหมักแตกต่างกัน

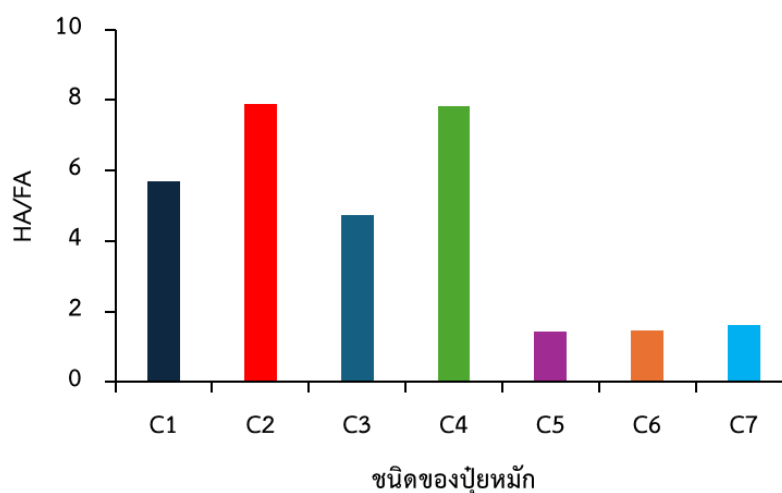
จากการศึกษาปริมาณของสารฮิวมิกโดยพิจารณาในเชิงสัดส่วนของกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิก (HA/FA) พบว่า พบว่าปริมาณของสารฮิวมิกของปุ๋ยหมัก C2 มีค่าสูงที่สุดถึง 7.88 รองลงมาคือปุ๋ย C4, C1 และ C3 มีค่า 7.82, 5.70 และ 4.73 ตามลำดับ (ภาพที่ 15) ซึ่งปุ๋ยหมักทั้ง 4 มีวัตถุประสงค์จาก

ตารางที่ 10 ส่วนผสมในการหมักปุ๋ยแต่ละชนิดและระยะเวลาที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่

ปุ๋ยหมัก	วิธีการหมัก	วัตถุดิบหลัก	วัตถุดิบรอง	วันที่พัฒนาเต็มที่
C1	ใช้กระบวนการ ย่อยสลายด้วย	ซากปลา	ฟาง พืช และเชื้อจากปุ๋ย หมักก่อน	185
C2*	จุลินทรีย์เป็นหลัก	มูลม้า	ฟาง	90
C3*		ตะกอนน้ำเสีย	ฟาง	120
C4*		กิ่งไม้ใบไม้	-	> 180
C5*		ขยะจากครัว	เศษไม้สับ	130
C6		ใช้การย่อยสลาย โดยตัวอ่อน แมลงวันลายดำ	ขยะจากโรง อาหาร	-
C7	ใช้การย่อยสลาย โดยไส้เดือน	ขยะจากครัว	ฟาง กระจาด กิ่งไม้ใบไม้ และไบโอชาร์ (biochar)	365

หมายเหตุ: * คือ ปุ๋ยหมักที่ผลิตเพื่อจำหน่าย

ที่มา: Lanno et al. (2022)

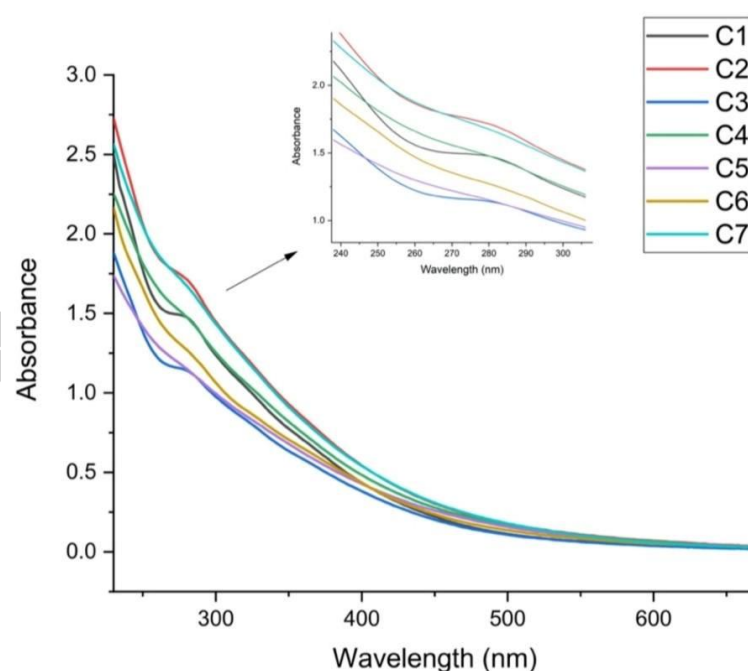


ภาพที่ 15 สัดส่วนปริมาณกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิก (HA/FA) ของปุ๋ยหมัก 5 ชนิด ได้แก่ C1 = ปุ๋ยหมักซากปลา, C2 = ปุ๋ยหมักมูลม้า, C3 = ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย, C4 = ปุ๋ยหมักกิ่งไม้ใบไม้, C5 = ปุ๋ยหมักขยะจากครัว, C6 = ปุ๋ยหมักมูลตัวอ่อนแมลงวันลายดำ และ C7 = ปุ๋ยหมักจากมูลไส้เดือน

ที่มา: ข้อมูลจาก Lanno et al. (2022)

มุลส์ตว์และซากพืชซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีลิกนิน และเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกรดฮิวมิก ขณะที่ปุ๋ยหมักขยะจากครัวและโรงอาหาร C5, C6 และ C7 ซึ่งมีความชื้นสูงประกอบด้วยเศษอาหารประเภทแป้งและไขมันเป็นส่วนใหญ่ เมื่อย่อยสลายจะได้กรดอะมิโนโมเลกุลเล็ก ๆ และกลายเป็นกรดฟัลวิกก่อนทำให้ปริมาณค่อนข้างสูงและทำสัดส่วนกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิกมีค่าต่ำเพียง 1.42, 1.46 และ 1.60

เมื่อศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่น 230 – 670 นาโนเมตร พบว่าปริมาณสารฮิวมิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของสารอินทรีย์ที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่มักเกิดในช่วงความยาวคลื่นที่สั้น 255 – 290 นาโนเมตร ขณะที่การเกิดโครงสร้างสารฮิวมิกที่เสถียรในช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร ที่แสดงถึงโครงสร้างแอลิแพติก และช่วงความยาวคลื่น 600 – 670 นาโนเมตร แสดงถึงโครงสร้างแอโรแมติกที่จะลดลงตามลำดับ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การดูกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลในช่วงคลื่น 230 – 670 นาโนเมตร ของปุ๋ยหมัก 7 ชนิด ได้แก่ C1 = ปุ๋ยหมักซากปลา, C2 = ปุ๋ยหมักมูลม้า, C3 = ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย, C4 = ปุ๋ยหมักกิ่งไม้ใบไม้, C5 = ปุ๋ยหมักขยะจากครัว, C6 = ปุ๋ยหมักมูลตัวอ่อนแมลงวันลายดำ และ C7 = ปุ๋ยหมักจากมูลไส้เดือน

ที่มา: Lanno et al. (2022)

โดยการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นในช่วง 255 – 290 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกิดสารประกอบแอรอแมติกและสารประกอบไม่อิ่มตัวเช่น ควิโนนและคีโตน ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในปุ๋ยหมัก C1, C2 และ C3 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในปุ๋ยหมัก C4, C6 และ C7 และไม่พบในปุ๋ยหมัก C5 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของโครงสร้างที่เสถียรกว่าของกรดฮิวมิกต่อโครงสร้างที่เสถียรน้อยกว่าของกรดฟัลวิกดังกล่าว (ภาพที่ 15) อย่างไรก็ตามพบว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของสารฮิวมิกอาจไม่ได้สอดคล้องกับคุณภาพของสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารอินทรีย์และระดับการเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักด้วยอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 250 นาโนเมตรต่อการดูดกลืนคลื่นแสง 365 นาโนเมตร (E_2/E_3) พบว่าปุ๋ยหมักสูตร C5 มีค่าน้อยที่สุดเพียง 2.38 รองลงมา ได้แก่ C3, C4, C2, C7, C1 และ C6 มีค่า E_2/E_3 เท่ากับ 2.49, 2.56, 2.57, 2.61, 2.65 และ 2.66 ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เช่นเดียวกับอัตราส่วนของการเกิดโครงสร้างแอลิแพติกต่อโครงสร้างแอรอแมติกที่การดูดกลืนคลื่นแสงที่ 465 นาโนเมตรต่อการดูดกลืนคลื่นแสง 665 นาโนเมตร (E_4/E_6) ที่อยู่ในกลุ่มที่มีค่าน้อยโดยมีค่า 6.88 รองจากปุ๋ยสูตร C6 ที่มีค่า 6.40 รองลงมาได้แก่ปุ๋ยสูตร C2, C4, C1, C3 และ C7 ตามลำดับ ที่มีค่า 6.95, 7.34, 7.78, 8.33 และ 8.59 ตามลำดับ ดังนั้นวัตถุดิบตั้งต้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อระยะเวลาการหมัก ปริมาณ และคุณภาพของสารฮิวมิกที่แตกต่างกัน ที่ความสัมพันธ์เชิงคุณภาพอาจไม่แปรตามปริมาณของสารฮิวมิกที่เกิดขึ้น ทำให้การศึกษาเชิงคุณภาพของสารฮิวมิกจึงมีความสำคัญในการเลือกใช้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพตลอดจนการพัฒนาสูตรปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพเพื่อให้ได้สารฮิวมิกที่ดีในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 11 สัดส่วนกรดฮิวมิกต่อกรดฟัลวิก (HA/FA) และอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงของปุ๋ยหมัก 7 ชนิด

ปุ๋ยหมัก	E_2/E_3	E_4/E_6
C1	2.65	7.78
C2	2.57	6.95
C3	2.49	8.33
C4	2.56	7.34
C5	2.38	6.88

หมายเหตุ: C1 = ปุ๋ยหมักซากปลา, C2 = ปุ๋ยหมักมูลม้า, C3 = ปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย, C4 = ปุ๋ยหมักกิ่งไม้ใบไม้, C5 = ปุ๋ยหมักขยะจากครัว

ที่มา: Lanno et al. (2022)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและรีเอเจนต์

สารเคมีและรีเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 12 โดยระบุถึงบริษัทผู้ผลิต และ Chemical Abstracts Service number (CAS No.) ของสารเคมีแต่ละชนิด

ตารางที่ 12 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง CAS NO. และบริษัทผู้ผลิต

สารเคมี	CAS No.	บริษัทผู้ผลิต
Hydrochloric acid	7647-01-0	Merck
Sodium hydroxide	1310-73-2	Merck
Sodium bicarbonate	144-55-8	QReC
Hydrofluoric acid	7664-39-3	Univar

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องชั่ง (Analytical balance)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น 204 ของบริษัท Metler Toledo

2) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น HI 9835 ของบริษัท HANNA

3) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง รุ่น AB150 ของบริษัท Fisher Scientific

4) ตู้อบ (Dry Oven)

ตู้อบยี่ห้อ Ecocell รุ่น Einrichtung Gmbh MMM- Group ของบริษัท Medcenter

5) ตู้เย็น (Refrigerator)

ตู้เย็นสำหรับเก็บรักษาสารเคมีที่เตรียมไว้ใช้ในการทดลอง และตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพสารเคมี

6) เครื่องผสมสารละลาย (Vortex stirrer)

เครื่องผสมสารละลาย รุ่น G-560E ของบริษัท Scientific industries, Inc.

7) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

เครื่องปั่นเหวี่ยงสารละลายความเร็วสูงของบริษัท Thai Victory CO., Ltd

8) เครื่องเขย่าสารละลาย (shaker)

เครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ (incubator shaker) รุ่น IOI400.XX2.C ของบริษัท Gallenkamp

9) เครื่องออร์แกนิกเอลิเมนเทลอนาไลเซอร์ (Organic Elemental Analyzer)

เครื่องออร์แกนิกเอลิเมนเทลอนาไลเซอร์ ของบริษัท Thermoscientific รุ่น Flashsmart

10) เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (Ultraviolet-Visible Spectrophotometer)

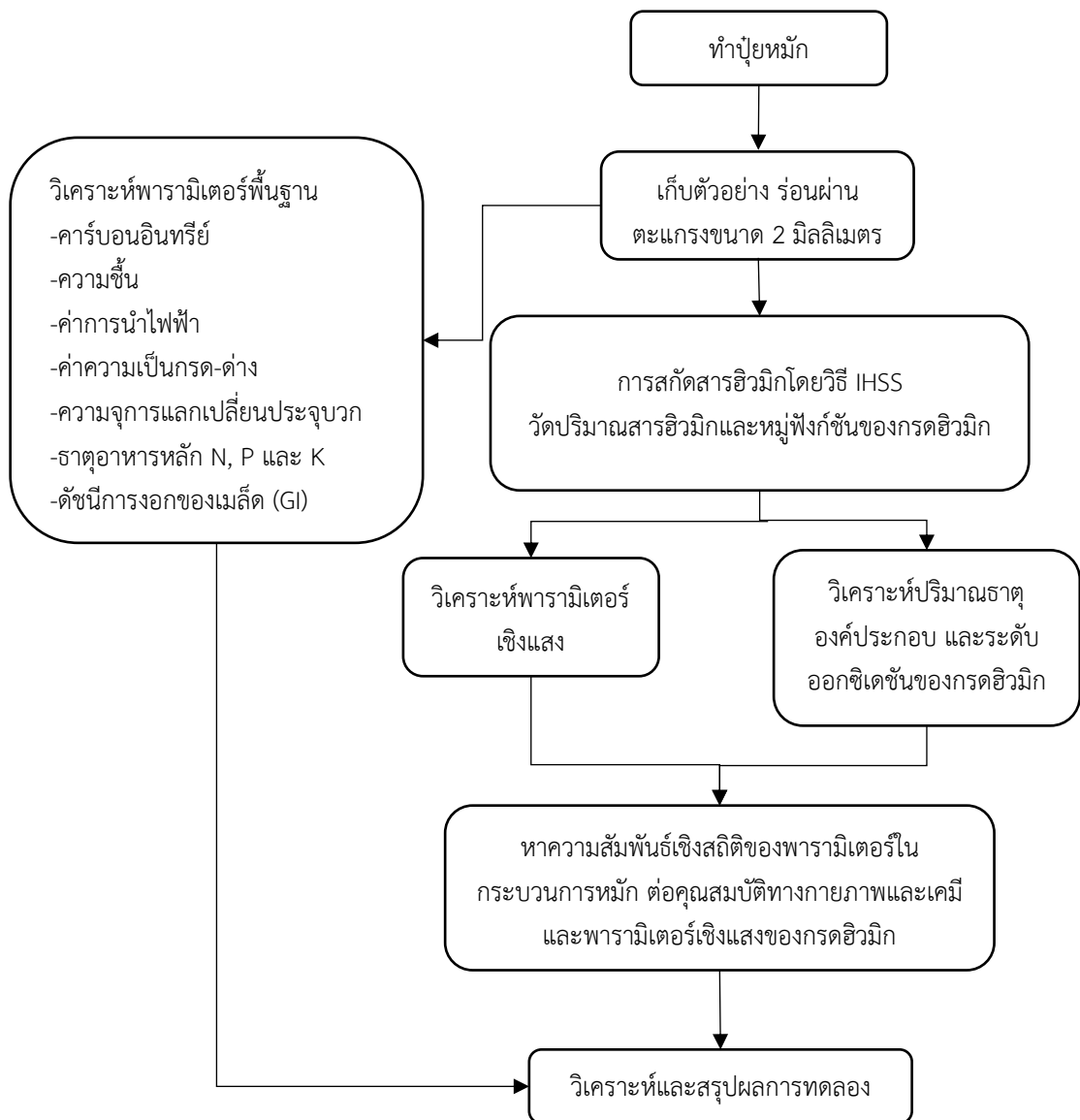
เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ของบริษัท GBC Scientific Equipment รุ่น Cintra 1010

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เริ่มจากการทำปุ๋ยหมัก จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างเพื่อไปวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน และสารชีวมีก ดังภาพที่ 17

3.3.1 การหมักปุ๋ยตัวอย่าง

ในการหมักปุ๋ยผู้ศึกษาได้ใช้สูตรปุ๋ยหมักของ รองศาสตราจารย์ ดร. นัทธีรา สรรมณี โดยแบ่งส่วนผสมหลักออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ น้ำหมัก ของแห้ง และมูลสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 13 หมักในพื้นที่ตำบลดอนพุทรา อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม ซึ่งห่างไกลจากแหล่งชุมชนเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์นำโรค สำหรับขั้นตอนในการหมักปุ๋ย จะเริ่มเทมูลสัตว์รวมกันบนพื้น จากนั้นฉีดน้ำให้ส่วนผสมให้เข้ากันโดยให้ความชื้นประมาณร้อยละ 60 จากนั้นใส่ส่วนผสมน้ำหมักและส่วนผสมแห้งและผสมคลุกเคล้าให้ส่วนผสมทั้งหมดเท่ากันดีแล้วบรรจุปุ๋ยหมักใส่กระสอบจำนวน 10 กระสอบปริมาณกระสอบละ 15 กิโลกรัม ใช้เชือกฟางรัดปากกระสอบปุ๋ยโดยไม่ต้องแน่นมาก แล้วนำกลับมาหมักต่อในเรือนเพาะชำ อาคารวิทยาศาสตร์ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 17 แผนผังการดำเนินการทดลองการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยและการหาข้อมูลคุณลักษณะของปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายความสัมพันธ์เชิงสถิติ

ตารางที่ 13 ส่วนผสมและปริมาณที่ใช้ผลิตปุ๋ยหมัก

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

3.3.2 การเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักจากกองปุ๋ยหมักทั้งสองสูตร โดยก่อนเก็บตัวอย่างจะทำการพลิกกลับกระสอบปุ๋ยเพื่อให้ปุ๋ยผสมกันดี จากนั้นทำการเปิดกระสอบวัดอุณหภูมิ และบันทึกลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมัก ได้แก่ สี กลิ่น และลักษณะวัสดุหมัก ดังภาพที่ 18 โดยจะทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยเมื่อปุ๋ยมีอายุ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 วัน ตามลำดับ เก็บตัวอย่างปุ๋ยทั้ง 10 กระสอบ กระสอบละประมาณ 200 กรัม บริเวณตรงกลางของกระสอบปุ๋ย เก็บตัวอย่างให้ได้ประมาณ 2 กิโลกรัม เขียนฉลากอายุวันที่เก็บไว้ข้างถุง ทำการเก็บตัวอย่างแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ตามช่วงอายุศึกษาที่กำหนด จนครบอายุการหมัก 119 วัน



ภาพที่ 18 ปุ๋ยหมักมูลโคผสมมูลสุกรก่อนและหลังหมัก

ภาพโดย: พรรณนิภา เปียชาติ

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยได้แล้วนำตัวอย่างปุ๋ยหมักมาผึ่งโดยวิธีทำให้แห้ง (Air dry) ในห้องที่สะอาด จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ของ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ได้แก่ การแยกพลาสติก แก้ว วัสดุไม้คั้น และโลหะอื่นๆ ออก และคัดแยกขนาดอนุภาคของปุ๋ยโดยใช้ตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลางรูขนาด 2 มิลลิเมตร ปุ๋ยหมักที่ได้ส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานและมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร และอีกส่วนนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์การเกิดสารฮิวมิก เพื่อทดสอบหาการเจริญเต็มที่ของปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน พารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ในทันทีจะนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส แต่เมื่อต้องการนำออกจากมาวิเคราะห์ต้องนำตัวอย่างมาผึ่งเพื่อให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนนำมาวิเคราะห์

3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

3.4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ความชื้น

การวัดความชื้นใช้หลักการหาความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ได้โดยการชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแล้วนำไปวิเคราะห์ความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาผึ่งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 45 นาที และนำไปชั่งน้ำหนักปุ๋ยหลังอบ ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยหมักจะมีน้ำหนักคงที่ (น้ำหนักหลังอบมีความแตกต่างจากน้ำหนักที่ชั่งในครั้งก่อนไม่เกินร้อยละ 4 หากเกินให้ทำซ้ำใหม่) แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความชื้นดังสมการที่ 6

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักหลังอบ}} \times 100 \quad (6)$$

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างทำโดยใช้เซลล์อิเล็กโทรไลต์จุ่มลงในสายละลายที่ต้องการทดสอบ โดยทำการชั่งตัวอย่างปุ๋ยที่ต้องการวิเคราะห์ 2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์และเติมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาทีเพื่อให้ปุ๋ยตกตะกอน หลังจากนั้นทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างในส่วนของสารละลายด้วยเครื่องตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง

3.4.3 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิจะทำทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ โดยก่อนทำการวัดอุณหภูมิจะต้องมีการพลิกกลับกระสอบปุ๋ยก่อนทุกครั้งเพื่อผสมปุ๋ยให้เข้ากัน และทำการวัดอุณหภูมิที่กลางกระสอบของปุ๋ยหมัก

3.4.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (total carbon) ทหารด้วยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ดังสมการที่ 7 การหาปริมาณคาร์บอนทั้งหมดใช้เทคนิคการเผาไหม้แห้ง (Dry combustion) โดยวิธี Medium-Temperature Resistance Furnace Method สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะใช้วิธี Kjeldahl Method

$$\text{อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)} = \frac{\text{ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม)}} \quad (7)$$

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

นำตัวอย่างที่ทำให้แห้งจากการหาค่าความชื้น มาเผาที่ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักปุ๋ยหลังการเผาหลังจากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนปุ๋ยมีน้ำหนักที่คงที่ น้ำหนักส่วนที่หายไปนำมาคำนวณหาปริมาณอินทรีย์วัตถุดังสมการที่ 8

$$\text{อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักปุ๋ยก่อนเผา} - \text{น้ำหนักปุ๋ยหลังเผา}}{\text{น้ำหนักหลังเผา}} \times 100 \quad (8)$$

3.4.6 การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด

คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดคำนวณจากปริมาณอินทรีย์วัตถุจากข้อ 3.4.5 คูณด้วย Van Bemmelen factor (0.58) (Visconti et al., 2022) ดังสมการที่ 9

$$\text{คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (ร้อยละ)} = \text{อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)} \times 0.58 \quad (9)$$

3.4.7 อัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก (decomposition rate)

ซึ่งนำน้ำหนักกระสอบปุ๋ยหมักก่อนและหลังเก็บตัวอย่างทุกครั้ง และนำค่าที่บันทึกมา คำนวณหาอัตราการย่อยสลาย ดังสมการที่ 10 (Makkonen et al., 2012)

$$k = \frac{\ln \frac{M_t}{M_0}}{t} \quad (10)$$

เมื่อ k หมายถึง อัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก

M_0 หมายถึง น้ำหนักปุ๋ยหลังเก็บตัวอย่างวันก่อนหน้า

M_t หมายถึง น้ำหนักปุ๋ยก่อนเก็บตัวอย่างวันถัดมา

t หมายถึง ระยะเวลาในการหมัก (วัน)

3.4.8 การย่อยสลายสมบูรณ์

กรมวิชาการเกษตร (2557) กำหนดให้ปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ด้วยวิธีวัดค่าดัชนีการงอกของเมล็ดโดยนำตัวอย่างปุ๋ย 1 กรัม เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าด้วยเครื่อง 1 ชั่วโมง กรองสารละลายที่สกัดได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นนำไปเพาะเมล็ดในจานเพาะเชื้อ (petri dish) โดยการแบ่งช่องบนกระดาษกรอง 10 ช่องสำหรับวางเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) ช่องละ 1 เมล็ด และใส่น้ำปุ๋ยสกัด 5 มิลลิลิตร ชุดควบคุมใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออนแทนน้ำปุ๋ยสกัด บ่มไว้ในที่มีดินนาน 48 ชั่วโมง จากนั้นเก็บข้อมูลจำนวนเมล็ดที่งอกเพื่อคำนวณร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ด (relative seed germination; RSG) และความยาวรากเฉลี่ยเพื่อคำนวณร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์ (relative root germination; RRG) จากนั้นนำค่ามาคำนวณดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI) ดังสมการที่ 11 12 และ 13 (Hou et al., 2024)

$$RSG = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง}}{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดควบคุม}} \times 100 \quad (11)$$

$$RRG = \frac{\text{ความยาวรากเฉลี่ยของชุดทดลอง}}{\text{ความยาวรากเฉลี่ยของชุดควบคุม}} \times 100 \quad (12)$$

$$GI = \frac{RSG \times RRG}{100} \quad (13)$$

เมื่อ RSG หมายถึง ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ด

RRG หมายถึง ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์

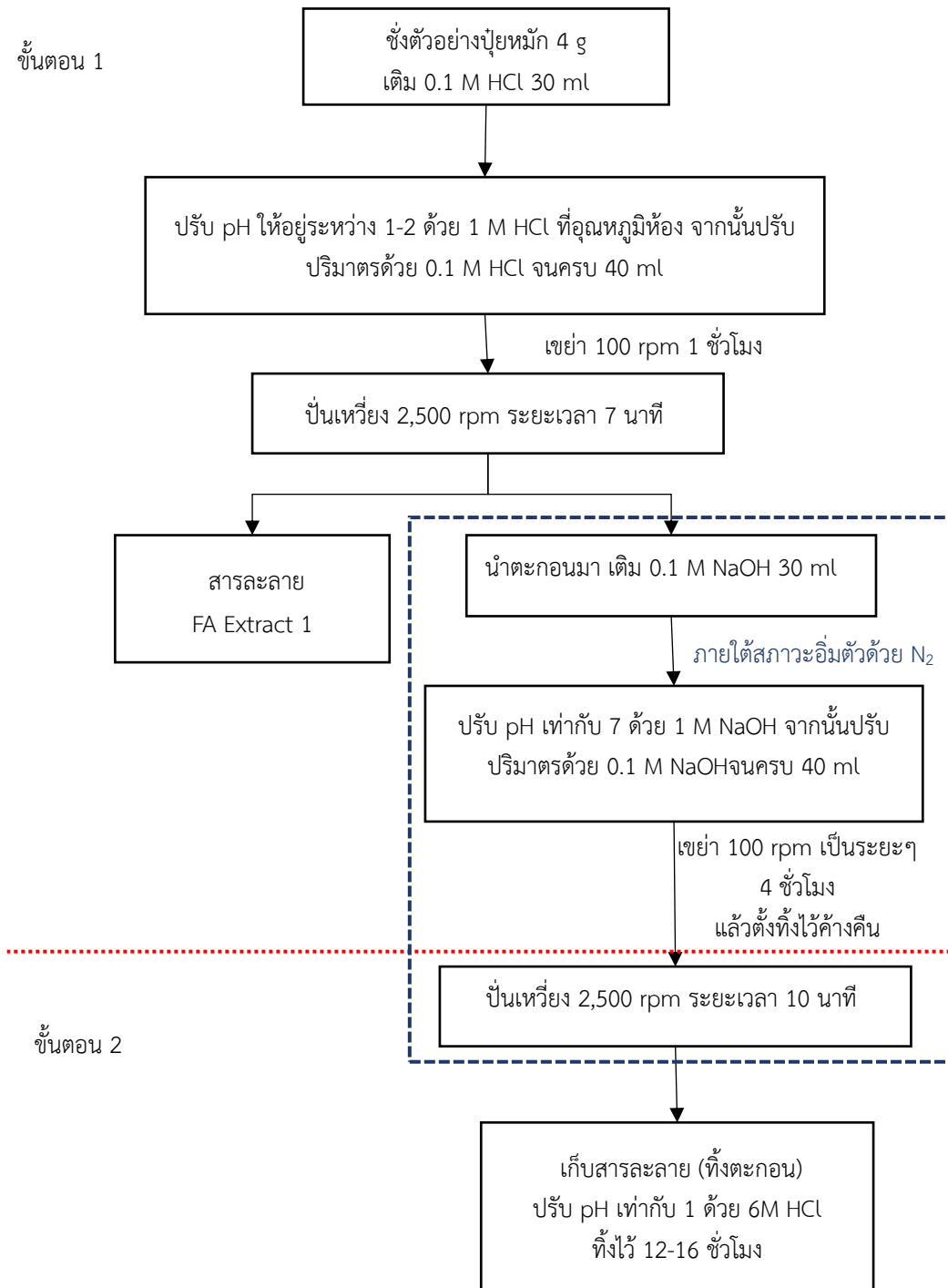
GI หมายถึง ดัชนีการงอกของเมล็ด

3.4.9 การสกัดสารฮิวมิก

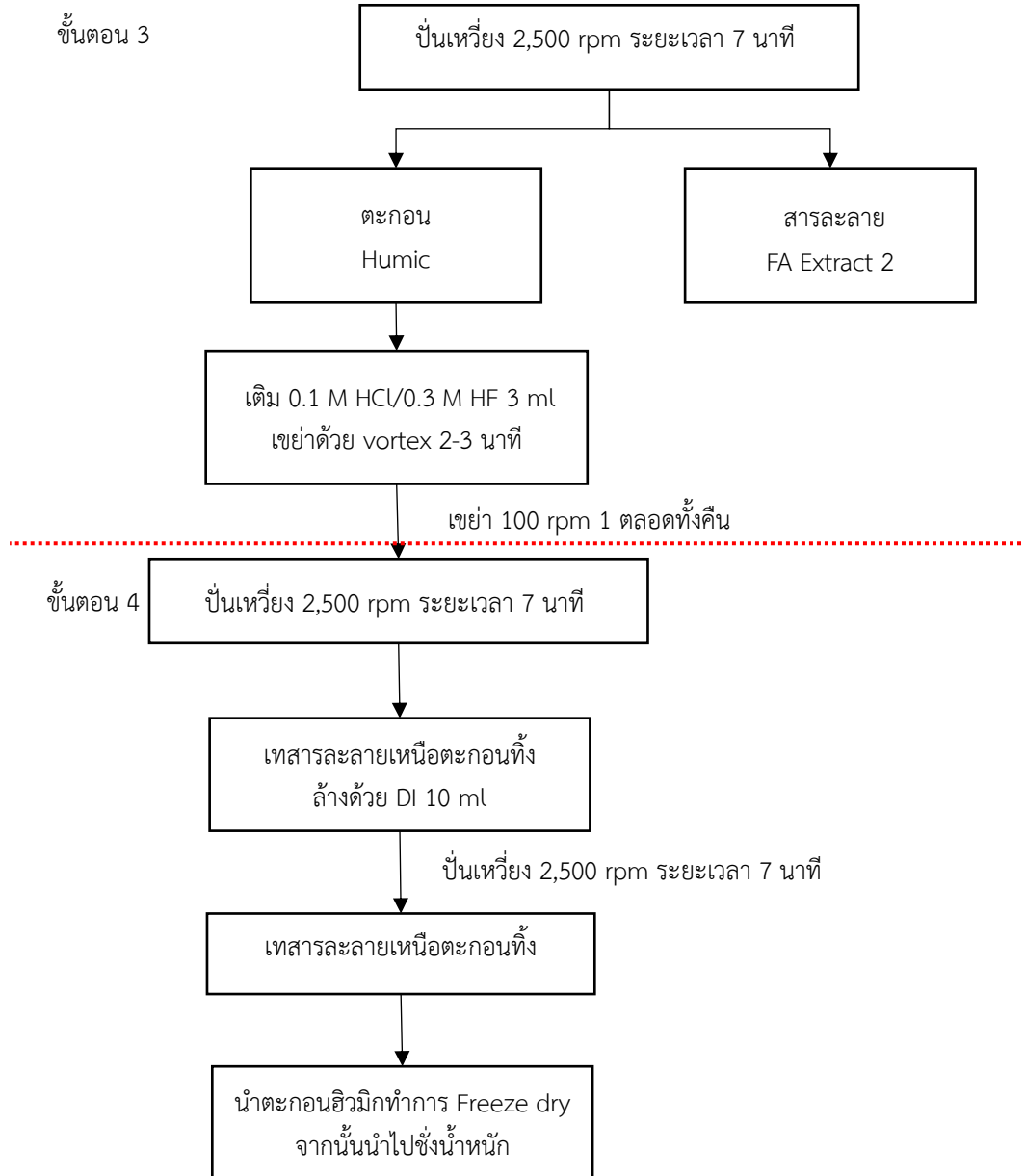
การแยกสารฮิวมิกจากตัวอย่างปุ๋ยหมักโดยวิธีของ International Humic Substances Society (IHSS) (Swift, 1996) โดยการร่อนตัวอย่างปุ๋ยหมักแห้งด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรเพื่อนำเศษไม้รากต่าง ๆ ออกจากนั้นนำไปสกัดสารฮิวมิก (ภาพที่ 19 และ 20) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ≤ 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมล ให้มีอัตราส่วน 10 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของตัวอย่างปุ๋ยหมักแล้วนำไปเขย่าแนวระนาบความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แยกสารละลายส่วนใสออกจากของแข็ง หากสารไม่ละลายไม่แยกชั้น ให้นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นเก็บสารละลายส่วนใส (กรดฟัลวิก) ใส่ในขวดพลาสติก ปรับสภาพปุ๋ยตัวอย่างที่เหลือด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 โมล เพื่อให้ตะกอนมีความเป็นกรด-ด่าง ≥ 7 ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลเป็น 100 มิลลิลิตรภายใต้สภาวะบรรยากาศที่อ้อมด้วยไนโตรเจนแล้วนำไปเขย่าแนวระนาบเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง เป็นเวลานาน 10 นาที นำสารละลายส่วนใสด้านบนมาทำให้ตกตะกอน โดยเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 6 โมล นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นนำตะกอน มาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมล และกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) เข้มข้น 0.3 โมล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายนาน 24 ชั่วโมง นำสารละลายมาปั่นเหวี่ยง จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนักเปียกของกรดฮิวมิก แล้วนำไปทำให้แห้งเยือกแข็ง (freeze drying หรือ lyophilization) แล้วบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง

3.4.10 ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก

นำน้ำหนักปริมาณกรดฮิวมิก และฟัลวิกที่สกัดได้จากข้อ 3.4.8 คำนวนเทียบกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดจากข้อ 3.4.6 เป็นค่าสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก และระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังสมการที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 19 วิธีการสกัดสารชีวโมเลกุล



ภาพที่ 20 วิธีการสกัดสารฮิวมิก (ต่อ)

3.4.11 ปริมาณธาตุและองค์ประกอบกรดฮิวมิก

นำกรดฮิวมิก 3 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะบรรจุตัวอย่างสำหรับเครื่องตรวจวัด วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic Elemental Analyzer) ของ Thermoscientific รุ่น Flashsmart

3.4.12 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

นำกรดฮิวมิกที่ทำการสกัดจากตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้นำไปละลายในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เข้มข้น 0.05 M จากนั้นนำไปวัดความดูดกลืนรังสีด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-Visible Spectrophotometer) ของ GBC Scientific Equipment รุ่น Cintra 1010 โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงวิชิเบิลในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร (Biyada et al., 2020; Radwan et al., 2019)

3.4.13 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรมทดสอบทางสถิติ IBM SPSS Statistics version 26 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีกับพารามิเตอร์เชิงคุณภาพของกรดฮิวมิก โดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson Correlation) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณสารฮิวมิก ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) และเรียงลำดับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณสารฮิวมิกด้วยสถิติทดสอบของดันแคน (Duncan Test)

บทที่ 4

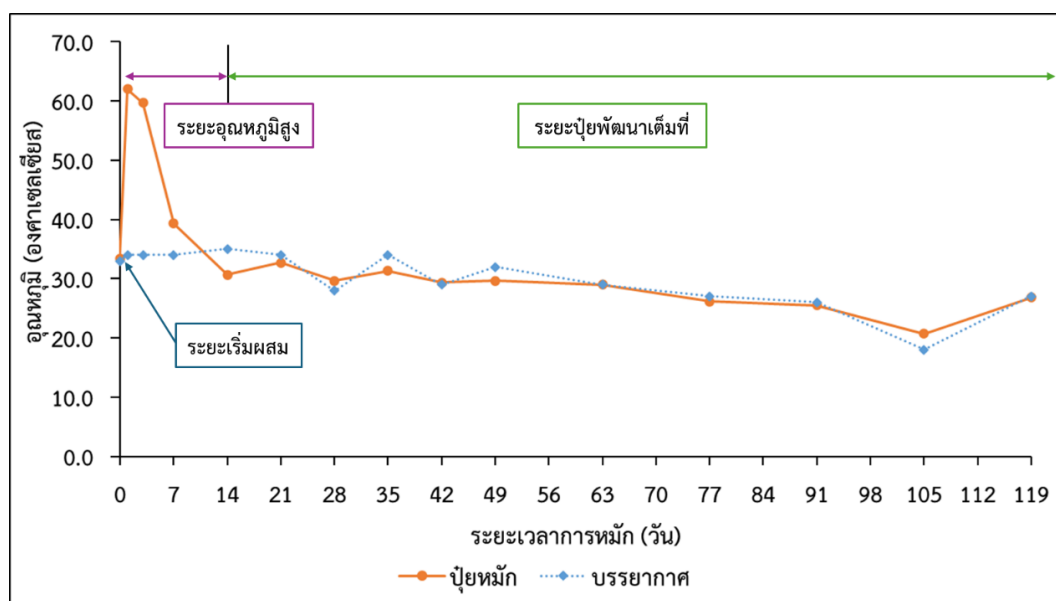
ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการหมักต่อกระบวนการเกิดสารชีวโมเลกุลที่ส่งผลต่อปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพโดยใช้วัสดุจากมูลโคผสมมูลสุกรร่วมกับมูลค่างควา รำละเอียด กากน้ำตาล และน้ำหมักปลา คิดเป็นร้อยละ 37.50, 53.89, 0.94, 3.15, 3.43 และ 1.14 ตามลำดับ ทำการศึกษาเป็นเวลา 4 เดือน โดยเก็บตัวอย่างวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ตามลำดับ เปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) และพิจารณาการย่อยสลายสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) จากนั้นศึกษาสารชีวโมเลกุลเชิงคุณภาพและปริมาณ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ รวมถึงคุณลักษณะเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิคที่เกิดขึ้นจากปริมาณและอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิค ร่วมกับการดูกลิ่นคลีนเนสของพันธะไม่อิ่มตัวในโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี ซึ่งชนิดและปริมาณของโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวจะสะท้อนถึงเสถียรภาพของสารฮิวมิคในสิ่งแวดล้อม อันนำไปสู่การประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก การเลือกระยะเวลาการหมักที่เหมาะสม และปัจจัยที่อาจมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้าง ที่จะป็นฐานข้อมูลในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมัก การควบคุมระยะเวลาการหมัก เพื่อการจัดการปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพต่อไป

4.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเกณฑ์

มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

การศึกษาคุณภาพปุ๋ยหมักในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระยะต่าง ๆ ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำแนกช่วงระยะการหมัก โดยให้ความสำคัญกับระยะที่อุณหภูมิสูงหรือที่เรียกว่า Thermophilic phase ที่มักเกิดในช่วงต้นของกระบวนการหมัก โดยในระยะนี้จะย่อยสลายองค์ประกอบที่ย่อยสลายยาก เช่น ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส รวมถึงการกำจัดเชื้อโรค และไข่ของแมลงที่ปะปนมา (Tai et al., 2022; Yu et al., 2019) ซึ่งเมื่อปุ๋ยเย็นลงเท่าอุณหภูมิบรรยากาศปุ๋ยเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่หรือที่เรียกว่า mature phase ยังคงมีการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องด้วยจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางสร้างและสลายอินทรีย์วัตถุ เช่น สารฮิวมิคอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักตลอดเวลา (Hou et al., 2024; Wang et al., 2019) และส่งผลต่อคุณภาพของปุ๋ยหมักด้วย โดยในการศึกษานี้แบ่งช่วงปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม ระยะอุณหภูมิสูง และระยะปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ ดังภาพที่ 21 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิปุ๋ยหมักและอุณหภูมิบรรยากาศตลอดระยะเวลาการหมัก

4.1.1 ระยะเวลาเริ่มผสม (initial phase)

ระยะเวลาเริ่มผสม ได้แก่ วันแรกของการทำปุ๋ยหมัก (วันที่ 0) การย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ยังไม่มากนักจากการปรับตัวของจุลินทรีย์กับสภาพแวดล้อม ยังคงสังเกตลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นในปุ๋ยหมักได้อย่างชัดเจนทั้งขนาด สี และกลิ่น มีอุณหภูมิ 33.3 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศ ความชื้นมีค่าร้อยละ 54.19 ซึ่งเพียงพอให้ความชื้นพหุจุลินทรีย์คลุกเคล้ากับเนื้อปุ๋ยได้อย่างทั่วถึงที่ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 50 – 60 จึงจะเหมาะต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (Cornell Waste Management Institute, 2007) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.52 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์เติบโตได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างควรอยู่ในช่วง 6.5 -8.0 (DeMoranville et al., 2000) ค่าการนำไฟฟ้า หรือปริมาณเกลือที่ละลายได้ 3.38 เดซิซีเมน/เมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 65.48 โดยน้ำหนัก โดยจัดว่าปุ๋ยนี้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่มากนักเมื่อเทียบกับปุ๋ยหมักผสมมูลสัตว์อื่น ๆ ที่มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55.5 – 99.4 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าค่อนข้างต่ำเท่ากับ 15.24 ซึ่งแตกต่างกันตามสัดส่วนและวัตถุดิบที่ใช้ร่วมผสม เช่น ฟางข้าว ฟางข้าวโพด ชี้อ้อย และแกลบ กลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนสูงหากมีปริมาณมากจะทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูง แต่จากส่วนผสมของมูลสัตว์ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ มักพบได้บ่อยในปุ๋ยหมักมูลไก่ มูลสุกร มูลโค (Bello et al., 2019; Bustamante et al., 2008; Kong et al., 2022; Ming et al., 2023; Wang et al., 2019; Wu et al., 2017) โดยพบไนโตรเจนสูงกว่าร้อยละ 2.49 ขณะที่ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมมีค่าร้อยละ 1.61 และ 1.47 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปุ๋ยหมักที่ธาตุ

อาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เริ่มต้นสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) 2.49 3.22 และ 2.94 เท่าตามลำดับ ดังตารางที่ 14

4.1.2 ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic phase)

ระยะอุณหภูมิสูงระหว่างวันที่ 1-13 เป็นระยะที่เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ยาก โดยมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 1 และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรกของกระบวนการหมัก จากนั้นค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = -0.646$, $p < 0.01$) อุณหภูมิที่พบในระยะนี้มีค่าอยู่ในช่วง 39.3 – 62.0 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 15) และเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อหนอนแมลง และเชื้อโรคที่ปะปนมากับวัตถุดิบได้เมื่อสูงเกินกว่า 50 องศาเซลเซียส (Tai et al., 2022) ระยะอุณหภูมิสูงที่ค่อนข้างสั้นนี้มักเกิดกับวัตถุดิบจากมูลสัตว์ที่ย่อยสลายได้ค่อนข้างง่ายและมีไนโตรเจนเพียงพอ แตกต่างจากวัตถุดิบที่มาจากพืชที่มีโครงสร้างที่ย่อยสลายยากสูงจึงต้องใช้เวลาค่อนข้างนานกว่า (Lahsaini et al., 2017; Yu et al., 2019) ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงจากร้อยละ 64.26 เหลือร้อยละ 61.77 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงจาก 16.43 เหลือ 14.04 มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยไอออนที่มีประจุของธาตุอาหารต่าง ๆ จาก 3.39 เดซิซีเมน/เมตร เป็น 4.02 เดซิซีเมน/เมตร ขณะที่ความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงจากร้อยละ 44.08 เหลือร้อยละ 36.02 และลดลงอย่างต่อเนื่องไปจนเข้าสู่ระยะที่ปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่ดังทิศทางการความสัมพันธ์ของอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าการนำไฟฟ้า และความชื้น กับระยะเวลาการหมัก ($p < 0.01$) ในตารางที่ 15 ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 8.56 – 8.84 จากการปลดปล่อยแอมโมเนียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เกิดกลิ่นแอมโมเนียฉุนรุนแรงมากถึงปานกลาง เนื้อปุ๋ยหมักเริ่มแห้งเป็นก้อนเล็ก ๆ และมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลเข้ม

4.1.3 ระยะปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่ (mature phase)

ระยะปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่ เป็นระยะสุดท้ายของกระบวนการหมัก อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักค่อนข้างคงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ในช่วงวันที่ 14 – 119 มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25.5 – 32.7 องศาเซลเซียส แบคทีเรียที่เจริญได้ดีในอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic microorganisms) จะเจริญเติบโตเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นสารประกอบที่มีลักษณะคงทนเรียกว่าสารฮิวมิก (Stevenson, 1994) โดยปุ๋ยหมักมีลักษณะแห้ง ไม่มีกลิ่นฉุนละเอียดคล้ายดิน มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ความชื้นในระยะนี้มีปริมาณน้อยโดยลดลงจากร้อยละ 25.42 เหลือร้อยละ 11.56 จากการระเหยและการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความแปรปรวนอยู่ในช่วงร้อยละ 56.56 – 62.75 โดยน้ำหนัก แต่ยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมัก

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบมาตรฐานของปุ๋ยหมักกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

พารามิเตอร์	เกณฑ์มาตรฐาน	ระยะเวลาการหมัก (วัน)													
		ระยะอุณหภูมิสูง				ระยะพัฒนาเต็มที่									
		0	3	7	14	21	28	35	42	49	63	77	91	105	119
ความชื้น	≤ 30% โดยน้ำหนัก	54.19	44.08	36.02	19.75	21.78	25.42	24.30	21.59	20.42	15.29	15.54	14.71	11.56	19.02
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	≥ 30% โดยน้ำหนัก	65.48	64.26	61.77	62.75	62.54	61.96	56.56	61.46	62.16	60.38	62.36	62.29	59.46	58.06
pH	5.5 – 8.5	7.52	8.84	8.56	8.25	8.19	8.10	8.02	6.95	6.82	7.35	7.69	8.16	7.75	7.89
C/N	≤ 20:1	15.24	16.43	14.04	14.04	13.84	13.39	12.45	13.09	12.09	13.16	13.24	13.46	12.83	12.29
ค่าการนำไฟฟ้า	≤ 6 ds/m	3.38	3.39	4.02	4.62	5.24	4.68	5.16	5.06	5.34	5.45	6.07	5.98	6.04	6.02
ไนโตรเจน (TN)	≥ 1% โดยน้ำหนัก	2.49	2.27	2.55	2.58	2.62	2.68	2.63	2.72	2.79	2.68	2.73	2.69	2.69	2.74
ฟอสฟอรัส (TP)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	1.61	1.29	1.40	1.31	1.41	1.66	1.88	2.01	2.26	1.57	2.13	1.10	1.78	1.35
โพแทสเซียม (TK)	≥ 0.5% โดยน้ำหนัก	1.47	1.65	1.54	1.60	1.80	1.71	1.88	1.96	2.18	2.20	2.08	1.93	1.79	1.86
ผลรวมธาตุอาหารหลัก	≥ 2% โดยน้ำหนัก	5.51	5.21	5.49	5.49	5.83	6.05	6.39	7.16	7.23	6.45	6.94	5.72	6.26	5.59

หมายเหตุ: โดย ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ขนาดของปุ๋ย ปริมาณหินและกรวด พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นเป็นไปตามมาตรฐาน เนื่องจากปุ๋ยหมักได้ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ปริมาณสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และปรอท พบว่ามีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 50, 5, 300, 500, 500 และ 2 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

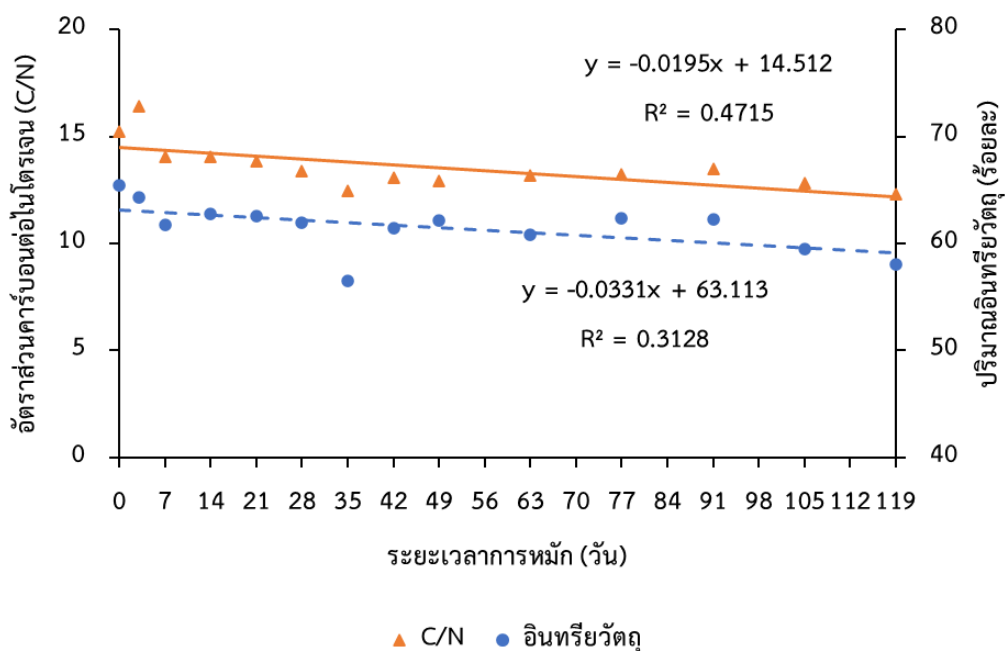
ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่าง ระยะเวลา อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) อินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

พารามิเตอร์	อุณหภูมิ	ความชื้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)	อินทรีย์วัตถุ (organic matters; OM)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)
ระยะเวลา	-0.646**	-0.730**	-0.290	0.884**	-0.515**	-0.674**
อุณหภูมิ		0.687**	0.536**	-0.763**	0.393*	0.795**
ความชื้น			0.285	-0.916**	0.519**	0.771**
pH				-0.353*	0.081	0.474**
EC					-0.546**	-0.815**
อินทรีย์วัตถุ						0.786**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 42$

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$, $n = 42$

นานขึ้น ($r = -0.515$, $p < 0.01$) ดังภาพที่ 22 เช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีความแปรปรวนอยู่ในช่วง 12.09 – 14.04 และมีแนวโน้มลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นเช่นกัน ($r = -0.674$, $p < 0.01$) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีค่าระหว่าง 10 – 15 จัดเป็นช่วงที่เกิดการสร้างสารฮิวมิกที่ดี (Tan, 2003) ซึ่งการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุสัมพันธ์กับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เป็นดัชนีบ่งบอกกระบวนการย่อยสลายของปุ๋ยหมักอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.786$, $p < 0.01$) อีกทั้งมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = 0.653$, $p < 0.01$ และ $r = 0.532$, $p < 0.01$ ตามลำดับ) ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 8.25 เหลือ 6.82 จากกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์และไนเตรท และอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (2557) (ตารางที่ 14) โดยค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วง 4.62 – 6.07 เดซิซีเมน/เมตร จากกระบวนการย่อยสลายการปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุ (Almeida et al., 2021; Zittel et al., 2018) และตั้งแต่วันที่ 77 เป็นต้นไปมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตรกำหนดไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร ดังนั้นในระยะนี้จึงควรใช้ปุ๋ยหมักในปริมาณน้อยเพื่อป้องกันปัญหาดินเค็ม

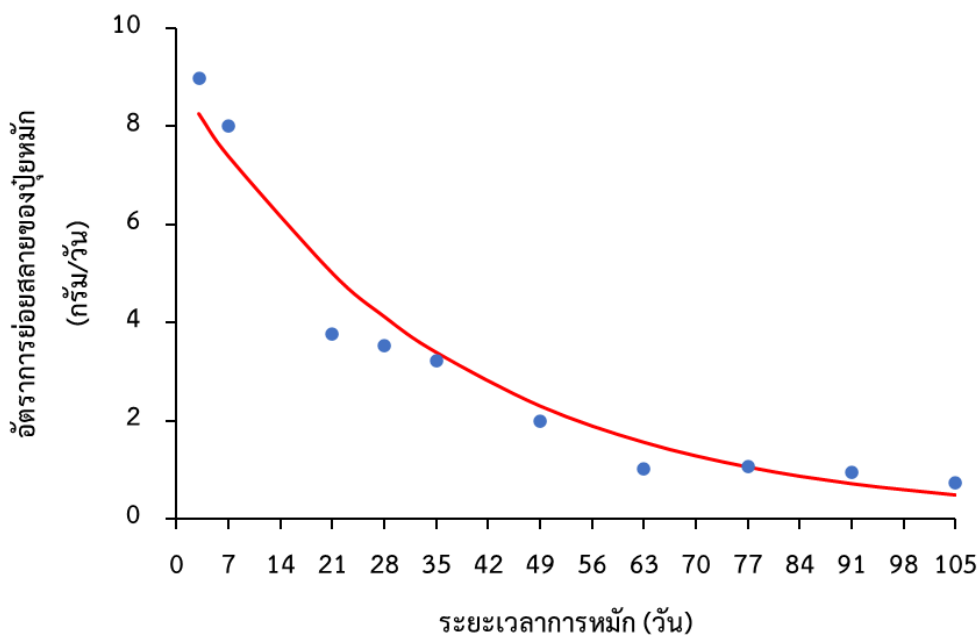


ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ตลอดระยะเวลาการหมัก ($r = -0.515$, $p < 0.01$ และ $r = -0.674$, $p < 0.01$ ตามลำดับ)

สำหรับอัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก (decomposition rate) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเช่นกันโดยสูงสุดในช่วงแรกและลดลงด้วยอัตราเร่ง 0.0278 กรัม/วัน ดังสมการที่ 4.1 โดยในระยะอุณหภูมิสูงจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงนี้ทำให้วันที่ 3 มีอัตราการย่อยสลายสูงที่สุด คิดเป็น 8.98 กรัม/วัน จากนั้นอัตราการย่อยสลายลดลงอย่างรวดเร็วจากการลดลงของวัตถุดิบตั้งต้นโดยเป็นช่วงที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ตั้งแต่วันที่ 14 – 63 ลดลงจาก 3.77 กรัม/วันเหลือ 1.02 กรัม/วัน และตั้งแต่วันที่ 64 เป็นต้นไปอัตราการย่อยสลายค่อนข้างคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.72 – 1.07 กรัม/วัน โดยอัตราการย่อยสลายการย่อยสลายของปุ๋ยหมักสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักดังภาพที่ 23

$$C_t = 8.98 e^{-0.0278t} \quad (4.1)$$

โดย C_t คือ อัตราการย่อยสลาย (กรัม/วัน)
 t คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)



ภาพที่ 23 อัตราการย่อยสลายของปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการหมัก

4.2 ความเป็นพิษต่อพืชของปุ๋ยหมักและการประเมินการย่อยสลายสมบูรณ์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร

การประเมินความเป็นพิษต่อพืช (phytotoxicity) ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ดถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเป็นสากล เช่น ใช้การใช้เมล็ดแตงกวา หัวไชเท้า ผักกาดขาว ผักกาดก้านขาว และกวางตุ้ง เป็นต้น (Hou et al., 2024; Kong et al., 2022) โดยมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร กำหนดคุณลักษณะทางชีวภาพด้วยดัชนีการงอกของเมล็ดต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 จึงจัดเป็นปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายสมบูรณ์และไม่เป็นพิษต่อพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2557)

ดัชนีการงอกของเมล็ดประกอบด้วยข้อมูลที่สำคัญ 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนเมล็ดที่งอกและความยาวรากที่งอก โดยจำนวนเมล็ดที่งอกบ่งบอกถึงโอกาสในการงอกของเมล็ด ส่วนความยาวรากบ่งบอกศักยภาพในการเจริญเติบโต ในการศึกษาใช้เมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นทำการทดสอบดัชนีการงอกชุดควบคุมด้วยน้ำปราศจากไอออนในระยะเวลา 48 ชั่วโมงพบว่าการตอบสนองที่ดีมีอัตราการงอกร้อยละ 100.00 เมื่อนำมาทดสอบด้วยสารละลายปุ๋ยหมักพบว่าความเป็นพิษของปุ๋ยหมักมีอิทธิพลต่อร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดน้อย โดยยังพบโอกาสการงอกสัมพัทธ์ตลอดกระบวนการหมักสูงถึงร้อยละ 86.67 – 100.00 เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่กลับมีอิทธิพลต่อร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 60.65 – 98.92 ซึ่งความยาวรากที่สั้นลงบ่งบอกถึงการหยุดชะงักการเจริญเติบโต (Hou et al.,

2024)ทำให้ดัชนีการงอกของเมล็ดมีความเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 54.59 – 95.63 โดยพบความเป็นพิษในช่วงระยะอุณหภูมิสูงไปจนถึงวันแรกที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มทีระหว่างวันที่ 1 – 14 ที่มีดัชนีการงอกของเมล็ดและความยาวรากมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 80 และต่ำสุดในวันที่ 3 ดังตารางที่ 16 จากนั้นดัชนีการงอกของเมล็ดและความยาวรากค่อยๆ เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการลดลงของอุณหภูมิเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะที่พัฒนาเต็มทีอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.459$, $p < 0.01$) และมีค่าสูงสุดในวันที่ 42 ของกระบวนการหมัก ดังภาพที่ 24 จากนั้นดัชนีการงอกและความยาวรากจะลดลงจากค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 63 โดยดัชนีการงอกและความยาวรากที่ลดลงในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมัก อาจเกิดจากกระบวนการย่อยสลายปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุมากเกินไปจนปุ๋ยเกิดความเค็มได้ โดยตั้งแต่วันที่ 63 เป็นต้นไปค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มผสมถึง 1.6-1.8 เท่า และเป็นช่วงที่พบมีค่าเกินมาตรฐานของ(กรมวิชาการเกษตร, 2557) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 6 เดซิซีเมน/เมตร (ตารางที่ 14)

4.3 ปริมาณสารฮิวมิกและธาตุองค์ประกอบ

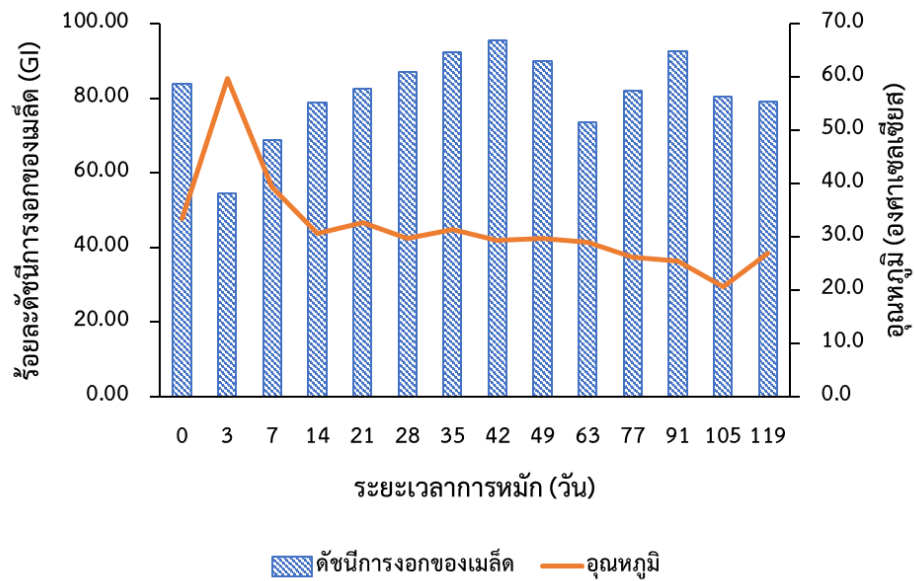
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของสารฮิวมิก ได้แก่ กรดฮิวมิก และกรดฟัลวิก เป็นดัชนีที่สำคัญในการบ่งชี้กระบวนการเกิดสารฮิวมิก โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของสารฮิวมิกและปริมาณกรดฮิวมิกต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในปุ๋ยหมัก ใช้อธิบายการย่อยสลายทางชีวภาพของอินทรีย์วัตถุขณะที่เกิดกระบวนการสร้างสารฮิวมิกขึ้น พิจารณาได้จากสัดส่วนเชิงโครงสร้างของธาตุองค์ประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงไป เกิดสารฮิวมิกที่เสถียรภาพเชิงโครงสร้างมีความแตกต่างกันตามขนาดโมเลกุลและคุณสมบัติในการละลาย (Behravan et al., 2020; El Fels et al., 2014; Flores-Solórzano et al., 2021; Putra et al., 2016) มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ปริมาณสารฮิวมิก

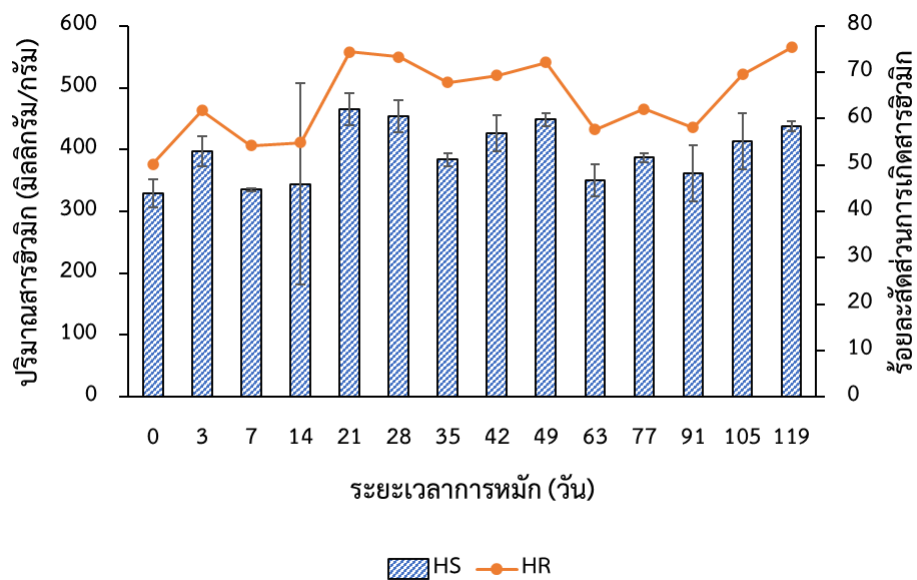
สารฮิวมิกที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเชิงปริมาณตลอดกระบวนการหมัก ($p < 0.05$) (ภาพที่ 25) แบ่งด้วยวิธีของ Duncan ได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม a มีปริมาณน้อยที่สุด กลุ่ม b มีปริมาณค่อนข้างน้อย กลุ่ม c มีปริมาณปานกลาง กลุ่ม d มีปริมาณค่อนข้างมาก และกลุ่ม e มีปริมาณมากที่สุด โดยจำแนกวันที่พบในกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity) ด้วยเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) ได้แก่ ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดเทียบกับชุดควบคุม (relative seed germination; RSG) ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์เทียบกับชุดควบคุม (relative root germination; RRG) และดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI)

ระยะเวลา (วัน)	ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ด (Relative Seed Germination; RSG)	ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์ (relative root germination; RRG)	ร้อยละดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI)
0	100.00	83.76	83.76
3	90.00	60.65	54.59
7	100.00	68.66	68.66
14	93.33	84.33	78.71
21	100.00	82.62	82.62
28	93.33	93.19	86.98
35	100.00	92.31	92.31
42	96.67	98.92	95.63
49	100.00	90.03	90.03
63	86.67	84.97	73.64
77	100.00	82.05	82.05
91	100.00	92.59	92.59
105	100.00	80.34	80.34
119	100.00	79.20	79.20



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการงอกของเมล็ด (germination index; GI) และอุณหภูมิปุ๋ยหมัก ตลอดระยะเวลาการหมัก



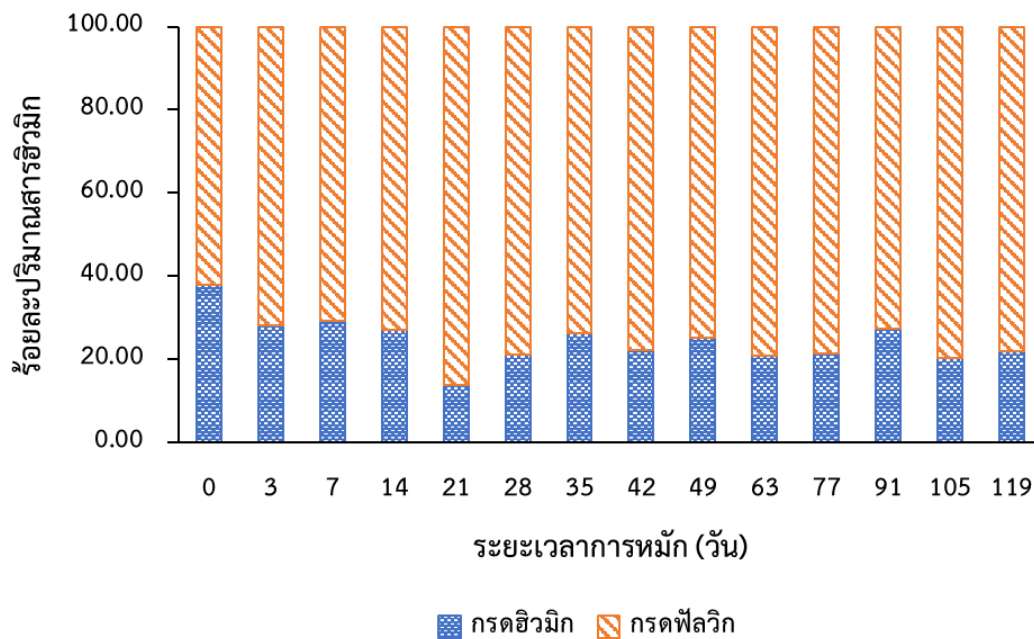
ภาพที่ 25 ปริมาณสารฮิวมิก (humic substances; HS) และสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ตลอดระยะเวลาการหมัก

ปริมาณสารฮิวมิก	วันที่พบ
กลุ่ม a มีปริมาณน้อยที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 328.72-413.69 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 0, 3, 7, 14, 35, 63, 91, 77 และ 105
กลุ่ม b มีปริมาณค่อนข้างน้อย มีค่าอยู่ในช่วง 335.00-426.08 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3, 7, 14, 35, 42, 63, 91, 77 และ 105
กลุ่ม c มีปริมาณปานกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 344.16-437.81 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3, 14, 35, 42, 63, 91, 77, 105 และ 119
กลุ่ม d มีปริมาณค่อนข้างมาก มีค่าอยู่ในช่วง 361.71-454.04 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3, 28, 35, 42, 49, 91, 77, 105 และ 119
กลุ่ม e มีปริมาณมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 383.66-465.46 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3, 21, 28, 35, 42, 49, 77, 105 และ 119

โดยวันเริ่มผสมวันที่ 0 สารฮิวมิกมีปริมาณน้อยที่สุดเพียง 328.72 มิลลิกรัม/กรัม แต่เมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นกระบวนการย่อยสลายของค้ำประกอบอินทรีย์ในวัสดุตั้งต้นปลดปล่อยสารฮิวมิกออกมามากขึ้น ทำให้ปริมาณสารฮิวมิกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยกลุ่มที่มีปริมาณมากที่สุดอยู่ในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 21 มีปริมาณ 465.46 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งปริมาณสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับกระบวนการสร้างสารฮิวมิกจากความสัมพันธ์กับสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.975$, $p < 0.01$) โดยในวันเริ่มกระบวนการหมักมีสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกร้อยละ 50.21 และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 75.42 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก (วันที่ 119) (ภาพที่ 25) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของสารฮิวมิกนี้สอดคล้องกับความเป็นพิษต่อความยาวรากสัมพันธ์ของเมล็ดผักกาดขาว โดยการลดลงเชิงปริมาณของสารฮิวมิกสัมพันธ์กับการลดลงของความยาวรากสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อการลดลงของดัชนีการงอกของเมล็ดด้วย ($r = 0.341$ และ 0.319 ตามลำดับ, $p < 0.05$) เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ El Fels et al. (2014) และ Lahsaini et al. (2017) พบว่าปริมาณสารฮิวมิกของปุ๋ยหมักจากขยะต้นปาล์มและอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นช่วยลดความเป็นพิษต่อพืช และเพิ่มดัชนีการงอกของเมล็ดหัวผักกาด เมล็ดผักกาดหอม เมล็ดผักแครอท และเมล็ดลูเชอร์น่า

ในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความสำคัญกับกรดฮิวมิกที่มีเสถียรภาพสูง เพราะไม่ละลายในกรดอยู่ปรับปรุงดินได้เป็นเวลานานก่อนถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เป็นธาตุอาหาร เช่นเดียวกับกรดฟัลวิกที่แม้มีคุณสมบัติการละลายสูงละลายได้ทั้งในกรดและด่างและมีเสถียรภาพใน

ดินน้อยกว่า แต่มีหุ้ฟง์กัซันจำนวนมากช่วยดูดยัธธาตุอาหารและทำให้ธาตุอาหารเคลือันที่ภายในดินได้ (Hou et al., 2024; Wang et al., 2019; Zhou et al., 2014) สำหรับการศึกษานี้พบว่ากรดฟัลวิกมีปริมาณมากที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 62.15 – 86.01 ขณะที่กรดฮิวมิกมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 13.99 – 37.85 ดังภาพที่ 26 ซึ่งหมายถึงมีปริมาณสัดส่วนโครงสร้างของโมเลกุลสารอินทรีย์ขนาดเล็กของกรดฟัลวิกที่มีหุ้ฟง์กัซันที่แลกเปลี่ยนได้ในปริมาณสูง มีคุณสมบัติในการตรึงธาตุอาหารที่มีประจุได้ดีและปลดปล่อยให้พืชเมื่อต้องการได้ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและออสโมซิส (Behravan et al., 2020; Chen et al., 2024; El Fels et al., 2014) ทำให้ปริมาณกรดฟัลวิกมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของสารฮิวมิกในปุ๋ยหมักถึงร้อยละ 95 ($p < 0.01$) เมื่อแบ่งกลุ่มกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกที่พบเชิงปริมาณตลอดกระบวนการหมักมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้



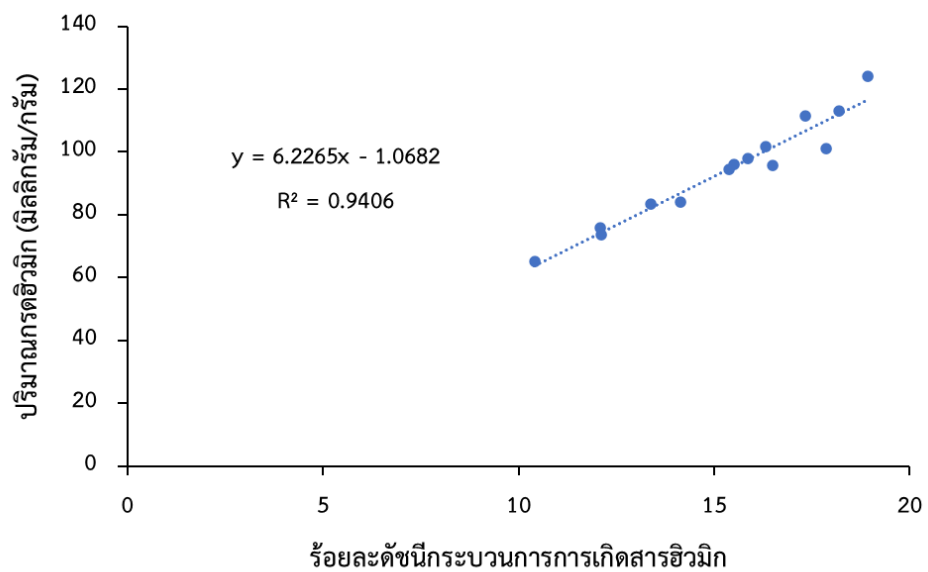
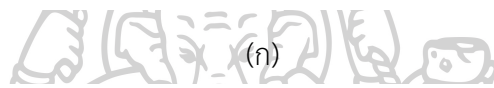
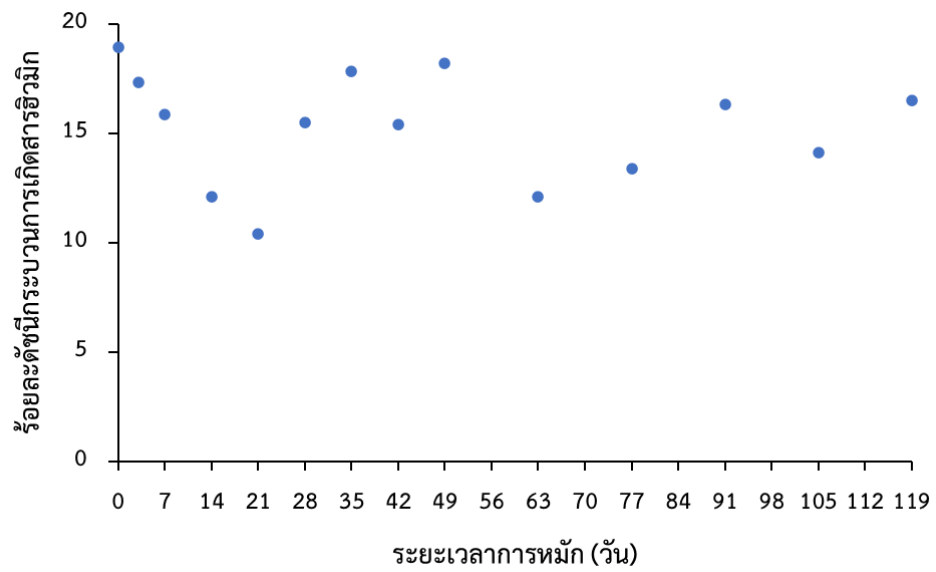
ภาพที่ 26 สัดส่วนปริมาณสารฮิวมิก (กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก) ตลอดระยะเวลาการหมัก

ปริมาณกรดฮิวมิก	วันที่พบ
กลุ่ม a มีปริมาณน้อยที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 65.11-84.03 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 14 21 63 77 และ 105
กลุ่ม b มีปริมาณค่อนข้างน้อย มีค่าอยู่ในช่วง 73.67-101.68 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 7 14 28 35 42 63 77 91 105 และ 119

กลุ่ม c มีปริมาณปานกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 84.03-111.38 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3 7 28 35 42 91 105 และ 119
กลุ่ม d มีปริมาณค่อนข้างมาก มีค่าอยู่ในช่วง 94.58-113.07 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3 7 28 35 42 49 91 และ 119
กลุ่ม e มีปริมาณมากที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 98.05-123.96 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 0 3 7 35 49 และ 91

ปริมาณกรดฟัลวิค	วันที่พบ
กลุ่ม a มีปริมาณน้อยที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 204.76-285.68 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 0 3 7 14 35 63 และ 91
กลุ่ม b มีปริมาณค่อนข้างน้อย มีค่าอยู่ในช่วง 236.95-303.46 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3 7 14 35 63 77 และ 91
กลุ่ม c มีปริมาณปานกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 260.04-342.01 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3 14 35 42 49 63 77 91 105 และ 119
กลุ่ม d มีปริมาณค่อนข้างมาก มีค่าอยู่ในช่วง 268.26-358.00 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 3 14 28 35 42 49 63 77 105 และ 119
กลุ่ม e มีปริมาณมาก มีค่าอยู่ในช่วง 329.66-400.35 มิลลิกรัม/กรัม	วันที่ 21 28 42 49 105 และ 119

โดยในช่วงระยะอุณหภูมิสูงเกิดการย่อยสลายโครงสร้างสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ทำให้กรดฮิวมิคจากวัตถุดิบตั้งต้นเกิดการสลายตัวและปริมาณกรดฮิวมิคลดลงจาก 123.96 มิลลิกรัม/กรัม ในวันที่ 0 เหลือ 65.11 มิลลิกรัม/กรัม ในวันที่ 21 ซึ่งเป็นวันที่มีปริมาณน้อยที่สุด จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแปรปรวนอยู่ในช่วง 73.67 – 113.07 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิคจากอัตราส่วนกรดฮิวมิคต่อปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดก็มีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 21 เช่นกัน ดังภาพที่ 27 (ก) โดยความแปรปรวนเชิงปริมาณของสารฮิวมิคสัมพันธ์กับดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิค ($r = 0.981, p < 0.01$) ดังภาพที่ 27 (ข)



(ข)

ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีภาวะบวมการเกิดสารชีวมีก (himification index; HI)

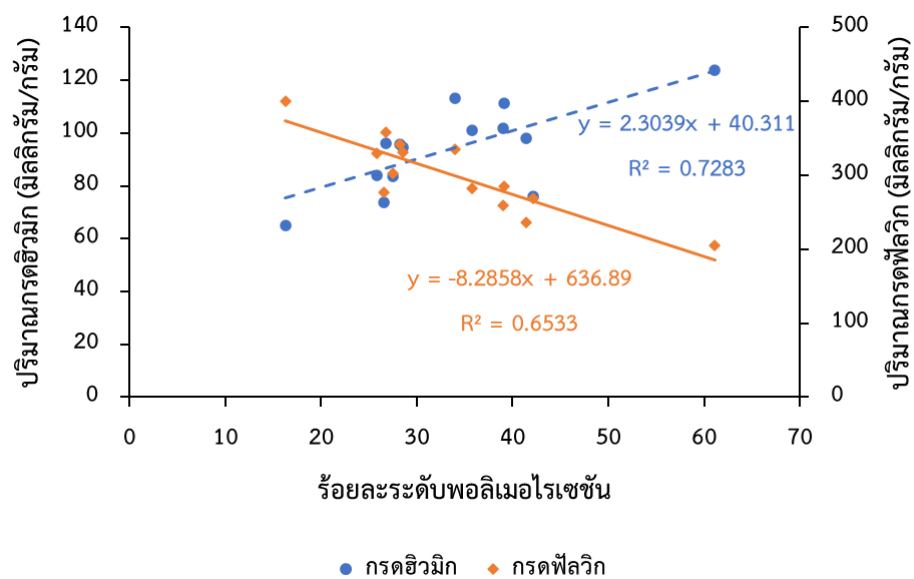
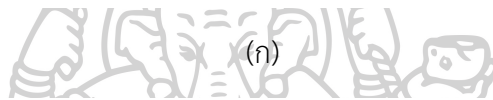
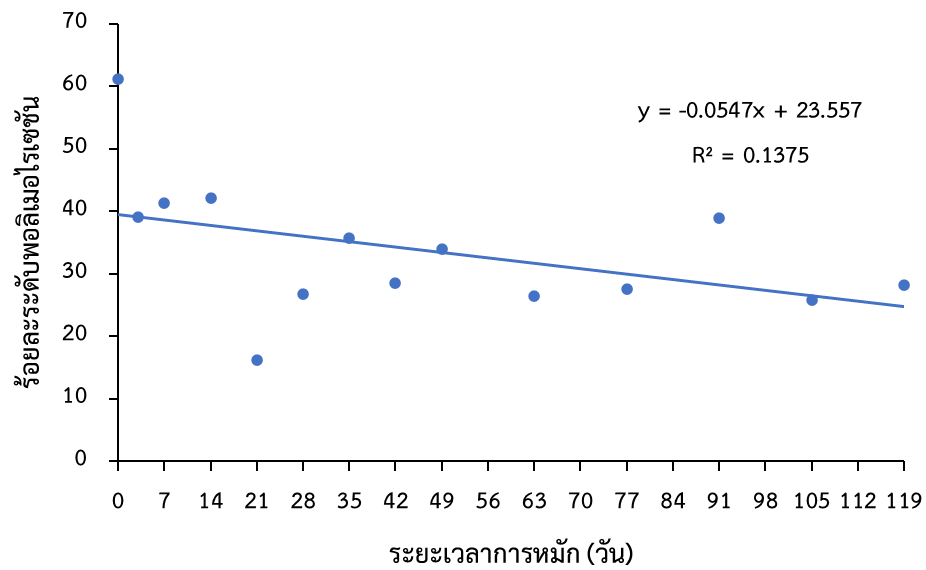
(ก) ดัชนีภาวะบวมการเกิดสารชีวมีกตลอดระยะเวลาการหมัก

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดชีวมีกกับดัชนีภาวะบวมการเกิดสารชีวมีก ($r = 0.981$, $p < 0.01$)

สำหรับทิศทางการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเชิงปริมาณของกรดฟัลวิคเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับกรดฮิวมิก ($r = -0.862$, $p < 0.01$) จากการเปลี่ยนรูปร่างและกันระหว่างกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิค โดยปริมาณกรดฟัลวิคเพิ่มสูงขึ้นจากวันที่ 0 มีค่า 204.76 มิลลิกรัม/กรัม ไปสูงที่สุดในวันที่ 21 มีค่า 400.35 มิลลิกรัม/กรัม ขณะที่กรดฮิวมิกในวัตถุตั้งต้นถูกย่อยสลายไปกับกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุปลดปล่อยโมเลกุลที่เล็กของกรดฟัลวิคทำให้ปริมาณของกรดฟัลวิคสูงขึ้น (Zhao et al., 2016) โดยปริมาณกรดฮิวมิกค่อย ๆ ลดลงและอยู่ในกลุ่มที่มีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 21 จากนั้นจะเกิดการสร้างกรดฮิวมิกขึ้นใหม่จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันโดยโมเลกุลของกรดฟัลวิคที่มีขนาดเล็กกว่าร่วมกับอนุภาคอินทรีย์ที่เป็นผลจากการย่อยสลายอื่น ๆ (Yu et al., 2019; Zhao et al., 2017) ทำให้กรดฟัลวิคในวันที่ 91 มีค่าลดลงเหลือ 260.04 มิลลิกรัม/กรัม ขณะที่กรดฮิวมิกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 91 มีค่า 101.68 มิลลิกรัม/กรัม เช่นเดียวกับค่าระดับพอลิเมอไรเซชันที่มีค่าสูงขึ้นในวันที่ 91 คิดเป็นร้อยละ 38.96 (ภาพที่ 28 (ก)) โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับพอลิเมอไรเซชันสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดฮิวมิกและการลดลงของปริมาณกรดฟัลวิคดังกล่าว ($r = 0.589$ และ $r = -0.860$, $p < 0.01$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 (ข) จากนั้นกระบวนการสร้างพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงในช่วงท้ายของกระบวนการหมักวันที่ 105 และ 119 เช่นเดียวกับปริมาณกรดฮิวมิกที่ลดลงเช่นกัน โดยกระบวนการย่อยสลายโครงสร้างที่เสถียรของกรดฮิวมิกปลดปล่อยโมเลกุลที่เล็กกว่าของกรดฟัลวิคออกมา และทำให้ค่าของกรดฟัลวิคเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ มักพบเมื่อสารอินทรีย์จากวัตถุตั้งต้นถูกใช้หมดไป และจุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างที่เสถียรเปลี่ยนเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่เสถียรน้อยกว่า (Yu et al., 2019)

4.3.2 ธาตุองค์ประกอบ และอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบในโครงสร้างกรดฮิวมิก

โครงสร้างกรดฮิวมิกประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละของธาตุองค์ประกอบโดยน้ำหนักอะตอมของกรดฮิวมิกพบว่าปริมาณไฮโดรเจนมากที่สุด รองลงมาเป็นคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ 46.46, 31.76, 18.57, 2.93 และ 0.27 ตามลำดับ (ตารางที่ 17) โดยกระบวนการหมักทำให้สัดส่วนของธาตุทั้ง 5 มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงไปทั้งเพิ่มขึ้น ลดลง และ/หรือคงที่ โดยสัดส่วนปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน และซัลเฟอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณธาตุไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลง ขณะที่สัดส่วนธาตุไนโตรเจนค่อนข้างคงที่ มีรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเชิงปริมาณของธาตุต่าง ๆ ดังนี้



(ข)

ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization degree; PD)

(ก) ระดับพอลิเมอร์ไรเซชันตลอดระยะเวลาการหมัก (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกรดซิตริกและกรดฟรุคติกกับระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน ($r = 0.589$, $p < 0.01$ และ $r = -0.860$, $p < 0.01$ ตามลำดับ)

สัดส่วนปริมาณคาร์บอนตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30.35 – 32.61 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = 0.604$, $p < 0.05$) จากวันเริ่มผสมมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 30.35 โดยน้ำหนักอะตอม และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 32.01 ในวันที่ 14 (ตารางที่ 17) แสดงถึงการเกิดโครงสร้างคาร์บอนอินทรีย์ในกรดฮิวมิคจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุตั้งต้น (Amir et al., 2010) จากนั้นในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่จะยังคงมีการสร้างและสลายกรดฮิวมิคอย่างต่อเนื่องโดยจุลินทรีย์กลุ่มอนุหมิปานกลาง (Yu et al., 2019; Zhou et al., 2014) ทำให้ปริมาณคาร์บอนอะตอมมีความแปรปรวนในช่วงแคบ ๆ ระหว่างร้อยละ 31.37 - 32.61 โดยน้ำหนักอะตอม แต่หากทิ้งปุ๋ยไว้นานจนอินทรีย์วัตถุตั้งต้นหมดอาจทำให้ปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงได้ ซึ่งมักพบได้ในปุ๋ยที่มีปริมาณไนโตรเจนเพียงพอต่อการย่อยสลายคาร์บอนอย่างต่อเนื่อง เช่น ปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ เป็นต้น (จุฑาวรรณ สุคนธินิตย์, 2557; สิริประภัสสร รัชชีย้อย, 2558)

สัดส่วนปริมาณไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในปุ๋ยหมักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 44.64 – 50.58 โดยน้ำหนักอะตอม (ตารางที่ 17) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = -0.731$, $p < 0.01$) โดยเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปริมาณไฮโดรเจนลดลงคิดเป็นร้อยละ 10.12 โดยน้ำหนักอะตอมเมื่อเทียบกับวันเริ่มผสม แสดงถึงการสูญเสียอะตอมของไฮโดรเจนและเกิดการสร้างพันธะใหม่ที่มีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.60 – 0.73 พบว่าอัตราส่วนนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.726$, $p < 0.01$) (ตารางที่ 18) บ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอนไปเป็นโครงสร้างแอมดิคที่ต่อกับโครงสร้างแอลิแฟติก (Wang et al., 2023) การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแอลิแฟติกไปเป็นโครงสร้างแอมดิคในสารประกอบอีเทอร์และเปปไทด์ (Amir et al., 2010; Zhu et al., 2018) และการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแอลิแฟติกไปเป็นโครงสร้างแอมดิคที่มีกรดคาร์บอกซิลิกเป็นองค์ประกอบ (Han et al., 2022; Liu et al., 2020)

สำหรับออกซิเจนพบในสัดส่วนร้อยละ 15.85 – 19.80 โดยน้ำหนักอะตอม (ตารางที่ 17) ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง และพบได้ทั่วไปในปุ๋ยหมักที่มีมูลสัตว์เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 70 เช่น ปุ๋ยหมักมูลโค มูลสุกร และมูลไก่ เป็นต้น (จุฑาวรรณ สุคนธินิตย์, 2557; สิริประภัสสร รัชชีย้อย, 2558) โดยกระบวนการหมักทำให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = 0.719$, $p < 0.01$) แสดงถึงการเพิ่มโครงสร้างที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนปริมาณคาร์บอนอะตอมในตารางที่ 18 พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = 0.663$, $p < 0.01$) หมายถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน O-alkyl และหมู่ฟังก์ชันอื่นที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ในโครงสร้างของกรดฮิวมิค

ตารางที่ 17 ร้อยละปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยน้ำหนักอะตอมตลอดระยะเวลากระบวนการหมัก

ระยะเวลา (วัน)	คาร์บอน (ร้อยละ)	ไฮโดรเจน (ร้อยละ)	ออกซิเจน (ร้อยละ)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละ)
0	30.35	50.58	15.85	3.08	0.14
3	31.16	48.76	17.32	2.56	0.21
7	31.92	47.02	17.94	2.88	0.23
14	32.01	46.69	18.11	2.91	0.28
21	31.65	46.91	18.12	3.04	0.29
28	31.37	46.58	18.81	2.97	0.27
35	31.55	45.62	19.59	2.96	0.28
42	31.66	45.23	19.80	3.02	0.29
49	31.89	46.36	18.40	3.06	0.28
63	32.13	45.88	18.83	2.87	0.30
77	32.14	44.96	19.60	3.00	0.30
91	32.61	44.64	19.51	2.91	0.32
105	32.00	45.41	19.36	2.91	0.31
119	31.80	45.46	19.51	2.91	0.31
เฉลี่ย	31.76	46.46	18.57	2.93	0.27
ช่วงแบ่ง ระดับ	1.00	2.00	0.50	0.20	0.10
ค่าระดับสี ตามปริมาณ (ร้อยละ)	30.00-30.99	44.00-45.99	15.50-16.99	2.50-2.69	0.10-0.19
	31.00-31.99	46.00-47.99	17.00-18.49	2.70-2.89	0.20-0.29
	32.00-32.99	48.00-49.99	18.50-19.99	2.90-3.09	0.30-0.39
		50.00-51.99			

ซึ่งหมูฟังกซ์ชั้นเหล่านี้ช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนธาตุอาหารที่มีประจุโดยการแทนที่โปรตรอนหรือหมูไฮดรอกซิลในโครงสร้างหมูฟังกซ์ชั้น และการแตกตัวเป็นไอออนของหมูฟังกซ์ชั้นนี้ ยังสามารถเพิ่มการละลายน้ำได้ดีขึ้นอีกด้วย (Domeizel et al., 2004; Gong et al., 2020)

ตารางที่ 18 อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกโดยน้ำหนักอะตอม และระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิกตลอดระยะเวลากระบวนการหมัก (ω)

ระยะเวลา (วัน)	C/H	O/C	C/N	ω
0	0.60	0.52	9.85	-0.32
3	0.64	0.56	12.19	-0.21
7	0.68	0.56	11.07	-0.08
14	0.69	0.57	10.98	-0.05
21	0.67	0.57	10.41	-0.05
28	0.67	0.60	10.56	0.00
35	0.69	0.62	10.67	0.08
42	0.70	0.63	10.50	0.11
49	0.69	0.58	10.41	-0.01
63	0.70	0.59	11.21	0.01
77	0.71	0.61	10.71	0.10
91	0.73	0.60	11.20	0.10
105	0.70	0.60	10.99	0.06
119	0.70	0.61	10.92	0.07
ช่วงแบ่งระดับ	0.05	0.05	1.00	0.20
ค่าระดับสีตามปริมาณสัดส่วน	0.60 - 0.64	0.50 - 0.54	9.00 - 9.99	(-0.40) - (-0.21)
	0.65 - 0.69	0.55 - 0.59	10.00 - 10.99	(-0.20) - (-0.01)
	0.70 - 0.74	0.60 - 0.65	11.00 - 11.99	0.00 - 0.19
			12.00 - 12.99	

ขณะที่ธาตุไนโตรเจนในกรดฮิวมิกมีค่าอยู่ในช่วง 2.56 – 3.08 โดยมีปริมาณสูงที่สุดในวันเริ่มผสมถึงร้อยละ 3.08 (ตารางที่ 17) จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยจากการสูญเสียไนโตรเจนอะตอมในรูปของแก๊สแอมโมเนียในระยยะอุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณไนโตรเจนในวันที่ 3 และวันที่ 7 ลดลง จากนั้นเมื่อปุ๋ยเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่มีปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นและแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ ระหว่างร้อยละ 2.87 – 3.04 โดยน้ำหนักอะตอม โดยอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอมมีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับปริมาณไนโตรเจนเช่นกัน (ตารางที่ 18) เมื่อปริมาณไนโตรเจนลดต่ำลงในช่วงอุณหภูมิสูงอัตราส่วนนี้จึงมีค่าสูงสุดในวันที่ 3 จากนั้นอัตราส่วนนี้จะค่อย ๆ

ลดลง แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างหลักของกรดฮิวมิกมีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนนี้ตลอดกระบวนการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 9.85 – 12.19

นอกจากนี้ค่าระดับการออกซิเดชันภายใน (Internal oxidation; ω) เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของสารฮิวมิกเชิงโครงสร้าง โดยระดับออกซิเดชันที่มีค่าเป็นบวกบ่งบอกถึงกระบวนการออกซิเดชันเพิ่มปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง ในขณะที่ระดับออกซิเดชันที่มีค่าเป็นลบมักบ่งบอกสภาวะรีดักชัน (Tan, 2003) ที่เกิดในช่วงการย่อยสลายช่วงแรกและจุลินทรีย์นำออกซิเจนไปใช้สำหรับค่าระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิกในปุ๋ยหมักมีค่าอยู่ในช่วงเป็นลบที่ -0.32 ในวันแรก ของกระบวนการหมัก จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าตั้งแต่ 0.00 ในวันที่ 28 ไปจนถึงมีค่าสูงสุดในวันที่ 42 มีค่า 0.11 (ตารางที่ 18) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าระดับออกซิเดชันภายในนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.720$, $p < 0.01$) แสดงถึงการสร้างพันธะใหม่ที่เสถียรมากขึ้นกับอะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างโดยอะตอมของธาตุไฮโดรเจนลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในโครงสร้างที่มักหมายถึงการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ

จากการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณของธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ และระดับการออกซิเดชันภายในที่บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอมและสัดส่วนอะตอมในโครงสร้างของกรดฮิวมิก พบว่ามีความเสถียรเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ซึ่งแม้ปุ๋ยหมักจะเย็นลงทำอุณหภูมิบรรยากาศและพร้อมนำไปใช้ได้ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป แต่คุณภาพปุ๋ยหมักที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงวันที่ 42 และนำไปใช้ได้จนถึงวันที่ 119 โดยมีความแปรปรวนเชิงปริมาณของธาตุองค์ประกอบ อัตราส่วนของธาตุองค์ประกอบ และระดับการออกซิเดชันภายในในช่วงแคบ ๆ โดยมีรายละเอียดการศึกษาคุณภาพเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิชิเบลสเปกโทรสโกปีที่อภิปรายในหัวข้อถัดไป

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของกรดฮิวมิกด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิชิเบลสเปกโทรสโกปี

การดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต-วิชิเบลสเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของปุ๋ยในระหว่างกระบวนการหมัก โดยการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ 200 – 230 นาโนเมตร บ่งบอกถึงสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ถูกย่อยสลายปลดปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ ออกมา ช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกิดพอลิเมอร์ในกระบวนการเกิดสารฮิวมิก ช่วงความยาวคลื่น 300 – 370 นาโนเมตร แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นละมีคุณสมบัติเป็นแอมโรแมติกมากขึ้น และช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร แสดงถึงการเกิดโครงสร้างที่ไม่

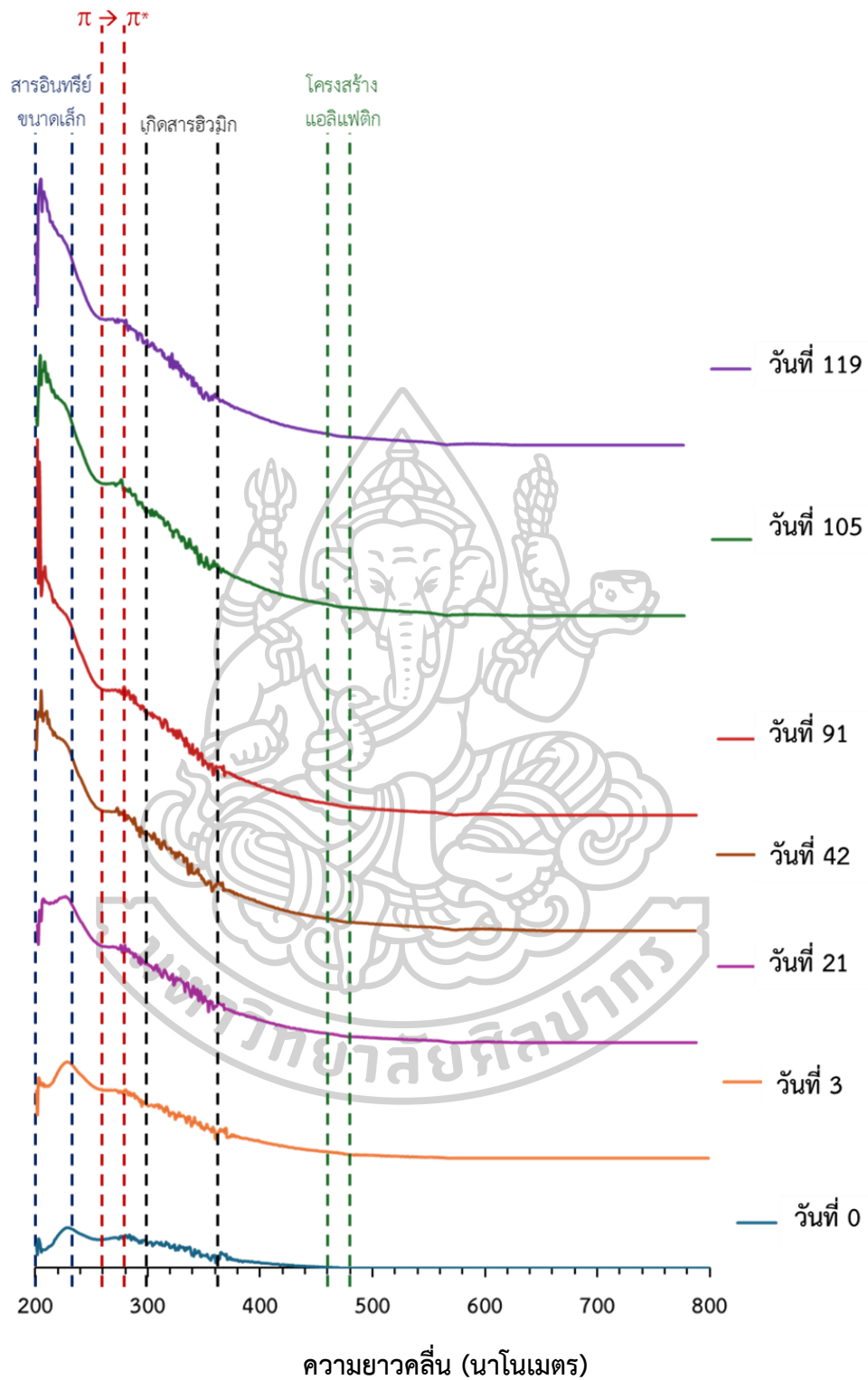
อิมตัวของโครงสร้างแอลิแฟติกในสารฮิวมิก (Albrecht et al., 2011; Biyada et al., 2020; Li et al., 2014; Tai et al., 2022; Wei et al., 2007) โดยอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงบ่งบอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณจากการเกิดโครงสร้างหนึ่งไปเป็นอีกโครงสร้างหนึ่ง มีรายละเอียดการศึกษาเชิงโครงสร้างที่ความยาวคลื่น และอัตราส่วนของความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ

ในการศึกษานี้มีการศึกษาการดูดกลืนคลื่นแสง 4 ช่วงคลื่น ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่น 200 – 230 นาโนเมตร ช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร ช่วงความยาวคลื่น 300 – 370 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร ดังภาพที่ 29

1) ช่วงความยาวคลื่น 200 – 230 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 230 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกิดโมเลกุลสารอนินทรีย์ขนาดเล็กที่มีคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุตั้งต้น เช่น หมูไนไตรท์ ($-\text{NO}_2^-$) หมูไนเตรท ($-\text{NO}_3^-$) และหมูคาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) (Domeizel et al., 2004; Li et al., 2014) พบว่าช่วงการดูดกลืนคลื่นแสง 201 – 228 นาโนเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นค่อนข้างมากตลอดกระบวนการหมัก โดยในช่วงเริ่มผสม (วันที่ 0) ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงดังกล่าวมีค่าต่ำที่สุดและเพิ่มขึ้นในช่วงที่ปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงไปจนถึงช่วงที่ปุ๋ยหมักพัฒนาเต็มที่ โดยมีค่าสูงที่สุดที่ช่วงคลื่น 201 นาโนเมตรในวันที่ 91 แสดงถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ปลดปล่อยอินทรีย์วัตถุขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($p < 0.01$; ภาคผนวกค.7) ขณะที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ($r = -0.599$, $p < 0.05$ และ $r = -0.687$, $p < 0.01$) จากนั้นการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่นนี้จะลดลง แต่เพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 204 -230 นาโนเมตร โดยวันที่ 105 มีการดูดกลืนคลื่นแสงสูงที่สุด ซึ่งหมายถึงการสร้างสารฮิวมิกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ขึ้นผ่านกระบวนการรีดักชัน จากนั้นโครงสร้างนี้มีแนวโน้มลดลงในวันที่ 119 และมีการเพิ่มโมเลกุลเล็ก ๆ ในช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 200 – 212 นาโนเมตรอีกครั้งหนึ่ง บ่งบอกถึงการย่อยสลายโครงสร้างที่เสถียรในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าปลดปล่อยโมเลกุลขนาดเล็กของสารอนินทรีย์ออกมาดังกล่าว



ภาพที่ 29 การดูดกลืนคลื่นแสงของกรดฮิวมิกในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร

2) ช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตรแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างแอรโม่ติกหรือควิโนน และมีการดูดกลืนของโครงสร้างแอรโม่ติกและพันธะคอนจูเกต เช่น C=C, C=O และ N=N เพิ่มขึ้น (Albrecht et al., 2011; Biyada et al., 2020; Tai et al., 2022; Wei et al., 2007) สัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณไฮโดรเจน ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.8) โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร ในวันที่ 0 มีค่าต่ำที่สุด จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.8) โดยวันที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดคือวันที่ 105 นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.8) บ่งบอกถึงการสร้างสายพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นซึ่งเป็นโครงสร้างตั้งต้นของกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Wei et al., 2007)

3) ช่วงความยาวคลื่น 300 – 370 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 300 – 370 นาโนเมตร แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลและความเป็นแอรโม่ติกของกรดฮิวมิก (Amine-Khodja et al., 2006; Li et al., 2014; Peacock et al., 2014; Uyguner & Bekbolet, 2005) พบว่ามีการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.9) โดยเพิ่มสูงขึ้นจากวันเริ่มผสม (วันที่ 0) ไปจนมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดวันที่ 105 สัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณไฮโดรเจน ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.9) และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม ($p < 0.01$; ภาคผนวก ค.9) แสดงถึงการรวมตัวกันของสารอินทรีย์ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นบ่งบอกการเกิดสารฮิวมิกที่มีความเสถียรมากขึ้น (Biyada et al., 2020)

4) ช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร

การดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร ที่เพิ่มมากขึ้นบ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของแอลิแฟติกซึ่งเป็นโครงสร้างเริ่มต้นของพอลิเมอร์ของสารฮิวมิก (Biyada et al., 2020) พบว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น โดยไม่พบการดูดกลืนคลื่นแสงในวันเริ่มผสม (วันที่ 0) แต่จะเริ่มพบในวันที่ 3 เป็นต้นไปจนมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 105 สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$; ภาคผนวก ค.10) และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนธาตุคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอมในองค์ประกอบของกรดฮิวมิก ($p < 0.05$; ภาคผนวก ค.10) แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างแอลิแฟติกที่ไม่อิ่มตัวและความเสถียรมากขึ้นในช่วงท้ายของกระบวนการหมัก

4.4.2 อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

การศึกษาอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงใช้อธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของกระบวนการเกิดสารชีวโมเลกุลจากโครงสร้างหนึ่งไปเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งได้ ในการศึกษาที่ใช้อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 230 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 367 นาโนเมตร หรือ E_2/E_3 และอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 230 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร หรือ E_2/E_4 ที่บ่งบอกถึงการย่อยสลายสารตั้งต้นต่อสัดส่วนโครงสร้างที่เสถียรมากกว่า มีรายละเอียดดังนี้

1) อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงระหว่าง E_2/E_3

อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงระหว่าง E_2/E_3 ใช้บ่งบอกถึงการย่อยสลายสารตั้งต้นและโครงสร้างที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างสารชีวโมเลกุลต่อโครงสร้างกรดชีวโมเลกุลที่มีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วน E_2/E_3 มีค่าอยู่ในช่วง 2.87 – 4.17 ดังตารางที่ 4.6 โดยการเพิ่มขึ้นของ E_2/E_3 สัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.625, p < 0.05$) และอัตราส่วน E_2/E_3 ที่มากกว่า 3.5 บ่งบอกถึงปริมาณกรดฟัลวิกที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากรดชีวโมเลกุล (Lanno et al., 2022) สังเกตจากปริมาณของกรดฟัลวิกสัมพันธ์กับอัตราส่วน E_2/E_3 ที่เพิ่มขึ้น ($r = 0.542, p < 0.05$) สำหรับปุ๋ยหมักที่วิจัยมีปริมาณกรดชีวโมเลกุลมากที่สุดในวันเริ่มผสมซึ่งเป็นกรดชีวโมเลกุลที่มาจากวัตถุดิบตั้งต้น เมื่อถูกย่อยสลายจะเกิดการสร้างสารชีวโมเลกุลขึ้นใหม่โดยเกิดโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น กรดฟัลวิกขึ้นก่อนและมีปริมาณมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น โดยอัตราส่วนนี้มีค่าแปรปรวนในช่วงอุณหภูมิสูงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นไปจนมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 119

2) อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงระหว่าง E_2/E_4

อัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงระหว่าง E_2/E_4 บ่งบอกถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นสารอินทรีย์ขนาดเล็กต่อโครงสร้างแอลิแพติกซึ่งเป็นโครงสร้างตั้งต้นต่อกระบวนการเกิดกรดชีวโมเลกุล (Zbytniewski & Buszewski, 2005) ซึ่งไม่พบโครงสร้างแอลิแพติกนี้ในวันเริ่มผสมที่การดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร โดยอัตราส่วนนี้มีค่าแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ ในช่วง 15.07 – 17.21 (ตารางที่ 19) โดยมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 42 โดยอัตราส่วนที่มีค่าต่ำนี้บ่งบอกถึงโครงสร้างที่มีความเสถียรในเชิงปริมาณที่มากกว่าวันอื่น ๆ และบ่งเป็นนัยถึงคุณภาพของกรดชีวโมเลกุลที่ดีกว่าวันอื่น ๆ ด้วย

เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปีช่วยในการศึกษาเชิงโครงสร้างของกรดชีวโมเลกุล โดยแต่ละช่วงคลื่นบ่งบอกลักษณะเฉพาะของโครงสร้างสารอินทรีย์แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละช่วงคลื่นบ่งบอกปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกสร้างและ/หรือสลายใน

ตารางที่ 19 อัตราส่วนความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ต่อ 367 นาโนเมตร (E_2/E_3) และ อัตราส่วนความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ต่อ 465 นาโนเมตร (E_2/E_4) ตลอดระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลา (วัน)	E_2/E_3	E_2/E_4
0	2.87	ไม่นิยาม
3	3.53	16.35
7	3.75	17.21
14	3.76	16.34
21	3.76	15.90
28	4.10	15.60
35	3.42	16.94
42	3.80	15.07
49	3.66	17.13
63	3.95	16.43
77	3.65	17.09
91	4.02	16.72
105	4.02	16.61
119	4.17	15.88

หมายเหตุ: ไม่นิยาม (undefined) หมายถึง ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากไม่มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร

ระหว่างกระบวนการหมัก จากการศึกษาพบว่า การดูดกลืนคลื่นแสงทุกช่วงคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น แสดงถึงการเกิดโครงสร้างสารชีวโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อศึกษาอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสง E_2/E_3 และ E_2/E_4 พบว่ากระบวนการสลายสารชีวโมเลกุลในโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ก่อนที่จะพัฒนาไปเป็นโครงสร้างที่เสถียรกว่า ยังคงเป็นลักษณะเด่นที่ทำให้ E_2/E_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ E_2/E_4 มีความแปรปรวนอยู่ในช่วงแคบ ๆ ทำให้การติดตามการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างยังคงเป็นที่น่าสนใจให้ศึกษาในรายละเอียดต่อไป

4.5 แนวทางการพิจารณาเลือกใช้ปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพ

จากการพิจารณาเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ได้แก่ ขนาดของปุ๋ย ปริมาณกรวด-หิน พลาสติก แก้ว วัสดุมีคมและโลหะอื่น ๆ ความชื้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า การย่อยสลายที่สมบูรณ์ ปริมาณธาตุอาหารหลัก

และปริมาณธาตุโลหะหนักพบว่าปุ๋ยหมักวันที่ 21, 28, 35, 42 และ 49 เป็นวันที่ปุ๋ยหมักมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตร (2557) ทุกข้อกำหนด จึงนำมาสู่การพิจารณาคุณภาพปุ๋ยช่วงวันที่ 21 – 49 จากพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อการนำปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพสูงที่สุดไปใช้ให้เกิดประโยชน์

เมื่อพิจารณาปริมาณสารฮิวมิกที่สกัดจากนำปุ๋ยหมัก ได้แก่ กรดฟัลวิก และกรดฮิวมิก พบว่าสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกสูงที่สุดในวันที่ 21 มีค่าร้อยละ 74.42 รองลงมาคือวันที่ 28, 49, 42 และ 35 ตามลำดับ (ภาพที่ 30 (ก)) ในขณะที่ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 49 มีค่าร้อยละ 18.19 รองลงมาคือวันที่ 35, 28, 42 และ 21 (ภาพที่ 30 (ข)) บ่งบอกการเกิดสารฮิวมิกโดยเฉพาะกรดฮิวมิก และระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซีสูงที่สุดในวันที่ 49 มีค่าร้อยละ 18.19 และ 34.02 ตามลำดับ รองลงมาคือวันที่ 35, 28, 42 และ 21 ตามลำดับเช่นกัน (ภาพที่ 30 (ค)) บ่งบอกถึงการรวมตัวกันของกรดฟัลวิกจนเกิดเป็นกรดฮิวมิก ซึ่งหมายถึงสัดส่วนการเกิดสารฮิวมิกที่มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 21 ส่วนใหญ่เป็นปริมาณกรดฟัลวิกในขณะที่ปริมาณกรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นและมีปริมาณสูงที่สุดในวันที่ 49

สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก

วันที่	21	>	28	>	49	>	42	>	35
ค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)	74.42		73.28		72.12		69.32		67.83

ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก

วันที่	49	>	35	>	28	>	42	>	21
ค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)	18.19		17.86		15.50		15.39		10.41

ระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซี

วันที่	49	>	35	>	42	>	28	>	21
ค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)	34.02		35.74		28.56		26.79		16.27

อย่างไรดีเมื่อนำกรดฮิวมิกไปศึกษาปริมาณและอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอมมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42 มีค่า 0.70 แสดงถึงความเสถียรเชิงโครงสร้างที่มากที่สุดรองลงมาคือวันที่ 35 และ 49 ที่มีค่า 0.69 เท่ากัน (ภาพที่ 30 (ง)) และยังพบว่าอัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอมมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42 มีค่า 0.63 รองลงมาคือวันที่ 35, 28, 49 และ 21 ตามลำดับ (ภาพที่ 30 (จ)) โดยระดับออกซิเดชันภายในมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 42 เช่นกันมีค่า



ภาพที่ 30 คุณสมบัตินี้เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักวันที่ 21 28 35 42 และ 49

(ก) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR), (ข) ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI), (ค) ระดับพอลิเมอไรเซชัน (polymerization degree; PD), (ง) อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H), (จ) อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C), (ฉ) ระดับออกซิเดชันภายใน (internal oxidation; IO), (ช) อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_3 , (ช) อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_4

0.11 (ภาพที่ 30 (ฉ)) ดังนั้นจากการศึกษาธาตุองค์ประกอบบ่งบอกว่าปุ๋ยหมักวันที่ 42 เป็นวันที่กรดฮิวมิกมีโครงสร้างที่เสถียรและมีออกซิเจนในโครงสร้างมากขึ้นเพิ่มการละลายน้ำและแลกเปลี่ยนโปรตรอนธาตุอาหารได้ดี

อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม

วันที่	42	>	35	=	49	>	21	=	28
ค่าเฉลี่ย	0.70		0.69		0.69		0.67		0.67

อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม

วันที่	42	>	35	>	28	>	49	>	21
ค่าเฉลี่ย	0.35		0.62		0.60		0.58		0.57

ระดับออกซิเดชันภายใน

วันที่	42	>	35	>	28	>	49	>	21
ค่าเฉลี่ย	0.11		0.08		0.00		-0.01		-0.05

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น E_2/E_3 และ E_2/E_4 ซึ่งค่าน้อยเป็นดัชนีบ่งบอกเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นเชิงโครงสร้าง พบว่าที่อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_3 มีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 35 มีค่า 3.42 บ่งบอกว่าพบโครงสร้างสารอินทรีย์ที่เสถียรกว่าในสัดส่วนที่สูงที่สุด ถัดไปคือวันที่ 49, 21, 42 และ 28 ตามลำดับ (ภาพที่ 30 (ช)) ขณะที่อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_4 บ่งบอกการเกิดโครงสร้างตั้งต้นของกรดฮิวมิกที่มีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 42 โดยมีค่า 15.07 ถัดไปคือวันที่ 28, 21, 35 และ 49 ตามลำดับ (ภาพที่ 30 (ซ))

อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_3

วันที่	35	<	49	<	21	<	42	<	28
ค่าเฉลี่ย	3.42		3.66		3.76		3.42		4.10

อัตราส่วนความยาวคลื่น E_2/E_4

วันที่	42	<	28	<	21	<	35	<	49
ค่าเฉลี่ย	15.07		15.60		15.90		16.94		17.13

อย่างไรก็ดีความแปรปรวนเชิงลำดับของอัตราส่วน E_2/E_3 และ E_2/E_4 บ่งบอกว่าปุ๋ยหมักมีกระบวนการย่อยสลายและสร้างกรดฮิวมิก ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง แม้กระนั้นก็ตามวันที่ 35, 42 และ 49 ยังคงเป็นวันที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีของดัชนีเชิงแสงที่สอดคล้องกับดัชนีอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าดัชนีที่บ่งบอกถึงเสถียรภาพเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิกจากสัดส่วนธาตุองค์ประกอบและระดับออกซิเดชันภายในดีที่สุดในวันที่ 35 และ 42 ขณะที่ในเชิงปริมาณของกรดฮิว

มิกปุ๋ยหมักวันที่ 35 และ 49 เป็นช่วงที่ดีที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่าปุ๋ยหมักในช่วงวันที่ 35 – 49 เป็นวันที่กรดฮิวมิกมีคุณภาพสูงที่สุดเหมาะสำหรับการนำไปใช้



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การศึกษากระบวนการหมักปุ๋ยมูลโคผสมมูลสุกรแบบถ่วงถ่ายเทอากาศด้วยเทคนิค อัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปีต่อกระบวนการเกิดสารฮิวมิกในปุ๋ยหมัก โดยศึกษาเป็นระยะเวลา 4 เดือน เก็บตัวอย่างปุ๋ยวันที่ 0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 63, 77, 91, 105 และ 119 ตามลำดับ ตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานทางการเกษตร ศึกษาคุณภาพและปริมาณสารฮิวมิก ธาตุองค์ประกอบและดัชนีเชิงแสงของกรดฮิวมิก ติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปุ๋ยหมัก แบ่งได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (วันที่ 0) ระยะอุณหภูมิสูง (วันที่ 1 – 13) และระยะปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (วันที่ 14 – 119) ซึ่งในระยะนี้เป็นระยะที่ปุ๋ยสามารถนำไปใช้งานได้ มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25.5 – 32.7 องศาเซลเซียสใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ

สำหรับอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับ 1 (first order reaction) มีค่าคงที่อัตราการลดลง 0.0278 กรัม/วัน โดยในระยะอุณหภูมิสูงอัตราการย่อยสลายลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 3 จากนั้นอัตราการย่อยสลายจะช้าลงเมื่อปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะพัฒนาเต็มที่ สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น ($r = -0.515$ และ $r = -0.674$ ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงในอัตราร้อยละ 0.0331/วัน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงในอัตรา 0.0195/วัน เมื่อพิจารณาปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพพบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ในช่วงวันที่ 21 – 49 โดยในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักตั้งแต่วันที่ 63 เป็นต้นไปมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นจากการปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุ ปุ๋ยมีความเค็มสูงและเป็นพิษต่อเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) ซึ่งเป็นพืชทดสอบ

สารฮิวมิกที่สกัดจากปุ๋ยหมักพบสัดส่วนกรดฟัลวิกมีปริมาณมากที่สุดร้อยละ 62.15 – 86.01 รองลงมาได้แก่กรดฮิวมิกอยู่ช่วง 13.99 – 37.85 โดยปริมาณกรดฮิวมิกที่มีค่ามากที่สุดในวันเริ่มผสม จากวัตถุดิบตั้งต้น เมื่อถูกย่อยสลายในช่วงอุณหภูมิสูงปริมาณกรดฮิวมิกจะลดลง จากนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 49 สอดคล้องกับดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกและระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน ($r = 0.981$ และ 0.589 ตามลำดับ, $p < 0.01$) โดยระดับการเกิดพอลิเมอร์ที่มากขึ้นแสดงถึงการสร้างกรดฮิวมิกขึ้น

ใหม่ที่มีเสถียรภาพเชิงโครงสร้างมากขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักวันที่ 105 – 119 มีค่าลดลง บ่งบอกถึงการย่อยสลายโครงสร้างนี้ด้วยจุลินทรีย์เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นที่หมดไป

สำหรับปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิกพบว่าปริมาณคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนอะตอมลดลงสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.604$, $p < 0.05$ และ $r = -0.731$, $p < 0.05$ ตามลำดับ) ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอมเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.726$, $p < 0.01$) ซึ่งหมายถึงเกิดพันธะที่เสถียรในโครงสร้างกับอะตอมของคาร์บอนมากขึ้น โดยค่าระหว่าง 0.60 – 0.73 บ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างแอร์แมติกที่ต่อกับโครงสร้างแอลิแพติก นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้างตลอดกระบวนการหมัก ($r = 0.719$, $p < 0.01$) แสดงถึงการเติมหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่คาร์บอกซิล โดยปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นและปริมาณไฮโดรเจนที่ลดลงส่งผลให้ระดับออกซิเดชันภายในของกรดฮิวมิกมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมัก ($r = 0.720$, $p < 0.01$) สำหรับปริมาณไนโตรเจนอะตอมลดลงสอดคล้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ในช่วงระยะอุดมภูมิสูงแสดงถึงการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 2.91 – 3.06 สอดคล้องกับอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอม ($r = -0.949$, $p < 0.01$) ที่ในช่วงปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ 10.41 – 11.21 บ่งบอกถึงความเพียงพอของปริมาณไนโตรเจนที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่อง

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพสารฮิวมิกเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปีในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร พบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงเพิ่มมากขึ้นจากวันเริ่มผสมไปจนถึงสูงสุดในวันที่ 105 และลดต่ำลงในวันที่ 119 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างแม้ว่าปริมาณกรดฮิวมิกจะมากที่สุดในวันเริ่มผสมแต่ไม่พบการดูดกลืนแสงที่ 465 นาโนเมตร ทำให้อัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 230 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร หรือ E_2/E_4 ไม่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายเชิงคุณภาพได้ และหมายถึงคุณภาพสารฮิวมิกไม่จำเป็นที่จะต้องสัมพันธ์กับปริมาณที่พบ โดยอัตราส่วนการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 230 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่น 367 นาโนเมตร หรือ E_2/E_3 และอัตราส่วนความยาวคลื่นที่ 230 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 465 นาโนเมตร (E_2/E_4) ที่มีค่าน้อยลงบ่งบอกการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพเชิงโครงสร้างเมื่อเกิดโครงสร้างที่เสถียรในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่าเพิ่มขึ้น และในช่วงที่ปฏิกิริยาพัฒนาเต็มที่มีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 35 และ 42 ตามลำดับ ทำให้ปฏิกิริยาที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตรให้คุณภาพของกรดฮิวมิกและ

ดัชนีเสถียรภาพเชิงโครงสร้างจากสัดส่วนอะตอมธาตุองค์ประกอบและดัชนีเชิงแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี ระหว่างวันที่ 35 – 49 เป็นระยะที่ปุ๋ยหมักมีคุณภาพดีที่สุดใน

จากการศึกษานี้พบว่าในช่วงท้าย ๆ ของกระบวนการหมักกระบวนการสร้างสารฮิวมิคยังคงดำเนินต่อไป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยหมักเพื่อการจำหน่ายของกรมวิชาการเกษตรปรากฏว่าปุ๋ยหมักในช่วงท้ายกระบวนการหมักมีค่าการนำไฟฟ้าเกินมาตรฐานเล็กน้อย ดังนั้นปุ๋ยหมักในช่วงอายุ 91 วันเป็นต้นไปไม่สามารถทำการจำหน่ายได้แต่ยังคงสามารถนำมาใช้ประโยชน์จากสารฮิวมิคที่เสถียรปรับปรุงดินได้ โดยพิจารณานำไปใช้ในปริมาณน้อย ๆ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดินเค็ม เพราะค่าการนำไฟฟ้าที่สูงอาจจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ นอกจากนี้การศึกษาคุณสมบัติของดินร่วมด้วยจะช่วยให้การพิจารณาสัดส่วนที่จะนำไปใช้ได้ดียิ่งขึ้น

การศึกษาเชิงโครงสร้างสารอินทรีย์ในปุ๋ยหมักชนิดอื่นที่มีวิธีการหมักหรือส่วนผสมของวัตถุดิบแตกต่างกันอาจทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพที่ต่างกันออกไป เช่น มีการเพิ่มวัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงทำให้จุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักย่อยสลายยากขึ้นและใช้ระยะเวลาการหมักนานขึ้น อาจส่งผลให้สารอินทรีย์สามารถพัฒนาโครงสร้างเกิดเป็นสารฮิวมิคที่มีคุณภาพดีขึ้นได้ นอกจากนี้การใช้เทคนิคอื่น ๆ ประกอบ เช่น เทคนิคฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier-transform infrared spectroscopy; FTIR) จะทำให้การอธิบายผลเชิงโครงสร้างร่วมกับปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิคได้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นการเปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยหมักกับมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการพิจารณาเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมัก การวิเคราะห์คุณภาพเชิงแสงร่วมกับการศึกษาเชิงปริมาณธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิค ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกรดฮิวมิคตลอดจนเสถียรภาพในการปรับปรุงดินที่ ช่วยในการตัดสินใจเลือกระยะเวลาการหมักตลอดจนการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่ยังให้คุณประโยชน์ อันนำไปสู่การจัดการในการนำปุ๋ยไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตลอดจนแนวทางในการพัฒนาคุณภาพปุ๋ยหมักในอนาคตต่อไป

รายการอ้างอิง

- Al-Faiyz, Y. S. S. (2017, 2017/02/01/). CPMAS ¹³C NMR characterization of humic acids from composted agricultural Saudi waste. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S839-S853. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.12.018>
- Albrecht, R., Le Petit, J., Terrom, G., & Périssol, C. (2011). Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting. *Bioresource Technology*, 102(6), 4495-4500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.053>
- Almeida, T. E., Silva, C. P., Zittel, R., Gonçalves, D. R. P., & Campos, S. X. (2021). Composting of Seized Cigarette Tobacco and Industrial Sewage Sludge with Sawdust or Garden Pruning. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 1094-1108.
- Amine-Khodja, A., Trubetskaya, O., Trubetskoj, O., Cavani, L., Ciavatta, C., Guyot, G., & Richard, C. (2006). Humic-like substances extracted from composts can promote the photodegradation of Irgarol 1051 in solar light. *Chemosphere*, 62(6), 1021-1027. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.023>
- Amir, S., Jouraiphy, A., Meddich, A., El Gharous, M., Winterton, P., & Hafidi, M. (2010). Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: elemental analysis, FTIR and ¹³C NMR. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3), 524-529.
- Behravan, H. R., Voroney, P., Khorassani, R., Fotovat, A., Moezei, A. A., & Taghavi, M. (2020). Chemical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from filter cake using different basic solutions. *Sugar Tech*, 22, 311-318.
- Bello, A., Deng, L., Sheng, S., Jiang, X., Yang, W., Meng, Q., Wu, X., Han, Y., Zhu, H., & Xu, X. (2019). Biochar reduces nutrient loss and improves microbial biomass of composted cattle manure and maize straw. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67(5), 799-811.

- Biyada, S., Merzouki, M., Elkarrach, K., & Benlemlih, M. (2020). Spectroscopic characterization of organic matter transformation during composting of textile solid waste using UV–Visible spectroscopy, Infrared spectroscopy and X-ray diffraction (XRD). *Microchemical Journal*, 159, 105314.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105314>
- Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72(4), 551-557.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.030>
- Chen, X., Qin, X., Wang, A., & Li, Q. (2024). Alkali-activated persulfate mediated the depolymerization and oxygenation of lignin to synthesize humus-like substances for agricultural applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-13.
- Cooperband, L. (2002). The art and science of composting. *Center for Integrated agricultural systems*.
- Cornell Waste Management Institute. (2007). *Composting*.
<https://cwmi.css.cornell.edu/composting.htm>
- DeMoranville, C., Sandler, H., & Bicki, T. (2000). Best management practices guide for Massachusetts cranberry production. *Univ. of Massachusetts Cranberry Exp. Station*, 5p.
- Domeizel, M., Khalil, A., & Prudent, P. (2004). UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost. *Bioresource Technology*, 94(2), 177-184.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.026>
- El Fels, L., Zamama, M., El Asli, A., & Hafidi, M. (2014). Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 87, 128-137.

- Flores-Solórzano, S. B., Espinosa-Victoria, D., & Serrano-Casillas, J. A. (2021). Physicochemical maturity parameters in the coffee pulp-cow manure vermicomposted mixture. *Revista fitotecnia mexicana*, 44(4), 553-560.
- Fukushima, M., Yamamoto, K., Ootsuka, K., Komai, T., Aramaki, T., Ueda, S., & Horiya, S. (2009). Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids. *Bioresource Technology*, 100(2), 791-797.
- Gayathri, B., Srinivasamurthy, C., Vasanthi, B., Naveen, D., Prakash, N., & Bhaskar, S. (2019). Extraction and characterisation of humic acid from different organic wastes and its physico-chemical properties. *Int. J. Chem. Stud*, 8(1), 769-775.
- Gong, B., Zhong, X., Chen, X., Li, S., Hong, J., Mao, X., & Liao, Z. (2021). Manipulation of composting oxygen supply to facilitate dissolved organic matter (DOM) accumulation which can enhance maize growth. *Chemosphere*, 273, 129729. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129729>
- Gong, G.-q., Zhao, Y.-f., Zhang, Y.-j., Deng, B., Liu, W.-x., Wang, M., Yuan, X., & Xu, L.-w. (2020). Establishment of a molecular structure model for classified products of coal-based fulvic acid. *Fuel*, 267, 117210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117210>
- Hafez, M., Mohamed, A., Rashad, M., & Popov, A. (2021). The efficiency of application of bacterial and humic preparations to enhance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant productivity in the arid regions of Egypt. *Biotechnology Reports*, 29, e00584.
- Han, X., Liu, S., Xie, Z., Ma, X., Wang, Y., & Peng, C. (2022). Dynamic Changes of Humic Acids in Chicken Manure Composting. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(2).
- Hanc, A., Enev, V., Hrebeckova, T., Klucakova, M., & Pekar, M. (2019). Characterization of humic acids in a continuous-feeding vermicomposting system with horse manure. *Waste Management*, 99, 1-11.
- Ho, T. T. K., Le, T. H., Tran, C.-S., Nguyen, P.-T., Thai, V.-N., & Bui, X.-T. (2022). Compost

to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100211.

Hou, J.-y., Liu, H.-t., Wang, L.-x., & Zhang, Z.-l. (2024). Novel perspective on qualitative assessment of swine manure compost maturity using organic carbon density fractions. *Bioresource Technology*, 395, 130386.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130386>

Huang, G. F., Wu, Q. T., Wong, J. W. C., & Nagar, B. B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresource Technology*, 97(15), 1834-1842.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.024>

Kong, Y., Wang, G., Chen, W., Yang, Y., Ma, R., Li, D., Shen, Y., Li, G., & Yuan, J. (2022). Phytotoxicity of farm livestock manures in facultative heap composting using the seed germination index as indicator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 247, 114251.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114251>

Lahsaini, S., Aguelmous, A., El Fels, L., Idrissi, L., Souabi, S., Zamama, M., & Hafidi, M. (2017). Assessment of biotransformation of sludge from vegetable oil refining by composting. *Compost Science & Utilization*, 25(2), 130-140.

Lanno, M., Klavins, M., Purmalis, O., Shanskiy, M., Kisand, A., & Kriipsalu, M. (2022). Properties of humic substances in composts comprised of different organic source material. *Agriculture*, 12(11), 1797.

Li, D., He, X. S., Xi, B. D., Wei, Z. M., Pan, H. W., & Cui, D. Y. (2014). Study on UV-visible spectra characteristic of dissolved organic matter during municipal solid waste composting. *Advanced Materials Research*, 878, 840-849.

Li, H., Zhang, T., Tsang, D. C. W., & Li, G. (2020). Effects of external additives: Biochar, bentonite, phosphate, on co-composting for swine manure and corn straw. *Chemosphere*, 248, 125927.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125927>

- Liu, X., Hou, Y., Li, Z., Yu, Z., Tang, J., Wang, Y., & Zhou, S. (2020). Hyperthermophilic composting of sewage sludge accelerates humic acid formation: Elemental and spectroscopic evidence. *Waste Management*, *103*, 342-351.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.053>
- Machado, W., Franchini, J. C., de Fátima Guimarães, M., & Tavares Filho, J. (2020). Spectroscopic characterization of humic and fulvic acids in soil aggregates, Brazil. *Heliyon*, *6*(6).
- Makkonen, M., Berg, M. P., Handa, I. T., Hättenschwiler, S., van Ruijven, J., van Bodegom, P. M., & Aerts, R. (2012). Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient. *Ecology letters*, *15*(9), 1033-1041.
- Ming, L., Dou, S., Wang, H., & Zhu, Y. (2023). Study of the humification process and humic acid-like structure characteristics of kitchen waste with the addition of biochar. *Agronomy*, *13*(2), 465.
- Pace, M. G., Miller, B. E., & Farrell-Poe, K. L. (1995). The composting process.
- Peacock, M., Evans, C. D., Fenner, N., Freeman, C., Gough, R., Jones, T. G., & Lebron, I. (2014). UV-visible absorbance spectroscopy as a proxy for peatland dissolved organic carbon (DOC) quantity and quality: considerations on wavelength and absorbance degradation. *Environmental Science: Processes & Impacts*, *16*(6), 1445-1461.
- Putra, M., Soemarno, S., & Suntari, R. (2016). Humification degree and its relationship with some soil physical characteristics on robusta coffee (*Coffea canephora*) plantation. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, *3*(4), 649.
- Radwan, E., Ibrahim, M., Moursy, A., & Ghafar, H. A. (2019). Characterization of humic acids extracted from Egyptian sediment by elemental composition, NMR and FTIR. *J. Environ. Sci. Technol*, *12*, 221-227.
- Raleigh. (2024). *Buy Compost and Mulch*. <https://raleighnc.gov/landfill-and->

[reuse/services/buy-compost-and-mulch](#)

- Song, X., Liu, J., Jin, S., He, X., Liu, S., Kong, X., & Dong, F. (2018). Differences of C sequestration in functional groups of soil humic acid under long term application of manure and chemical fertilizers in North China. *Soil and Tillage Research*, 176, 51-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.004>
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc.
- Swift, R. (1996). Organic matter characterization. In 'Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods'. *Soil Science Society of America: Madison, WI*.
- Tai, D., Zhang, H., Shahab, A., Yu, J., & Garg, A. (2022). Spectroscopic analysis of dissolved organic matter in industrial sludge composting process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12187-12196.
- Tan, K. H. (2003). *Humic matter in soil and the environment: principles and controversies*. Marcel dekk.
- Tong, B., Wang, X., Wang, S., Ma, L., & Ma, W. (2019). Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods. *Bioresource Technology*, 293, 122046.
- Trautmann, N. M., & Krasny, M. E. (1997). *Composting in the Classroom Scientific Inquiry for High School Students*. Cornell University.
- Troeh, F. R., & Thompson, L. M. (2005). *Soils and soil fertility* (Vol. 489). Blackwell Iowa.
- USDA. (2011). *Natural Rrsorce Conservation Service*. U.S. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSConsumption/download/?cid=nrcs142p2_052823&ext=pdf
- Uyguner, C. S., & Bekbolet, M. (2005). Evaluation of humic acid photocatalytic degradation by UV-vis and fluorescence spectroscopy. *Catalysis Today*, 101(3), 267-274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.03.011>
- Van Krevelen. (1950). Graphical-statistical method for the study of structure and

reaction processes of coal. *Fuel*, 29, 269-284.

Visconti, F., Jiménez, M. G., & de Paz, J. M. (2022). How do the chemical characteristics of organic matter explain differences among its determinations in calcareous soils? *Geoderma*, 406, 115454.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115454>

Wang, L., Zhao, Y., Ge, J., Zhu, L., Wei, Z., Wu, J., Zhang, Z., & Pan, C. (2019). Effect of tricarboxylic acid cycle regulators on the formation of humic substance during composting: The performance in labile and refractory materials. *Bioresource Technology*, 292, 121949.

Wang, S., & Mulligan, C. N. (2006). Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater. *Environmental geochemistry and health*, 28, 197-214.

Wang, S., Wang, Y., Shi, Z., Sun, K., Wen, Y., Niedzwiecki, L., Pan, R., Xu, Y., Zaini, I. N., & Jagodzinska, K. (2023). Van Krevelen diagrams based on machine learning visualize feedstock-product relationships in thermal conversion processes. *Communications Chemistry*, 6(1), 273.

Wei, Z., Xi, B., Zhao, Y., Wang, S., Liu, H., & Jiang, Y. (2007). Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. *Chemosphere*, 68(2), 368-374.

Wu, S., Shen, Z., Yang, C., Zhou, Y., Li, X., Zeng, G., Ai, S., & He, H. (2017). Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 429-436. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.016>

Yang, Y., Awasthi, M. K., Du, W., Ren, X., Lei, T., & Lv, J. (2020). Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting. *Bioresource Technology*, 297, 122435.

Yaser, A. Z., Lamaming, J., Suali, E., Rajin, M., Saalah, S., Kamin, Z., Safie, N. N., Aji, N. A. S., & Wid, N. (2022). Composting and anaerobic digestion of food waste and

- sewage sludge for campus sustainability: a review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022(1), 6455889.
- Yu, H., Xie, B., Khan, R., & Shen, G. (2019). The changes in carbon, nitrogen components and humic substances during organic-inorganic aerobic co-composting. *Bioresource Technology*, 271, 228-235.
- Zbytniewski, R., & Buszewski, B. (2005). Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties. *Bioresource Technology*, 96(4), 471-478.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.018>
- Zhang, J., Kong, Y., Yang, Y., Ma, R., Li, G., Wang, J., Cui, Z., & Yuan, J. (2024). Effects of thermophilic bacteria inoculation on maturity, gaseous emission and bacterial community succession in hyperthermophilic composting. *Science of The Total Environment*, 927, 172304.
- Zhao, X.-L., Li, B.-q., Ni, J.-p., & Xie, D.-t. (2016). Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1), 232-240.
- Zhao, Y., Zhao, Y., Zhang, Z., Wei, Y., Wang, H., Lu, Q., Li, Y., & Wei, Z. (2017). Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting. *Waste Management*, 68, 64-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.022>
- Zhou, Y., Selvam, A., & Wong, J. W. (2014). Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues. *Bioresource Technology*, 168, 229-234.
- Zhu, Y., Yang, K., Shan, R., Han, Z., Shao, Y., & Tian, C. (2018). The influence of humification degree of humic acid on its sorption of norfloxacin during sewage sludge composting. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 1-11.
- Zittel, R., Pinto da Silva, C., Domingues, C. E., de Oliveira Stremel, T. R., de Almeida, T. E., Vieira Damiani, G., & Xavier de Campos, S. (2018). Treatment of smuggled

cigarette tobacco by composting process in facultative reactors. *Waste Management*, 71, 115-121.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.023>

กรมพัฒนาที่ดิน. (2556). มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง) ของกรมพัฒนาที่ดิน.

http://www1.ldd.go.th/ldd/Fertilizer/Organic_Fertilizer.pdf

กรมวิชาการเกษตร. (2548). เอกสารวิชาการปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. กรมวิชาการเกษตร.

กรมวิชาการเกษตร. (2557). ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ.๒๕๕๗.

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

จุฑาวรรณ สุคนธนิษฐ์. (2557). การศึกษาการเจริญเติบโตของปุ๋ยหมักโดยใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี: การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมูลหมูและมูลไก่ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร].

ชัยวัฒน์ วามวรรธน์. (2564). การทดลองที่ 2 สเปกโทรโฟโตเมตรี.

<https://biochem.flas.kps.ku.ac.th/01402312/document164/01402312-02-Spectrophotometry-protocol-164.pdf>

ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะเกษตร ภาควิชาปฐพีวิทยา.

ยงยุทธ โอสสถภา. (2564). การใช้สารเร่งเชิงชีวภาพเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช. วารสารดินและปุ๋ย, 36(1-4), 27-54.

สิริประภัสสร ระย้าอ้อย. (2558). การศึกษาวิวัฒนาการของกรดฮิวมิคระหว่างการทำปุ๋ยมูลวัวด้วยการใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร].



ภาคผนวก



ตารางที่ ก.1 ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) เทียบกับชุดควบคุม (relative seed germination; RSG)

ตัวอย่าง	จำนวนซ้ำ	จำนวนเมล็ดที่งอก (เมล็ด)	%RSG	%RSG (เฉลี่ย)
ชุดควบคุม	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 0	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 3	1	8	80.00	90.00
	2	9	90.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 7	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 14	1	10	100.00	93.33
	2	8	80.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 21	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 28	1	9	90.00	93.33
	2	10	100.00	
	3	9	90.00	
วันที่ 35	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	

หมายเหตุ: RSG (%) = (จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง/จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดควบคุม) × 100

ตารางที่ ก.2 ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*)
เทียบกับชุดควบคุม (relative seed germination; RSG) (ต่อ)

ตัวอย่าง	จำนวนซ้ำ	จำนวนเมล็ดที่งอก (เมล็ด)	%RSG	%RSG (เฉลี่ย)
วันที่ 42	1	9	90.00	96.67
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 49	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 63	1	10	100.00	86.67
	2	8	80.00	
	3	8	80.00	
วันที่ 77	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 91	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 105	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	
วันที่ 119	1	10	100.00	100.00
	2	10	100.00	
	3	10	100.00	

หมายเหตุ: RSG (%) = (จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง/จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดควบคุม) × 100

ตารางที่ ก.3 ร้อยละการงอกสัมพันธ์ของเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) เทียบกับชุดควบคุม (relative root germination; RRG)

ตัวอย่าง	จำนวนซ้ำ	ความยาวรากเฉลี่ย (CM)	%RRG	%RRG (เฉลี่ย)
ชุดควบคุม	1	1.11	100.00	100.00
	2	1.12	100.00	
	3	1.28	100.00	
วันที่ 0	1	0.88	75.21	83.76
	2	0.91	77.78	
	3	1.15	98.29	
วันที่ 3	1	0.50	42.74	60.65
	2	0.89	75.97	
	3	0.74	63.25	
วันที่ 7	1	0.81	69.23	68.66
	2	0.84	71.79	
	3	0.76	64.96	
วันที่ 14	1	0.71	60.68	84.33
	2	1.10	94.02	
	3	1.15	98.29	
วันที่ 21	1	1.00	85.47	82.62
	2	0.93	79.49	
	3	0.97	82.91	
วันที่ 28	1	1.09	93.07	93.19
	2	0.96	82.05	
	3	1.22	104.46	
วันที่ 35	1	1.06	90.60	92.31
	2	0.98	83.76	
	3	1.20	102.56	

หมายเหตุ: RRG (%) = (ความยาวรากเฉลี่ยของชุดทดลอง/ความยาวรากเฉลี่ยของชุดควบคุม) × 100

ตารางที่ ก.4 ร้อยละการงอกสัมพันธ์ของเมล็ดผักกาดขาว (*Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*) เทียบกับชุดควบคุม (relative root germination; RRG) (ต่อ)

ตัวอย่าง	จำนวนซ้ำ	ความยาวรากเฉลี่ย (CM)	%RRG	%RRG (เฉลี่ย)
วันที่ 42	1	1.02	87.37	98.92
	2	1.12	95.73	
	3	1.33	113.68	
วันที่ 49	1	84.17	86.32	90.03
	2	86.67	88.89	
	3	92.50	94.87	
วันที่ 63	1	76.67	78.63	84.97
	2	101.04	103.63	
	3	70.83	72.65	
วันที่ 77	1	75.00	76.92	82.05
	2	85.83	88.03	
	3	79.17	81.20	
วันที่ 91	1	115.83	118.80	92.59
	2	85.00	87.18	
	3	70.00	71.79	
วันที่ 105	1	85.00	87.18	80.34
	2	73.33	75.21	
	3	76.67	78.63	
วันที่ 119	1	71.67	73.50	79.20
	2	70.00	71.79	
	3	90.00	92.31	

หมายเหตุ: RRG (%) = (ความยาวรากเฉลี่ยของชุดทดลอง/ความยาวรากเฉลี่ยของชุดควบคุม) × 100



ตารางที่ ข.1 ปริมาณสารฮิวมิก (humic substances; HS) กรดฮิวมิก (humic acid; HA) และ กรดฟัลวิก (fulvic acid; FA)

ระยะเวลา (วัน)	สารฮิวมิก (มิลลิกรัม/กรัม)	กรดฮิวมิก (มิลลิกรัม/กรัม)	กรดฟัลวิก (มิลลิกรัม/กรัม)
0	328.72	123.96	204.76
3	397.06	111.38	285.68
7	335.00	98.05	236.95
14	344.16	75.90	268.26
21	465.46	65.11	400.35
28	454.04	96.04	358.00
35	383.66	101.00	282.66
42	426.08	94.58	331.49
49	448.33	113.07	335.26
63	350.54	73.67	276.87
77	386.97	83.51	303.46
91	361.71	101.68	260.04
105	413.69	84.03	329.66
119	437.83	95.82	342.01

ตารางที่ ข.2 คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon; TOC) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) และระดับพอลิเมอไรเซชัน (polymerization degree; PD)

ระยะเวลา (วัน)	ร้อยละคาร์บอน อินทรีย์ทั้งหมด	ร้อยละสัดส่วนการ เกิดสารฮิวมิก	ร้อยละดัชนีการ เกิดสารฮิวมิก	ร้อยละระดับ พอลิเมอไรเซชัน
0	37.98	50.21	18.93	61.14
3	37.27	61.79	17.33	39.10
7	35.83	54.23	15.87	41.40
14	36.39	54.85	12.10	42.13
21	36.27	74.42	10.41	16.27
28	35.94	73.28	15.50	26.79
35	32.80	67.83	17.86	35.74
42	35.65	69.32	15.39	28.56
49	36.05	72.12	18.19	34.02
63	35.28	57.63	12.11	26.51
77	36.17	62.06	13.39	27.52
91	36.13	58.07	16.32	38.96
105	34.49	69.57	14.13	25.81
119	33.67	75.42	16.51	28.27



ภาคผนวก ค
ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณสารชีวมีก ณ เวลาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักด้วย Duncan test

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
0	3	328.72				
7	3	335.00	335.00			
14	3	344.16	344.16	344.16		
63	3	350.54	350.54	350.54		
91	3	361.71	361.71	361.71	361.71	
35	3	383.66	383.66	383.66	383.66	383.66
77	3	386.97	386.97	386.97	386.97	386.97
3	3	397.06	397.06	397.06	397.06	397.06
105	3	413.69	413.69	413.69	413.69	413.69
42	3		426.08	426.08	426.08	426.08
119	3			437.83	437.83	437.83
49	3				448.33	448.33
28	3				454.04	454.04
21	3					465.46
Sig.		0.083	0.064	0.057	0.060	0.095

ตารางที่ ค.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณกรดฮิวมิก ณ เวลาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักด้วย Duncan test

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
21	3	65.11				
63	3	73.67	73.67			
14	3	75.90	75.90			
77	3	83.51	83.51			
105	3	84.03	84.03	84.03		
42	3		94.58	94.58	94.58	
119	3		95.82	95.82	95.82	
28	3		96.04	96.04	96.04	
7	3		98.05	98.05	98.05	98.05
35	3		101.00	101.00	101.00	101.00
91	3		101.68	101.68	101.68	101.68
3	3			111.38	111.38	111.38
49	3				113.07	113.07
0	3					123.96
Sig.		0.160	0.050	0.053	0.185	0.060

ตารางที่ ค.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณกรดฟัลวิค ณ เวลาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหมักด้วย Duncan test

Day	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
0	3	204.76				
7	3	236.95	236.95			
91	3	260.04	260.04	260.04		
14	3	268.26	268.26	268.26	268.26	
63	3	276.87	276.87	276.87	276.87	
35	3	282.66	282.66	282.66	282.66	
3	3	285.68	285.68	285.68	285.68	
77	3		303.46	303.46	303.46	
105	3			329.66	329.66	329.66
42	3			331.49	331.49	331.49
49	3			335.26	335.26	335.26
119	3			342.01	342.01	342.01
28	3				358.00	358.00
21	3					400.35
Sig.		0.075	0.141	0.078	0.054	0.114

ตารางที่ ค.4 ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระหว่างปริมาณสารฮิวมิก และดัชนีการเกิดสารฮิวมิก ได้แก่ สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) ระดับพอลิเมอไรเซชัน (polymerization degree; PD) และระยะเวลาการหมัก

พารามิเตอร์	สารฮิวมิก	กรดฮิวมิก	กรดฟัลวิค	HR	HI	PD
ระยะเวลา	0.188	-0.177	0.236	0.304	-0.076	-0.340*
สารฮิวมิก		0.040	0.950**	0.975**	0.975**	-0.703**
กรดฮิวมิก			-0.274	0.004	0.981**	0.589**
กรดฟัลวิค				0.937**	-0.231	-0.860**
HR					0.084	-0.723**
HI						0.533**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 42$

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$, $n = 42$

ตารางที่ ค.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับปริมาณธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S)

พารามิเตอร์	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์
ระยะเวลา	0.604*	-0.731**	0.719**	0.088	0.743**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 14$

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

ตารางที่ ค.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างระยะเวลาการหมักกับอัตราส่วนธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C) อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H) อัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไนโตรเจนอะตอม (C/N) และระดับการเกิดออกซิเดชันของกรดฮิวมิก (ω)

พารามิเตอร์	ω	O/C	C/H	C/N
ระยะเวลา	0.720**	0.663**	0.726**	0.090

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 14$

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

ตารางที่ ค.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization degree; PD) ปริมาณไฮโดรเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) กับการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 201 – 230 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (nm)	ระยะเวลา	HI	HR	PD	ไฮโดรเจน	C/H
201	0.671**	-0.145	0.135	-0.326	-0.788**	0.827**
203	0.690**	-0.175	0.24	-0.432	-0.721**	0.733**
204	0.759**	-0.201	0.439	-0.570*	-0.756**	0.724**
205	0.729**	-0.284	0.425	-0.605*	-0.782**	0.757**
207	0.753**	-0.266	0.427	-0.602*	-0.797**	0.782**
208	0.758**	-0.246	0.417	-0.581*	-0.802**	0.785**
210	0.724**	-0.286	0.406	-0.603*	-0.791**	0.774**
211	0.745**	-0.282	0.420	-0.611*	-0.801**	0.786**
213	0.749**	-0.294	0.427	-0.619*	-0.803**	0.787**
214	0.744**	-0.301	0.426	-0.627*	-0.807**	0.791**
216	0.749**	-0.307	0.431	-0.634*	-0.809**	0.794**
219	0.748**	-0.312	0.441	-0.646*	-0.818**	0.801**
220	0.753**	-0.321	0.441	-0.652*	-0.819**	0.802**
222	0.751**	-0.327	0.451	-0.665**	-0.828**	0.809**
223	0.753**	-0.328	0.449	-0.665**	-0.830**	0.813**
224	0.754**	-0.329	0.454	-0.669**	-0.831**	0.812**
225	0.752**	-0.330	0.456	-0.672**	-0.833**	0.814**
226	0.755**	-0.334	0.456	-0.675**	-0.837**	0.818**
228	0.755**	-0.338	0.459	-0.682**	-0.842**	0.823**
229	0.756**	-0.341	0.462	-0.685**	-0.844**	0.825**
230	0.755**	-0.341	0.460	-0.684**	-0.845**	0.826**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, n = 14

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

ตารางที่ ค.8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization degree; PD) ปริมาณไฮโดรเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) กับการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 260 – 280 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (nm)	ระยะเวลา	HI	HR	PD	ไฮโดรเจน	C/H
260	0.752**	-0.354	0.485	-0.716**	-0.869**	0.849**
261	0.751**	-0.354	0.483	-0.715**	-0.868**	0.848**
262	0.752**	-0.355	0.482	-0.714**	-0.868**	0.849**
263	0.752**	-0.353	0.485	-0.716**	-0.868**	0.847**
264	0.752**	-0.354	0.479	-0.713**	-0.867**	0.847**
265	0.751**	-0.353	0.479	-0.712**	-0.869**	0.849**
266	0.751**	-0.350	0.481	-0.712**	-0.867**	0.847**
267	0.753**	-0.352	0.480	-0.711**	-0.867**	0.846**
268	0.754**	-0.350	0.476	-0.708**	-0.866**	0.846**
269	0.754**	-0.353	0.476	-0.709**	-0.865**	0.845**
270	0.754**	-0.351	0.476	-0.707**	-0.864**	0.844**
271	0.755**	-0.348	0.473	-0.705**	-0.863**	0.844**
272	0.756**	-0.349	0.472	-0.704**	-0.862**	0.844**
273	0.756**	-0.349	0.471	-0.704**	-0.863**	0.844**
274	0.741**	-0.356	0.481	-0.709**	-0.862**	0.837**
275	0.759**	-0.339	0.454	-0.690**	-0.873**	0.855**
276	0.770**	-0.354	0.458	-0.692**	-0.848**	0.834**
277	0.743**	-0.366	0.494	-0.724**	-0.857**	0.835**
278	0.776**	-0.346	0.461	-0.687**	-0.846**	0.825**
279	0.786**	-0.341	0.449	-0.683**	-0.868**	0.857**
280	0.763**	-0.35	0.480	-0.708**	-0.869**	0.848**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 14$

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

ตารางที่ ค.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) สัดส่วนการเกิดสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization degree; PD) ปริมาณไฮโดรเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) กับการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 340 – 370 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (nm)	ระยะเวลา	HI	HR	PD	ไฮโดรเจน	C/H
340	0.741**	-0.331	0.445	-0.669**	-0.837**	0.814**
341	0.762**	-0.336	0.500	-0.722**	-0.866**	0.838**
342	0.763**	-0.360	0.462	-0.686**	-0.842**	0.830**
344	0.801**	-0.367	0.456	-0.712**	-0.861**	0.847**
346	0.744**	-0.407	0.456	-0.710**	-0.852**	0.837**
347	0.738**	-0.381	0.489	-0.740**	-0.848**	0.832**
349	0.750**	-0.431	0.523	-0.749**	-0.862**	0.838**
350	0.739**	-0.342	0.438	-0.643*	-0.857**	0.856**
353	0.736**	-0.380	0.508	-0.741**	-0.823**	0.805**
354	0.766**	-0.372	0.501	-0.763**	-0.863**	0.843**
356	0.730**	-0.309	0.427	-0.665**	-0.858**	0.838**
357	0.762**	-0.301	0.490	-0.682**	-0.866**	0.845**
359	0.748**	-0.375	0.463	-0.725**	-0.843**	0.826**
360	0.800**	-0.396	0.476	-0.733**	-0.863**	0.859**
362	0.740**	-0.384	0.502	-0.733**	-0.865**	0.852**
363	0.756**	-0.336	0.455	-0.666**	-0.842**	0.826**
365	0.730**	-0.423	0.450	-0.718**	-0.829**	0.810**
366	0.788**	-0.366	0.497	-0.715**	-0.882**	0.857**
367	0.730**	-0.332	0.452	-0.692**	-0.880**	0.854**
369	0.725**	-0.358	0.469	-0.701**	-0.851**	0.828**
370	0.717**	-0.386	0.440	-0.707**	-0.897**	0.881**

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, $n = 14$

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

ตารางที่ ค.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ดัชนีการเกิดสารฮิวมิก (humification index; HI) สัดส่วนการเกิดสารฮิวสารฮิวมิก (humification ratio; HR) และระดับพอลิเมอไรเซชัน (polymerization degree; PD) ปริมาณไฮโดรเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) กับการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 460 – 480 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (nm)	ระยะเวลา	HI	HR	PD	ไฮโดรเจน	C/H
460	0.691**	-0.129	0.282	-0.448	-0.652*	0.594*
461	0.688**	-0.138	0.293	-0.460	-0.655*	0.595*
462	0.695**	-0.127	0.291	-0.450	-0.662*	0.599*
463	0.687**	-0.133	0.287	-0.449	-0.661*	0.599*
464	0.682*	-0.115	0.294	-0.445	-0.651*	0.585*
465	0.691**	-0.121	0.286	-0.441	-0.658*	0.595*
466	0.685**	-0.137	0.294	-0.461	-0.659*	0.596*
467	0.687**	-0.138	0.289	-0.458	-0.659*	0.597*
468	0.685**	-0.133	0.285	-0.446	-0.646*	0.585*
469	0.682*	-0.127	0.302	-0.459	-0.651*	0.588*
470	0.682*	-0.136	0.298	-0.459	-0.644*	0.579*
471	0.672*	-0.135	0.295	-0.455	-0.642*	0.577*
472	0.678*	-0.144	0.314	-0.472	-0.652*	0.585*
473	0.678*	-0.114	0.308	-0.451	-0.652*	0.584*
474	0.681*	-0.127	0.294	-0.452	-0.655*	0.591*
475	0.675*	-0.128	0.318	-0.470	-0.644*	0.574*
476	0.673*	-0.129	0.299	-0.456	-0.654*	0.587*
477	0.681*	-0.118	0.302	-0.448	-0.647*	0.581*
478	0.679*	-0.136	0.300	-0.464	-0.650*	0.583*
479	0.665*	-0.134	0.306	-0.463	-0.643*	0.576*
480	0.680*	-0.119	0.307	-0.450	-0.656*	0.590*

หมายเหตุ: * มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$, n = 13

** มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$, n = 13

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พรรณนิภา เป็ยชาติ
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2564 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	Obsuwan, K., Phuekvilai, P., Yookongkaew, N., Chaneam, S., Wanichacheva, N., Panishkan, K., Piachart, P., Artjinda, P., & Sanmanee, N. (2022). Nitrogen transformation during composting: A comparison of cow manure and mixed cow and pig manure. Science, Engineering and Health Studies, 22030013-22030013.

