

การศึกษาคุณภาพปุ๋ยหมักด้วยคุณสมบัติทางกายภาพเคมี
และความเป็นพิษต่อผักกาดขาว

STUDY OF COMPOST QUALITY USING ITS PHYSICOCHEMICAL
CHARACTERISTICS AND PHYTOTOXICITY
ON *BRASSICA RAPA* SUBSP. *PEKINENSIS*

พรรณนิภา เปียชาติ¹ อุมารัจน์ สันติสุขเกษม¹ นันทนิตย์ วานิชาชีวะ²
กมลชนก พานิชการ³ และ นัทธีรา สรรมนะ^{1*}

Pannipa Piachart¹, Umarat Santisukkasaem¹, Nantanit Wanichacheva²,
Kamolchanok Panishkan³, and Natdhera Sanmanee^{1*}

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

³ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

¹Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University

³Department of Statistics, Faculty of Science, Silpakorn University

*corresponding author e-mail: sanmanee_n@su.ac.th

(Received: 17 June 2024; Revised: 24 September 2024; Accepted: 4 October 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพปุ๋ยหมักด้วยคุณลักษณะทางกายภาพเคมีและความเป็นพิษต่อผักกาดขาว ปุ๋ยหมักจากมูลสุกรและมูลโคผสมกับน้ำหมักปลา รำละเอียด และมูลค่างควา ในอัตราส่วนร้อยละ 53.85 37.50 4.56 3.15 และ 0.94 ตามลำดับ เติร์ยมและเก็บในที่ร่มในฤดูระบายนาค 10 ธง ในการหมักพบว่าระยะอุณหภูมิสูงค่อนข้างสั้นเพียง 14 วัน แม้กระนั้นก็ตามการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักเกิดขึ้นตลอดกระบวนการหมัก โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักเช่นเดียวกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($r = -0.506$ & -0.795 , ตามลำดับ $P < 0.01$) ปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ($r = 0.821$, $P < 0.01$) สำหรับปริมาณกรดฮิวมิกที่มีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นนั้นมาจากวัตถุดิบตั้งต้นสอดคล้องกับเสถียรภาพเชิงโครงสร้างจากค่าดัชนีเชิงแสง (E_{280}/E_{465}) ที่มีค่าสูง โดยการลดลงของ E_{280}/E_{465} ระหว่างกระบวนการหมักบ่งชี้ถึงกระบวนการสร้างสารฮิวมิก (Humification process) จากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างแอลิแฟติกที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร

ขณะที่โครงสร้างที่ไม่อิมิต์ของสารตั้งต้นที่ 280 นาโนเมตร ลดลง ดัชนีการงอกของเมล็ด (GI) ซึ่งให้เห็นว่าปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ได้ในช่วง 21–49 วัน โดยไม่เป็นพิษต่อพืช แต่หากทิ้งปุ๋ยหมักไว้ถึง 63 วัน ปริมาณเกลือที่มากเกินไปทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินกว่ามาตรฐานกรมวิชาการเกษตรและลดค่าดัชนีการงอกของเมล็ดลง ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพเคมีร่วมกับความเป็นพิษต่อพืชจะช่วยกำหนดคุณภาพปุ๋ยหมัก มีประโยชน์ต่อการจัดการปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพและการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ได้

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก ดัชนีการงอกของเมล็ด คุณสมบัติทางกายภาพเคมี กรดฮิวมิก ฟักกาดขาว

Abstract

This research studied the compost quality using its physicochemical characteristics and phytotoxicity on *Brassica rapa* subsp. *Pekinensis*. Compost derived from porcine manure and bovine manure mixed with fine bran, fish fermentation, and bat manure in the percentage ratio of 53.85, 37.50, 4.56, 3.15, and 0.94, respectively, was prepared and kept under the shed in 10 air-flow bags. During composting, a short period of high temperature was observed within 14 days. Nevertheless, changing of compost quality was observed throughout the entire study. Organic matters (OM) decreased with time as same as the C/N ratio ($r = -0.506$ & -0.795 , respectively $P < 0.01$) responding to the increasing of electrical conductivity (EC) ($r = 0.821$, $P < 0.01$) through mineralization process. A high humic acid (HA) content at the beginning stage coming from the initial materials corresponded with the stability of humic structure as shown by the high optical density (E_{280}/E_{465}). The decreasing of E_{280}/E_{465} during the composting indicated the humification process responding to the more aliphatic structures at 465 nm while unsaturated structures of raw materials at 280 nm decreasing. The germination index (GI) also indicated that during 21–49 days, the compost was appropriate to use without phytotoxicity but if mixing the compost too long till 63 days, the EC would be too high exceeding the Department of Agriculture's Thai standard of fertilizer and lower GI from too much salt. Therefore, study the compost's physicochemical characteristics together with its phytotoxicity would help determining compost quality which would be beneficial for compost management and selecting the appropriate duration to effectively use.

Keyword: Compost, Germination index, Physicochemical properties, Humic acid, Chinese cabbage

บทนำ

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพของดินทั้งทางด้านกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ โดยอินทรีย์วัตถุที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายปุ๋ยหมักมีสีน้ำตาล-ดำ มีโครงสร้างที่ค่อนข้างเสถียรและมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดิน เรียกว่า สารฮิวมิก (Humic substances) สามารถดูดซับธาตุอาหารและทยอยปลดปล่อยแก่พืช มีอิทธิพลต่อการเพิ่มผลผลิตพืช (Hafez et al., 2021; Kandil et al., 2020)

กระบวนการหมัก แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแรกที่เกิดการแบ่งตัวของจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic microorganisms) จำนวนมาก โดยนำโมเลกุลเล็กๆ เช่น น้ำตาล และแป้งที่ละลายน้ำไปใช้ ในช่วงนี้อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วถึงในช่วง 40–45 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นเพียง 1–3 วัน เมื่อจำนวนจุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิสูง (Thermophilic organisms) เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในกองปุ๋ยอาจสูงถึง 57–80 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 50 องศาเซลเซียส สามารถฆ่าเชื้อที่ก่อให้เกิดโรคที่ปะปนมากับมูลสัตว์หรือวัตถุดิบตั้งต้นได้ แต่ไม่ควรสูงเกินกว่า 65 องศาเซลเซียส เพราะจะลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ดีลง ซึ่งระยะนี้อาจใช้เวลาหลายวันหรือหลายสัปดาห์ขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการหมัก (Cornell Waste Management Institute, 2007; Tai et al., 2022; Texas & M University System, 2009) ในระยะนี้ จุลินทรีย์จะย่อยสลายองค์ประกอบที่ย่อยสลายยากจำพวกโปรตีน ไขมัน เซมิเซลลูโลส และเซลลูโลส และกรดฮิวมิกซึ่งเป็นสารฮิวมิกโมเลกุลใหญ่จะลดปริมาณอย่างรวดเร็วจากกระบวนการย่อยสลายขณะที่โมเลกุลกรดฟัลวิกที่มีขนาดเล็กจะเพิ่มปริมาณขึ้น (Huang et al., 2008; Wang et al., 2019) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matters) ลดลง และพบโมเลกุลเล็กจำพวก กรดอะมิโน อะมิโน และอะมิโนซูการ์ และแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มมากขึ้น จากแอมโมเนียที่มีฤทธิ์เป็นด่างและการปลดปล่อยไฮดรอกไซด์ของธาตุอาหารที่มีประจุ และกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กๆ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) สูงขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) จะลดต่ำลงจากการนำคาร์บอนไปใช้และการเพิ่มของไนโตรเจนอินทรีย์ที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ (Bioavailable organic nitrogen) (Mao et al., 2019; Sharma et al., 2018; Zhu et al., 2019) เมื่ออุณหภูมิของปุ๋ยหมักลดลงเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศจะเข้าสู่ระยะสุดท้ายของกระบวนการหมัก จุลินทรีย์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางกลับมีบทบาทสำคัญและย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอย่างช้าๆ เกิดการสร้างสารฮิวมิกที่มีความเสถียรและโมเลกุลใหญ่ เช่น กรดฮิวมิกมากขึ้น (Huang et al., 2008; Wang et al., 2019) ในระยะนี้ปุ๋ยหมักที่ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยกว่า 20 (กรมวิชาการเกษตร, 2557) โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในช่วง 10–15 จึงจะเกิดสารฮิวมิกที่มีคุณภาพดี (Tan, 2003) และควรมีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง

5.50–8.50 และค่าการนำไฟฟ้าไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต์/เมตร จึงจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงดินและไม่เกิดความเป็นพิษต่อพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ดังนั้นการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้านต่างๆ ของปุ๋ยหมักดังกล่าว ร่วมกับการประเมินคุณภาพของสารฮิวมิกที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักด้วยดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (Humification index; HI) และคุณลักษณะเชิงโครงสร้าง จะช่วยให้การประเมินปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพเป็นไปอย่างชัดเจนมากขึ้น เช่น สัดส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H) ที่มีค่าสูงมากขึ้นจะบ่งบอกถึงกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของโครงสร้างที่ประกอบด้วยพันธะที่มีพลังงานสูง เช่น โครงสร้างแอโรแมติก และสัดส่วนปริมาณออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C) ที่เพิ่มมากขึ้น จะบ่งเป็นนัยถึงการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Gayathri et al., 2020; Liu et al., 2020) เช่น โครงสร้างคาร์บอกซิลและคาร์บอนิลในปุ๋ยหมักมูลไก่ มูลโค และมูลสุกรเมื่อเข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ เป็นต้น (Wang et al., 2015) ซึ่งคุณสมบัติของปุ๋ยหมักที่เปลี่ยนแปลงไปสัมพันธ์กับดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index; GI) และสะท้อนความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity) (Kong et al., 2022; Li et al., 2021; Yang et al., 2020)

ในการศึกษานี้ได้นำปุ๋ยหมักจากมูลโคและมูลสุกรมาผสมกับรำละเอียด มูลค่างควาพรหมด้วยกากน้ำตาลและน้ำหมักปลา ซึ่งล้วนเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายของประเทศไทยเมื่อจัดทำเป็นปุ๋ยหมักจะให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นไม่สูงนัก (น้อยกว่า 20) ซึ่งอัตราส่วนเริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำนี้มักพบในปุ๋ยที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง เช่น ปุ๋ยหมักที่มาจากมูลสัตว์หรือที่มีส่วนผสมของกากถั่ว (Bean dredge) เป็นต้น (Li et al., 2021; Wang et al., 2015) ทำการศึกษาคูณภาพของปุ๋ยหมักด้วยคุณสมบัติทางกายภาพเคมี ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าการนำไฟฟ้า และการย่อยสลายปุ๋ยหมักที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ด้วยดัชนีความเป็นพิษต่อพืชโดยใช้เมล็ดผักกาดขาวเป็นพืชทดสอบจากคุณสมบัติที่โตเร็วและการงอกของเมล็ดตอบสนองต่อความเป็นพิษของปุ๋ยหมักได้ อีกทั้งยังเป็นพืชท้องถิ่นที่นิยมบริโภคในประเทศไทย ร่วมกับการศึกษาคูณลักษณะของกรดฮิวมิกที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปในกระบวนการหมัก อันนำไปสู่แนวคิดในการประเมินปุ๋ยหมักเชิงคุณภาพและการเลือกระยะเวลาการนำไปใช้ที่เหมาะสม อันจะเป็นแนวทางในการพัฒนาปุ๋ยหมักในอนาคตต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักที่นำมาศึกษาเป็นปุ๋ยหมักผสมมูลสุกรและมูลโค ร้อยละ 53.85 และ 37.50 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ น้ำหมักปลา รำละเอียด และมูลค่างควา

ในอัตราส่วนร้อยละ 4.56 3.15 และ 0.94 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ คลุกเคล้าให้เข้ากัน ปุ๋ยที่ได้มีความเป็นกรดต่าง 7.52 ความชื้นร้อยละ 54.19 โดยน้ำหนัก ค่าการนำไฟฟ้า 3.38 เดซิซีเมนส์/เมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 65.48 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 15.24 มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ร้อยละ 2.49 1.61 และ 1.47 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ แบ่งปุ๋ยหมัก 15 กิโลกรัมใส่ถุงที่มีรูระบายอากาศ ดังภาพที่ 1(ก) มัดปากถุง เก็บในที่ร่มวางไม่ชิดกันเพื่อให้อากาศถ่ายเทสะดวก เมื่อวัดอุณหภูมิปุ๋ยกลางถุงแล้วพลิกกลับถุงเพื่อให้เกิดการย่อยสลายอย่างทั่วถึงทุกวัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยกลางถุง ถุงละ 250 กรัม จำนวน 10 ถุง นำมารวมเป็นตัวอย่างของวันที่ศึกษา โดยเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในวันที่ 0 3 7 14 21 28 35 42 49 และ 63 มีลักษณะปุ๋ยหมักดังภาพที่ 1(ข)-(ค) นำปุ๋ยที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานต่างๆ ทันทที ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ต่าง ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณอินทรีย์วัตถุ สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ดัชนีการงอกของเมล็ด ปริมาณกรดชีวมิค ธาตุองค์ประกอบของกรดชีวมิค และดัชนีเชิงแสงที่รอวิเคราะห์ภายหลังทำการเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ปุ๋ยหมักที่บรรจุในรูระบายอากาศ และลักษณะเนื้อปุ๋ยวันเริ่มผสม (วันที่ 0) และวันสุดท้ายของการศึกษา (วันที่ 63) (ก) ปุ๋ยหมักที่ผสมและบรรจุถุงแล้ว (ข) ปุ๋ยหมักวันเริ่มผสม (วันที่ 0) และ (ค) ปุ๋ยหมักวันสุดท้ายของการศึกษา (วันที่ 63)

2. วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน

อุณหภูมิของปุ๋ยหมักวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ค่าความเป็นกรด-ต่าง ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) ยี่ห้อ Fisher scientific รุ่น AB150 และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) โดยเครื่อง Sartorius AG Gottingen Germany รุ่น Professional Meter PP-50 วิเคราะห์ค่าความชื้นจากน้ำหนักปุ๋ยก่อน-หลังอบด้วยตู้อบลมร้อน 103–105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณปริมาณอินทรีย์วัตถุจากตัวอย่างที่อบแห้งแล้วมาเผาที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Tong et al., 2019) คำนวณปริมาณคาร์บอนอินทรีย์

ทั้งหมด (Total organic carbon; TOC) ด้วยการคูณ van Bemmelen factor (0.58) (Visconti, Jiménez & de Paz, 2022) ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldahl Method ของ AOAC Official Method 955.04 (Latimer, 2012) จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

3. ความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity)

วิเคราะห์ความเป็นพิษต่อพืชจากค่าดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index) โดยใช้เมล็ดผักกาดขาว *Brassica rapa* subsp. *pekinensis* เทียบกับชุดควบคุมด้วยน้ำกลั่นปราศจากไฮดรอน (DI) ตามวิธีของ กรมพัฒนาที่ดิน (2553) แต่ละชุดทดลองมีจำนวน 3 ซ้ำ โดยใน 1 ซ้ำมีจำนวน 10 เมล็ด การคำนวณร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ดเทียบกับชุดควบคุม (Relative Seed Germination; RSG) ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์เทียบกับชุดควบคุม (Relative Root Growth; RRG) และดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination Index; GI) ดังสมการที่ 1–3 ตามลำดับ (ลักษณะ และคณะ, 2558; Hou et al., 2024)

$$RSG = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง}}{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดควบคุม}} \times 100 \quad (1)$$

$$RRG = \frac{\text{ความยาวรากเฉลี่ยของชุดทดลอง}}{\text{ความยาวรากเฉลี่ยของชุดควบคุม}} \times 100 \quad (2)$$

$$GI = \frac{RSG \times RRG}{100} \quad (3)$$

เมื่อ RSG หมายถึง ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ด

RRG หมายถึง ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์

GI หมายถึง ดัชนีการงอกของเมล็ด

4. ปริมาณกรดฮิวมิก และธาตุองค์ประกอบ

สกัดกรดฮิวมิกจากตัวอย่างปุ๋ยหมักตามวิธีของ International Humic Substances Society; IHSS (Swift, 1996; Behravan et al., 2020) กรดฮิวมิก (Humic Acid; HA) ที่สกัดได้นำมาคำนวณเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) เป็นค่าดัชนีการเกิดกรดฮิวมิก (HI) ดังสมการที่ 4 (El Fels et al., 2014) ตรวจวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจน วัดด้วยเครื่องออร์แกนิคเอลิเมนเทลอนาไลเซอร์ (Organic Elemental analyzer)

$$HI = \frac{HA}{TOC} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ HI หมายถึง ดัชนีการเกิดสารชีวมิ

HA หมายถึง ปริมาณกรดชีวมิ (กรัม)

TOC หมายถึง ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (กรัม)

5. การวิเคราะห์ดัชนีเชิงแสง

นำกรดชีวมิ 5 มิลลิกรัม นำไปละลายในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 0.05 โมล (Zhang et al., 2020) จากนั้นนำไปวัดความดูดกลืนรังสีด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร (E_{280}) และ 465 นาโนเมตร (E_{465}) เป็นสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงสถานะอิเล็กทรอนิกส์จากการซ้อนเหลื่อมของออร์บิทัลในพันธะไพแบบสร้างและต้านพันธะ ($\pi-\pi^*$) ในโครงสร้างของลิกนิน และควิโนนต่อโครงสร้างแอลิแพติกความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ซึ่งเป็นโครงสร้างเริ่มต้นของสารชีวมิ (Biyada et al., 2020; Radwan et al., 2019)

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statics Version 26 โดยแต่ละการทดลองมีจำนวนตัวอย่างอย่างน้อย 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติทางกายภาพเคมีของปุ๋ยหมัก

การศึกษาคุณสมบัติปุ๋ยหมักผสมมูลโค มูลสุกร และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเวลา 63 วัน แบ่งระยะการย่อยสลายของปุ๋ยหมักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Tai et al., 2022) ได้เป็น 3 ระยะ ดังตารางที่ 1 ได้แก่ ระยะเริ่มผสม (Initial phase) วันที่ 0 มีอุณหภูมิ 33.30 องศาเซลเซียส ในระยะนี้ปุ๋ยหมักมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 54.19 จากส่วนผสมน้ำหมักและการพรมน้ำ มีค่าการนำไฟฟ้า 3.38 เดซิซีเมนต์/เมตร ระยะอุณหภูมิสูง (Thermophilic phase) วันที่ 1–13 มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 39.30–62 องศาเซลเซียส มีค่าการนำไฟฟ้าจากการปลดปล่อยไฮดรอนของธาตุอาหารสูงขึ้นในวันที่ 3 และวันที่ 7 เป็น 3.39 และ 4.02 เดซิซีเมนต์/เมตร ตามลำดับ และระยะปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (Mature phase) วันที่ 14 เป็นต้นไป มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงจากการะบวนการย่อยสลายสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = -0.506$, $P < 0.01$ และ $r = -0.795$, $P < 0.01$ ตามลำดับ) ดังภาพที่ 2 โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนนี้สัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุอย่างมีนัยสำคัญ ($r = 0.763$, $P < 0.01$) ปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.62–5.45 เดซิซีเมนต์/เมตร และสูงที่สุดในวันที่ 63 แต่ไม่เกินมาตรฐานของ กรมวิชาการเกษตร (2557) ที่กำหนดไว้ไม่ให้มากกว่า 6 เดซิซีเมนต์/เมตร โดยคุณสมบัติ

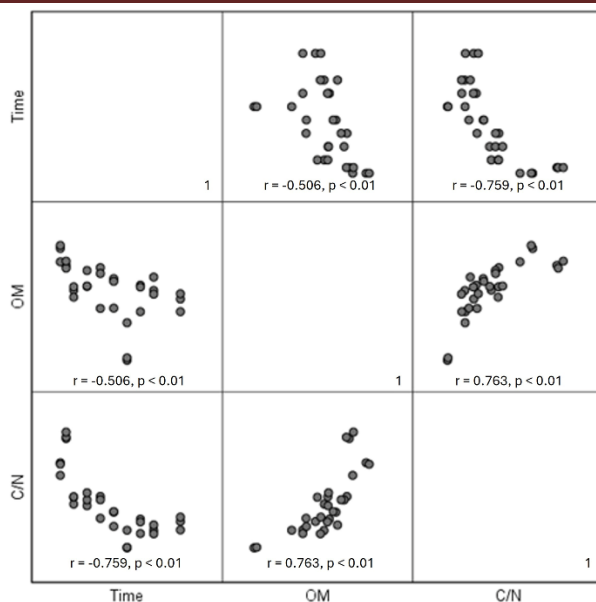
ดานความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ผ่านมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2557) ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของปุ๋ยหมักในช่วงระยะการหมักต่างๆ

ระยะเวลา (วัน)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%)	pH	อินทรีย์วัตถุ (%)	C/N
มาตรฐานกรม วิชาการเกษตร	–	≤35%	5.5–8.5	≥30%	≤20
0 (เริ่มผสม)	33.30	54.19	7.52	65.48	15.24
1–13 (อุณหภูมิสูง)	39.30–62	36.02–44.08	8.56–8.84	61.77–64.26	14.04–16.43
14–63 (ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่)	29.0–32.7	15.29–25.42	6.82–8.25	56.56–68.83	12.45–14.04

2. กระบวนการย่อยสลายกับคุณสมบัติของกรดฮิวมิก

กรดฮิวมิก (HA) ที่พบมีค่าอยู่ในช่วง 34.54–64.35 มิลลิกรัม/กรัม และมีดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (HI) อยู่ในช่วงร้อยละ 9.53–16.94 ดังตารางที่ 2 โดยปริมาณกรดฮิวมิก ดัชนีกระบวนการเกิดฮิวมิกและสัดส่วนการดูดกลืนคลีนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร (E_{280}/E_{465}) ในช่วงเริ่มผสมมีค่าสูงที่สุด จากนั้นจะลดลงและมีค่าต่ำที่สุดในวันที่ 21 และเพิ่มขึ้นมีความแปรปรวนอยู่ในช่วง 42.31–50.90 เช่นเดียวกับดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิกที่อยู่ในช่วงร้อยละ 12–15.37 และอัตราส่วนการดูดกลืนคลีนแสงมีค่าอยู่ในช่วง 9.9085–11.9832 โดยสัดส่วนปริมาณออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนของกรดฮิวมิกมีค่าต่ำที่สุดในวันเริ่มผสมมีค่า 0.52 และ 0.59 ตามลำดับ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ($r = 0.685$ และ 0.681 ตามลำดับ, $P < 0.05$)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM%) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และระยะเวลาการหมัก (Time) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.01$ (2-tailed)

ตารางที่ 2 ปริมาณกรดฮิวมิก (HA) ดัชนีกระบวนการเกิดสารฮิวมิก (HI) อัตราส่วนธาตุองค์ประกอบของกรดฮิวมิก ได้แก่ อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) และดัชนีเชิงแสง (E_{280}/E_{465})

ระยะเวลา (วัน)	HA (mg/g)	HI (%)	O/C	C/H	E_{280}/E_{465}
0	64.35	16.94	0.52	0.59	51.0253
3	56.67	15.21	0.55	0.64	11.6530
7	47.39	13.23	0.56	0.68	11.0295
14	37.23	10.23	0.56	0.68	11.1736
21	34.54	9.53	0.58	0.69	10.9052
28	50.90	14.17	0.60	0.66	10.1254
35	50.40	15.37	0.62	0.69	11.8914
42	49.61	13.92	0.63	0.70	9.9085
49	49.22	13.65	0.58	0.70	11.9832
63	42.31	12.00	0.58	0.70	10.7533

3. ความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity)

ดัชนีการงอกของเมล็ดเป็นดัชนีบ่งบอกการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ใช้ประเมินความเป็นพิษของปุ๋ยหมักต่อพืชเป็นสากล ด้วยการใช้พืชที่เติบโตได้ง่ายและมีความไวต่อการทดสอบความเป็นพิษ วัดด้วยจำนวนการงอกของเมล็ดและความยาวรากที่เป็นสัดส่วนกับชุดควบคุมซึ่งหากปุ๋ยหมักมีสารพิษที่ปลดปล่อยออกมาในกระบวนการหมักที่แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายไม่สมบูรณ์หรือปลดปล่อยปริมาณธาตุอาหารออกมาในรูปเกลือที่มากเกินไปจะทำให้การเติบโตของพืชหยุดชะงักหรืออาจตายได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553; ลักขณา และคณะ, 2558; Hou et al., 2024; Kong et al., 2022; Lahsaini et al., 2017; Pena et al., 2020) เมื่อนำเมล็ดผักกาดขาวมาทดสอบด้วยสารละลายปุ๋ยหมักเทียบกับชุดควบคุม มีการงอกของเมล็ด (RSG) อยู่ในช่วงร้อยละ 86.67–100 จึงเป็นเมล็ดที่สามารถเติบโตได้ในสารละลายปุ๋ยหมัก และมีความยาวราก (RRG) เทียบกับชุดควบคุมอยู่ในช่วงร้อยละ 60.65–98.92 ดังตารางที่ 3 โดยตอบสนองต่อสารพิษในปุ๋ยหมักจากความยาวรากที่สั้นลงบ่งบอกถึงการหยุดชะงักการเจริญเติบโต เมื่อประเมินดัชนีการงอกของเมล็ด (GI) มีค่าอยู่ในช่วง 54.59–95.62 โดยในช่วงอุณหภูมิสูงที่มีการย่อยสลายองค์ประกอบที่ย่อยสลายยากดัชนีการงอกของเมล็ดจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 80 และต่ำที่สุดในวันที่อุณหภูมิปุ๋ยหมักสูงที่สุดในวันที่ 3 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิปุ๋ยหมักเย็นลงเข้าสู่ระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ ดัชนีการงอกค่อยๆ เพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.624$ และ -0.521 ตามลำดับ, $P < 0.01$) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$GI = -1.0954 \text{temp} + 118.45 \quad R^2 = 0.6882 \quad (5)$$

$$GI = -7.8405 \text{C/N} + 189.34 \quad R^2 = 0.5708 \quad (6)$$

เมื่อ GI หมายถึง ร้อยละดัชนีการงอกของเมล็ด

Temp หมายถึง อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

C/N หมายถึง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเมล็ดผักกาดขาว (Phytotoxicity) ได้แก่ ร้อยละการงอกสัมพัทธ์ของเมล็ด (RSG) ร้อยละความยาวรากสัมพัทธ์ (RRG) และดัชนีการงอกของเมล็ด (GI)

ระยะเวลา	RSG (%)	RRG (%)	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	86.97
35	100.00	92.31	92.31
42	96.67	98.92	95.62
49	100.00	90.03	90.03
63	86.67	84.97	73.64

อภิปรายผล

ปุ๋ยหมักที่มีอินทรีย์วัตถุจากมูลสัตว์เป็นหลักมีปริมาณไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นจึงค่อนข้างต่ำ ปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุทำให้ช่วงระยะอุณหภูมิสูงค่อนข้างสั้นเพียง 13 วัน เมื่อเข้าสู่ระยะอุณหภูมิสูงในวันที่ 1 ซึ่งเป็นระยะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายองค์ประกอบอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายยากปลดปล่อยความร้อนสูงในกระบวนการย่อยสลายออกมา (Biyada et al., 2020) อุณหภูมิในระยะนี้จะสูงขึ้นจนถึง 62 องศาเซลเซียส เพียงพอที่จะทำให้ลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและปรสิตได้ (>50 องศาเซลเซียส) (Tai et al., 2022) ดังตารางที่ 1 เมื่ออุณหภูมิปุ๋ยเย็นลงเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศปุ๋ยเข้าสู่ระยะที่พัฒนาเต็มที่ กระบวนการย่อยสลายยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการหมัก สอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ลดลงสัมพันธ์กับระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ดังภาพที่ 2 ซึ่งการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุจะปลดปล่อยไอออนของธาตุอาหารเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน มักพบในปุ๋ยหมักที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง เช่น ปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์ที่มีไนโตรเจนปะปนในรูปยูเรีย เช่น ปุ๋ยหมักมูลโค มูลสุกร มูลแกะ และมูลไก่ (Kong et al., 2022; Zhang et al., 2024)

กรดฮิวมิกและดัชนีกระบวนการเกิดฮิวมิกในช่วงเริ่มผสมมีค่าสูงนั้นล้วนมาจากวัตถุดิบตั้งต้น และเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่าในระยะอื่นๆ โดยค่าดัชนีเชิงแสง (E_{280}/E_{465})

ที่มีค่าสูงที่สุดในวันเริ่มผสม ดังตารางที่ 2 และลดลงอย่างรวดเร็วจากกระบวนการย่อยสลายโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของลิกนินและควิโนนในโครงสร้างที่ช่วงความยาวคลื่น 260–280 นาโนเมตร ร่วมกับการเพิ่มโครงสร้างแอลิแฟติกของกระบวนการสร้างสารชีวโมเลกุลในช่วงความยาวคลื่น 460–480 นาโนเมตร (Biyada et al., 2020) นอกจากนี้อัตราส่วนออกซิเจนอะตอมต่อคาร์บอนอะตอม (O/C) และอัตราส่วนคาร์บอนอะตอมต่อไฮโดรเจนอะตอม (C/H) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงท้ายๆ ของกระบวนการหมักที่สัมพันธ์กับการลดลงของดัชนีเชิงแสงอย่างมีนัยสำคัญ ($r = -0.658$ และ -0.848 ตามลำดับ, $P < 0.05$) อาจหมายถึงการย่อยสลายองค์ประกอบแอลิแฟติก อมิโน และพอลิแซ็กคาไรด์ในโครงสร้างวัตถุดิบตั้งต้นเกิดโครงสร้างแอลิแฟติก (C–H) รวมถึงกระบวนการออกซิเดชันที่เพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) และฟีนอลิก ($-\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) ในโครงสร้างสารชีวโมเลกุล (Fukushima et al., 2009; Huang et al., 2006) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวช่วยในการดูดซับธาตุอาหารส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย

ดัชนีการงอกของเมล็ดเมื่อนำมาใช้ประเมินการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก พบว่า วันเริ่มผสมซึ่งยังไม่เข้าสู่กระบวนการย่อยสลายวัตถุดิบตั้งต้น การตอบสนองของดัชนีการงอกของเมล็ดอาจมีค่าค่อนข้างสูงได้ในวัตถุดิบตั้งต้นที่มีความเป็นพิษน้อย เช่น การศึกษาของ Kong et al. (2022) ทดสอบดัชนีการงอกด้วยเมล็ดแตงกวาในปุ๋ยหมักมูลโคที่วันเริ่มผสมมีดัชนีการงอกมากกว่าร้อยละ 80 จากองค์ประกอบอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายมาบ้างแล้วจากการเคี้ยวเอื้องสำหรับมูลสัตว์อื่นๆ เช่น มูลไก่ มูลแกะ และมูลสุกรที่มียูเรียปะปนสูงกว่าปริมาณแอมโมเนียและกรดอมิโนในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าสูง และไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของเมล็ด ทำให้ดัชนีการงอกต่ำจากความเป็นพิษได้ ดังนั้นการผสมมูลโคกับมูลสุกรในการศึกษานี้จึงอาจช่วยลดพิษที่ปะปนมากับมูลสุกรลงดัชนีการงอกของเมล็ดในวันเริ่มผสมจึงสูงกว่าร้อยละ 80 เล็กน้อย แต่เมื่อปุ๋ยเข้าสู่ช่วงระยะอุณหภูมิสูงไปจนถึงช่วงต้นของระยะที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่ (วันที่ 14) ดัชนีการงอกมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 80 บ่งบอกถึงความเป็นพิษของปุ๋ยหมักที่มักปล่อยแอมโมเนีย และโอโซนที่มีประจุอื่นๆ เพิ่มมากขึ้น (Kong et al., 2022; Zhang et al., 2024) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Ji et al. (2023) พบว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในปุ๋ยหมัก 4 ชนิด ได้แก่ มูลไก่ มูลเป็ด มูลสุกร และมูลโคลดดัชนีการงอกของเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นเมื่อปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะที่พัฒนาเต็มที่ วันที่ 21–49 มีดัชนีการงอกของเมล็ดมีค่าอยู่ในช่วง 82.62–95.62 ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์และปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้ได้ โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรทซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืช (Lahsaini et al., 2017) อย่างไรก็ดีเมื่อทิ้งปุ๋ยหมักไว้นานเกินไปถึงวันที่ 63 กระบวนการย่อยสลายยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประจุและค่าการนำไฟฟ้าสูงเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอัตราส่วน

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง ($r = -0.866$, $P < 0.01$) ไส้ที่มากเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตหยุดชะงักได้ และไม่เป็นผลดีกับการนำไปใช้ต่อพืช (Aylaj & Adani, 2023)

สรุปผลการวิจัย

กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิเย็นลงและสามารถนำไปใช้ได้ตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไป แต่ดัชนีชีวภาพในการงอกของเมล็ดผักกาดขาวที่ตอบสนองต่อความเป็นพิษของปุ๋ยหมัก ชี้ให้เห็นว่าปุ๋ยหมักเหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้ในช่วงวันที่ 21–49 เท่านั้น ดังนั้นการศึกษาทางกายภาพและเคมีเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถบ่งบอกการนำไปใช้ของปุ๋ยหมักได้ชัดเจนนัก การใช้ดัชนีชีวภาพร่วมด้วยจะช่วยให้ประเมินช่วงอายุปุ๋ยหมักที่นำไปใช้ได้ดียิ่งขึ้น ในศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของสารอินทรีย์ในช่วงที่ปุ๋ยพัฒนาเต็มที่แล้ว ที่ยังคงดำเนินต่อไป และปลดปล่อยไอออนธาตุอาหารในรูปค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างอื่นๆ ของสารอินทรีย์ที่ส่งผลต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก การศึกษาพลวัตของปุ๋ยหมักตลอดกระบวนการหมักจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะกับวัตถุดิบตั้งต้นที่มีความหลากหลาย ซึ่งในปัจจุบันนิยมนำของเสียอินทรีย์หรือสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยหมักและเป็นแนวทางในการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยหมักได้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. (2553). คู่มือปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์พืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน. สืบค้นเมื่อ 12 กรกฎาคม 2566, จาก <https://www.ddd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-07.pdf>
- กรมวิชาการเกษตร. (2557). **ราชกิจจานุเบกษา**, 131 (ตอนพิเศษ 29 ง), 4.
- ลักขณา เบญจวรรณ, ปิยะรัตน์ วิจิตรนังสลิทธิ, ทศนีย์ ชัยคงดี, และโยธกา รัตนวงศ์. (2558). การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติและดัชนีการงอกของเมล็ดพืช ของปุ๋ยหมักจากพืชน้ำ 3 ชนิด. ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12: ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน** (น.1794–1803). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน กองบริหารวิชาการและนิสิต.
- Aylaj, M., & Adani, F. (2023). The evolution of compost phytotoxicity during municipal waste and poultry manure composting. **Journal of Ecological Engineering**, 24(6), 281–293.

- 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.
- 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.
- Cornell Waste Management Institute. (2007). **The Science of Composting**. Retrieved June, 1, 2024, from <https://cwmi.css.cornell.edu/chapter1.pdf>
- El Fels, L., Zamama, M., El Asli, A., & Hafidi, M. (2014). Assessment of biotransformation of organic matter during co–composting of sewage sludge–lignocellulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**, **87**, 128–137.
- 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. (2020). Extraction and characterisation of humic acid from different organic wastes and its physico–chemical properties. **Int. J. Chem. Stud**, **8**(1), 769–775.
- Hafez, M., Mohamed, A.E., Rashad, M., & Popov, A.I. (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.
- 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.
- 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.
- Huang, H., Zeng, G., Tang, L., Yu, H., Xi, X., Chen, Z., & Huang, G. (2008). Effect of biodelignification of rice straw on humification and humus quality by *Phanerochaete chrysosporium* and *Streptomyces badius*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, **61**(4), 331–336.
- Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta–analysis. **Science of The Total Environment**, **886**, 163929.
- Kandil, E.E., Abdelsalam, N.R., Mansour, M.A., Ali, H.M., & Siddiqui, M.H. (2020). Potentials of organic manure and potassium forms on maize (*Zea mays* L.) growth and production. **Scientific Reports**, **10**(1), 8752.
- 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.

- 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.
- Latimer, G.W. (2012). **Official Methods of Analysis of AOAC International**. (19th edition.). Gaithersburg: AOAC International.
- Li, L., Guo, X., Zhao, T., & Li, T. (2021). Green waste composting with bean dregs, tea residue, and biochar: Effects on organic matter degradation, humification and compost maturity. **Environmental Technology & Innovation**, 24, 101887.
- 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.
- Mao, H., Zhang, H., Fu, Q., Zhong, M., Li, R., Zhai, B., Wang, Z., & Zhou, L. (2019). Effects of four additives in pig manure composting on greenhouse gas emission reduction and bacterial community change. **Bioresource technology**, 292, 121896.
- Pena, H., Mendoza, H., Dianeze, F., & Santos, M. (2020). Parameter selection for the evaluation of compost quality. **Agronomy**, 10(10), 1567.
- Radwan, E.K., Ibrahim, M.B.M., Moursy, A. S., & Ghafar, H.A. (2019). Research article characterization of humic acids extracted from Egyptian sediment by elemental composition, NMR and FTIR. **Journal of Environmental Science and Technology**, 12(5), 221–227.
- Sharma, D., Yadav, K.D., & Kumar, S. (2018). Role of sawdust and cow dung on compost maturity during rotary drum composting of flower waste. **Bioresource technology**, 264, 285–289.
- Swift, R.S. (1996). Organic matter characterization. **Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods**, 5, 1011–1069.
- 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**, 1–10. DOI: 10.1007/s13399-022-03141-5.
- Tan, K.H. (2003). **Humic Matter in Soil and the Environment: Principle and Controversies**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Texas, A., & M University System. (2009). **Composting Fundamentals**. Retrieved June, 1, 2024, from <https://aggie-horticulture.tamu.edu/earthkind/landscape/dont-bag-it/chapter-2-composting-fundamentals/>
- 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.
- 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.

- Wang, K., He, C., You, S., Liu, W., Wang, W., Zhang, R., Qi., & Ren, N. (2015). Transformation of organic matters in animal wastes during composting. **Journal of hazardous materials**, **300**, 745–753.
- Wang, L., Li, Y., Prasher, S.O., Yan, B., Ou, Y., Cui, H., & Cui, Y. (2019). Organic matter, a critical factor to immobilize phosphorus, copper, and zinc during composting under various initial C/N ratios. **Bioresource technology**, **289**, 121745.
- 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.
- 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.
- Zhang, Y., Li, Y., Chang, L., Zi, C., Liang, G., Zhang, D., & Su, Y. (2020). A comparative study on the structural features of humic acids extracted from lignites using comprehensive spectral analyses. **RSC advances**, **10**(37), 22002–22009.
- Zhu, L., Zhao, Y., Zhang, W., Zhou, H., Chen, X., Li, Y., Wei, D., & Wei, Z. (2019). Roles of bacterial community in the transformation of organic nitrogen toward enhanced bioavailability during composting with different wastes. **Bioresource technology**, **285**, 121326.