



บทความวิจัย

ผลของการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบต่อการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียและคุณภาพของปุ๋ยหมัก

นิติพล อินทร์วงศ์ และ เสาวคนธ์ เหมวงษ์*

คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4253 2471 อีเมล: saowakon@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.001

รับเมื่อ 5 กรกฎาคม 2568 แก้ไขเมื่อ 5 มกราคม 2569 ตอรับเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 11 มิถุนายน 2569

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในปุ๋ยหมักในอัตรา 0% 20% 40% และ 60% ต่อการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) และคุณภาพของปุ๋ยหมัก การทดลองดำเนินการในโรงเรือนเป็นเวลา 54 วัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ โดยใช้ถ่านแกลบที่ผลิตด้วยวิธีการเผาแบบดั้งเดิมผสมกับฟางข้าว และมูลวัวซึ่งเป็นวัสดุหลักของการทำปุ๋ยหมัก ทำการวัดปริมาณก๊าซ NH_3 ความชื้น และอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักในวันที่ 1 4 16 32 และ 54 หลังการหมัก และวิเคราะห์คุณสมบัติของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดการหมัก ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ผลการทดลองพบว่า การเติมถ่านแกลบช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีไม่เติมถ่าน โดยเฉพาะอัตราการเติม 60% ซึ่งสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ได้สูงสุด 30.22% ตลอดกระบวนการหมัก นอกจากนี้ การเติมถ่านแกลบทุกอัตราส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ขณะที่ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งด้านคุณภาพปุ๋ยหมักการคงอยู่ของไนโตรเจน ต้นทุน และความเหมาะสมเชิงปฏิบัติพบว่า อัตราการเติมถ่านแกลบ 40% เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นศักยภาพของถ่านแกลบในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปุ๋ยหมัก ลดการสูญเสียไนโตรเจน และสนับสนุนการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ แกลบ ปุ๋ยหมัก ก๊าซแอมโมเนีย คุณภาพปุ๋ยหมัก



Influence of Rice Husk-derived Biochar Rates on Ammonia Emissions and Quality of Compost

Nitiphon Ainthauaong and Saowakon Hemwong*

Faculty of Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 4253 2471, E-mail: saowakon@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.001

Received 5 July 2025; Revised 5 January 2026; Accepted 4 February 2026; Published online: 11 June 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of adding rice husk biochar to compost at different rates (0, 20, 40, and 60%) on ammonia (NH_3) emissions and compost quality. The experiment was conducted in a greenhouse for 54 days using a Completely Randomized Design (CRD) with four replications. Rice husk biochar produced by a traditional pyrolysis method was mixed with rice straw and cattle manure, which served as the main composting materials, at the designated ratios. Ammonia emissions, moisture content, and temperature of the compost piles were measured on days 1, 4, 16, 32, and 54 after composting. At the end of the composting period, compost properties were analyzed, including pH, Electrical Conductivity (EC), organic matter content, total nitrogen content, and the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio. The results showed that the addition of rice husk biochar significantly reduced NH_3 emissions compared with the treatment without biochar, particularly at the 60% application rate, which achieved the greatest reduction in NH_3 emissions (up to 30.22%) throughout the composting process. Moreover, all biochar application rates increased total nitrogen and organic matter contents and decreased the C/N ratio, while pH and EC were not significantly different. However, when compost quality, nitrogen retention, cost, and practical applicability were considered together, the 40% rice husk biochar application rate was identified as the most suitable under the experimental conditions. These findings indicate the potential of rice husk biochar to enhance composting efficiency, reduce nitrogen losses, and support the sustainable management of agricultural residues.

Keywords: Biochar, Rice Husk, Compost, Ammonia Gas, Compost Quality

Please cite this article as: N. Ainthauaong and S. Hemwong, "Influence of rice husk-derived biochar rates on ammonia emissions and quality of compost," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 3, pp. 1–12, Jul.–Sep. 2026 (in Thai), Art. no. 263-8186, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.001.

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการปุ๋ยหมักมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับการขับเคลื่อนและการขยายตัวระบบการจัดการขยะอินทรีย์อย่างยั่งยืน โดยการทำปุ๋ยหมักมีบทบาทสำคัญในการหมุนเวียนธาตุอาหาร การส่งเสริมการเกษตรอินทรีย์ การปรับปรุงสุขภาพดิน และการกักเก็บคาร์บอนในดินที่ใช้ในการเกษตร [1] กระบวนการทำปุ๋ยหมักสามารถดำเนินการได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การหมักแบบกองเติมอากาศ การหมักแบบกลับกอง การทำปุ๋ยหมักด้วยไส้เดือน เป็นต้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการทำปุ๋ยหมักจะเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในเชิงคุณภาพของปุ๋ยหมักยังคงพบข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบธาตุอาหาร และการสูญเสียในรูปของก๊าซไนโตรเจน เช่น ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นต้น [2], [3] ส่งผลทำให้คุณภาพของปุ๋ยหมักลดลง พร้อมทั้งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้ให้ความสนใจต่อการบูรณาการถ่านชีวภาพ (Biochar) เข้ากับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก โดยมองถ่านชีวภาพเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของปุ๋ยหมักและลดการสูญเสียธาตุอาหาร [4]–[7] ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ภายใต้อุณหภูมิสูงที่ปราศจากออกซิเจนส่งผลให้มีคุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ พื้นที่ผิวสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) สูง และโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมากซึ่งเอื้อต่อการดูดซับความชื้น ธาตุอาหาร รวมถึงสารระเหยต่าง ๆ [8] คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการลดการสูญเสียไนโตรเจนในระหว่างกระบวนการหมัก และช่วยยกระดับคุณภาพของปุ๋ยหมักเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปุ๋ยหมักแบบดั้งเดิม

นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังเป็นวัสดุที่มีความคุ้นเคยและเข้าถึงได้ง่ายในบริบทของชนบทไทยโดยเฉพาะในกลุ่มเกษตรกร งานวิจัยจำนวนมากรายงานว่าถ่านชีวภาพในกองปุ๋ยหมักสามารถการทำงานของจุลินทรีย์เร่งกระบวนการหมัก ปรับปรุงคุณภาพของปุ๋ยหมัก และ

ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก [3], [9], [10] รวมถึงมีบทบาทในการลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ทั้งในกองปุ๋ยหมักและในดิน [11]–[13] รายงานว่าการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 10% เป็นระดับเหมาะสมที่สุด โดยสามารถลดการสูญเสียไนโตรเจนลงเหลือเพียง 25.69% เมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติมถ่านชีวภาพซึ่งมีการสูญเสียไนโตรเจนสูงถึง 40.01% พร้อมทั้งช่วยลดระยะเวลาการหมักเหลือเพียง 14 วัน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของประชากรจุลินทรีย์ในแต่ละช่วงของกระบวนการหมัก เนื่องจากถ่านชีวภาพมีบทบาทช่วยเสริมสร้างการเจริญของประชากรแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) และยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการลดการสูญเสียไนโตรเจนจากกองปุ๋ยหมัก นอกเหนือจากการใช้ถ่านชีวภาพแล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางอื่นในการปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยหมัก เช่น การใช้วัสดุปรับโครงสร้าง การเติมแร่ดูดซับอย่างซีโอไลต์ (Zeolite) และการใช้จุลินทรีย์เสริมซึ่งสามารถช่วยเร่งการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและลดการสูญเสียไนโตรเจนในระหว่างกระบวนการหมักได้ในระดับหนึ่ง [14]–[16] อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวมักให้ผลเฉพาะด้านและขึ้นอยู่กับสภาพการจัดการและชนิดวัตถุดิบเป็นสำคัญ ขณะที่การใช้ถ่านชีวภาพมีศักยภาพเชิงบูรณาการมากกว่าทั้งในการลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 และก๊าซเรือนกระจก เพิ่มการกักเก็บธาตุอาหาร และปรับปรุงโครงสร้างของดินในระยะยาว [6], [7], [17] รวมไปถึงการลดต้นทุนการผลิตและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในชุมชนให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อย่างไรก็ตามการเติมถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยหมักในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อความเป็นอัตราการเกิดกระบวนการเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) และลดความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ [18] ดังนั้นการกำหนดสัดส่วนของถ่านชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักและลดการสูญเสียไนโตรเจนจึงยังคงเป็นประเด็นที่จำเป็นต้องได้รับการศึกษาอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการเติมถ่านชีวภาพต่อการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียในระหว่างกระบวนการหมัก และต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก

เพื่อสนับสนุนการพัฒนากระบวนการผลิตปุ๋ยหมักที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการทดลอง

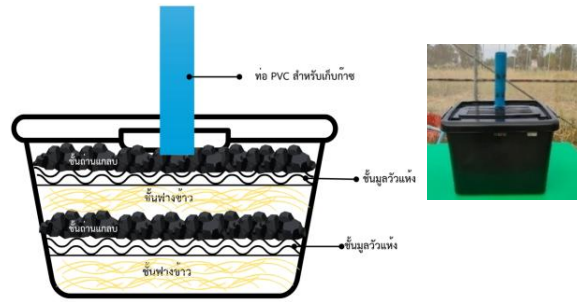
การศึกษานี้ดำเนินการในโรงเรือนทดลอง โดยมีกรรมวิธีจำนวน 4 กรรมวิธี ดังนี้ 1) ไม่ใส่ถ่าน (0%) 2) ใส่ถ่านแกลบ อัตรา 20% 3) ถ่านแกลบ อัตรา 40% และ 4) ถ่านแกลบ อัตรา 60% วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 4 ซ้ำ

2.1 การเตรียมถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพที่ใช้ศึกษานี้คือ ถ่านแกลบ ซึ่งผลิตด้วยวิธีการเผาแบบดั้งเดิมโดยใช้ขี้เถ้าเป็นเตาเผา มีขั้นตอนดังนี้ ใช้ขี้เถ้าที่เปิดท้ายออกหนึ่งด้านและเจาะรูบริเวณด้านบนสำหรับติดตั้งท่อสังกะสีเพื่อระบายควัน พร้อมทั้งเจาะรูรอบผนังขี้เถ้าเพื่อให้อากาศไหลผ่าน ใส่ฟางข้าวลงในขี้เถ้าเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง จากนั้นจุดไฟและตั้งขี้เถ้าขึ้น นำแกลบเทรอบขี้เถ้า ความร้อนจากการเผาไหม้ฟางข้าวด้านในขี้เถ้าจะถ่ายเทออกทางรูที่เจาะไว้ ทำให้แกลบเกิดการคาร์บอนไนซ์ โดยมีการเผาสังเกตและเกลี่ยแกลบเป็นระยะเพื่อป้องกันการไหม้จนเป็นถ่าน เมื่อแกลบเปลี่ยนเป็นสีดำทั่วทั้งกองจึงยุติกระบวนการเผา โดยการนำขี้เถ้าออกและรดน้ำให้ชุ่มเพื่อหยุดการเผาไหม้ อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยวัดได้ระหว่างกระบวนการผลิตถ่านแกลบอยู่ที่ 280 องศาเซลเซียส ถ่านแกลบที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.47 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 0.63 ไมโครซีเมนส์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.94% และปริมาณอินทรีย์คาร์บอน 13.89%

2.2 การทำปุ๋ยหมัก

การทดลองดำเนินการโดยใช้กล่องพลาสติกขนาดกว้าง 38 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และสูง 33 เซนติเมตร โดยเจาะรูที่ฝาปิดด้านบนเพื่อติดตั้งท่อพีวีซี (PVC) ความยาว 100 เซนติเมตร โดยเสียบท่อให้ปลายด้านหนึ่งลงไปในฝาท่อประมาณ 2 เซนติเมตร จากนั้นอุดปิดรอยแตกและรูต่าง ๆ ด้วยกาวร้อนให้สนิท เพื่อลดการรั่วไหลของก๊าซและเพิ่ม



รูปที่ 1 การทำปุ๋ยหมักที่เติมถ่านแกลบในการศึกษา

ความแม่นยำในการตรวจวัด วัสดุหมักประกอบด้วยฟางข้าว มูลวัวแห้ง และถ่านแกลบ โดยกำหนดน้ำหนักฟางข้าว 1 กิโลกรัม และมูลวัวแห้ง 200 กรัม รวมเป็นน้ำหนักวัสดุอินทรีย์พื้นฐาน 1200 กรัมต่อกล่อง ทั้งนี้เติมถ่านแกลบในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบการไม่เติมถ่านแกลบ (0%) ดังนี้ อัตรา 20 40 และ 60% ของน้ำหนักรวมของวัสดุหมัก คิดเป็น 240 480 และ 720 กรัมต่อกล่อง ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของอัตราการใช้ถ่านแกลบต่อการดูดซับไนโตรเจนและการลดการสูญเสียในรูปก๊าซแอมโมเนียระหว่างการหมัก การจัดเรียงวัสดุหมักภายในกล่องทำเป็นชั้นจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ ฟางข้าว มูลวัวแห้ง และถ่านแกลบ ตามลำดับ โดยจัดเรียงในรูปแบบเดียวกันในทุกชุดการทดลอง เพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของสภาพการหมัก จากนั้นเตรียมสารเร่งจุลินทรีย์ พต.1 ของ [19] โดยละลายในอัตราส่วน 1 กรัมต่อน้ำ 1.5 ลิตร และรดลงบนกองปุ๋ยหมักให้ทั่วทุกชั้น เพื่อกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์และเร่งกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ หลังจากนั้นปิดฝากล่องพลาสติกให้แน่นระหว่างกระบวนการหมักทำการกลับกองปุ๋ยหมักทุก ๆ 7 วัน เพื่อให้ส่วนผสมและเติมน้ำปริมาณ 500 มิลลิลิตรต่อกล่อง เพื่อรักษาระดับความชื้นที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์และเอื้อต่อการตรึงและการเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนในกองปุ๋ยหมักตลอดระยะเวลาการทดลอง (รูปที่ 1)

2.3 การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 อุณหภูมิ และความชื้นของกองปุ๋ยหมัก ดำเนินการในวันที่ 1 4 16 32

และ 54 วันหลังการเริ่มกระบวนการหมัก โดยในแต่ละวันทำการวัดจำนวน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ เวลา 07:00 11:00 และ 17:00 นาฬิกา การวัดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ใช้เครื่องวัดแอมโมเนีย Smart Ammonia Gas AR8500 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์แบบ Electrochemical ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความไวและเสถียรเหมาะสำหรับการตรวจจับก๊าซ NH_3 ในช่วงความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง เครื่องมีช่วงความสามารถในการวัดตั้งแต่ 0–100 ppm และมีความละเอียดในการวัด 0.1 ppm ในการวัดก๊าซทำการวางเครื่องวัดลงบนปากท่อ PVC ที่ติดตั้งไว้กับกล่องหมัก โดยให้ตำแหน่งเซ็นเซอร์ของเครื่องอยู่ภายในท่อ จากนั้นทิ้งเครื่องวัดไว้เป็นระยะเวลา 2 นาที เพื่อให้ค่าการตรวจวัดมีความเสถียรก่อนอ่านค่าและบันทึก

การวัดความชื้นของกองปุ๋ยหมักดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดความชื้นแบบเปียก (Moisture Meter) ซึ่งเป็นการวัดความชื้นบนฐานเปียก (Wet Basis) โดยปักหัววัดลงในกองปุ๋ยหมักให้ปลายแท่งโลหะที่มีเซ็นเซอร์สัมผัสวัสดุหมักในระดับประมาณ 3/4 ของความยาวเซ็นเซอร์ ทำการวัดจำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งด้านซ้าย กลาง และขวาของกล่องปุ๋ยหมัก แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย เมื่อครบระยะเวลา 54 วันหลังการหมัก ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วปริมาณ 500 กรัมต่อกล่องหมักเพื่อทำไปวิเคราะห์ค่า pH ในอัตราส่วนปุ๋ยหมักต่อน้ำกลั่นคือ 1 : 10 และค่าการนำไฟฟ้า ในอัตราส่วน 1 : 20 จากนั้นนำสารละลายเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์ นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุโดยวิธีของ Walkley และ Black ตามวิธีของ [19] และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี Kjeldahl

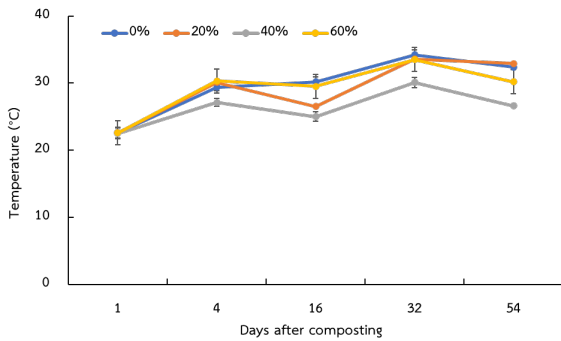
2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Statistix 10

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลของอัตราส่วนแกลบต่อการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ในกองปุ๋ยหมัก

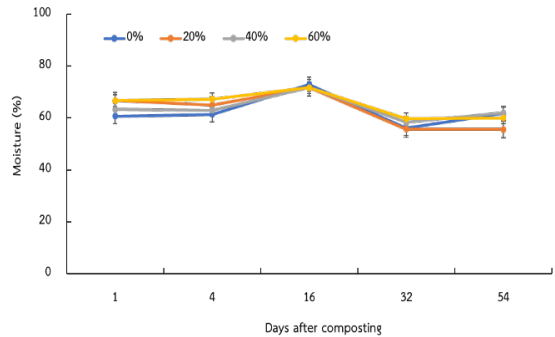
ตลอดระยะเวลาการหมัก 54 วัน พบว่าอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักในวันเริ่มต้นของการหมัก (วันที่ 1) ไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละกรรมวิธีโดยมีค่าเฉลี่ย 22 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกิจกรรมการย่อยของจุลินทรีย์ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดกระบวนการหมักของกรรมวิธีเติมถ่านแกลบ 40% (26.3 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่ากรรมวิธีเติมถ่านแกลบ 0 20 และ 60% (29.8 29.1 และ 29.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) อุณหภูมิสูงสุดของกองปุ๋ยหมักในทุกกรรมวิธีเกิดขึ้นในช่วงวันที่ 32 และเริ่มลดลงเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก โดยในวันที่ 54 กรรมวิธีเติมถ่านแกลบในอัตรา 40% มีอุณหภูมิกองปุ๋ยหมักต่ำที่สุด (26.6 องศาเซลเซียส) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value ≤ 0.01) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีเติมถ่านแกลบ 0 20 และ 60% (32.4 32.9 และ 30.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) (รูปที่ 2) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการเติมถ่านแกลบมีผลต่ออุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Response) โดยอัตรา 40% เป็นจุดเหมาะสมที่ช่วยลดอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักได้มากที่สุด ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการเติมถ่านแกลบเป็น 60% ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้จากคุณสมบัติของถ่านแกลบซึ่งมีคาร์บอนที่ทนต่อการย่อยสลาย (Recalcitrant Carbon) ทำให้การเจือจางของแหล่งคาร์บอนที่ย่อยสลายได้และลดการเกิดความร้อนจากการหายใจของจุลินทรีย์ในระดับหนึ่ง [20], [17] ขณะเดียวกันความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงของถ่านสามารถปรับปรุงการแลกเปลี่ยนอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ [21], [22] ดังนั้นจากผลการทดลองเมื่อเติมถ่านแกลบอัตราที่สูง (60%) อาจทำให้โครงสร้างของกองปุ๋ยหมักเปลี่ยนแปลงไปมากจนเกิดช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ (Macropores) ซึ่งส่งผลทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Microbial) บางชนิดเพิ่มขึ้น [22] เกิดความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักไม่ลดลง



รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยของกองปุ๋ยหมักระหว่างกระบวนการหมักเมื่อเติมถ่านแกลบในอัตรา 0 20 40 และ 60%

อย่างต่อเนื่องทำให้มีอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงกว่าการเติมถ่านแกลบ 40% ค่าความชื้นของกองปุ๋ยหมักในวันที่ 1-4 ของกระบวนการหมัก มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในกรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value ≤ 0.05) โดยปุ๋ยหมักที่เติมถ่านแกลบ 60% มีความชื้นสูงสุดในขณะที่ปุ๋ยหมักที่ไม่เติมถ่านแกลบมีความชื้นต่ำสุด ในขณะที่เมื่อ 54 วันหลังการหมัก ค่าความชื้นในกองปุ๋ยหมักในกรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบ 40% และ 60% สูงกว่ากรรมวิธีเติมถ่านแกลบ 20% (รูปที่ 3) ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงของกรรมวิธีที่ไม่เติมถ่านแกลบทำให้ความชื้นที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ยหมักลดลงระหว่าง 6-9% เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบ

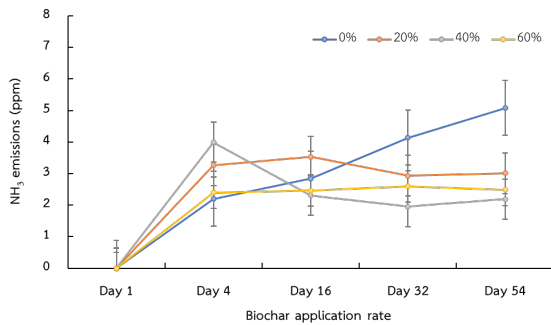
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปุ๋ยหมักที่ไม่เติมถ่านแกลบมีความชื้นในกองปุ๋ยหมักสูงกว่าในกรรมวิธีเติมถ่านแกลบ 60% อาจเนื่องจาก 1) กองปุ๋ยหมักที่ไม่เติมถ่านแกลบมีความหนาแน่น (Bulk Density) สูงกว่า ส่งผลทำให้การไหลเวียนของอากาศภายในกองจำกัด และการสูญเสียน้ำจากการระเหยเกิดขึ้นช้ากว่ากองที่เติมถ่านแกลบในอัตราสูง ซึ่งในขณะที่กองปุ๋ยหมักที่เติมถ่านแกลบอัตรา 60% ทำให้โครงสร้างกองมีความพรุนสูงและเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ซึ่งเอื้อต่อการแลกเปลี่ยนอากาศและเร่งการระเหยของน้ำทำให้ความชื้นในกองปุ๋ยลดลง สอดคล้องกับงานของ [23]-[25] ที่พบว่าการเติมถ่านชีวภาพในอัตราสูงช่วยเพิ่มการระบายอากาศ แต่ไม่ได้ทำให้ความชื้นรวมของกองปุ๋ยหมักสูงขึ้นเสมอไป 2) ถ่านแกลบอาจแสดงสมบัติ



รูปที่ 3 ความชื้นเฉลี่ยในกองปุ๋ยหมักระหว่างกระบวนการหมักเมื่อเติมถ่านแกลบในอัตรา 0 20 40 และ 60%

ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ซึ่งมีการสูญเสียหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนพื้นผิวทำให้น้ำไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างถ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงต้นของการใช้งานส่งผลให้การกักเก็บน้ำเชิงปริมาตรของกองลดลงแม้ถ่านจะมีความช่องว่างอากาศขนาดเล็ก (Micropores) สูง [26], [27] 3) วัตถุประสงค์อินทรีย์หลักที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมัก เช่น ฟางข้าวและปุ๋ยคอก มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นเส้นใยและสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันจำนวนมาก ทำให้กองปุ๋ยหมักที่ไม่เติมถ่านแกลบจึงสามารถรักษาน้ำไว้ในสารอินทรีย์ได้ดี ในขณะที่การเติมถ่านแกลบ 60% ทำให้สัดส่วนของวัสดุอินทรีย์ที่อุ้มน้ำได้ลดลง (Dilution Effect) ส่งผลทำให้ความชื้นของกองลดลง [28], [29] และ 4) กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในกรรมวิธีไม่เติมถ่านแกลบอาจก่อให้เกิดน้ำจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolic Water) เนื่องจากเป็นคาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายในปริมาณที่สูงกว่า การเติมถ่านแกลบในอัตราที่สูงจะเจือจางแหล่งคาร์บอนดังกล่าวส่งผลทำให้การเกิดน้ำจากเมแทบอลิซึมลดลง [30], [8]

ปริมาณการปลดปล่อย NH_3 ในกระบวนการหมักพบว่าในวันที่ 1 หลังการหมัก ไม่พบการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ในทุกกรรมวิธีการทดลอง อย่างไรก็ตามตั้งแต่วันที่ 4 จนถึงวันที่ 54 หลังการหมัก พบว่าทุกกรรมวิธีเริ่มมีการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 โดยในกรรมวิธีไม่เติมถ่านแกลบมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 สูงสุด โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 16-54 หลังการหมัก ซึ่งมีปริมาณก๊าซ NH_3 ในวันที่ 54 เท่ากับ 14.26 ppm



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซ NH_3 ที่ปลดปล่อยระหว่างกระบวนการหมักเมื่อเติมถ่านแกลบในอัตรา 0 20 40 และ 60%

(รูปที่ 4) โดยปริมาณการปลดปล่อยก๊าซสะสมทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมักพบว่ากรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบ 60% มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ต่ำสุด (9.95 ppm) ในขณะที่กรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบอัตรา 40% 20% และ 0% มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 สูงกว่า (10.44 12.74 และ 14.26 ppm ตามลำดับ)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าโครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับก๊าซ NH_3 ของถ่านชีวภาพทำให้สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ได้ถึง 10.65–30.22% เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติมถ่านแกลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติโครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และความสามารถในการดูดซับก๊าซและไอออนของถ่านชีวภาพ ส่งผลทำให้ก๊าซ NH_3 และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ถูกกักเก็บไว้ในระบบหมักมากขึ้น และลดการสูญเสียไนโตรเจนระหว่างกระบวนการหมัก [31]–[33] อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ โดยมีรายงานว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำ (300 องศาเซลเซียส) มีความสามารถในการลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ได้ดีกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตที่อุณหภูมิสูง (800 องศาเซลเซียส) เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันบนผิวและความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่า [34]

การเติมถ่านแกลบลงในปุ๋ยหมักไม่เพียงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ NH_3 เท่านั้น แต่ยังส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าการไม่เติมถ่านแกลบ ทั้งนี้เนื่องจากถ่าน

ชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับความชื้นและธาตุอาหารที่มีประจุบวก โดยเฉพาะ NH_4^+ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซและเพิ่มการคงอยู่ของไนโตรเจนในระบบหมัก [34] นอกจากนี้ งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าการเติมถ่านชีวภาพสามารถกระตุ้นกระบวนการ Nitrification [35] และสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่ม Nitrifying Bacteria จากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและการปรับสมดุลค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่เกินไปในช่วงที่มีการสลายโปรตีนและยูเรียอย่างรวดเร็วส่งผลให้ NH_4^+ ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรทไอออน (NO_3^-) มากขึ้น และลดการสะสมของ NH_4^+ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหลักของก๊าซ NH_3 [14], [36]–[38] สอดคล้องกับรายงานของ [39] ที่พบว่าถ่านชีวภาพในปุ๋ยคอกที่อัตรา 25% ช่วยลดการปลดปล่อย NH_3 ผ่านกระบวนการระเหยกลายเป็นไอ (Volatilization) อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ H^+ การดูดซับอนุภาคไนโตรเจน และการเพิ่มกระบวนการตรึง (Immobilization) ของไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยก่อนหน้าบางฉบับรายงานว่า การเติมถ่านชีวภาพอาจลดอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนสุทธิหรือทำให้ปริมาณ $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ในช่วงการหมักลดลง ซึ่งอาจสะท้อนถึงการตรึงไนโตรเจนระยะสั้นหรือการเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนภายในระบบ [40], [41] ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่พบว่าถ่านชีวภาพที่เติมถ่านแกลบช่วยลดการปลดปล่อย NH_3 และเพิ่มปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยหมัก อาจเนื่องมาจากบทบาทของถ่านชีวภาพในการเร่งกระบวนการเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุของวัสดุอินทรีย์ร่วมกับการเพิ่มการตรึงของไนโตรเจนภายในระบบการหมัก

3.2 ผลของอัตราถ่านแกลบต่อคุณภาพของปุ๋ยหมัก

คุณภาพของปุ๋ยหมักเมื่อ 54 วันหลังการหมัก (สิ้นสุดการหมัก) พบว่าปริมาณไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก 54 วันหลังการหมัก พบว่ากรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบมีปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่เติมถ่านแกลบ โดยถ่านแกลบอัตรา 40% และ 60% มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญเชิงทางสถิติ ($p\text{-value} \leq 0.01$) การเติมถ่านแกลบ

ในกองปุ๋ยหมักทำให้มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าการไม่เติมถ่านแกลบคิดเป็น 44.95–49.15% เช่นเดียวกันกับปริมาณอินทรีย์วัตถุพบว่ามีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p -value ≤ 0.01) ระหว่างกรรมวิธีโดยปุ๋ยหมักที่เติมถ่านแกลบมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงถึง 6.14–6.15% สูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่เติมถ่าน (6.06%) ดังนั้นส่งผลให้ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักในกรรมวิธีที่ไม่เติมถ่านแกลบสูงกว่ากรรมวิธีที่เติมถ่านแกลบเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์วัตถุ และค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักที่ 54 วันหลังกระบวนการหมัก

อัตราของถ่านแกลบ	ปริมาณ N ทั้งหมด (%)	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	คาร์บอนต่อไนโตรเจน
0 %	0.60 ^c	6.06 ^b	5.92 ^a
20 %	1.09 ^b	6.15 ^a	3.30 ^b
40 %	1.14 ^{ab}	6.15 ^a	3.13 ^b
60 %	1.18 ^a	6.16 ^a	3.03 ^b
LSD.05	0.09 ^{**}	0.03 ^{**}	0.55 ^{**}
C.V. (%)	4.59	0.25	7.66

หมายเหตุ: ^{a,b,c} คือ ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันในคอลัมน์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น p -value ≤ 0.05

^{**} คือ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น p -value ≤ 0.01

จากตารางที่ 1 แม้ว่าการเติมถ่านแกลบในอัตรา 60% จะให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุด (1.18%) อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยดังกล่าวไม่แตกต่างทางสถิติจากร้อยละ 40% (1.14%) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณถ่านแกลบจาก 40% เป็น 60% ไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญในด้านการสะสมไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการตอบสนองแบบลดลง (Diminishing Return) เมื่อระบบได้รับวัสดุปรับปรุงในปริมาณที่เพียงพอแล้ว [8] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพร้อมกับต้นทุนการใช้วัสดุและความเหมาะสมในเชิงปฏิบัติ อัตราการเติมถ่านแกลบที่ 40%

จึงสามารถพิจารณาเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตปุ๋ยหมักภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมัก เมื่อ 54 วันหลังการหมัก พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ p -value ≥ 0.05 โดยค่า pH ของกองปุ๋ยหมัก อยู่ระหว่าง 7.60–7.75 (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตามการเติมถ่านชีวภาพมีแนวโน้มทำให้ค่า pH ของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากถ่านแกลบที่ใช้ในการศึกษามีค่า pH เป็นค่าเล็กน้อย (7.47) ซึ่งมาจากการมีส่วนของซี้ไธลัมสมอยู่ด้วย ในขณะที่ค่าความนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอยู่ระหว่าง 2.13–2.38 ไมโครซีเมนส์ ซีให้เห็นว่าเมื่อเติมถ่านแกลบในปุ๋ยหมักส่งผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงตามปริมาณการเติมถ่านแกลบซึ่งเกิดจากถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหาร โดยเฉพาะธาตุอาหารที่เป็นประจุบวก (Cation) ดังนั้นจึงมีการนำคุณสมบัติของถ่านชีวภาพไปใช้ในการปรับปรุงดินเค็มเพื่อช่วยในการดูดซับธาตุอาหารที่เป็นแหล่งกำเนิดดินเค็มที่ปริมาณสูงเกินไป ได้แก่ Ca^{2+} Na^+ K^+ และ Mg^{2+} เป็นต้น [42]

ตารางที่ 2 ค่า pH และค่าความนำไฟฟ้าของปุ๋ยหมักที่ 54 วันหลังกระบวนการหมัก

อัตราของถ่านแกลบ	pH	คาร์บอนต่อไนโตรเจน (μ S)
0 %	7.60	2.38
20 %	7.70	2.35
40 %	7.70	2.34
60 %	7.75	2.13
LSD.05	0.14 ^{ns}	0.25 ^{ns}
C.V. (%)	2.29	13.5

หมายเหตุ: ^{ns} คือ ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ p -value > 0.05

4. สรุปผลการทดลอง

การเติมถ่านแกลบในกองปุ๋ยหมักช่วยลดปริมาณการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซแอมโมเนีย และเพิ่มคุณภาพของปุ๋ยหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัตราการเติม

ถ่านแกลบ 60% ให้การปลดปล่อยก๊าซ NH_3 ต่ำที่สุดในภาพรวม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพร้อมกับคุณภาพของปุ๋ยหมัก ต้นทุนการใช้วัสดุ และความเหมาะสมในเชิงปฏิบัติ อัตราการเติมถ่านแกลบที่ 40% จึงเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตปุ๋ยหมักภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ทั้งนี้ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตปุ๋ยหมักทั้งในระดับอุตสาหกรรมและระดับเกษตรกร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ธาตุอาหารของพืช ลดการสูญเสียไนโตรเจน และสนับสนุนการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างยั่งยืน รวมถึงการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Cao, H. L. Qu, R. R. Li, P. J. Wang, J. J. Fu, and M. J. Chen, "Effects of membrane-covered and biochar on compost quality and greenhouse gas reduction in aerobic composting," *BioResources*, vol.19, no. 2, pp. 3475–3488, 2024, doi: 10.15376/biores.19.2.3475-3488.
- [2] S. M. Tiquia, N. F. Y. Tam, and I. J. Hodgkiss, "Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter," *Bioresource Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 7–14, 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(97)00080-1.
- [3] E. Agyarko-Mintah, A. Cowie, L. V. Zwieter, B. P. Singh, R. Smillie, and S. Harden, "Biochar lower ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting," *Waste Management*, vol. 61, pp. 129–137, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.11.027.
- [4] C. Steiner, K. Das, N. Melear, and D. Lakly, "Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar," *Journal of Environment Quality*, vol. 39, no. 4, pp. 1236–1242, 2010, doi: 10.2134/jeq2009.0337.
- [5] M. K. Awasthi, Q. Wang, H. Huang, R. Li, F. Shen, A. H. Lahori, P. Wang, D. Guo, and Z. Zhang, "Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting," *Bioresource Technology*, vol. 219, pp.270–280, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.08.047.
- [6] C. Kammann, J. Ippolito, N. Hagemann, N. Borchard, M. L. Cayuela, J. M. Estavillo, T. Fuertes-Mendizabal, S. Jeffery, J. Kern, J. Novak, D. Rasse, S. Saarnio, H.-P. Schmidt, K. Spokas, and N. Wrage-Mönnig, "Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden: Knowns, unknowns and future research needs," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 25, no. 2, pp. 114–139, 2017, doi: 10.3846/16486897.2017.1319375.
- [7] G. Agegnehu, A. M. Bass, P. N. Nelson, and M. I. Bird, "Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions," *Soil Research*, vol. 55, no. 2, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1071/SR16242.
- [8] J. Lehmann and S. Joseph, "Biochar for environmental management: Science, technology and implementation," *Routledge*, 2015, doi 10.4324/978020376226
- [9] M. K. Awasthi, M. Wang, H. Chen, Q. Wang, J. Zhao, X. Ren, D. S. Li, S. K. Awasthi, F. Shen, R. Li, and Z. Zhang, "RETRACTED: Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting," *Bioresource Technology*, vol. 224, pp. 428-438, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.014.



- [10] R. Xiao, M. K. Awasthi, R. Li, J. Park, S. M. Pensky, Q. Wang, J. J. Wang, and Z. Zhang, "Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review," *Bioresource Technology*, vol. 246, pp. 203–213, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.097.
- [11] Z. Sha, Q. Li, T. Lv, T. Misselbrook, and X. Liu, "Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis," *Science of Total Environment*, vol. 655, pp. 1387–1396, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.173.
- [12] B. Fungo, Z. Chen, K. Butterbach-Bahl, J. Lehmann, G. Saiz, V. Braojos, A. Kolar, T. F. Rittl, M. Tenywa, K. Kalbitz, H. Neufeldt, and M. Dannenmann, "Nitrogen turnover and N_2O/N_2 ratio of three contrasting tropical soils amended with biochar," *Geoderma*, vol. 348, pp. 12–20, 2019, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.03.048.
- [13] S. P. Wang, L. Wang, Z. Y. Sun, S. T. Wang, C. H. Shen, Y. Q. Tang, and K. Kida, "Biochar addition reduces nitrogen loss and accelerates composting process by affecting the core microbial community during distilled grain waste composting," *Bioresource Technology*, vol. 337, 2021, Art. no. 1235492, doi: 10.1016/j.biortech.2021.123549.
- [14] M. P. Bernal, J. A. Alburquerque, and R. Moral, "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 5444–5453, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.04.028.
- [15] M. K. Awasthi, S. K. Sarsaiya, A. H. Lahori, Q. Wang, P. Wang, R. Li, Z. Zhang, and S. K. S. R. Bux, "Biochar amendment for mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emissions during organic waste composting: A review," *Bioresource Technology*, vol. 268, pp. 596–610, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.006.
- [16] K. Malińska, J. Zabochnicka-Swiątek, and M. Dach, "Biochar amendment for reducing gaseous emissions during composting," *Waste Management*, vol. 58, pp. 156–164, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.10.034.
- [17] C. Steiner, K. C. Das, N. Melear, and D. Lakly, "Nitrogen retention in compost amended with biochar," *Biology and Fertility of Soils*, vol. 46, pp. 485–493, 2010.
- [18] C. C. Tsai and Y. F. Chang, "Nitrogen availability in biochar-amended soils with excessive compost application," *Agronomy*, vol. 10, no. 3, pp. 444, 2020, doi: 10.3390/agronomy10030444.
- [19] Land Development Department. (2010, Mar.). Quality compost production. [Online]. Available: http://osd101.ldd.go.th/Q/manual/compost_guide.pdf (in Thai).
- [20] X. Jiang, M. L. Haddix, and M. F. Cotrufo, "Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition: Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 100, pp. 92–101, 2016, doi: 10.1016/j.soilbio.2016.05.020.
- [21] S. Hemwong, C. Sangrit, P. Phunthupan, S. Butnan, and P. Vityakon, "Rice-derived biochars enhance the yield of spring onion (*Allium cepa* L. var. *Aggregatum*), while reducing pesticide contamination in soil plant," *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 19, no. 1,

- pp. 349–358, 2021, doi: 10.15666/aeer/1901_349358.
- [22] K. Zhang, L. Chen, Y. Li, P. C. Brookes, J. Xu, and Y. Luo, “The effects of combinations of biochar, lime, and organic fertilizer on nitrification and nitrifiers,” *Biology and Fertility Soils*, vol. 53, pp. 77–87, 2017, doi: 10.1007/s00374-016-1154-0.
- [23] R. Li, Q. Wang, Z. Zhang, G. Zhang, Z. Li, L. Wang, and J. Zheng, “Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures,” *Environmental Technology*, vol. 36, no. 5–8, pp. 815–826, 2014, doi: 10.1080/09593330.2014.951400.
- [24] E. Agyarko-Mintah, M. K. Awasthi, L. S. Liu, J. Li, R. Zhang, Q. Wang, Z. Zhang, and X. Zhang, “Biochar increases oxygen uptake and reduces nitrogen loss during composting,” *Bioresource Technology*, vol. 246, pp. 102–110, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.131.
- [25] D. Sun, Y. Meng, Q. Liang, X. Jiang, Y. Zhang, Y. Yang, and X. Zhang, “Effects of biochar on composting dynamics and oxygen availability,” *Waste Management*, vol. 61, pp. 229–236, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.12.026.
- [26] T. J. Kinney, C. A. Masiello, B. Dugan, W. C. Hockaday, M. R. Dean, M. D. Zygourakis, and R. Barnes, “Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures,” *Environmental Science & Technology*, vol. 46, pp. 11855–11863, 2012, doi: 10.1021/es302422k.
- [27] M. Gray, M. G. Johnson, M. I. Dragila, and M. Kleber, “Water uptake in biochars: The role of porosity and hydrophobicity,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 196–205, 2014, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.12.010.
- [28] M. P. Bernal, J. A. Alburquerque, and R. Moral, “Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment,” *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 5444–5453, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.04.028.
- [29] R. T. Haug, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1993.
- [30] M. de Bertoldi, G. Vallini, and A. Pera, “The biology of composting: A review,” *Waste Management & Research*, vol. 1, pp. 157–176, 1983.
- [31] G. Shan, W. Li, Y. Gao, W. Tan, and B. Xi, “Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 307, 2021, Art. no. 127308, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127308.
- [32] S. Qian, X. Zhou, Y. Fu, B. Song, H. Yan, Z. Chen, Q. Sun, H. Ye, and L. Qin, “Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils,” *Science of The Total Environment*, vol. 870, 2023, Art. no. 162024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162024.
- [33] B. Ravindran, N. Karmegam, M. K. Awasthi, S. W. Chang, P. K. Selvi, R. Balachandar, S. Chinnappan, N. I. W. Azelee, and G. Munuswamy-Ramanujam, “Valorization of food waste and poultry manure through co-composting amending saw dust, biochar and mineral salts for value-added compost production,” *Bioresource Technology*, vol. 346, 2022, Art. no. 26442, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126442.
- [34] Y. Shin, K. Iwabuchi, and T. Itoh, “Low-temperature biochars are more effective in reducing



- ammonia emissions through various mechanisms during manure composting,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 26, pp. 138–148, 2024, doi: 10.1007/s10163-023-01672-1.
- [35] J. Zhang, F. Lü, L. Shao, and P. He, “The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge,” *Bioresource Technology*, vol. 168, pp. 252–258, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2014.02.036.
- [36] L. Zhang and X. Sun, “Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar,” *Bioresource Technology*, vol. 171, pp. 274–284, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.079.
- [37] I. López-Cano, A. Roig, M. L. Cayuela, J. A. Albuquerque, and M. A. Sánchez-Monedero, “Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure,” *Waste Management*, vol. 49, pp. 553–559, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.01.031.
- [38] N. Hagemann, J. Kammann, H.-P. Schmidt, T. Kappler, and S. Behrens, “Biochar effects on nitrogen cycling in soils and compost,” *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 115, pp. 232–243, 2017, doi: 10.1016/j.soilbio.2017.08.003.
- [39] C. M. Hung, C. P. Huang, J. W. Cheng, C. W. Chen, and C. D. Dong, “Production and characterization of a high value-added seaweed-derived biochar: Optimization of pyrolysis conditions and evaluation for sediment treatment,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 155, 2021, Art. no. 105071, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105071.
- [40] J. J. Pulliam, A. Smith, B. Lee, and C. Zhao, “Effect of biochar on nitrogen mineralization during composting,” *Journal of Environmental Quality*, vol. 54, pp. 125–136, 2025, doi: 10.1002/jeq2.20617.
- [41] E. Abban-Baidoo, M. K. Awasthi, J. Li, Q. Wang, Z. Zhang, and X. Liu, “Biochar addition influences carbon and nitrogen dynamics during composting,” *Compost Science & Utilization*, vol. 32, pp. 45–58, 2024, doi: 10.1080/1065657X.2023.2294285.
- [42] S. Hemwong, “Effects of rice husk charcoal on growth and yield potential of two rice varieties under saline soil condition,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 457–467, 2021 (in Thai), doi: 10.14456/kmuttrd.2021.7.