



ประสิทธิภาพการจัดการและบำบัดขยะเศษอาหารด้วยระบบหมักแบบการเติมอากาศและควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

Efficiency of food waste management and treatment using an aerated and temperature-controlled in-vessel bioreactor composting system

กฤษฎางค์ เสนาวงษ์¹, สมพร เกษแก้ว², ชัยยันต์ จันทร์ศิริ³, กิตติพงษ์ ลาลูน³ และ สุชาติ จันทะทุม^{4*}

Kritsadang Senawong¹, Somporn Katekaew², Chaian Junsiri³, Kittipong Laloon³ and Suchat Juntahum⁴

¹สถาบันการสอนวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

¹General Education Teaching Institute, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

²สาขาวิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

²Department of Biochemistry, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

³สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

⁴สถาบันวิจัยความมั่นคงด้านอาหาร พลังงาน และน้ำอนุมิภาคลุ่มน้ำโขง มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

⁴GMS Food, Energy, Water Security Research Institute, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

* Corresponding author: jsuchat@kkumail.com

Received: date; December 2025 Accepted: date; December 2025 Published: date; December 2025

บทคัดย่อ

จากปัญหาปริมาณขยะเศษอาหารที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและการจัดการที่ยังไม่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ เครื่องหมักเศษอาหารระบบปิดแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ การเติมอากาศ และการพลิกกลับกอง โดยเปรียบเทียบกับ การหมักแบบกองปกติ ภายในระยะเวลา 7 วัน ผลการทดลองพบว่าเครื่องหมักสามารถรักษาอุณหภูมิในถังหมักให้อยู่ในช่วง thermophilic ลดความชื้นของวัสดุหมักเหลือร้อยละ 23.5 เพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดเป็นร้อยละ 46.8 และสามารถผลิตวัสดุอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่า 6 มม. ได้ตั้งแต่วันแรกของการหมัก ขณะที่การหมักแบบกองปกติยังคงมีความชื้นสูง (ร้อยละ 50.54) มีอัตราการงอกต่ำ (ร้อยละ 8.16) และพบวัสดุหมักที่ย่อยสลายไม่สมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปุ๋ยพบว่าปุ๋ยจากเครื่องหมักมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวม (NPK) ร้อยละ 3.97 อินทรีย์วัตถุร้อยละ 34.63 และค่า C/N ratio เท่ากับ 13 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์และสูงกว่าการหมักแบบกองปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเครื่องหมักเศษอาหารระบบปิดแบบกึ่งอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการเร่งการย่อยสลาย ลดความชื้น และผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพ จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้จัดการขยะเศษอาหารที่ต้นทางเพื่อส่งเสริมการหมุนเวียนทรัพยากรและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ขยะเศษอาหาร, เครื่องหมักระบบปิด, การควบคุมสภาวะ, การเติมอากาศ, กำจัดขยะให้เป็นศูนย์



Abstract

Given the continuously increasing amount of food waste and inefficient management practices, this study aimed to evaluate the performance of a prototype semi-automated in-vessel bioreactor composting machine capable of controlling temperature, aeration, and pile turning, in comparison with conventional pile composting over a 7-day period. The results showed that the composting machine effectively maintained thermophilic conditions, reduced the moisture content of the composting material to 23.5%, increased seed germination to 46.8%, and produced organic material with particle sizes smaller than 6 mm from the first day of composting. In contrast, conventional pile composting exhibited a higher moisture content (50.54%), a lower germination rate (8.16%), and incomplete organic matter degradation. Chemical and physical analyses revealed that compost produced by the semi-automated system contained higher total macronutrient content (NPK, 3.97%), organic matter (34.63%), and a favorable C/N ratio of 13, meeting organic fertilizer standards and significantly outperforming conventional composting. These findings demonstrate that a prototype semi-automated in-vessel bioreactor composting system is effective in accelerating food waste decomposition, reducing moisture content, and producing high-quality organic amendment. Therefore, this prototype technology shows strong potential for on-site food waste management, supporting resource recycling and reducing environmental impacts.

Keyword: Food Waste, In-Vessel Composting, Controlled Conditions, Aeration, Zero Waste

บทนำ

การเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะอินทรีย์จากแหล่งกำเนิดในครัวเรือน ชุมชน และสถานศึกษา เป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมสำคัญของหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งมีปริมาณขยะอินทรีย์สูงกว่าร้อยละ 38 ของขยะชุมชนทั้งหมด ตามรายงานของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (เบญจมาศ โชติทอง, 2565) สัดส่วนขยะอินทรีย์ที่สูงนี้นำไปสู่ปัญหากลิ่น การสะสมของแมลง และการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เช่น มีเทน (CH_4) หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม (Dharnaik and Pol, 2024) อย่างไรก็ตาม ขยะอินทรีย์โดยเฉพาะเศษอาหารยังเป็นทรัพยากรสำคัญที่สามารถนำกลับมาใช้ผลิตปุ๋ยอินทรีย์และปรับปรุงดินได้หากมีเทคโนโลยีจัดการที่เหมาะสม ส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน (Bernal et al., 2009)

การหมักปุ๋ยแบบใช้อากาศ (aerobic composting) เป็นวิธีจัดการขยะอินทรีย์ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถลดปริมาณของเสียและย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งผลิตปุ๋ยที่อุดมด้วยธาตุอาหารพืช โดยทั่วไปกระบวนการหมักจะแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะเริ่มต้น (mesophilic phase), ระยะอุณหภูมิสูง (thermophilic phase) ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงถึง 50–70 °C ช่วยฆ่าเชื้อโรคและเมล็ดวัชพืช ซึ่งเป็นระยะที่มีการย่อยสลายรวดเร็วและสูงที่สุด และระยะสุก (maturation phase) ที่เกิดการสร้างอิวมัส กระบวนการหมักต้องอาศัยการควบคุมปัจจัยสำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน



(C/N ratio) เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างเหมาะสม (Haug, 2018) อย่างไรก็ตาม การหมักแบบเปิดทั่วไปมักใช้เวลานาน (30–90 วัน) และไม่มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและอากาศ ทำให้เกิดกลิ่นและภาวะไม่ใช้ออกซิเจนได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการใช้ในระดับครัวเรือนและชุมชน

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการหมักแบบระบบปิด (in-vessel composting) ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถควบคุมสภาวะการหมักได้อย่างแม่นยำ ลดกลิ่น ลดพื้นที่ใช้สอย และผลิตปุ๋ยได้ในระยะเวลาสั้นกว่าเมื่อเทียบกับการหมักแบบดั้งเดิมที่อาศัยการตั้งกองหมักในพื้นที่กว้าง (Manyapu et al., 2017; Dharmak and Pol, 2024; Wang et al., 2024) ระบบดังกล่าวมักติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ระบบเติมอากาศ และระบบกวนผสมวัสดุหมัก ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศ กระจายความร้อน และลดความชื้นส่วนเกิน ส่งผลให้กระบวนการหมักสามารถเข้าสู่ระยะ thermophilic อย่างรวดเร็ว ช่วยกำจัดเชื้อโรคและเร่งการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Lu et al., 2001)

การพัฒนาเครื่องหมักปุ๋ยกึ่งอัตโนมัติ (semi-automatic in-vessel composter) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการจัดการขยะอินทรีย์ที่ต้นทาง โดยเฉพาะครัวเรือน ร้านอาหาร และชุมชนขนาดเล็ก ซึ่งมีปริมาณเศษอาหารสูง แต่ขาดเครื่องมือที่ถูกออกแบบให้ใช้งานได้สะดวกและควบคุมได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงที่มีปริมาณสารพิษจากการหมักต่ำ เช่น กรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอมโมเนีย ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักผ่านค่าการออกของเมล็ด (Zucconi et al., 1981) ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องหมักปุ๋ยต้นแบบ ระบบกึ่งอัตโนมัติที่มีระบบการพลิกกองและการให้ความร้อนและการเติมอากาศภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องที่พัฒนาขึ้นในการหมักขยะเศษอาหาร โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการหมักแบบกองปกติ การศึกษานี้ไม่เพียงตอบโจทย์การจัดการขยะอินทรีย์ในระดับครัวเรือน แต่ยังเป็นแนวทางสู่ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนด้านอาหารที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระดับชุมชนต่อไป

วิธีการดำเนินการ

พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่างเศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้ในการทดลองเก็บจาก ร้านอาหารยูเซ็นเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยทำการเก็บตัวอย่างรวมโดยแม่บ้านจากจุดทิ้งเศษอาหาร ภายในร้านอาหารในช่วงเวลาอาหารกลางวัน (12.00 น. ถึง 17.00 น.) ในช่วงเดือนกันยายน 2568 เพื่อให้ได้เศษอาหารตัวแทนที่สะท้อนลักษณะของเสียโดยรวมจากการบริโภคจริงของผู้ใช้บริการ ทั้งนักศึกษา บุคลากรภายในมหาวิทยาลัย และบุคลากรภายนอก ตัวอย่างเศษอาหารถูกนำมาชั่งน้ำหนักหกรวม จากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างซ้ำ (sub-sample) จำนวน 3 ซ้ำ ของแต่ละครั้งที่เก็บรวบรวมตัวอย่าง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ความชื้น ปริมาณสิ่งปนเปื้อน และความหนาแน่นรวมของเศษอาหาร

การวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของเศษอาหาร

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างเศษอาหารประมาณ 100 กรัม เพื่อวิเคราะห์ความชื้นในเศษอาหารที่รวบรวมไว้ แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ การทดสอบทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ (ตามวันที่เก็บอาหาร) หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ และหลังอบ เพื่อคำนวณค่าความชื้นตามสมการที่ 1



$$\text{Moisture content (\%)} = \frac{WW - DW}{WW} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ wet weight: WW คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ และ dry weight: DW คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

การวิเคราะห์ปริมาณสิ่งปนเปื้อน (contaminants) ดำเนินการโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างเศษอาหารสดทั้งหมดที่เก็บรวบรวมได้ จากนั้นทำการคัดแยกสิ่งปนเปื้อน โดยจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) น้ำและของเหลวที่แยกได้จากการกรองเศษอาหาร โดยตั้งเศษอาหารบนตะแกรงขนาด 2 มม.ทิ้งไว้ก่อนคัดแยกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2) ส่วนที่ย่อยสลายยาก เช่น เศษกระดูกหมูและกระดูกไก่ 3) ส่วนที่ย่อยสลาย เช่น เศษพลาสติก ถุงพลาสติก ถ้วยน้ำจิ้ม ซ้อนส้อมพลาสติก ฝาปิดขวดน้ำ ขวดตะเกียบ หรือกล่องโฟม สิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ เช่น ซ้อนส้อม (ถ้ามี) สิ่งปนเปื้อนแต่ละประเภทถูกชั่งน้ำหนักแยก แล้วนำไปคำนวณเป็นสัดส่วนร้อยละของมวลรวม

ตัวอย่างเศษอาหารสดที่ผ่านการคัดแยกแล้ว ถูกบรรจุลงในภาชนะทรงกระบอกปริมาตร 1000 ซม.³ โดยปล่อยให้ตกลงตามแรงโน้มถ่วงโดยไม่กดอัด จากนั้นชั่งน้ำหนักและคำนวณความหนาแน่นรวม ตามสมการที่ 2

$$\rho_b = \frac{W_s}{V} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นรวม (kg m⁻³), W_s คือ น้ำหนักของตัวอย่างเศษอาหาร (kg), และ V คือ ปริมาตรของภาชนะ (m³)

การออกแบบและส่วนประกอบหลักของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพระบบปิด

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (bioreactor) สำหรับบำบัดขยะเศษอาหารในงานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นบนแนวคิดของ ระบบหมักแบบควบคุมสภาวะในถังปิด (controlled in-vessel composting system) ดังแสดงใน Figure 1 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ควบคุมสภาวะแวดล้อมของกระบวนการหมัก และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก โครงสร้างหลักของระบบเป็น ถังทรงกระบอกแนวนอน ผลิตจากสแตนเลสสตีลเกรด SUS304 ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน ความชื้น และสารอินทรีย์ที่เกิดจากการหมัก รองรับความจุวัสดุอินทรีย์เริ่มต้นประมาณ 20 กิโลกรัม ตัวถังออกแบบให้เป็นระบบปิดเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและควบคุมสภาวะภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบผ่านช่องป้อนวัสดุ (feeding hopper) ซึ่งติดตั้งตะแกรงระบายของเหลว เพื่อแยกน้ำส่วนเกินออกก่อนเข้าสู่ถังหมัก ช่วยลดความชื้นเริ่มต้นและป้องกันการเกิดสภาวะกึ่งไม่ใช้ออกซิเจนภายในระบบ ระบบกลไกการกวนหรือ agitation system เป็นองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมกระบวนการหมัก โดยใช้ electric motor แบบเกียร์ทดกำลังขับเคลื่อนใบกวนสแตนเลสภายในถังหมัก (bioreactor tank) ด้วยความเร็วรอบต่ำประมาณ 18 รอบต่อนาที การกวนอย่างสม่ำเสมอช่วยพลิกกลับวัสดุหมัก ลดการจับตัวเป็นก้อน ลดขนาดอนุภาค และป้องกันการเกิดจุดอับอากาศ ส่งผลให้การถ่ายเทมวลและความร้อนภายในกองหมักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ และเอื้อต่อการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ถัดมาเป็น ระบบควบคุมอุณหภูมิและการเติมอากาศ ซึ่งใช้โบลเวอร์ที่ให้ความร้อนได้ (hot air blower) สำหรับจ่ายอากาศร้อนเข้าสู่ถังหมักในอัตราการไหลที่ควบคุมได้ระหว่าง 20 – 60 ลิตรต่อนาที โดยมี Proportional-Integral-Derivative: PID Control คอนโทรลเลอร์ และ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทำหน้าที่ควบคุมและ

รักษาอุณหภูมิภายในถังให้อยู่ใน ช่วงระยะ thermophilic range (45 – 65 °C) บริเวณทางออกด้านล่างของถังหมัก ติดตั้ง ตะแกรงคัดแยกขนาด 6 มม. เพื่อแยกวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายออกจากวัสดุอินทรีย์ที่ยังไม่สลายตัว โดยวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านตะแกรงจะถูกรวบรวมในถังเก็บด้านล่าง ในขณะที่วัสดุอินทรีย์ที่ยาบจะสามารถกลับเข้าสู่ถังหมัก โดยใบกวนที่สลับทิศทางได้ การออกแบบดังกล่าวควบคุมสภาวะที่ใช้ในการหมักได้ ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และลดระยะเวลาการบำบัดโดยรวมของระบบ



Figure 1 In-vessel bioreactor composting machine and its major components: (1) feeding hopper, (2) control panel, (3) electric motor, (4) hot air blower, (5) bioreactor tank, and (6) compost collection chamber.



การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องหมักปุ๋ย

ออกแบบการทดลองโดยเปรียบเทียบการหมักขยะเศษอาหาร โดยใช้เครื่องหมักเศษอาหารที่พัฒนาขึ้น เป็นฐานการทดลองเพื่อลดอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมในการหมัก โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดทดลอง (treatment) ได้แก่ 1) ชุดทดลอง คือ การหมักขยะเศษอาหารในเครื่องหมักภายใต้การเปิดใช้งานระบบควบคุมเติมอากาศและให้ความร้อน ระบบพลิกกองวัสดุ และ 2) ชุดควบคุม คือ การหมักขยะเศษอาหารในเครื่องเดียวกัน แต่ไม่เปิดใช้งานระบบควบคุมดังกล่าว โดยปล่อยให้กระบวนการหมักดำเนินไปภายใต้สภาวะธรรมชาติภายในถังหมัก

ชุดทดลองประสิทธิภาพเครื่องหมักเศษอาหาร นำเศษอาหารที่แยกสิ่งแปลกปลอมออก ให้ได้วัสดุอินทรีย์ที่พร้อมสำหรับการหมัก จากนั้นทำการหมักปุ๋ยโดยใช้ส่วนผสมดังนี้ 1) นำวัสดุอินทรีย์ที่คัดแยกได้ 2) วัสดุเริ่มต้น (starter compost) ที่เป็นวัสดุหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการหมักปุ๋ยจากเศษอาหาร เช่น *Bacillus* sp., *Aeribacillus* sp. และอื่นๆ (López et al., 2021) และ 3) ถ่านชีวภาพเพื่อดูดซับความชื้น ในอัตราส่วน 2:2:1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (Figure 2a) นำวัสดุอินทรีย์ที่เตรียมไว้ผสมรวมกัน และบรรจุลงในเครื่องหมักในปริมาณ 10 กิโลกรัม ในวันเริ่มต้นการทดลอง จากนั้นทำการเติมเศษอาหารเพิ่มเติมในทุกวัน วันละประมาณ 2 กิโลกรัม จนครบ 7 วัน เปิดระบบการทำงานของเครื่อง โดยตั้งการพลิกกองวันละ 4 ครั้ง ครั้งละ 10 วินาที (สามารถพลิกกองได้ครบ 3 รอบ) ห่างกันครั้งละ 6 ชั่วโมง เพื่อกวนผสมวัสดุหมักที่ใช้ในการหมักให้เข้ากัน เพิ่มการระบายอากาศ และลดความชื้นสะสม ในขณะเดียวกันระบบให้ความร้อนจะทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 45 °C เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องให้อยู่ในระดับเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ระหว่างการหมักจะทำการติดตามและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิภายในกองหมักด้วยเทอร์โมมิเตอร์ และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมัก เช่น สี กลิ่น และโครงสร้างของเนื้อปุ๋ย และนำเศษวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านตะแกรงมาตรวจวัด น้ำหนัก ความชื้น (สมการที่ 1) และอัตราการงอกของเมล็ด (Zucconi et al., 1981) เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องในการย่อยสลาย

ชุดควบคุม ทำการทดสอบการหมักเศษอาหารเช่นเดียวกับชุดทดสอบในเครื่องหมักเศษอาหาร โดยไม่เปิดระบบการทำงานของเครื่อง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องในการย่อยสลายและปรับปรุงคุณภาพของเศษอาหารให้กลายเป็นปุ๋ยหมักหรือสารปรับปรุงดิน

เมื่อครบระยะเวลา 7 วัน วัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมักจะถูกเก็บรวบรวม โดยการหมักแบบใช้เครื่องจะเก็บรวบรวมจากถาดเก็บวัสดุตลอดเวลา 7 วัน รวมกัน และการหมักแบบกองปกติจะทำการเก็บรวบรวมโดยเปิดฝาทิ้งหมัก และนำวัสดุอินทรีย์ภายในถังหมักออกมารวมกัน จากนั้นส่งวิเคราะห์การตรวจสอบเคมีกายภาพของวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมักทั้ง 2 แบบ ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ณ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) พารามิเตอร์ต่างๆที่ตรวจสอบในระหว่างการหมักปุ๋ยทั้งชุดทดลองและชุดควบคุม เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของปุ๋ยหมักเมื่ออายุครบ 7 วัน ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics V.28 โดยใช้ Independent Samples t-test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างการหมักทั้ง 2 วิธี (ชุดทดลอง และชุดควบคุม) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณลักษณะเบื้องต้นของอาหารที่ใช้ในการทดลอง

การตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง โดยเก็บรวบรวม ขยะเศษอาหารจากโรงอาหารยูนิเวอร์ซิตี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นแหล่งที่มีเศษอาหารหลากหลายชนิดจากการบริโภคของนักศึกษา และบุคลากรภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ขยะเศษอาหารที่ได้ถูกนำมาผ่านการตรวจสอบและบันทึกคุณลักษณะเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก พบว่าขยะเศษอาหารดังกล่าวมีองค์ประกอบทั้ง 3 ประเภท ดังนี้ 1) ขยะที่ไม่ใช้อินทรีย์ เช่น เศษพลาสติก ถ้วยน้ำจิ้ม ของตะเกียบ และพลาสติกห่ออาหาร ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณร้อยละ 5.7 ± 2.1 2) วัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น เศษกระดูกหมู และกระดูกไก่ ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณร้อยละ 16.1 ± 5.2 และ 3) ของเหลวและน้ำคืดเป็นร้อยละ 39.5 ± 10.2 ส่วนที่เหลือเป็นส่วนของ เศษอาหารอินทรีย์ (ร้อยละ 38.3 ± 12.62) ซึ่งประกอบด้วยเศษข้าวเป็นหลัก และมีเศษผักปนอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 10 ของส่วนนี้ (Figure 2b) ทั้งนี้เศษอาหารที่ผ่านการคัดแยกนี้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง เพื่อจำลองสภาพจริงของเศษอาหารจากแหล่งกำเนิด คุณสมบัติทางกายภาพของเศษอาหารที่เก็บรวบรวมได้ มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 80.2 ± 5.6 และมีความหนาแน่นรวม 986.59 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

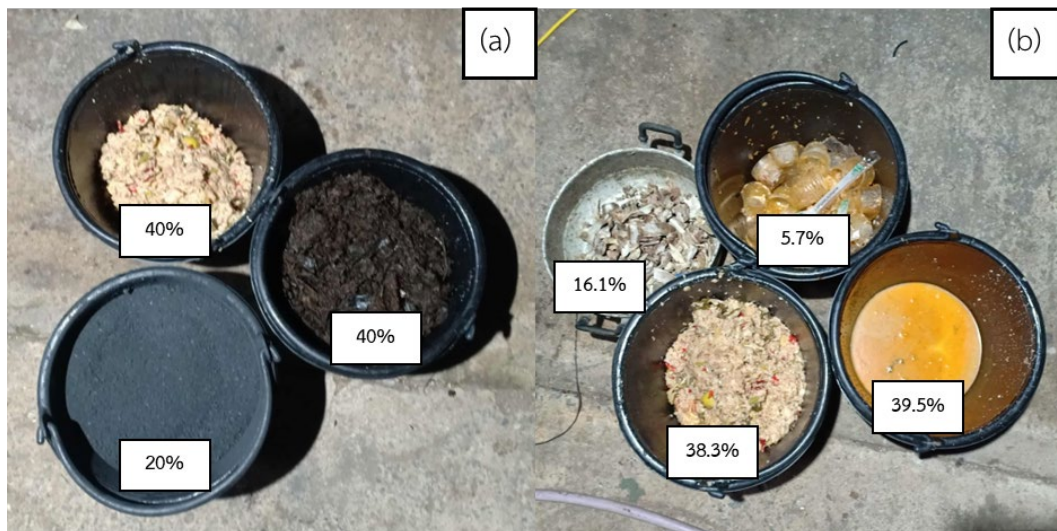


Figure 2 Percentage of the mixture used for food waste fermentation (a) and Percentage composition of collected food waste components (b).



การออกแบบและผลิตเครื่องหมักเศษอาหารต้นแบบ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องหมักปุ๋ยอินทรีย์จากเศษอาหาร ในการศึกษาครั้งนี้ มีพื้นฐานมาจากหลักการของการหมักแบบใช้ออกซิเจน (aerobic composting) ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ส่งผลให้เกิดความร้อน น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Epstein, 2011) การออกแบบระบบหมักในลักษณะ in-vessel จึงช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และการระบายอากาศ ได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นหัวใจหลักของการเร่งการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุให้เกิดได้ภายในระยะเวลาอันสั้น (Dharnaik and Pol, 2024)

ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก

ในระหว่างกระบวนการหมักตลอดระยะเวลา 7 วัน ได้มีการติดตามและประเมินการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมักอย่างต่อเนื่อง โดยทำการตรวจวัดอุณหภูมิภายในกองหมักและภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Figure 3) ความชื้น อัตราการงอกของเมล็ด และปริมาณวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการหมัก (Figure 4) นอกจากนี้ ยังมีการประเมินลักษณะทางกายภาพเชิงคุณภาพอื่น ๆ ได้แก่ สี กลิ่น และโครงสร้างของวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมัก (Figure 5)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการหมัก (Figure 3) ในระบบเครื่องหมัก (ชุดทดลอง) พบว่าอุณหภูมิภายในกองหมัก เพิ่มขึ้นจาก 35 °C เป็น 52 °C ในวันแรกของการหมัก ในวันที่ 3 และวันที่ 4 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 54 °C ซึ่งเป็นช่วงของระยะ thermophilic ที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ย่อยสลายโปรตีนและไขมัน ขณะเดียวกัน อุณหภูมิภายในถังหมัก มีค่า 43–47 °C ในช่วงเริ่มต้น (1 ถึง 3 วัน) และคงที่ที่ 45 °C จนถึงสิ้นสุดการหมักวันที่ 7 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ “ภายในกอง” และ “ภายในถังหมัก” อยู่ที่ประมาณ 2 °C จากค่าที่ตั้งไว้ (45 °C) ซึ่งแสดงถึงการกระจายความร้อนที่มีประสิทธิภาพภายในถังหมัก เนื่องจากระบบมีการกวนและเป่าลมร้อนช่วยให้เกิดการกระจายความร้อนทั่วถึงและควบคุมได้ต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม การหมักแบบกองปกติ (ชุดควบคุม) พบว่าอุณหภูมิในกองเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด 56 °C ในวันที่ 5 ซึ่งเป็นช่วงที่การย่อยสลายเริ่มเกิดขึ้นมาก แต่อุณหภูมิภายในกองและภายในถัง มีความแตกต่างกันเฉลี่ยถึง 10 °C โดยอุณหภูมิภายในถังอยู่เพียง 35–37 °C ตลอดช่วงการหมัก จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าระบบหมักโดยใช้เครื่องจะมีการควบคุมอุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพ แตกต่างกับการหมักแบบกองปกติที่พบว่าอุณหภูมิภายในกองหมักสูงกว่าในบางช่วง เนื่องจากระบวนการหมักเป็นกระบวนการคายความร้อนโดยธรรมชาติ (exothermic process) จากกิจกรรมของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ เมื่อไม่มีการพลิกกองหรือระบายอากาศ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสะสมภายในกองมากขึ้นอย่างรวดเร็ว (Luangwilai et al., 2022; Liu et al., 2020) ในทางตรงกันข้าม การพลิกกองและการไหลเวียนอากาศในระบบเครื่องหมักช่วยระบายความร้อนส่วนเกินและรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่อง (Sotowiej et al., 2021) แสดงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในกองและการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมอย่างมาก

การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการหมัก (Figure 4a) ในระบบหมักโดยใช้เครื่องหมักทดลองอย่างรวดเร็วจาก ร้อยละ 61.25 เหลือเพียงร้อยละ 23.5 ภายใน 7 วัน เนื่องจากภายในถังมีระบบให้ความร้อนและการเป่าลมซึ่งช่วยระเหยน้ำออกจากวัสดุหมัก ส่งผลให้ปุ๋ยมีลักษณะแห้งและไม่จับตัวเป็นเม็ดได้ง่าย ส่วนการหมักแบบกองปกติ ความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อยจากร้อยละ 60.78 เหลือประมาณร้อยละ 50.54 หลัง 7 วัน ซึ่งยังถือว่าสูง ทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้ช้ากว่า และมีการเกิดกลิ่นเน่าจากสภาวะกึ่งไม่ใช้ออกซิเจน



ปริมาณวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านตะแกรง (Figure 4b) ในเครื่องหมักสามารถผลิตวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 6 มม. ได้ตั้งแต่วันแรก (20 กรัม) และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึง 451 กรัม ในวันที่ 3 จากนั้นคงที่ในช่วง 340–360 กรัมต่อวัน แสดงถึงการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องและการลดขนาดของวัสดุหมัก ขณะที่การหมักแบบกองปกติไม่มีวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านตะแกรงในทุกวันของการทดลอง สะท้อนให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุยังและการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุหมัก ส่งผลให้การแตกตัวและการลดขนาดของวัสดุเกิดขึ้นอย่างจำกัด

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการงอกของเมล็ด (Figure 4c) ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อพืชโดยใช้การงอกของเมล็ดผักสลัดกรีนคอส พบว่า การหมักแบบใช้เครื่องหมัก (ชุดทดลอง) มีค่าอัตราการงอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากร้อยละ 0 ในวันแรกเป็นร้อยละ 46.8 ในวันที่ 7 แสดงถึงการลดลงของสารพิษเช่น กรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอมโมเนีย ซึ่งเกิดจากการหมักสมบูรณ์มากขึ้น ในทางกลับกัน การหมักแบบกองปกติมีค่าการงอกของเมล็ด ต่ำกว่าอย่างชัดเจน โดยเพิ่มจากร้อยละ 0 ในวันแรกเป็นเพียงร้อยละ 8.2 ในวันที่ 7 แสดงว่ากระบวนการย่อยสลายยังไม่สมบูรณ์

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมักเมื่อระยะเวลา 7 วัน (Figure 5) วัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการหมักภายใต้การหมักทั้ง 2 แบบ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในการหมักแบบใช้เครื่องนั้น ปุ๋ยที่ได้มีลักษณะเนื้อร่วนละเอียดและมีความสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความชื้นและการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญและความหลากหลายสูงสุดพบในระยะเทอร์โมฟิลิก ซึ่งสะท้อนถึงระบบการหมักที่มีประสิทธิภาพ (Wang et al., 2022b) ใบกวนของเครื่องผสมช่วยคลุกเคล้าและพลิกกลับวัสดุหมักอย่างต่อเนื่อง ทำให้การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อากาศสามารถแทรกผ่านวัสดุหมักได้ทั่วถึง ซึ่งส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม วัสดุอินทรีย์ที่หมักโดยไม่เปิดระบบการทำงาน (ชุดควบคุม) มีลักษณะจับตัวเป็นก้อนใหญ่ เนื้อวัสดุมีความชื้นสะสมสูงในบางบริเวณ และมีส่วนที่ยังไม่สลายตัวอย่างสมบูรณ์ เห็นได้จากลักษณะเนื้อวัสดุที่ผ่านการหมักไม่ร่วนและยังคงมีเศษอินทรีย์วัตถุขนาดใหญ่ปะปนอยู่ การไม่พลิกกลับวัสดุอินทรีย์ระหว่างการหมักส่งผลให้เกิดการกระจายอากาศไม่ทั่วถึง เกิดสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนในบางจุดของวัสดุหมัก ทำให้การย่อยสลายช้าลงและไม่สม่ำเสมอ จากประสิทธิภาพของเครื่องหมักเศษอาหารนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบการพลิกกอง การเติมอากาศ และให้ความร้อนในระหว่างการหมัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wang et al. (2024) ได้รายงานว่ารูปแบบการย่อยสลายแบบลอการิทึม (logarithmic degradation pattern) ในระบบกึ่งปิดนั้น การกวนอย่างสม่ำเสมอช่วยลดขนาดวัสดุ (particle size reduction) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของจุลินทรีย์กับวัสดุหมักเพิ่มขึ้น และเร่งกระบวนการย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

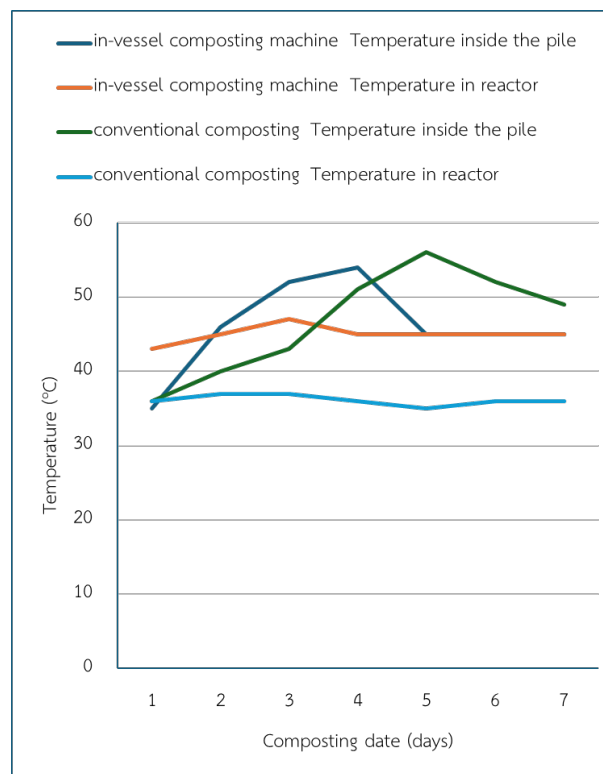


Figure 3 Temperature changes inside the fermentation chamber during food waste composting under in-vessel composting machine (experimental) and conventional (control) treatments.

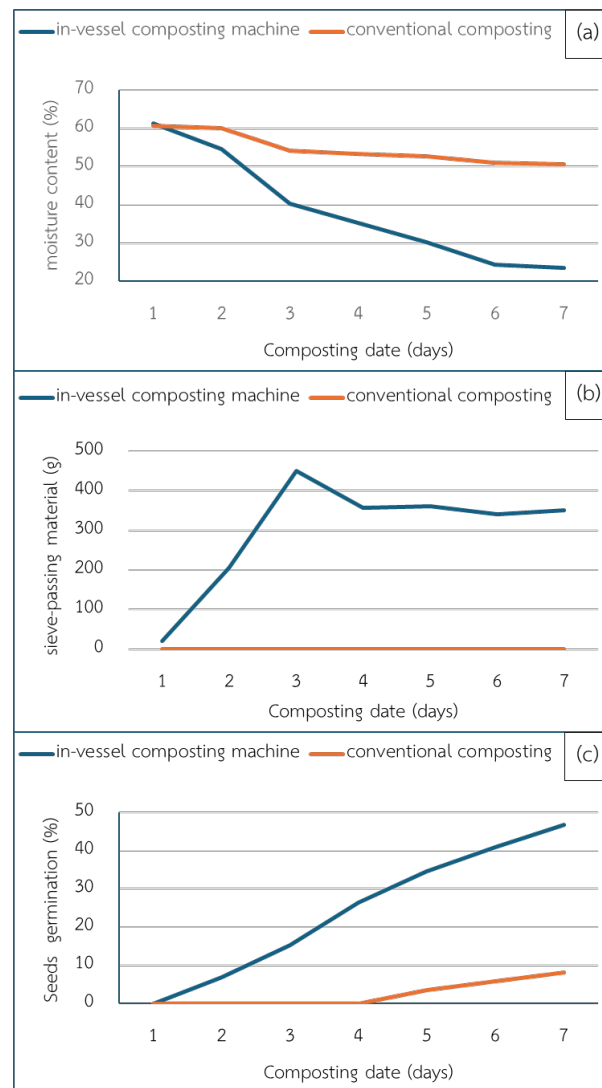


Figure 4 Changes in moisture content (a), sieve-passing material (b), and seed germination (c) during the composting process of food waste under in-vessel composting machine (experimental) and conventional (control) treatments.



Figure 5 Physical characteristics of the composted food waste material after 7 days under in-vessel composting machine (a) and conventional composting without machine operation (b).

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปุ๋ยที่ได้จากการหมัก

จากผลการตรวจสอบคุณภาพปุ๋ยหมักตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 จากการหมักทั้งแบบการใช้เครื่อง (ชุดทดลอง) และแบบกองปกติ (ชุดควบคุม) เมื่อครบระยะเวลา 7 วัน พบว่า ปุ๋ยหมักที่ผลิตจากเครื่องหมักเศษอาหาร มีคุณสมบัติด้านธาตุอาหารหลักและคุณภาพโดยรวมสูงกว่าปุ๋ยที่ได้จากการหมักแบบกองปกติอย่างชัดเจน (Table 1) ในด้านปริมาณธาตุอาหารหลัก พบว่าเครื่องหมักสามารถผลิตปุ๋ยที่มีไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 1.53 ฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 1.62 และโพแทสเซียมทั้งหมดร้อยละ 0.82 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานอินทรีย์ขั้นต่ำที่กำหนด และสูงกว่าปุ๋ยที่ได้จากการหมักแบบกองปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการหมักแบบกองปกติมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมทั้งหมดร้อยละ 0.89, 0.75 และ 0.42 ตามลำดับ ปริมาณธาตุอาหารหลักรวมกันในปุ๋ยจากเครื่องหมักมีค่าร้อยละ 3.97 ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 ขณะที่การหมักแบบกองปกติมีธาตุอาหารหลักรวมกันเพียงร้อยละ 2.06 ซึ่งโดยทั่วไปปุ๋ยอินทรีย์จากเศษอาหารจะมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และโพแทสเซียมทั้งหมดอยู่ร้อยละ 0.96–1.42, 0.19–0.78, และ 0.86–1.42 ตามลำดับ (Nkansah et al., 2018) จากคุณสมบัติของธาตุอาหารพืชเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเศษอาหารมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้เป็นธาตุอาหารพืชด้วยวิธีการหมักปุ๋ย ทำให้เกิดการหมุนเวียนและลดขยะที่อาจเกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมได้

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ พบว่าปุ๋ยจากเครื่องหมักมีค่าร้อยละ 34.63 ซึ่งผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำเกินเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ในขณะที่ปุ๋ยจากการหมักแบบกองปกติมีอินทรีย์วัตถุอยู่ร้อยละ 12.23 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานอย่างมาก สะท้อนให้เห็นว่าการใช้เครื่องหมักช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายเศษอาหารจนกลายเป็นอินทรีย์วัตถุได้ดีกว่า



ความชื้นในปุ๋ยจากเครื่องหมักมีค่าร้อยละ 23.5 ซึ่งน้อยกว่าความชื้นในของปุ๋ยจากการหมักแบบกองปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 50.54 ทำให้มีกลิ่นและมีแนวโน้มในการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์

การทดสอบการงอกของเมล็ดพืชพบว่า ปุ๋ยที่ได้จากเครื่องหมักมีอัตราการงอกเฉลี่ยร้อยละ 46.83 ซึ่งแม้จะยังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ แต่มีค่าสูงกว่าปุ๋ยที่ได้จากการหมักแบบกองปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ร้อยละ 8.16) ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าปุ๋ยจากเครื่องหมักมีความเป็นพิษต่อพืชน้อยกว่าเมื่อพิจารณาภายใต้ระยะเวลาการหมักที่เท่ากัน ผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการที่เครื่องหมักช่วยให้กระบวนการหมักเข้าสู่ระยะ thermophilic ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สารอินทรีย์ที่ไม่เสถียรถูกย่อยสลายและแปรสภาพเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพมากขึ้น จึงลดความเป็นพิษต่อพืช ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Wang et al. (2022a) ที่พบว่าดัชนีการงอกเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดอินทรีย์และการลดลงของกรดไขมันระเหย อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดที่ยังคงพบในปุ๋ยหมักทั้ง 2 วิธี บ่งชี้ว่ากระบวนการหมักยังไม่สมบูรณ์ โดยอาจมีสาเหตุหลักจากการสะสมของแอมโมเนียและกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเฉพาะกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิก ซึ่งมีรายงานว่าสามารถยับยั้งการงอกของเมล็ด รบกวนการดูดน้ำ และขัดขวางการเจริญของรากอ่อนได้ (Du et al., 2024) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปุ๋ยหมักที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ในระยะเวลา 7 วัน ยังมีความเป็นพิษต่อพืชในระดับหนึ่ง จึงควรมีการปรับปรุงคุณภาพของปุ๋ยด้วยการหมักต่อในระยะสุกเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอย่างเสถียรมากขึ้น แม้ปุ๋ยที่ได้ยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับพืชโดยตรง โดยเฉพาะในระยะเพาะกล้าหรือพืชอ่อนที่มีความไวต่อสารพิษอินทรีย์ แต่สามารถพิจารณานำปุ๋ยหมักที่ได้ไปใช้ในลักษณะของ “สารปรับปรุงดิน (soil amendment)” เช่น การคลุมหน้าดินหรือโรยรอบโคนต้นไม้ขนาดใหญ่ อาทิ พืชสวนหรือไม้ผล โดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสโดยตรงกับระบบรากของพืช

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ปุ๋ยจากเครื่องหมักมีค่า 13:1 ซึ่งเหมาะสมและต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุด ($\leq 20:1$) สะท้อนว่าเมื่อนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปใช้กับพืชจะไม่ทำให้เกิดการแก่งแย่งธาตุอาหารกันของพืชกับจุลินทรีย์ในดิน ส่วนการหมักแบบกองปกติยังมีค่า C/N สูงถึง 36:1 ซึ่งเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่บ่งชี้ว่ากระบวนการย่อยสลายยังไม่สมบูรณ์ สำหรับ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของปุ๋ยจากเครื่องหมักมีค่า 3.82 dS m^{-1} ต่ำกว่าเกณฑ์สูงสุด ($\leq 6 \text{ dS m}^{-1}$) และต่ำกว่าปุ๋ยจากการหมักแบบกองปกติ (5.42 dS m^{-1}) ซึ่งเป็นสัญญาณว่าปุ๋ยจากวัสดุอินทรีย์มีความปลอดภัยต่อการใช้กับพืช ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของทั้งสองวิธีอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (7.7 และ 8.16 ตามลำดับ) ในส่วนของ โลหะหนักและสิ่งปนเปื้อน ทั้งสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และปรอท มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดอย่างมาก และไม่พบสิ่งแปลกปลอม เช่น พลาสติกหรือโลหะในตัวอย่างทั้งสองวิธี

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การหมักเศษอาหารด้วยเครื่องหมักเศษอาหารมีประสิทธิภาพสูงกว่าการหมักแบบกองปกติ ทั้งในด้านคุณภาพของธาตุอาหาร ความสมบูรณ์ของกระบวนการหมัก และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถใช้ในการส่งเสริมเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ (บรรจง อุปแก้ว และคณะ, 2568) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการจัดการขยะอินทรีย์ในครัวเรือนและการผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพดีภายในชุมชน และสามารถใช้เป็นต้นแบบเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับขยายขนาดขึ้นได้

**Table 1** Comparison of chemical and physical properties of food waste compost produced by in-vessel composting machine and conventional composting with compost standards.

Compost parameters	Compost standards of the Department of Agriculture (2005)	In-vessel composting machine	Conventional composting
Total N	> 1% by weight	1.53 a	0.89 b
Total P ₂ O ₅	> 0.5 % by weight	1.62 a	0.75 b
Total K ₂ O	> 0.5 % by weight	0.82 a	0.42 b
Note: or having a total amount of macronutrients	> 2 % by weight	3.97 a	2.06 b
Organic matter content	> 30 % by weight	34.63 a	12.23 b
Moisture	< 35 % by weight	23.5 b	50.54 a
Germination	> 80%	46.83 a	8.16 b
C/N ratio	< 20:1	13 b	36.15 a
Electrical Conductivity	< 6 dS m ⁻¹	3.82 b	5.42 a
pH	5.5-8.5	7.7 a	8.16 a
Particle size	Not more than 12.5 x 12.5 mm. (%)	100 a	61.25 b
Quantity of rocks and gravel	Size exceeding 5 mm, < 5% by weight.	0 a	0 a
Plastic, glass, sharp materials, or other metals	Not found	Not found	Not found
Arsenic	< 50 mg kg ⁻¹	0.613 a	0.785 a
Cadmium	< 5 mg kg ⁻¹	0.11 a	0.25 a
Chromium	< 300 mg kg ⁻¹	59.47 a	61.25 a
Copper	< 500 mg kg ⁻¹	16.4 a	15.24 a
Lead	< 500 mg kg ⁻¹	2.033 a	2.015 a
Mercury	< 2 mg kg ⁻¹	0.071 b	0.628 a

Note: Mean values of fertilizer properties between the composter (experimental) and conventional compost (control) were compared using the t-test at the 95% confidence level. Different lowercase letters in each row indicate statistically significant differences.



สรุปผลการทดลอง

ระบบหมักแบบเติมอากาศและควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแสดงศักยภาพในการเร่งกระบวนการย่อยสลายขยะเศษอาหาร โดยควบคุมการเติมอากาศให้อยู่ในระดับเหมาะสม อุณหภูมิให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก และพลิกกองวัสดุหมักอย่างเหมาะสม ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัวความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพทางเคมีและกายภาพสูงขึ้น รวมถึงความพร้อมในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับหมักแบบกองปกติ แม้ว่าปุ๋ยหมักยังอาจมีผลต่อการงอกของเมล็ดพืชในระดับหนึ่ง แต่สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยการเพิ่มขั้นตอนการหมักในระยะสุก หรือพิจารณานำไปใช้เป็น สารปรับปรุงดิน สำหรับการใช้งานทางการเกษตร โดยรวมแล้วผลการศึกษานี้ให้เห็นว่าระบบหมักแบบควบคุมสภาวะในถังปิดสามารถจัดการขยะเศษอาหาร ณ แหล่งกำเนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งส่งเสริมการหมุนเวียนทรัพยากร และสามารถขยายผลสู่การจัดการขยะในระดับชุมชน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยความมั่นคงด้านอาหาร พลังงาน และน้ำอนุภูมิภาคลุ่มน้ำโขง มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยขอนแก่น รวมทั้งศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเทศไทย 10400 ที่มีบทบาทสำคัญในการให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ อุปกรณ์ และทรัพยากรในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- บรรจง อุปแก้ว, อภिरยา เทพสุคนธ์, อนุชา จันทบูรณ์, วราวุฒิ โส๊ะสุข, วสุธร บัวคอม, ณัฐกร ไชยแสน, กัญญ์ณพัชญ์ ดวงแก้ว และ กัลยา พงสะพัง. (2568). อิทธิพลของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีต่อปริมาณธาตุอาหารในดิน การออกดอก และคุณภาพผลผลิตของโกโก้. *วารสารเกษตรอนุภูมิภาคลุ่มน้ำโขง*, 2(1), 14–26.
- เบญจมาศ โชติทอง. (2565). ลดโลกร้อน เริ่มต้นจาก "จานอาหาร" ของเรา. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. สืบค้น วันที่ 17 พฤศจิกายน 2568, จาก https://www.tei.or.th/th/article_detail.php?bid=157
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.016>
- Dharnaik, A. S., & Pol, P. (2024). A review on composting of organic solid waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1326, 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012130>



- Du, S., Ding, S., Wen, X., Yu., M., Zou, X., & Wu, D. (2024). Investigating inhibiting factors affecting seed germination index in kitchen waste compost products: Soluble carbon, nitrogen, and salt insights. *Bioresource Technology*, 406, 130995. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130995>
- Epstein, E. (2011). Industrial composting: Environmental engineering and facilities management. 1st Edition. CRC Press: UK.
- Haug, R.T. (2018). The practical handbook of compost engineering. 1st Edition. Routledge: UK.
- Liu, Z., Wang, X., Wang, F., Bai, Z., Chadwick, D., Misselbrook, T., & Ma, L. (2020). The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122328>
- López, M. J., Jurado, M. M., López-González, J. A., Estrella-González, M. J., Martínez-Gallardo, M. R., Toribio, A., & Suárez-Estrella, F. (2021). Characterization of thermophilic lignocellulolytic microorganisms in composting. *Frontiers in Microbiology*, 12, 697480. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.697480>
- Lu, S. G., Imai, T., Li, H. F., Ukita, M., Sekine, M., & Higuchi, T. (2001). Effect of enforced aeration on in-vessel food waste composting. *Environmental Technology*, 22(10), 1177–1182. <https://doi.org/10.1080/09593332208618200>
- Luangwilai, T., Sidhu, H., & Nelson, M. (2021). Understanding the factors affecting the self-heating process of compost piles: Two-dimensional analysis. *Proceedings Engineering Mathematics and Applications Conference*, 63, C15–C29. <https://doi.org/10.21914/anziarnj.v63.17119>
- Manyapu, V., Shukla, S., Kumar, S., Rajendra K. (2017). In-vessel composting: a rapid technology for conversion of biowaste into compost. *Open Access International Journal of Science and Engineering*, 2, 58–63.
- Nkansah, J. B., Oduro-Kwarteng, S., Essandoh, H. M. K., & Kuffuor, R. A. (2022). Enhancing food waste compost quality with nutrient amendments. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 11, 15–31. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2021.1901356.1121>
- Sołowiej, P., Pochwatka, P., Wawrzyniak, A., Łapinski, K., Lewicki, A., & Dach, J. (2021). The effect of heat removal during thermophilic phase on energetic aspects of biowaste composting process. *Energies*, 14(4), 1183. <https://doi.org/10.3390/en14041183>



- Wang, G., Kong, Y., Yang, Y., Ma, R., Shen, Y., Li, G., & Yuan, J. (2022a). Y. Superphosphate, biochar, and a microbial inoculum regulate phytotoxicity and humification during chicken manure composting. *The Science of the Total Environment*, 2022, 153958. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3985470>
- Wang, H., Qin, Y., Xin, L., Nan, Q., Xu, X., Zhao, C., Wu, W. (2024). Pilot-scale study of innovative mechanically-enhanced dynamic composting for treating kitchen waste. *Bioresource Technology*, 394, 130176. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130176>
- Wang, X., He, X., & Liang, J. (2022b). Succession of Microbial Community during the Co-Composting of Food Waste Digestate and Garden Waste. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9945. <https://doi.org/10.3390/ijerph19169945>
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981). Evaluating compost maturity by phytotoxicity tests. *Compost Science*, 22(2), 43–50.