

ศักยภาพของเชื้อรา *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560 ในการละลายหินฟอสเฟตและการใช้ร่วมกับน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งเพื่อการผลิตปุ๋ยหมัก

Phosphate-Solubilizing Potential of *Aspergillus niger* TISTR 3254 and *Penicillium notatum* TISTR 3560 and Their Application with Rice Noodle Wastewater for Compost Production

ศรีอุบล ทองประดิษฐ์¹, ณรงค์ชัย ชูพล¹, และอดุลย์สมาน สุขแก้ว^{2*}

Sriubol Thongpradistha¹, Narongchai Choopool¹, and Adulsman Sukkaew^{2*}

Received date: 25 มี.ค. 68 Revised date: 20 ม.ค. 69 Accepted date: 20 ม.ค. 69

DOI: <https://doi.org/10.55003/kmaj.2026.266638>

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟตของเชื้อรา *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560 รวมทั้งการใช้เชื้อผสมของทั้งสองชนิดในการเพิ่มธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักจากมูลโค โดยใช้แป้งขนมจีนเหลือทิ้งเป็นแหล่งสารอาหารอินทรีย์เสริม ซึ่งได้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 8 วัน ผลการศึกษาพบว่าเชื้อผสม *A. niger* TISTR 3254 และ *P. notatum* TISTR 3560 ให้ค่าการละลายฟอสเฟตสูงสุด 85.43 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดค่า pH จาก 7.03 เหลือ 5.81 ซึ่งต่ำกว่าการหมักด้วยเชื้อเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สำหรับการพัฒนาเป็นปุ๋ยหมัก พบว่าการเติมน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งในอัตราร้อยละ 2 และหินฟอสเฟตร้อยละ 5 ร่วมกับเชื้อผสมร้อยละ 1.5 ให้ปริมาณฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.93 พร้อมด้วยไนโตรเจนร้อยละ 1.65 และโพแทสเซียมร้อยละ 3.06 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร การเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 วัน ส่งผลให้ค่าธาตุอาหารหลักลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงผ่านมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่าการใช้เชื้อราในระบบหมักร่วมกับน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการละลายฟอสเฟตและคุณภาพปุ๋ยหมักได้อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อีกทั้งเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ของเสียทางการเกษตรอย่างยั่งยืน ลดต้นทุน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ: หินฟอสเฟต ปุ๋ยหมัก น้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้ง การย่อยสลายสารอินทรีย์

Abstract

This research aimed to compare the phosphate rock solubilization efficiency of the fungi *Aspergillus niger* TISTR 3254 and *Penicillium notatum* TISTR 3560, as well as the use of their mixed culture to enhance major nutrient contents in compost derived from cattle manure, using discarded rice noodle wastewater (RNW) as a supplementary organic nutrient source. The experiment was conducted at the laboratory scale at 30 °C for 8 days. The results showed that the mixed culture of *A. niger* TISTR 3254 and *P. notatum* TISTR 3560 achieved the highest phosphate solubilization, reaching 85.43 mg/L, and reduced the pH from 7.03 to 5.81, which was significantly lower than that obtained from single-strain fermentation ($P < 0.05$). For compost development, the addition of 2% (v/w) discarded RNW and 5% (w/w) phosphate rock, together with 1.5% (w/w) mixed fungal inoculum, resulted in the highest phosphorus content of 0.93%, along with nitrogen and potassium contents of 1.65% and 3.06%, respectively, which complied with the organic fertilizer standards of the Department of Agriculture. Storage of the compost at room temperature for 15 days led to a slight reduction in major nutrient contents; however, the values remained within the standard limits. The findings indicate that the application of fungi in a co-fermentation system with discarded RNW significantly enhances phosphate solubilization efficiency and compost quality at the 95% confidence level. Moreover, this approach provides a sustainable alternative for agricultural waste utilization, reduces production costs, and is environmentally friendly.

Keywords: phosphate rock, compost, rice noodle wastewater, organic matter decomposition

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

² เทคโนโลยีพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา 95000

¹ Program in Food Technology and Innovation, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat 80240

² Renewable Energy Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala 95000

* Corresponding author: email: adulsman.s@yru.ac.th

คำนำ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักของพืชที่มีความสำคัญรองจากไนโตรเจน โดยมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิต เพราะฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่พบในนิวเคลียสของเซลล์ รวมถึงโครโมโซม ซึ่งเป็นแหล่งของดีเอ็นเอและอาร์เอ็นเอ มีบทบาทสำคัญในการควบคุมกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช เช่น การหายใจ การสังเคราะห์แสง การผลิตแป้ง โปรตีน และไขมัน นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสยังส่งผลต่อการพัฒนาราก การออกดอก การสร้างหัว และการสุกของผล ในพื้นที่เขตร้อน ดินมักมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ ส่งผลให้มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มธาตุอาหารดังกล่าวในภาคเกษตรกรรม เช่น ในประเทศแอฟริกาและไนจีเรีย โดยอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยเคมีจะพบฟอสฟอรัสที่ถูกเปลี่ยนเป็นรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การใช้ปุ๋ยเคมีที่มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อระบบนิเวศ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ และการเสื่อมโทรมของคุณภาพดิน (Booali et al., 2024; Ding et al., 2024) ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้ให้ความสนใจในการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (Phosphate-Solubilizing Microorganisms: PSMs) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นรูปที่ละลายน้ำได้ (available P) โดย PSMS ประกอบด้วยกลุ่ม แบคทีเรีย และ เชื้อรา ที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์และเอนไซม์ต่าง ๆ เพื่อช่วยละลายสารประกอบฟอสเฟตในดิน ตัวอย่างเช่น แบคทีเรีย กลุ่ม *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizobium leguminosarum* และเชื้อรากลุ่ม *Aspergillus niger*, *Penicillium notatum*, *Trichoderma harzianum*, *Rhizopus oryzae* เป็นต้น (Aliyat et al., 2022)

ฟอสฟอรัสนอกจากจะได้รับจากปุ๋ยเคมีทั่วไปแล้ว ยังปรากฏในดินในบางชนิดอีกด้วย โดยกลไกทั่วไปของฟอสฟอรัสในดินเกิดขึ้นจากการสลายตัวของชีวภาพและเคมีของแร่ในดิน เช่น แร่อะพาไทต์ (Apatite) รวมถึงการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุที่เป็นแหล่งฟอสฟอรัส กระบวนการดังกล่าวทำให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของสารฟอสเฟตไอออน ได้แก่ HPO_4^{4-} และ HPO_4^{2-} ซึ่งสารเหล่านี้จำเป็นต้องละลายน้ำได้ก่อนจึงจะเป็นประโยชน์ต่อพืชในการดูดซึมและใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ได้ (Mesa et al., 2025; Ogbo, 2010) ในดินพบสารประกอบของฟอสฟอรัสในปริมาณที่ค่อนข้างมาก แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยาก เนื่องจากอนุพลฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้มักทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ภายในดิน ส่งผลให้เกิดสารประกอบฟอสเฟตในรูปแบบที่ละลายน้ำได้จำกัด ทำให้พืชจะไม่สามารถดูดซึมฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ได้ ช่วงของค่าพีเอชที่เอื้อต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัสให้พืชสามารถนำไปใช้ได้อยู่ที่ประมาณ 5.5–7 อย่างไรก็ตาม ในช่วงค่าพีเอชดังกล่าว ปัญหาการละลายน้ำของฟอสฟอรัสยังคงพบเป็นประจำ เนื่องจากฟอสเฟตไอออนที่ละลายน้ำได้มักทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุอื่น ๆ ในดิน กลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากขึ้น ส่งผลให้พืชขาดแคลนฟอสฟอรัสแม้ว่าในดินที่มีฟอสฟอรัสในปริมาณโดยรวมสูง ในบริบทของการเกษตรในประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะการเพาะปลูกทางการเกษตรที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ปลูกข้าวที่พบดินทรายและดินร่วนซึ่งมีความแตกต่างในด้านผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การพัฒนาและความสมบูรณ์ของเมล็ดข้าว ซึ่งในเมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวได้จะพบฟอสฟอรัสในดินที่มีปริมาณที่ต่ำกว่าความต้องการของพืช ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมปุ๋ยฟอสเฟตเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและเพิ่มผลผลิตข้าว อย่างไรก็ตาม เมื่อปุ๋ยฟอสเฟตถูกนำมาผสมกับดิน พืชสามารถดูดซึมฟอสฟอรัสได้เพียงประมาณร้อยละ 2–25 ของฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไป ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาของฟอสเฟตกับสารประกอบอื่น ๆ ในดิน เช่น เหล็กฟอสเฟต อะลูมิเนียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟตที่สะสมอยู่ในดิน ทำให้ฟอสฟอรัสในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ลดลง หนึ่งในแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือการใช้ปุ๋ยมูลสัตว์ เช่น มูลไก่, มูลโค และมูลสุกร ซึ่งมีคุณสมบัติในการปรับปรุงสภาพดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชดูดซึมได้ดีขึ้น แม้ว่าในมูลสัตว์จะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่าความต้องการของพืชโดยตรง แต่การใช้ร่วมกับกลยุทธ์การปรับปรุงดินอื่น ๆ อาจช่วยเพิ่มความพร้อมของฟอสฟอรัสในระบบเกษตรและลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีได้ (Liao et al., 2025) หนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารในวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตปุ๋ย คือการหมักปุ๋ยร่วมกับวัสดุเสริมที่มีองค์ประกอบของแร่ธาตุสูง อาทิ กากสัลดจ์ ปาล์ม กากถั่วเหลือง และหินฟอสเฟต วัสดุดังกล่าวมีบทบาทในการเพิ่มปริมาณของธาตุอาหารหลัก โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นธาตุสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืช เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดของเสียในภาคการเกษตร วัสดุร่วม เช่น น้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้ง ถูกนำมาใช้พัฒนาปุ๋ยอินทรีย์ ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้แล้ว แต่ยังทำหน้าที่ปรับความชื้นในกระบวนการหมักแบบเดิม ซึ่งเดิมกระบวนการหมักจะใช้น้ำสะอาดหรือปุ๋ยอินทรีย์น้ำในการเพิ่มความชื้นให้แก่กองหมัก เพื่อรักษาสภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำแป้งขนมจีนดังกล่าว ช่วยเพิ่มแหล่งคาร์บอนและสารอาหารบางชนิดให้แก่จุลินทรีย์ ทำให้การหมักเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายดีขึ้น และยังเป็นการใช้ประโยชน์ของเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีนให้เกิดคุณค่าเพิ่ม ส่งผลให้กระบวนการหมักและการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น น้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือความสามารถในการละลายน้ำที่สูงและมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมาก โดยคาร์โบไฮเดรต

ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสำคัญสำหรับจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีและสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ferrari et al., 2024; Nawaz et al., 2024) นอกจากนี้ คุณสมบัติเหล่านี้ยังช่วยเพิ่มความชื้นในระบบการหมัก ส่งเสริมให้กระบวนการหมักชีวภาพดำเนินไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้สามารถใช้แป้งขนมจีนเหลือทิ้งแทนปุ๋ยอินทรีย์น้ำในการผลิตปุ๋ยหมักและลดต้นทุนทางเศรษฐกิจในภาคการเกษตรได้ (Fernández-Delgado et al., 2022)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟตของเชื้อ *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560 ศึกษาปริมาณน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจชีวภาพ-หมุนเวียน-สีเขียว (BCG Economy Model)

วิธีการศึกษา

การศึกษาประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟตของเชื้อ *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560

ในการทดลองขั้นต้นที่เป็นการคัดเลือกเชื้อราที่มีความสามารถในการละลายหินฟอสเฟตในระดับห้องปฏิบัติการ เริ่มต้นด้วยการเตรียมขยายปริมาณของเชื้อรา *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560 โดยเฉพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDB เพื่อให้ได้ชุดเชื้อที่แข็งแรงและมีความเข้มข้นที่เหมาะสม จากนั้นทำการถ่ายเชื้อลงบนอาหารเพาะเชื้อประเภท Potato Dextrose Agar (PDA) ร่วมกับวุ้นผิวเอียงและบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อได้ชุดเชื้อที่พร้อมสำหรับการทดลองแล้ว จะมีการเตรียมอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ประกอบด้วยซูโครส 10 กรัม, เพป्टอน 5 กรัม, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 กรัม, NaCl 0.5 กรัม, KCl 0.5 กรัม และน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร (Aliyat et al., 2022; Thongpradistha et al., 2020) หลังจากฆ่าเชื้ออาหารเลี้ยงให้ปราศจากสิ่งมีชีวิตอื่นแล้ว จะเติมหินฟอสเฟตร้อยละ 5 น้ำหนักโดยน้ำหนัก ลงในอาหารเลี้ยง จากนั้นศึกษาโดยการเติมเชื้อราที่ผ่านการเพาะเลี้ยงที่มีความเข้มข้น 0.5 McFaland ลงในอาหารเลี้ยงในอัตราร้อยละ 1 ปริมาตรโดยปริมาตร โดยแบ่งเป็น 3 ชุดทดลอง คือ ชุดที่เติมเชื้อ *A. niger* TISTR 3254, ชุดที่เติมเชื้อ *P. notatum* TISTR 3560 และชุดที่เติมเชื้อผสมระหว่างทั้งสองสายพันธุ์ เมื่อดำเนินการดังกล่าวแล้ว นำสารทดลองไปบ่มด้วยการเขย่าในความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 วัน และสุ่มตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน นำมาวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู-แอสคอร์บิก (Molybdenum Blue-Ascorbic Acid Method) ตามมาตรฐาน APHA 4500-P E โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อหาปริมาณฟอสเฟตละลายน้ำ ที่เกิดจากการละลายหินฟอสเฟตโดยเชื้อรา ตัวอย่างน้ำเลี้ยงเชื้อหรือสารละลายถูกกรองผ่านกระดาษกรอง $0.45 \mu m$ แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมกรดซัลฟิวริก-แอมโมเนียมโมลิบดีต-แอนติโมนีทาร์เทรต และแอสคอร์บิกแอซิด เพื่อให้เกิดสีฟ้า จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อวัดปริมาณฟอสเฟตที่ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการละลายหินฟอสเฟต และวัดระดับพีเอชของระบบทดลอง ผลการทดลองนี้ใช้ในการคัดเลือกเชื้อราที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการละลายหินฟอสเฟตเพื่อใช้ในขั้นตอนการทดลองต่อไป

การศึกษาปริมาณน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งโดยนำน้ำแป้งขนมจีนที่ได้จากขั้นตอนลวกเส้นขนมจีน นำมาเตรียมสูตรปุ๋ยหมักจำนวน 6 สูตร ในอัตราร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 (โดยน้ำหนักของปุ๋ย) แล้วนำมาผสมกับวัตถุดิบต่าง ๆ ดังแสดงใน Table 1 แล้วเติมเชื้อราที่มีความเข้มข้น 0.5 McFaland ที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟตที่ดีที่สุดจำนวน ร้อยละ 1.5 ปริมาตรโดยปริมาตร (โดยผ่านการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDB และบ่มเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง) จากนั้นเติมหินฟอสเฟตร้อยละ 5 น้ำหนักโดยน้ำหนัก จากนั้นทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติกแล้วทำการผนึกปิดให้สนิท ทำการสุ่มตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน เพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลัก ประกอบด้วย ฟอสฟอรัส โดยวิธี โมลิบดีนัมบลู-แอสคอร์บิก ตามมาตรฐาน APHA 4500-P E ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด วิเคราะห์โดยวิธี Kjeldahl ตามมาตรฐาน APHA 4500-NH₃ B, C และปริมาณโพแทสเซียม วิเคราะห์โดยวิธี Flame Photometry ตามมาตรฐาน APHA 3500-K B จากนั้นบันทึกการเปลี่ยนแปลงของพีเอชและอุณหภูมิในระหว่างการหมัก ผลการทดลองที่ได้จะใช้ในการคัดเลือกสูตรปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารหลักที่ดีที่สุดจำนวน 2 สูตร และคัดเลือกสูตรปุ๋ยที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงสุดจำนวน 1 สูตร เพื่อนำไปศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยที่เพิ่มขึ้นในสภาพปลอดเชื้อต่อไป

Table 1 Formulations of compost using cow dung as the primary substrate

Raw Materials	Percentage
Cattle manure	60
Oil palm residues	25
Fermented soybean meal	8
Dolomite	2
Rubberwood ash	5

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักระหว่างการเก็บรักษา

ทำการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่มีปริมาณธาตุอาหารหลักสูงสุดจำนวน 1 สูตร ที่ผ่านการหมัก 14 วัน (โดยคัดเลือกจากช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์) ทำการเก็บในกระสอบที่สามารถมีอากาศถ่ายเทได้ ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 15 วัน

การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทุกชุดการทดลองถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตามแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) เพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างทรีทเมนต์ จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS (IBM) รุ่น IBM SPSS Statistics Version 26 (IBM Corp., 2019)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟตของเชื้อ *Aspergillus niger* TISTR 3254 และ *Penicillium notatum* TISTR 3560

การศึกษาประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟตของเชื้อรา *A. niger* TISTR 3254, *P. notatum* TISTR 3560 และชุดผสมระหว่าง *A. niger* กับ *P. notatum* ในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าเชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 มีผลทำให้ระดับฟอสฟอรัสในอาหารเลี้ยงเชื้อเปลี่ยนแปลงมากที่สุด จากระดับฟอสฟอรัสเริ่มต้นการหมักเท่ากับ 7.03 ลดลงเหลือ 5.81 ในวันสุดท้ายของการหมัก ในขณะที่เชื้อ *P. notatum* TISTR 3560 ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงระดับฟอสฟอรัสน้อยสุด โดยเริ่มต้นการหมักมีค่าฟอสฟอรัสเท่ากับ 7.04 และวันสุดท้ายของการหมักได้ค่าเท่ากับ 6.53 ดังแสดงใน Figure 1 สำหรับเชื้อ *A. niger* TISTR 3254 ได้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับ 65.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และเชื้อ *P. notatum* TISTR 3560 มีความสามารถในการละลายหินฟอสเฟตต่ำที่สุด โดยได้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับ 14.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 8 ของการหมัก ดังแสดงใน Table 2 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 เป็นจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟตได้ดีกว่าเชื้อ *A. niger* TISTR 3254 และ *P. notatum* TISTR 3560 จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตปุ๋ยหมักจากมูลโคผสมหินฟอสเฟต

ปริมาณน้ำแ่ียงขนมจีนเหลือทิ้งที่เหมาะสม

ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ ความชื้นเริ่มต้นในกองปุ๋ยหมักเท่ากับทุกทรีทเมนต์ที่ระดับ 60% (wet basis) เพื่อควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ เนื่องจากความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการหายใจ การเจริญ และการสร้างเอนไซม์ของเชื้อราทั้ง 2 สายพันธุ์ ซึ่งการศึกษานี้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบปริมาณน้ำแ่ียงขนมจีนเหลือทิ้งในการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมัก เท่ากับร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก แล้วทำการเติมหินฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก และเชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 โดยปรับความเข้มข้นของเชื้อราในแต่ละชนิดให้เทียบเท่า 0.5 McFarland standard จากนั้นนำเชื้อราทั้งสองชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนปริมาตร 1:1 และนำเชื้อผสมที่ได้ไปใช้เป็นหัวเชื้อในระบบทดลอง โดยมีความเข้มข้นสุดท้าย ร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อปริมาตร (1.5% v/v) ทำการหมักปุ๋ยเป็นเวลา 14 วัน ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

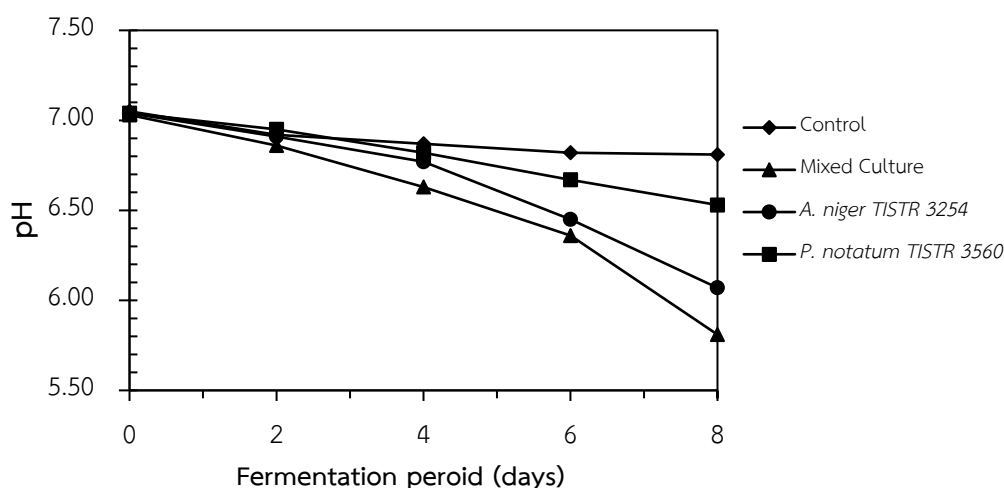


Figure 1 Changes in the pH levels of culture medium during 8-day period at 30°C

Table 2 Phosphorus concentration in the culture medium over an 8-day fermentation period

Microbial species	Phosphorus content (mg/L)				
	Day 0	Day 2	Day 4	Day 6	Day 8
Control	<0.01	<0.01	0.02 ^d ±0.01	0.27 ^d ±0.02	0.04 ^d ±0.02
<i>A. niger</i> TISTR 3254 plus <i>P. notatum</i> TISTR 3560	<0.01	26.04 ^a ±0.41	47.77 ^a ±0.28	68.66 ^a ±2.30	85.43 ^a ±0.49
<i>A. niger</i> TISTR 3254	<0.01	15.88 ^b ±0.78	28.89 ^b ±0.30	42.16 ^b ±0.41	65.03 ^b ±0.67
<i>P. notatum</i> TISTR 3560	<0.01	6.36 ^c ±0.12	10.25 ^c ±0.15	15.19 ^c ±0.16	14.20 ^c ±1.02

Means with the same letter in the column are not significantly different ($P>0.05$)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ยหมัก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการหมักปุ๋ยหมักจากมูลโคผสมหินฟอสเฟตเพื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสโดยใช้เชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 ซึ่งศึกษาในส่วนของปริมาณน้ำแ่งขมจิ้นเหลือทิ้งที่ใช้ทดแทนปริมาณปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่เหมาะสมในระดับต่าง ๆ เป็นเวลา 14 วัน พบว่าอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 6-10 โดยสูงสุดในวันที่ 10 (Figure 2) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 35-40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ซึ่งจะอยู่ในช่วง 31-32 องศาเซลเซียส ในวันที่ 14 ของการหมัก การที่ผลการศึกษากลายเป็นเช่นนี้ อาจเนื่องจากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ใช้สารอาหารที่มีอยู่และปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์เริ่มลดลง (Tian et al., 2024) กับระยะที่ปุ๋ยหมักเริ่มเข้าสู่สภาวะสมบูรณ์ ซึ่งเป็นช่วงที่สารอาหารที่ละลายได้เริ่มคงที่ และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากหินฟอสเฟตอาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Elias et al., 2024) จากผลการวิจัยสะท้อนว่ากระบวนการหมักอยู่ในช่วง เมโซฟิลิกเป็นหลัก และไม่ได้เข้าสู่ช่วงเทอร์โมฟิลิกอย่างเต็มที่ อาจเนื่องมาจากขนาดกองทดลองมีขนาดเล็ก หรืออาจมีการสูญเสียความร้อนสูง ส่งผลให้ไม่เกิดการสะสมอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงกลางการหมักแสดงถึงกิจกรรมจุลินทรีย์ที่เข้มข้น ซึ่งสอดคล้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์และการปลดปล่อยธาตุอาหารในช่วงต้นของกระบวนการหมัก (Tian et al., 2024; Elias et al., 2024)

การเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชในระหว่างการหมักปุ๋ยหมัก

การเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชของปุ๋ยแต่ละสูตร มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทุกสูตร คือ ค่าระดับพีเอชจะลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ระดับพีเอชเริ่มต้นของการหมักปุ๋ยหมัก สูตรปุ๋ยที่มีระดับพีเอชสูงที่สุด คือ สูตรที่มีการเติมน้ำแ่งขมจิ้นเหลือทิ้งทดแทนปริมาณปุ๋ยอินทรีย์น้ำร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 9.08 ส่วนปุ๋ยที่มีระดับพีเอชต่ำที่สุดคือ สูตรที่มีการเติมน้ำแ่งขมจิ้นเหลือทิ้งร้อยละ 0 มีค่าเท่ากับ 8.56 เมื่อสิ้นสุดของการหมักปุ๋ยหมักที่มีระดับพีเอชที่สูงที่สุดคือ สูตรที่มีการเติมน้ำแ่งขมจิ้นเหลือทิ้งร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 8.53 และสูตรที่มีระดับพีเอชต่ำที่สุด คือ สูตรที่เติมน้ำแ่งขมจิ้นเหลือทิ้งทดแทนปริมาณปุ๋ยอินทรีย์น้ำร้อยละ 0 มีค่าเท่ากับ 7.90 ระดับ พีเอชที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า เกิดการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และสร้าง

กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ออกมา ดังแสดงใน Figure 2 ระดับพีเอชของปุ๋ยหมักแต่ละสูตรมีค่าพีเอชในช่วง 5.5-8.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และตรงตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร ปี พ.ศ. 2548

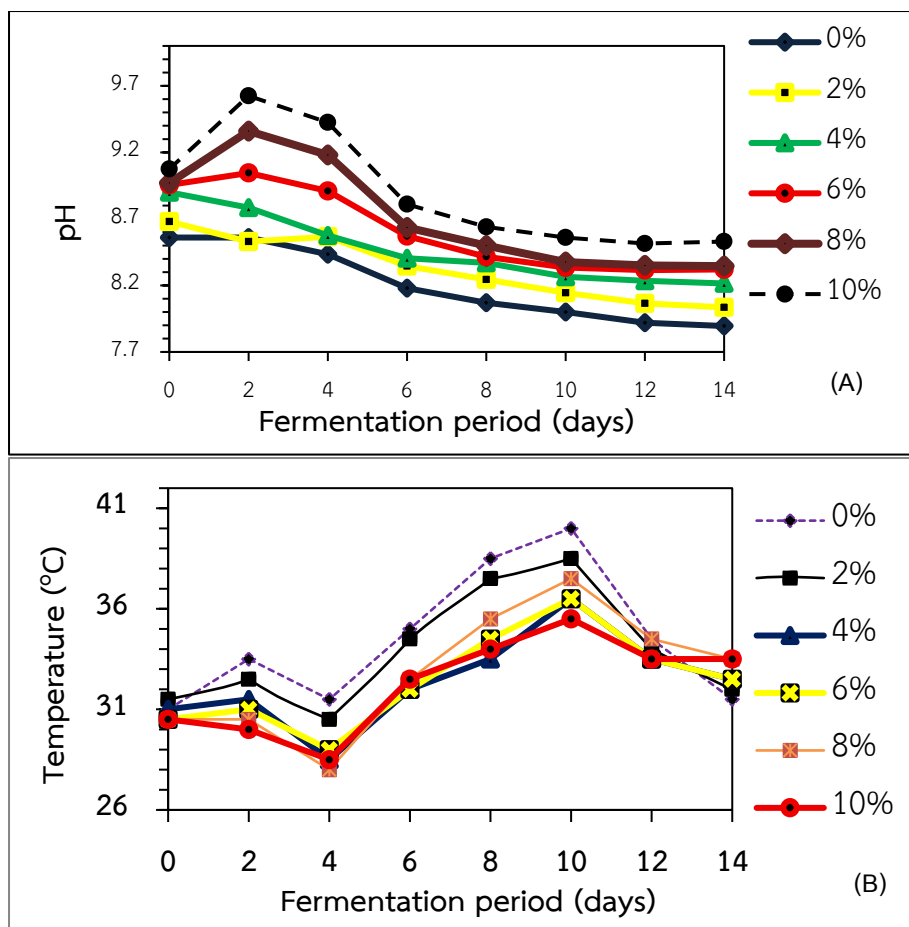


Figure 2 Changes in (A) temperature and (B) pH during the 14-day fermentation of compost produced from cattle manure with the addition of rice noodle wastewater under different conditions

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในระหว่างการหมักปุ๋ยหมัก

จากการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสของปุ๋ยหมักในระยะเริ่มต้นของกระบวนการหมัก พบว่าปุ๋ยหมักทุกสูตรมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 0.27–0.41 โดยมีสาเหตุจากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการหมักคือมูลโค ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.50 ส่งผลให้ปุ๋ยหมักในวันแรกของกระบวนการหมักมีค่าฟอสฟอรัสในระดับต่ำ ดังแสดงใน Table 3 จากผลการวิจัยพบว่าสูตรปุ๋ยที่ไม่ได้เติมน้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 0) มีปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 0.41 หลังจากหมักเป็นเวลา 14 วัน สูตรปุ๋ยที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุดคือสูตรที่มีการเติมน้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราร้อยละ 2 ซึ่งมีค่าฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.93 โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่สูตรที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำที่สุดคือสูตรที่เติมน้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราร้อยละ 10 ซึ่งมีค่าฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.53 ผลการศึกษาพบว่า การใช้น้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ น้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์โบไฮเดรต น้ำตาลรีดิวซ์ และกรดอินทรีย์บางชนิด รวมถึงธาตุอาหารในรูปที่ละลายน้ำได้ เช่น N และ K ซึ่งสามารถเป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ในกองปุ๋ย โดยเฉพาะเชื้อรา *A. niger* และ *P. notatum* ที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ย่อยแป้งและน้ำตาล ทำให้เกิดการสร้างกรดอินทรีย์ (เช่น citric acid และ gluconic acid) ในระหว่างการหมัก กรดอินทรีย์เหล่านี้จะลดค่า pH รอบอนุภาคของหินฟอสเฟต ส่งผลให้ธาตุฟอสฟอรัสที่จับอยู่กับแคลเซียมในรูป $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ถูกละลายออกมาเป็นฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้มากขึ้น ($\text{Soluble PO}_4^{3-}\text{-P}$) นอกจากนี้ การที่ น้ำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีค่า COD และคาร์บอน

สูงยังช่วยกระตุ้นการเจริญและการหายใจของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในวัตถุดิบและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากสารประกอบอินทรีย์ร่วมด้วย ส่งผลให้การใช้น้ำแ่่งขมจิ้นเหลือทิ้งในระดับที่เหมาะสมไม่เพียงเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ แต่ยังช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในระบบหมัก ซึ่งการหมักปุ๋ยที่เติมน้ำแ่่งขมจิ้นเหลือทิ้งในอัตราที่เหมาะสม ในอัตราร้อยละ 2 ส่งผลให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($P < 0.05$) ภายในระยะเวลา 14 วัน ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตปุ๋ยหมักให้มีธาตุอาหารสูงขึ้นได้

Table 3 Phosphorus content in compost supplemented with varying levels of rice noodle wastewater during a 14-day fermentation period

Level of rice noodle wastewater (%)	Phosphorus content (%)		
	Day 0	Day 7	Day 14
0	0.41 ^a ±0.066	0.41 ^a ±0.001	0.80 ^b ±0.001
2	0.40 ^a ±0.070	0.40 ^a ±0.001	0.93 ^a ±0.005
4	0.31 ^{ab} ±0.016	0.36 ^b ±0.001	0.59 ^c ±0.002
6	0.31 ^{ab} ±0.016	0.33 ^b ±0.001	0.57 ^c ±0.001
8	0.29 ^{ab} ±0.003	0.34 ^c ±0.002	0.54 ^c ±0.001
10	0.27 ^b ±0.004	0.30 ^d ±0.001	0.53 ^c ±0.001

Means with the same letter in the row are not significantly different ($P > 0.05$)

ปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการผลิตปุ๋ยหมักโดยใช้มูลวัวร่วมน้ำแ่่งขมจิ้นเหลือทิ้งในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลต่อสมบัติของปุ๋ยหมักที่ได้ โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ตามที่กรมวิชาการเกษตรกำหนด ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีปริมาณสูงสุดในปุ๋ยหมักจำนวน 2 สูตร ร้อยละ 0 และ 2 ที่ผ่านการหมักเป็นเวลา 14 วัน พบว่ามีปริมาณไนโตรเจน เท่ากับ 1.12 และ 1.06 % และโพแทสเซียมเท่ากับ ร้อยละ 0.62 และ 0.59 % ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 4 อย่างไรก็ตาม ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่าง 2 ทรีทเมนต์ที่ศึกษา ($P > 0.05$) และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมของปุ๋ยหมักแต่ละสูตร พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2553) (Department of Agriculture, 2010) ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 และโพแทสเซียมไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก การใช้วัตถุดิบอินทรีย์ท้องถิ่นร่วมกับของเสียจากกระบวนการผลิตอาหาร เช่น น้ำแ่่งขมจิ้น สามารถเพิ่มคุณภาพของปุ๋ยหมักให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของประเทศได้อย่างมีนัยสำคัญ และเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในภาคเกษตรกรรม

Table 4 Nitrogen and potassium content in compost fermented for 14-day

Compost with the addition of rice noodle wastewater (%)	Nitrogen content (%)	Potassium content (%)
0	1.12 ^a ± 0.025	0.62 ^a ± 0.013
2	1.06 ^a ± 0.019	0.59 ^a ± 0.015

Means with the same letter in the column are not significantly different ($P > 0.05$)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 15 วัน

การศึกษการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก ระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 15 วัน ภายหลังกการหมัก เนื่องจากการเก็บรักษาที่ 15 วัน เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยหมักภายหลังสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายเชิงจุลินทรีย์หลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sundberg, et al. (2013) จากนั้นทำการเก็บรักษาปุ๋ยหมักที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงสุดจำนวน 1 สูตร คือ สูตรที่มีปริมาณน้ำแ่่งขมจิ้นเหลือ

ทั้งหมดแทนปริมาณปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่ร้อยละ 2 โดยจะเก็บในกระสอบที่มีอากาศถ่ายเทได้ พบว่า มีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.81 ปริมาณไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 1.53 จะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุอาหารหลักจะลดลง โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้นั้นด้วยการเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักก่อนและหลังการเก็บรักษาปุ๋ยหมักเป็นเวลา 15 วัน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนลดลงจากร้อยละ 1.65 ± 0.05 เป็นร้อยละ 1.53 ± 0.04 และปริมาณฟอสฟอรัสลดลงจากร้อยละ 0.85 ± 0.03 เป็นร้อยละ 0.83 ± 0.02 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเก็บรักษา ($P > 0.05$) ซึ่งการเก็บรักษาปุ๋ยหมักเป็นเวลา 15 วันส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารหลักลดลงเพียงเล็กน้อย และยังคงมีความคงตัวทางเคมีในระดับที่เหมาะสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของปุ๋ยหมัก พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตรซึ่งกำหนดไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 และฟอสฟอรัสไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักดังแสดงใน Figure 3

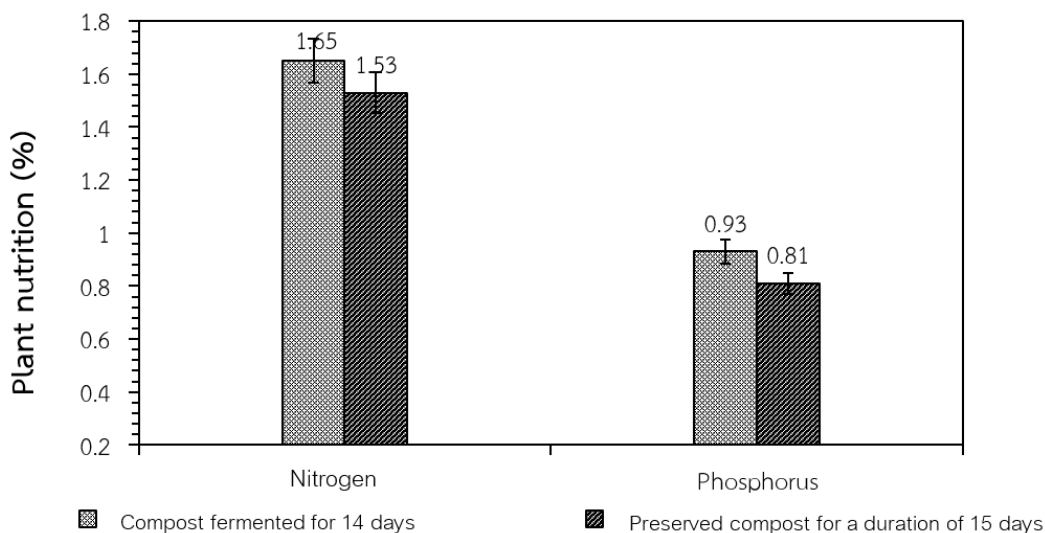


Figure 3 Comparison of nitrogen and phosphorus content in compost stored for 15 days

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการหมักปุ๋ยหมักแบบปลอดเชื้อ

การใช้วัตถุดิบที่ปลอดเชื้อโดยด้วยการฆ่าเชื้อวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเวลา 15 นาที และมีการเติมจากเชื้อผสม *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 จุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบความสามารถของตัวเชื้อผสมในการละลายฟอสเฟตเปรียบเทียบการหมักแบบธรรมชาติที่ไม่มีการฆ่าเชื้อวัตถุดิบ หมักเป็นเวลา 14 วัน พบว่าอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 6-8 โดยสูงสุดในวันที่ 8 (Figure 4) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 35-37.5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ซึ่งจะอยู่ในช่วง 31-32 องศาเซลเซียส ในวันที่ 14 ของการหมัก และมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศภายนอก จึงสามารถสรุปได้ว่าปุ๋ยหมักเข้าสู่ระยะสุก (maturity phase) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ยหมักมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิของปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-4 วันแรก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 33-44 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ซึ่งจะอยู่ในช่วง 31-33 องศาเซลเซียส (Dahunsi and Ogunwole, 2021)

ผลจากการวิเคราะห์ระดับพีเอชของการเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชในระหว่างการหมักปุ๋ยหมักชีวภาพแบบปลอดเชื้อของสูตรที่มีการเติมน้ำแอมโมเนียเหลือทิ้งร้อยละ 2 มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8.56 เมื่อสิ้นสุดของการหมักระดับพีเอชมีค่าเท่ากับ 8.10 พีเอชที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าเกิดการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และสร้างกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ออกมา ดังแสดงใน Figure 4 สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงของระดับพีเอชของปุ๋ยหมัก ซึ่งมีค่าพีเอชในช่วง 5.5-8.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และตรงตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร ปี พ.ศ. 2548

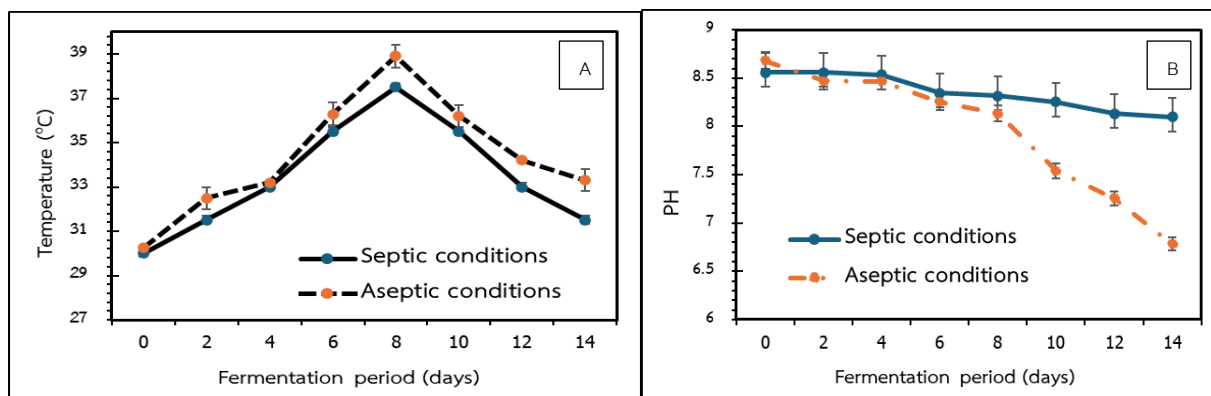


Figure 4 Changes in (A) temperature and (B) pH during the 14-day fermentation of compost from cow manure under aseptic conditions

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสของปุ๋ยหมักแบบปลอดเชื้อและไม่ปลอดเชื้อ พบว่าเมื่อเริ่มต้นการหมักจะมีปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 0.40 และเมื่อทำการหมักเป็นเวลา 14 วัน พบว่าปุ๋ยที่มีการเติมปริมาณน้ำแ่่งขมจิ้นเหลือทิ้งร้อยละ 2 มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.78 ดังแสดงใน Figure 5 และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรปุ๋ยที่หมักโดยไม่ปลอดเชื้อปริมาณฟอสฟอรัสของวันที่ 14 มีค่าฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.93 แสดงให้เห็นว่าเชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 กับ *P. notatum* TISTR 3560 สามารถละลายหินฟอสเฟตได้แต่จะมีปริมาณฟอสฟอรัสน้อยกว่าเพราะในปุ๋ยหมักที่มีการหมักแบบธรรมชาติ จะมีจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ช่วยย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในระหว่างการหมักมีผลทำให้มีปริมาณธาตุอาหารหลักมากกว่าการหมักแบบปลอดเชื้อ ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก พบว่าปริมาณน้ำแ่่งขมจิ้นเหลือทิ้งร้อยละ 2 มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 1.41 และปริมาณโพแทสเซียมเท่ากับร้อยละ 2.46 จะเห็นว่าปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมจะน้อยกว่าการหมักแบบธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าการหมักปุ๋ยหมักแบบปลอดเชื้อ จะทำให้ธาตุอาหารหลักลดลงเพราะไม่มีจุลินทรีย์จากธรรมชาติมาช่วยในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมาได้น้อยกว่าการหมักปุ๋ยตามธรรมชาติ ดังแสดงใน Figure 5

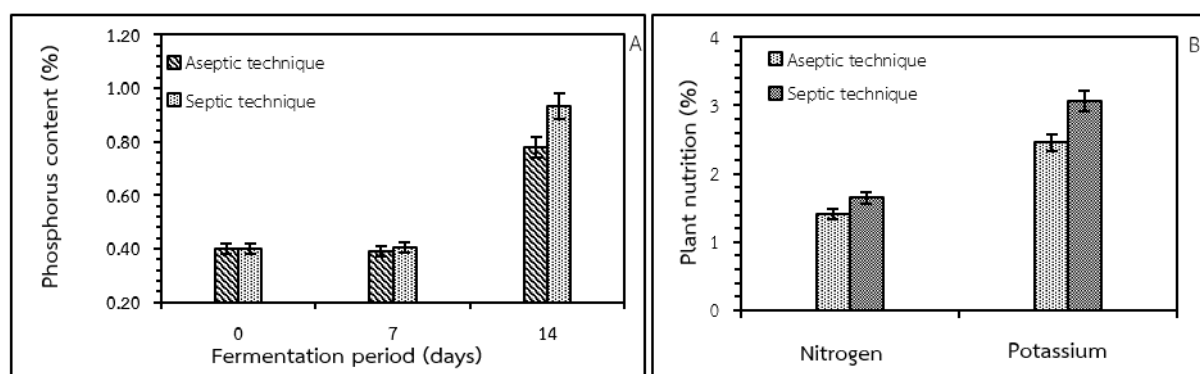


Figure 5 Phosphorus content (A) and nitrogen and potassium contents (B) in compost during a 14-day fermentation under aseptic and non-aseptic conditions

สรุปผลการศึกษา

จากงานวิจัยเรื่องศักยภาพของเชื้อรา *A. niger* TISTR 3254 และ *P. notatum* TISTR 3560 ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จากน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งเพื่อการผลิตปุ๋ยหมัก พบว่าเชื้อผสมระหว่าง *A. niger* TISTR 3254 และ *P. notatum* TISTR 3560 มีประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟตดีที่สุด โดยให้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสสูงสุดที่ 85.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูตรปุ๋ยหมักที่เหมาะสมที่สุด คือ การเติมน้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งร้อยละ 2 และหินฟอสเฟตร้อยละ 5 ร่วมกับเชื้อราผสมร้อยละ 1.5 ให้ปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.93 ไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 1.65 โพแทสเซียมเท่ากับร้อยละ 3.06 และค่าพีเอชเท่ากับ 8.04 ส่วนการเก็บรักษาปุ๋ยหมักในสภาพอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 วัน มีผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเล็กน้อยเหลือเท่ากับร้อยละ 0.81 และไนโตรเจนลดลงเหลือเท่ากับร้อยละ 1.53 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร และการใช้น้ำแป้งขนมจีนเหลือทิ้งช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มศักยภาพการนำของเสียมาใช้ประโยชน์ ผลการวิจัยมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัตถุดิบและจุลินทรีย์สำหรับผลิตปุ๋ยหมักที่มีประสิทธิภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดต้นทุนทางเศรษฐกิจในอนาคต

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

การมีส่วนร่วมในการเขียนบทความของผู้เขียน

ความคิดริเริ่มงานวิจัย สมมุติฐาน การวางแผนการวิจัย การทบทวนวรรณกรรม การออกแบบงานวิจัย การดำเนินงานวิจัย รวบรวมข้อมูลงานวิจัย การควบคุมคุณภาพของข้อมูล การวิเคราะห์เชิงสถิติ การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น และการเรียบเรียงบทความ: ศรีอุบล ทองประดิษฐ์, อุดลย์สมาน สุขแก้ว. ส่วนร่วมการทบทวนวรรณกรรม วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก การให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิจัย ห้องปฏิบัติการ: ศรีอุบล ทองประดิษฐ์, อุดลย์สมาน สุขแก้ว, ณรงค์ชัย ชูพล.

เอกสารอ้างอิง

- Aliyat, F. Z., Maldani, M., Guilli, M. E., Nassiri, L., & Ibjibijen, J. (2022). Phosphate-solubilizing bacteria isolated from phosphate solid sludge and their ability to solubilize three inorganic phosphate forms: calcium, iron, and aluminum phosphates. *Microorganisms*, 10(5), 980–992. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050980>.
- Booali, S., Zoufan, P., & Bavani, M. R. Z. (2024). Effect of biofertilizer containing *Thiobacillus* bacteria along with different levels of chemical sulfur fertilizer on growth response and photochemical efficiency of small radish plants (*Raphanus sativus* L. var. *shushtari*) under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 327(1), 112835. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112835>.
- Dahunsi, S. O., & Ogunwole, O. J. (2021). Biofertilizer production systems: Industrial insights. In A. Rakshit, V. S. Meena, M. Parihar, H. B. Singh, & A. K. Singh (Eds.), *Biofertilizers: Advances in Bio-inoculants*, pp. 21–30. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00001-4>.
- Department of Agriculture. (2010). *Organic fertilizer standard (B.E. 2553)*. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand. (in Thai).
- Ding, B., Cao, H., Bai, Y., Guo, S., Zhang, J., He, Z., Wang, B., Jia, Z., & Liu, H. (2024). Effect of biofertilizer addition on soil physicochemical properties, biological properties, and cotton yield under water irrigation with different salinity levels in Xinjiang, China. *Field Crops Research*, 308(1), 109300. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109300>.
- Elias, A. M., Gargalo, C. L., Farinas, C. S., & Gernaey, K. V. (2024). Production of phosphate biofertilizers as a booster for the techno-economic and environmental performance of a first-generation sugarcane ethanol and sugar biorefinery. *Journal of Cleaner Production*, 471(1), 143400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143400>.
- Ferrari, P. F., Bufalini, C., Campardelli, R., Brondolo, A., Ercole, E., Palombo, D., & Perego, P. (2024). Stabilization of microbial strains in long-lasting double emulsions as a new strategy for liquid biofertilizer formulation. *Food and Bioproducts Processing*, 148(1), 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.10.020>.
- Fernández-Delgado, M., del Amo-Mateos, E., Lucas, S., García-Cubero, M. T., & Coca, M. (2022). Liquid fertilizer production from organic waste by conventional and microwave-assisted extraction technologies: Techno-economic and environmental assessment. *Science of The Total Environment*, 806(4), 150904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150904>.
- IBM Corp. (2019). *IBM SPSS Statistics for Windows (Version 26.0)*. Retrieved from: <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Liao, Z., Boubakri, H., Chen, B., Farooq, M., Lai, Z., Kou, H., & Fan, J. (2025). Biofertilizers as an eco-friendly approach to combat drought stress in plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 64(1), 103510. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103510>.

- Mesa, A. P., Grattz, P. A. C., Vargas, J. J. V., Ríos, L. A., Echeverri, D. O., & Parra, A. M. M. (2025). Feasibility of nitrogen and phosphorus removal from treated wastewater using microalgae and potential microalgae use as biofertilizer. **Journal of Water Process Engineering**, 70(1), 107023. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107023>.
- Nawaz, T., Saud, S., Gu, L., Khan, I., Fahad, S., & Zhou, R. (2024). Cyanobacteria: Harnessing the power of microorganisms for plant growth promotion, stress alleviation, and phytoremediation in the era of sustainable agriculture. **Plant Stress**, 11(1), 100399. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100399>.
- Ogbo, F. C. (2010). Conversion of cassava wastes for biofertilizer production using phosphate-solubilizing fungi. **Bioresource Technology**, 101(11), 4120–4124. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.057>.
- Sundberg, C., Smårs, S., & Jönsson, H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. **Bioresource Technology**, 95(2), 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.016>.
- Thongpradistha, S., Muadsri, T., & Sukkaew, A. (2020). The effect of organic fertilizer formula from Sajor-caju mushroom (*Pleurotus sajor-caju*) waste on macronutrients. **Recent Science and Technology**, 12(1), 61–71. (in Thai).
- Tian, Y., Liu, Y., Yue, L., Zhao, X., Zhou, Q., Uwaremwe, C., Wang, Y., Chen, G., Sha, Y., Zhang, Y., & Wang, R. (2024). Multi-omics analysis reveals the effects of three application modes of plant growth promoting microbes biofertilizer on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth under alkaline loess conditions. **Microbiological Research**, 287(1), 127855. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127855>.