



Optimization of Bio-Fermented Liquid Fertilizer Production from *Leucaena leucocephala* Leaves

Wittawat Phonjaroen^{1*}, Narong Kotchabhakdi²,

Paiboon Muymas³ & Punchavee Sombutsiri⁴

^{1*,2,3,4} Lampang Rajabhat University

*Corresponding author: wittawat_p@lpru.ac.th

Received
28/12/2025

Reviewed
09/04/2026

Revised
03/08/2026

Accepted
03/08/2026

Abstract

This study aimed to determine the optimal conditions for producing bio-fermented liquid fertilizer from *Leucaena leucocephala* leaves by evaluating four factors: leaf quantity, molasses quantity, microbial inoculant type, and fermentation duration. The experiment was conducted using a Randomized Complete Block Design (RCBD), with three replications for each treatment. The results showed that the optimal conditions consisted of 10 kg of *L. leucocephala* leaves, 6 kg of molasses, Effective Microorganisms (EM) as the microbial inoculant, and a fermentation period of 4 weeks. These conditions provided suitable levels of major nutrients, particularly total nitrogen, phosphorus, and potassium. The study also found that fermentation beyond 8 weeks led to excessive potassium accumulation, which may cause phytotoxic effects if the liquid fertilizer is applied without proper dilution. In addition, Effective Microorganisms (EM) maintained relatively stable pH throughout the fermentation period, indicating its suitability for controlling the quality of the fermented liquid fertilizer. The resulting product could reduce production costs by more than 70% compared with chemical fertilizers. These findings provide fundamental information for producing bio-fermented liquid fertilizer from local resources and support sustainable and environmentally friendly agriculture.

Keywords: Bio-fermented liquid fertilizer; *Leucaena* leaves; microorganisms; organic fertilizer; potassium



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน

วิวัฒน์ ผลเจริญ^{1*}, ณรงค์ คชภักดี², ไพบุลย์ หมูย์มาต³และพูนฉวี สมบัติศิริ⁴

^{1*,2,3,4}มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

*ผู้รับผิดชอบ: wittawat_p@lpru.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน (*Leucaena leucocephala*) โดยพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณใบกระถิน ปริมาณกากน้ำตาล ชนิดของจุลินทรีย์ และระยะเวลาการหมัก การทดลองใช้รูปแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) โดยทุกการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือการใช้ใบกระถิน 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 6 กิโลกรัม หัวเชื้อจุลินทรีย์ Effective Microorganisms (EM) และระยะเวลาการหมัก 4 สัปดาห์ ซึ่งให้ปริมาณธาตุอาหารหลักในระดับเหมาะสม โดยเฉพาะไนโตรเจนรวม ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม การศึกษายังพบว่า การหมักเกิน 8 สัปดาห์ทำให้โพแทสเซียมสะสมในระดับสูง ซึ่งอาจเป็นพิษต่อพืชหากนำไปใช้โดยไม่มีการเจือจางที่เหมาะสม ขณะที่ Effective Microorganisms (EM) แสดงความเสถียรของ pH ตลอดระยะเวลาการหมัก สะท้อนถึงความเหมาะสมของหัวเชื้อในการควบคุมคุณภาพน้ำหมัก น้ำหมักที่ได้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่า 70% เมื่อเทียบกับปุ๋ยเคมี ผลการวิจัยนี้ให้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากทรัพยากรท้องถิ่น เพื่อส่งเสริมการเกษตรที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: น้ำหมักชีวภาพ; ใบกระถิน; จุลินทรีย์; ปุ๋ยอินทรีย์; โพแทสเซียม

บทนำ

การพึ่งพาปุ๋ยเคมีสังเคราะห์หรือปุ๋ยอินทรีย์ในปริมาณสูงเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อระบบนิเวศและความยั่งยืนทางการเกษตร ทั้งในด้านการเสื่อมโทรมของดิน โครงสร้างดินแข็งตัว ความหลากหลายทางชีวภาพในดินลดลง และมลพิษทางน้ำจากการชะล้างธาตุอาหาร (Kumawat et al., 2021; Savci, 2012) นอกจากนี้ การผลิตปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ยังใช้พลังงานจากฟอสซิลจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Bai et al., 2018; González-García et al., 2013; Van Rijn et al., 2012)

น้ำหมักชีวภาพจึงได้รับความสนใจในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืนต่อการลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในท้องถิ่น มีต้นทุนต่ำ และมีผลเชิงบวกต่อสุขภาพดิน โดยช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ปรับปรุงโครงสร้างดิน และสนับสนุนความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน (Doan et al., 2015; Fahad et al., 2015; Martínez-Blanco et al., 2013; Phibunwatthanawong & Riddech, 2019) งานวิจัยที่ผ่านมาในประเทศและต่างประเทศได้พัฒนาน้ำหมักชีวภาพจากวัสดุอินทรีย์หลายชนิด เช่น เศษพืช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เน้นการเพิ่มธาตุอาหารพืช การปรับปรุงคุณภาพดิน และการลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่มุ่งศึกษาการใช้ใบกระถินเป็นวัตถุดิบหลัก



โดยพิจารณาร่วมกันทั้งปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณแหล่งคาร์บอน ชนิดจุลินทรีย์ และระยะเวลาการหมัก ยังมีอยู่อย่างจำกัด

ใบกระถิน (*Leucaena leucocephala*) เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตน้ำหมักชีวภาพ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะโปรตีนประมาณ 20–30% ของน้ำหนักแห้ง และไนโตรเจนประมาณ 3–5% ของน้ำหนักแห้ง รวมทั้งมีธาตุอาหารรองและจุลินทรีย์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และธาตุเหล็ก นอกจากนี้ กระถินเป็นพืชตระกูลถั่วที่กระจายพันธุ์อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่หลากหลาย ตัดแต่งกิ่งได้หลายครั้งต่อปี และมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนผ่านปมรากร่วมกับแบคทีเรียไรโซเบียม (*Rhizobium*) จึงเป็นแหล่งวัตถุดิบท้องถิ่นที่มีความยั่งยืนและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน

อย่างไรก็ตาม ใบกระถินมีข้อจำกัดสำคัญคือสารไมโมซิน (mimosine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์โปรตีนและอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ได้ โดยส่งผลกระทบต่อสังเคราะห์โปรตีนและการแบ่งเซลล์ งานวิจัยของ Chanchay and Poosaran (2009) แสดงให้เห็นว่า กระบวนการหมักสามารถลดปริมาณสารไมโมซินได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายสารดังกล่าวผ่านกระบวนการเดออะมิเนชัน (deamination) และดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ส่งผลให้ใบกระถินที่ผ่านการหมักมีความปลอดภัยและเหมาะสมยิ่งขึ้นสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยชีวภาพ

แม้ใบกระถินจะมีศักยภาพสูง แต่น้ำหมักชีวภาพที่ผลิตตามแนวทางดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพและเสถียรภาพ โดยเฉพาะความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ต่ำและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้การกำหนดอัตราการใช้ทำได้ยากในระบบเกษตรที่ต้องการความแม่นยำ อีกทั้งยังอาจเพิ่มต้นทุนด้านการขนส่งและการจัดเก็บเมื่อต้องใช้ในปริมาณมาก (Phibunwatthanawong & Riddech, 2019) นอกจากนี้ การควบคุมค่า pH ยังเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจาก pH ที่ต่ำเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อความพร้อมใช้ของธาตุอาหารบางชนิด เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม ขณะที่ pH สูงเกินไปอาจลดความพร้อมใช้ของจุลินทรีย์ เช่น เหล็ก สังกะสี และแมงกานีส (Babuska et al., 2002) ดังนั้น การควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพ

จากข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน โดยพิจารณาปัจจัยหลัก 4 ประการ ได้แก่ ปริมาณใบกระถิน ปริมาณกากน้ำตาล ชนิดของจุลินทรีย์ และระยะเวลาการหมัก พร้อมทั้งประเมินผลต่อปริมาณธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง จุลธาตุ ค่า pH และค่า EC เพื่อพัฒนาสูตรน้ำหมักชีวภาพจากทรัพยากรท้องถิ่นที่มีคุณภาพ มีเสถียรภาพ และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน ได้แก่ ระยะเวลาการหมัก ปริมาณกากน้ำตาล ปริมาณใบกระถิน และชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก



วัสดุและวิธีการ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) โดยแบ่งการทดลองทั้งหมดเป็น 4 ขั้นตอน และทุกขั้นตอนมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ยืนยันผลการทดลองที่ถูกต้องและมีนัยสำคัญทางสถิติ

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1: การศึกษาชนิดหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน โดยใช้สูตรพื้นฐานประกอบด้วยใบกระถินบดปริมาณ 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 4 กิโลกรัม และน้ำ 100 ลิตร ทำการทดสอบหัวเชื้อจุลินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ นมเปรี้ยว (*Lactobacillus* sp.), อีเอ็ม (Effective Microorganisms (EM)), สารพด.2 (LDD Microbial Activator No.2 (PD2)) จุลินทรีย์ผงดับกลิ่น (Deodorizing microbial powder (DMP)) และหัวเชื้อน้ำหมักกระถิน (*Leucaena* fermented liquid inoculant (LFI)) โดยใช้ปริมาณหัวเชื้อชนิดละ 500 มิลลิลิตร ยกเว้น สารพด.2 (LDD Microbial Activator No.2 (PD2)) ใช้ปริมาณ 500 มิลลิกรัม กระบวนการหมักดำเนินการเป็นเวลา 4-5 สัปดาห์ (28-35 วัน) โดยคนกวนน้ำหมักทุก 2-3 วัน เพื่อให้เกิดการหมักอย่างสม่ำเสมอทั่วถึง

ขั้นตอนที่ 2: การศึกษาอัตราส่วนปริมาณใบกระถิน

ทำการศึกษาปริมาณใบกระถินที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำหมักชีวภาพ โดยทดสอบปริมาณใบกระถินบด 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 กิโลกรัม ในสูตรที่มีนมเปรี้ยว 500 มิลลิลิตร กากน้ำตาล 4 กิโลกรัม และน้ำ 100 ลิตร ระยะเวลาและวิธีการหมักเป็นไปตามขั้นตอนมาตรฐานเช่นเดียวกับขั้นตอนก่อนหน้า

ขั้นตอนที่ 3: การศึกษาอัตราส่วนปริมาณกากน้ำตาล

ทำการหาปริมาณกากน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำหมักชีวภาพ โดยทดสอบปริมาณกากน้ำตาล 3 ระดับ คือ 2, 4 และ 6 กิโลกรัม ในสูตรที่มีใบกระถินบด 10 กิโลกรัม นมเปรี้ยว 500 มิลลิลิตร และน้ำ 100 ลิตร การหมักและการดูแลรักษาดำเนินการตามวิธีการมาตรฐานเช่นเดียวกับขั้นตอนก่อนหน้า

ขั้นตอนที่ 4: การศึกษาระยะเวลาการหมัก

ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารหลักตามช่วงเวลาการหมัก โดยใช้สูตรที่ประกอบด้วยใบกระถินบด 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 6 กิโลกรัม นมเปรี้ยว 500 มิลลิลิตร และน้ำ 100 ลิตร ทำการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ในช่วงสัปดาห์ที่ 4, 8, 12 และ 16 ของกระบวนการหมักตามลำดับ โดยคนกวนน้ำหมักทุก 2-3 วัน เพื่อให้เกิดการหมักอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดลอง

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำหมักชีวภาพ

ภายหลังการทำซ้ำครบทั้ง 3 ครั้ง จึงดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหมักชีวภาพ โดยในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การวิเคราะห์ภาคสนามโดยใช้เครื่องมือแบบพกพา และการวิเคราะห์เชิงลึกในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องมือเฉพาะทาง

การวิเคราะห์ภาคสนาม

ใช้เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำแบบพกพา Horiba LAQUAtwin Compact Water Quality Meter และ pH meter ในการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นของไนเตรตไอออน (NO_3^-) ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออน (K^+) โดยทุกพารามิเตอร์วัดค่าจำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง และบันทึกค่าเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างถูกส่งวิเคราะห์ที่สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (IQS) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยดำเนินการตามวิธีมาตรฐานตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 การวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก (Primary Macronutrients) ประกอบด้วย ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen: N) วิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl method (กรมวิชาการเกษตร, 2551) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจน FOSS รุ่น Kjeltec 8200 ซึ่งมีหลักการโดยย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดซัลฟิวริก แปลงไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียม กลั่นและไทเทรตด้วยกรดมาตรฐาน ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P_2O_5) วิเคราะห์ด้วยวิธี Molybdenum blue method โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Thermo Electron Corporation Evolution 300 LC) ซึ่งมีหลักการโดยวัดความเข้มสีของสารประกอบฟอสโฟโมลิบดีนัมบลูที่ความยาวคลื่น 880 nm และโพแทสเซียม (Potassium: K_2O) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry) โดยใช้เครื่อง Agilent รุ่น 5800 ซึ่งมีหลักการโดยกระตุ้นอะตอมด้วยพลาสมาและวัดความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมา

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดถูกวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS (TH-20260100011) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Analysis of Variance; ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงทำการทดสอบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบจะถูกแสดงในรูปแบบตารางพร้อมสัญลักษณ์ตัวอักษรกำกับ (a, b, c) โดยค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ ข้อมูลทั้งหมดจะแสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) จากการทำซ้ำ 3 ครั้ง

มาตรฐานอ้างอิง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหมักชีวภาพจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์เหลวตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และที่แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2565 เพื่อยืนยันว่าน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของสูตรที่พัฒนาขึ้นเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์

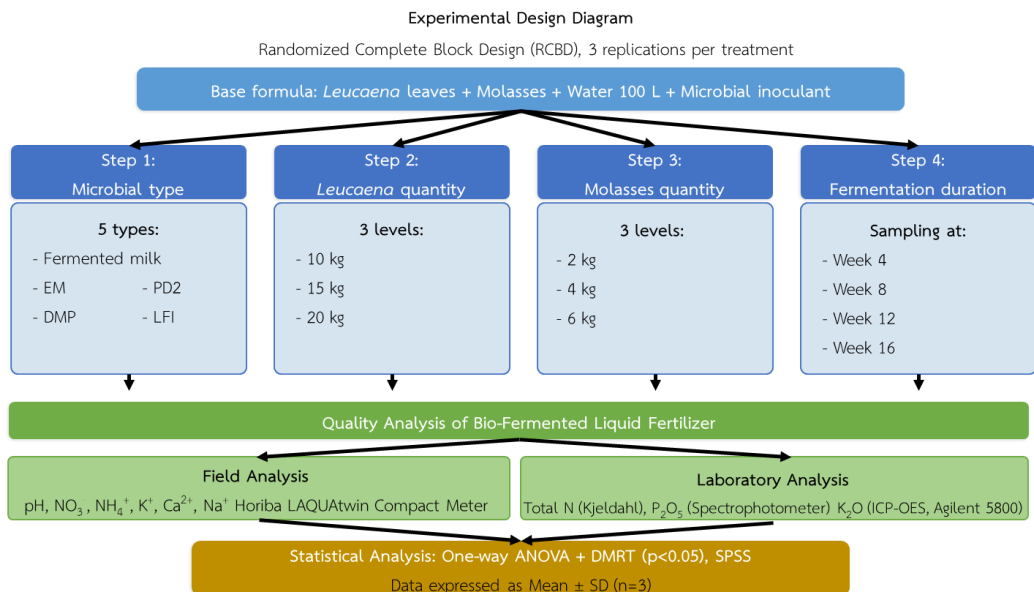


Figure 1. Experimental design diagram for bio-fermented liquid fertilizer production from *Leucaena leucocephala* leaves

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ข้อที่ 1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้านปริมาณไบโกระถินในการทำน้ำหมักชีวภาพจากไบโกระถิน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณไบโกระถินต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ ได้ทำการทดลองด้วยปริมาณไบโกระถิน 3 ระดับ ได้แก่ 10, 15 และ 20 กิโลกรัม โดยคงปริมาณกากน้ำตาล 4 กิโลกรัม ปริมาตรน้ำ 40 ลิตร และระยะเวลาการหมัก 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารด้วยเครื่อง Compact Water Quality Meter และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

Table 1. Nutrient concentrations in bio-fermented liquid fertilizer at different *Leucaena* leaf levels (Mean $\pm$ SD, n=3)

<i>Leucaena</i> leaf level	Time (week s)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	pH
10 kg	4	352.54 $\pm$ 11.4 6 ^a	958.37 $\pm$ 31.1 4 ^b	92.41 $\pm$ 3.0 0 ^b	130.07 $\pm$ 4.2 3 ^a	4.47 $\pm$ 0.1 5 ^a
	8	493.33 $\pm$ 15.7 8	946.67 $\pm$ 30.2 7	28.67 $\pm$ 0.9 2	120.00 $\pm$ 3.8 4	4.46 $\pm$ 0.1 4
	12	503.33 $\pm$ 16.1 1	946.67 $\pm$ 30.2 7	37.33 $\pm$ 1.1 9	250.00 $\pm$ 8.0 0	4.47 $\pm$ 0.1 4
	16	676.67 $\pm$ 21.6 5	1700.00 $\pm$ 54. 40	76.33 $\pm$ 2.4 4	340.00 $\pm$ 10. 88	4.46 $\pm$ 0.1 4
15 kg	4	184.83 $\pm$ 6.01 c	1506.02 $\pm$ 48. 19 ^a	147.18 $\pm$ 4. 71 ^a	130.07 $\pm$ 4.1 6 ^a	3.65 $\pm$ 0.1 2 ^b
	8	213.33 $\pm$ 6.83	1533.33 $\pm$ 49. 07	60.00 $\pm$ 1.9 2	120.00 $\pm$ 3.8 4	3.68 $\pm$ 0.1 2
	12	813.33 $\pm$ 26.0 3	1566.67 $\pm$ 50. 13	49.00 $\pm$ 1.5 7	250.00 $\pm$ 8.0 0	4.81 $\pm$ 0.1 5
	16	1366.67 $\pm$ 43. 73	2666.67 $\pm$ 85. 33	94.00 $\pm$ 3.0 1	326.67 $\pm$ 10. 45	4.79 $\pm$ 0.1 5
20 kg	4	318.32 $\pm$ 10.1 9 ^b	1608.70 $\pm$ 51. 48 ^a	150.61 $\pm$ 4. 82 ^a	116.37 $\pm$ 3.7 2 ^b	4.51 $\pm$ 0.1 4 ^a
	8	956.67 $\pm$ 30.6 1	1966.67 $\pm$ 62. 93	32.33 $\pm$ 1.0 3	110.00 $\pm$ 3.5 2	4.56 $\pm$ 0.1 5
	12	1933.33 $\pm$ 61. 87	1800.00 $\pm$ 57. 60	45.00 $\pm$ 1.4 4	216.67 $\pm$ 6.9 3	4.91 $\pm$ 0.1 6
	16	2600.00 $\pm$ 83. 20	3133.33 $\pm$ 100 .27	74.67 $\pm$ 2.3 9	290.00 $\pm$ 9.2 8	4.91 $\pm$ 0.1 6

Note: Values are expressed as Mean $\pm$ SD (n=3). Different superscript letters within the same column (week 4) indicate statistically significant differences at p<0.05 by Duncan's Multiple Range Test.



Table 2. Chemical composition of bio-fermented liquid fertilizer at different *Leucaena* leaf levels (% by weight, Mean $\pm$ SD, n=3)

<i>Leucaena</i> leaf level	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	pH
10 kg	0.130 $\pm$ 0.003 ^a	0.021 $\pm$ 0.001 ^a	0.227 $\pm$ 0.006 ^a	3.58 $\pm$ 0.09 ^a
15 kg	0.108 $\pm$ 0.003 ^b	0.013 $\pm$ 0.000 ^b	0.176 $\pm$ 0.004 ^b	3.51 $\pm$ 0.09 ^c
20 kg	0.064 $\pm$ 0.002 ^c	0.008 $\pm$ 0.000 ^c	0.106 $\pm$ 0.003 ^c	3.84 $\pm$ 0.09 ^a

Note: Different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test.

จากตารางที่ 1 และ 2 พบว่า การใช้ใบกระถินปริมาณ 10 กิโลกรัม ให้ปริมาณไนโตรเจนรวมสูงสุด (0.130 $\pm$ 0.003% by weight) ฟอสฟอรัสสูงสุด (0.021 $\pm$ 0.001% by weight) และโพแทสเซียมสูงสุด (0.227 $\pm$ 0.006% by weight) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปริมาณอื่น ($p < 0.05$) การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของโพแทสเซียมในสัปดาห์ที่ 16 (เพิ่มขึ้น 77.4% จากสัปดาห์ที่ 4) อาจส่งผลเสียต่อพืชหากนำไปใช้โดยไม่เจือจาง โดยเฉพาะการใช้น้ำหมักจากใบกระถิน 20 กิโลกรัม ที่สัปดาห์ที่ 16 จะมีโพแทสเซียมสูงถึง 3,133.33 ppm ซึ่งอยู่ในระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อพืช

ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าปริมาณใบกระถินมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อทุกพารามิเตอร์ที่วัด ($F = 257.67-508.02$, $p < 0.001$) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปริมาณใบกระถิน 10 กิโลกรัมเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตน้ำหมักชีวภาพ

ผลการศึกษาในข้อนี้สอดคล้องกับรายงานของ Doan et al. (2015) ที่พบว่าปริมาณวัตถุดิบพืชที่มากเกินไปส่งผลให้สัดส่วน C/N ไม่สมดุล ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลง การใช้ใบกระถินปริมาณ 10 กิโลกรัมให้สัดส่วน C/N ที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ได้ปริมาณธาตุอาหารสูงสุด ทั้งนี้ปริมาณใบกระถินที่มากขึ้น (15 และ 20 กิโลกรัม) แม้จะให้ปริมาณ NO₃⁻ สูงขึ้นในสัปดาห์หลัง แต่ปริมาณ N, P₂O₅ และ K₂O รวมกลับต่ำกว่า เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้ทั้งหมดในระยะเวลาที่กำหนด นอกจากนี้การสะสม K⁺ ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังสัปดาห์ที่ 8 อาจถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืช (phytotoxicity) ซึ่ง Fahad et al. (2015) ระบุว่าธาตุอาหารที่สะสมในระดับสูงเกินไปอาจยับยั้งการดูดซึมธาตุอาหารอื่น ๆ ของพืชได้



ข้อที่ 2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้านปริมาณกากน้ำตาลในการทำน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณกากน้ำตาลต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ ได้ทำการทดลองด้วยปริมาณกากน้ำตาล 3 ระดับ ได้แก่ 2, 4 และ 6 กิโลกรัม โดยคงปริมาณใบกระถิน 10 กิโลกรัม ปริมาตรน้ำ 40 ลิตร และระยะเวลาการหมัก 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารด้วยเครื่อง Compact Water Quality Meter และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่า การใช้กากน้ำตาล 6 กิโลกรัม ให้ปริมาณไนโตรเจนรวมสูงสุด ($0.113 \pm 0.003\%$ by weight) ฟอสฟอรัสสูงสุด ($0.012 \pm 0.000\%$ by weight) และโพแทสเซียมสูงสุด ($0.189 \pm 0.005\%$ by weight) แต่ที่สัปดาห์ที่ 16 โพแทสเซียมสูงถึง $3,200.00 \pm 102.40$ ppm ซึ่งอยู่ในระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อพืช

กากน้ำตาลมีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก โดยจุลินทรีย์จะใช้น้ำตาลในกากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตและผลิตกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดค่า pH และป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ (Higa & Parr, 1994) การใช้กากน้ำตาลปริมาณ 6 กิโลกรัม (15% by weight) ให้ผลดีที่สุดในการสกัดสารอาหารจากใบกระถิน เนื่องจากปริมาณน้ำตาลที่เพียงพอช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Olle & Williams (2013) ที่รายงานว่าแหล่งคาร์บอนที่เพียงพอเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการหมัก

อย่างไรก็ตาม ควรระมัดระวังในการใช้น้ำหมักที่หมักเกิน 8 สัปดาห์ เนื่องจากโพแทสเซียมจะสะสมในระดับสูง ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ระยะเวลาการหมัก 4-8 สัปดาห์ และควรเจือจางก่อนนำไปใช้กับพืช การที่ค่า pH ลดลงเมื่อปริมาณกากน้ำตาลเพิ่มขึ้น (จาก 4.75 ที่ 2 กิโลกรัม เป็น 3.37 ที่ 6 กิโลกรัม) บ่งชี้ว่าจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์ได้มากขึ้นเมื่อมีแหล่งคาร์บอนเพียงพอ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเก็บรักษาน้ำหมักชีวภาพให้มีคุณภาพคงที่ ผลนี้สอดคล้องกับ Phibunwatthanawong & Riddech (2019) ที่ระบุว่าค่า pH ที่ต่ำช่วยป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์และรักษาคุณภาพของน้ำหมักชีวภาพ

Table 3. Nutrient concentrations in bio-fermented liquid fertilizer at different molasses levels (Mean $\pm$ SD, n=3)

Molasses level	Time (weeks)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	pH
2 kg	4	673.33 $\pm$ 21.5	823.33 $\pm$ 26.35	90.00 $\pm$ 2.8	110.00 $\pm$ 3.5	4.36 $\pm$ 0.
	5			8	2	14
	8	1233.33 $\pm$ 39.	916.67 $\pm$ 29.33	33.67 $\pm$ 1.0	110.00 $\pm$ 3.5	4.84 $\pm$ 0.
	47			8	2	15
	12	1066.67 $\pm$ 34.	972.00 $\pm$ 31.10	55.67 $\pm$ 1.7	230.00 $\pm$ 7.3	4.91 $\pm$ 0.
	13			8	6	16
	16	1366.67 $\pm$ 43.	1666.67 $\pm$ 53.3	126.67 $\pm$ 4.	310.00 $\pm$ 9.9	4.94 $\pm$ 0.
	73		3	05	2	16
4 kg	4	726.67 $\pm$ 23.2	1166.67 $\pm$ 37.3	73.33 $\pm$ 2.3	126.67 $\pm$ 4.0	4.33 $\pm$ 0.
	5		3	5	5	14
	8	913.33 $\pm$ 29.2	1233.33 $\pm$ 39.4	24.00 $\pm$ 0.7	120.00 $\pm$ 3.8	4.52 $\pm$ 0.
	3		7	7	4	14
	12	1063.33 $\pm$ 34.	1300.00 $\pm$ 41.6	42.00 $\pm$ 1.3	250.00 $\pm$ 8.0	4.59 $\pm$ 0.
	03		0	4	0	15
	16	1333.33 $\pm$ 42.	2300.00 $\pm$ 73.6	74.00 $\pm$ 2.3	330.00 $\pm$ 10.	4.53 $\pm$ 0.
	67		0	7	56	14
6 kg	4	256.67 $\pm$ 8.21 ^a	1666.67 $\pm$ 53.3 ^{3^a}	130.00 $\pm$ 4. ^{16^a}	140.00 $\pm$ 4.4 ^{8^a}	3.42 $\pm$ 0. ^{11^a}
	8	273.33 $\pm$ 8.75	1800.00 $\pm$ 57.6	52.67 $\pm$ 1.6	133.33 $\pm$ 4.2	3.77 $\pm$ 0.
			0	9	7	12
	12	1266.67 $\pm$ 40.	1866.67 $\pm$ 59.7	56.00 $\pm$ 1.7	266.67 $\pm$ 8.5	4.78 $\pm$ 0.
	53		3	9	3	15
	16	1833.33 $\pm$ 58.	3200.00 $\pm$ 102.	76.33 $\pm$ 2.4	353.33 $\pm$ 11.	4.60 $\pm$ 0.
	67		40	4	31	15



Note: Values are expressed as Mean $\pm$ SD (n=3). Different superscript letters within the same column (week 4) indicate statistically significant differences at $p < 0.05$.

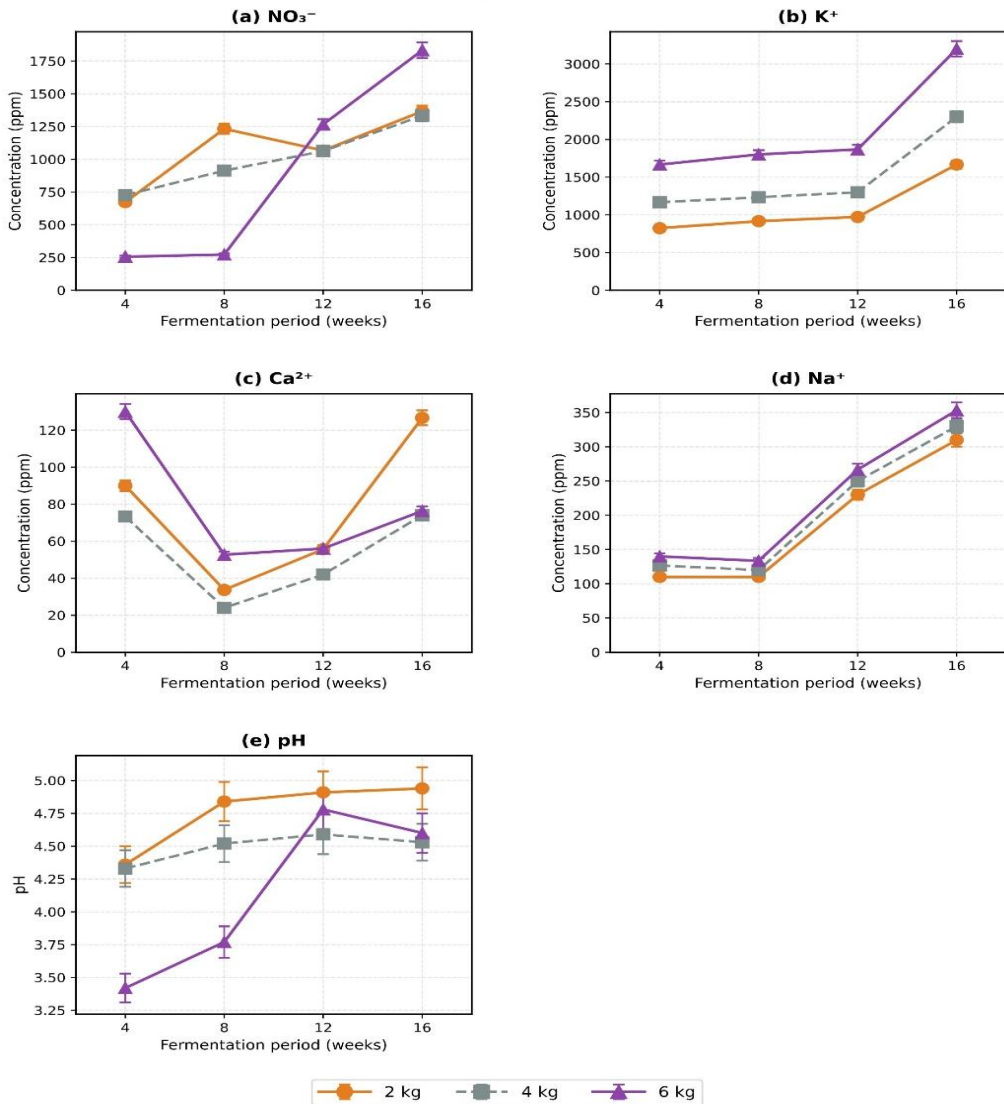


Figure 2. Nutrient concentrations in bio-fermented liquid fertilizer at different molasses levels (2, 4, and 6 kg) over 16 weeks of fermentation: (a) NO_3^- , (b) K^+ , (c) Ca^{2+} , (d) Na^+ , and (e) pH. Values are expressed as means $\pm$ SD (n=3).

Table 4. Chemical composition of bio-fermented liquid fertilizer at different molasses levels (% by weight, Mean $\pm$ SD, n=3)

Molasses level	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	pH
2 kg	0.057 $\pm$ 0.002	0.010 $\pm$ 0.000	0.099 $\pm$ 0.003	4.75 $\pm$ 0.14
4 kg	0.071 $\pm$ 0.002	0.010 $\pm$ 0.000	0.146 $\pm$ 0.004	3.55 $\pm$ 0.11
6 kg	0.113 $\pm$ 0.003 ^a	0.012 $\pm$ 0.000 ^a	0.189 $\pm$ 0.005 ^a	3.37 $\pm$ 0.10 ^a

Note: Superscript letters indicate the optimal value for each parameter.

ข้อที่ 3 ผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสมด้านระยะเวลาการหมักในการทำน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน

การศึกษาสภาพที่เหมาะสมของระยะเวลาการหมักต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่สัปดาห์ที่ 4, 8, 12 และ 16 ในสภาวะที่ควบคุมปริมาณใบกระถิน 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 6 กิโลกรัม และปริมาตรน้ำ 40 ลิตร ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารด้วยเครื่อง Compact Water Quality Meter และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 แสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

จากตารางที่ 5 และ 6 พบว่า ระยะเวลาการหมักมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ โดยระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 สัปดาห์ เนื่องจากให้ปริมาณไนโตรเจนรวมสูงสุด (0.100 $\pm$ 0.003% by weight) และปริมาณโพแทสเซียม (1,400.00 $\pm$ 44.80 ppm) อยู่ในระดับที่เหมาะสม ไม่เป็นอันตรายต่อพืช

การที่ปริมาณไนโตรเจนลดลงหลังสัปดาห์ที่ 4 อาจเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เปลี่ยนรูปไนโตรเจนในสภาวะที่ออกซิเจนลดลง ประกอบกับการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายหมดลง (Martinez-Blanco et al., 2013) ในขณะที่มีการสะสมของ K⁺ ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเกิดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในใบกระถินอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปลดปล่อยโพแทสเซียมที่ถูกกักเก็บในโครงสร้างของพืชออกมา ผลนี้สอดคล้องกับ Chanchay & Poosaran (2009) ที่ศึกษาองค์ประกอบของใบกระถินและพบว่ามีปริมาณแร่ธาตุสะสมสูง

ค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงจาก 3.91 $\pm$ 0.12 ในสัปดาห์ที่ 4 เป็น 4.89 $\pm$ 0.16 ในสัปดาห์ที่ 8 แล้วลดลงเป็น 4.26 $\pm$ 0.14 ในสัปดาห์ที่ 12 และเพิ่มขึ้นเป็น 4.60 $\pm$ 0.15 ในสัปดาห์ที่ 16 การเปลี่ยนแปลงนี้สะท้อนถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์และการสะสมของกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่ง Babuska et al. (2002) อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของ pH ในกระบวนการหมักเป็นผลจากสมดุลระหว่างการผลิตกรดอินทรีย์และการบริโภคกรดโดยจุลินทรีย์ การหมักเกิน 8 สัปดาห์ไม่ได้ให้คุณภาพที่ดีขึ้น แต่กลับมีความเสี่ยงจากการสะสมโพแทสเซียมในระดับสูง โดยที่สัปดาห์ที่ 16 มีโพแทสเซียมสูงถึง 2,800.00 $\pm$ 89.60 ppm ซึ่งเพิ่มขึ้น 100% จากสัปดาห์ที่ 4 และอาจเป็นอันตรายต่อพืชหากนำไปใช้โดยไม่เจือจาง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถินคือ 4 สัปดาห์ ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและปลอดภัยในการใช้งาน

Table 5. Changes in nutrient concentrations of bio-fermented liquid fertilizer over fermentation period (Mean $\pm$ SD, n=3)

Time (weeks)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	pH
4	263.33 $\pm$ 8.43 ^a	1400.00 $\pm$ 44.80 ^a	180.00 $\pm$ 5.76 ^a	130.00 $\pm$ 4.16	3.91 $\pm$ 0.12 ^a
8	1200.00 $\pm$ 38.40 ^b	1500.00 $\pm$ 48.00 ^a	57.67 $\pm$ 1.85 ^b	123.33 $\pm$ 3.95	4.89 $\pm$ 0.16 ^b
12	1050.00 $\pm$ 33.60 ^b	1466.67 $\pm$ 46.93 ^a	73.33 $\pm$ 2.35 ^b	253.33 $\pm$ 8.11	4.26 $\pm$ 0.14 ^c
16	1333.33 $\pm$ 42.67 ^c	2800.00 $\pm$ 89.60 ^b	140.00 $\pm$ 4.48 ^a	306.67 $\pm$ 9.81	4.60 $\pm$ 0.15 ^d

Note: Different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test.

Table 6. Chemical composition of bio-fermented liquid fertilizer at different fermentation periods (% by weight, Formula 601, Mean $\pm$ SD, n=3)

Time (weeks)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	pH
4	0.100 $\pm$ 0.003 ^a	0.012 $\pm$ 0.000	0.170 $\pm$ 0.005 ^a	3.52 $\pm$ 0.11 ^a
8	0.050 $\pm$ 0.002 ^b	0.013 $\pm$ 0.000	0.220 $\pm$ 0.007 ^b	4.93 $\pm$ 0.15 ^b
12	0.040 $\pm$ 0.001 ^c	0.015 $\pm$ 0.000	0.220 $\pm$ 0.007 ^b	4.32 $\pm$ 0.13 ^c
16	0.050 $\pm$ 0.002 ^b	0.017 $\pm$ 0.001	0.220 $\pm$ 0.007 ^b	4.41 $\pm$ 0.13 ^c

Note: Different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$.

ข้อที่ 4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้านชนิดจุลินทรีย์ในการทำน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของชนิดจุลินทรีย์ต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ โดยทดสอบ จุลินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ (1) นมเปรี้ยว (fermented milk) *Lactobacillus* sp. (2) Effective Microorganisms (EM) (3) สารพด.2 (LDD Microbial Activator No.2 (PD2)) (4) จุลินทรีย์ผงดับกลิ่น (deodorizing microbial powder (DMP)) และ (5) หัวเชื้อน้ำหมักกระถิน (*Leucaena* fermented liquid inoculant (LFI)) ในสภาวะที่คงปริมาณใบกระถิน 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 6 กิโลกรัม และระยะเวลาการหมัก 4, 8, 12 และ 16 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารด้วยเครื่อง Compact Water Quality Meter และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามคู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 แสดงดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8



จากตารางที่ 7 และ 8 พบว่า จุลินทรีย์ Effective Microorganisms (EM) เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด (Higa & Parr, 1994; Olle & Williams, 2013) เนื่องจากควบคุมค่า pH ได้เสถียรที่สุด (4.59-4.63 ตลอดระยะเวลา 16 สัปดาห์) ให้ปริมาณธาตุอาหารที่สมดุล และมีความปลอดภัยในการใช้งาน

EM เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ผสม (microbial consortium) ที่ประกอบด้วยแบคทีเรียกรดแลคติก ยีสต์ และจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria; PSB) ซึ่งทำงานร่วมกันแบบ synergistic (Higa & Parr, 1994) ความหลากหลายของจุลินทรีย์ใน EM ช่วยให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมดุลและต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า pH คงที่และปริมาณธาตุอาหารสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งสอดคล้องกับ Olle & Williams (2013) ที่รายงานว่า EM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและปรับปรุงคุณภาพผลผลิต

สำหรับนมเปรี้ยว (fermented milk) แม้จะให้ผลดีในช่วงแรก โดยให้ปริมาณไนโตรเจนสูงสุดที่สัปดาห์ที่ 4 (766.67 ± 24.53 ppm) แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่สูงขึ้นมากในสัปดาห์ที่ 16 ($pH\ 7.26 \pm 0.23$) ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาระยะยาว การเพิ่มขึ้นของ pH อาจเกิดจาก: (1) การสิ้นสุดของกระบวนการหมักกรดแลคติกเมื่อแหล่งน้ำตาลหมดลง (2) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของกรดอินทรีย์ และ (3) การเจริญของจุลินทรีย์ปนเปื้อนที่ผลิตแอมโมเนีย เนื่องจากนมเปรี้ยวเป็น monoculture ของ *Lactobacillus* sp. จึงขาดความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่จะช่วยรักษาสมดุลในระบบ ต่างจาก EM ที่เป็น microbial consortium (Higa & Parr, 1994)

สารพด.2 (LDD Microbial Activator No.2 (PD2)) ให้ผลดีในการควบคุม pH แต่ให้ปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า EM และนมเปรี้ยว (240.00 ± 7.68 ppm ที่สัปดาห์ที่ 4) จุลินทรีย์ผงดับกลิ่น (deodorizing microbial powder (DMP)) และหัวเชื้อน้ำหมักกระถิน (*Leucaena* fermented liquid inoculant (LFI)) ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับ EM แต่มีราคาแพงกว่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Effective Microorganisms (EM) เป็นจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน เนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่ ปลอดภัย สามารถเก็บรักษาได้นาน และมีราคาไม่แพง ซึ่งสอดคล้องกับ Kumawat et al. (2021) ที่ระบุว่าความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้จุลินทรีย์สำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การใช้ร่วมกับนมเปรี้ยว (fermented milk) ในช่วง 4 สัปดาห์แรกอาจช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนได้ โดยต้องใช้ผลิตภัณฑ์ภายใน 8 สัปดาห์

Table 7. Nutrient concentrations in bio-fermented liquid fertilizer from different microorganism types (Mean $\pm$ SD, n=3)

Microorganism type	Time (weeks)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	pH
Fermented milk (<i>Lactobacillus</i> sp.)	4	766.67 $\pm$ 24.53 ^a	1033.33 $\pm$ 3.3.07 ^b	123.33 $\pm$ 3.95	120.00 $\pm$ 3.84	4.53 $\pm$ 0.14 ^a
	8	326.67 $\pm$ 10.45	1166.67 $\pm$ 3.7.33	31.33 $\pm$ 1.0.0	113.33 $\pm$ 3.63	4.92 $\pm$ 0.16
	12	296.77 $\pm$ 9.5.0	1233.33 $\pm$ 3.9.47	85.67 $\pm$ 2.7.4	233.33 $\pm$ 7.47	5.28 $\pm$ 0.17
	16	326.66 $\pm$ 10.45	2233.33 $\pm$ 7.1.47	453.33 $\pm$ 14.51	350.00 $\pm$ 11.20	7.26 $\pm$ 0.23
	4	640.00 $\pm$ 20.48 ^b	1063.33 $\pm$ 3.4.03 ^b	150.00 $\pm$ 4.80 ^a	116.67 $\pm$ 3.73	4.63 $\pm$ 0.15 ^a
	8	363.33 $\pm$ 11.63	1100.00 $\pm$ 3.5.20	16.00 $\pm$ 0.5.1	110.00 $\pm$ 3.52	4.60 $\pm$ 0.15
	12	336.67 $\pm$ 10.77	1166.67 $\pm$ 3.7.33	41.67 $\pm$ 1.3.3	76.67 $\pm$ 2.4.5	4.59 $\pm$ 0.15
	16	370.00 $\pm$ 11.84	2166.67 $\pm$ 6.9.33	64.67 $\pm$ 2.0.7	330.00 $\pm$ 10.56	4.59 $\pm$ 0.15
Effective Microorganisms (EM)	4	240.00 $\pm$ 7.6.8 ^c	1366.67 $\pm$ 4.3.73 ^a	190.00 $\pm$ 6.08 ^a	130.00 $\pm$ 4.16 ^a	3.85 $\pm$ 0.12 ^b
	8	210.00 $\pm$ 6.7.2	1566.67 $\pm$ 5.0.13	23.67 $\pm$ 0.7.6	120.00 $\pm$ 3.84	4.04 $\pm$ 0.13
	12	690.00 $\pm$ 22.08	1466.66 $\pm$ 4.6.93	15.67 $\pm$ 0.5.0	236.67 $\pm$ 7.57	4.65 $\pm$ 0.15
	16	980.00 $\pm$ 31.36	2633.33 $\pm$ 8.4.27	38.00 $\pm$ 1.2.2	340.00 $\pm$ 10.88	4.68 $\pm$ 0.15
	4	230.00 $\pm$ 7.3.6 ^c	1266.67 $\pm$ 4.0.53 ^a	136.67 $\pm$ 4.37	130.00 $\pm$ 4.16 ^a	4.56 $\pm$ 0.15 ^a
	8	210.00 $\pm$ 6.7.2	1566.67 $\pm$ 5.0.13	23.67 $\pm$ 0.7.6	120.00 $\pm$ 3.84	4.04 $\pm$ 0.13
	12	690.00 $\pm$ 22.08	1466.66 $\pm$ 4.6.93	15.67 $\pm$ 0.5.0	236.67 $\pm$ 7.57	4.65 $\pm$ 0.15
	16	980.00 $\pm$ 31.36	2633.33 $\pm$ 8.4.27	38.00 $\pm$ 1.2.2	340.00 $\pm$ 10.88	4.68 $\pm$ 0.15
LDD Microbial Activator No.2 (PD2)	4	230.00 $\pm$ 7.3.6 ^c	1266.67 $\pm$ 4.0.53 ^a	136.67 $\pm$ 4.37	130.00 $\pm$ 4.16 ^a	4.56 $\pm$ 0.15 ^a
	8	210.00 $\pm$ 6.7.2	1566.67 $\pm$ 5.0.13	23.67 $\pm$ 0.7.6	120.00 $\pm$ 3.84	4.04 $\pm$ 0.13
	12	690.00 $\pm$ 22.08	1466.66 $\pm$ 4.6.93	15.67 $\pm$ 0.5.0	236.67 $\pm$ 7.57	4.65 $\pm$ 0.15
	16	980.00 $\pm$ 31.36	2633.33 $\pm$ 8.4.27	38.00 $\pm$ 1.2.2	340.00 $\pm$ 10.88	4.68 $\pm$ 0.15
Deodorizing microbial powder	4	230.00 $\pm$ 7.3.6 ^c	1266.67 $\pm$ 4.0.53 ^a	136.67 $\pm$ 4.37	130.00 $\pm$ 4.16 ^a	4.56 $\pm$ 0.15 ^a
	8	210.00 $\pm$ 6.7.2	1566.67 $\pm$ 5.0.13	23.67 $\pm$ 0.7.6	120.00 $\pm$ 3.84	4.04 $\pm$ 0.13
	12	690.00 $\pm$ 22.08	1466.66 $\pm$ 4.6.93	15.67 $\pm$ 0.5.0	236.67 $\pm$ 7.57	4.65 $\pm$ 0.15
	16	980.00 $\pm$ 31.36	2633.33 $\pm$ 8.4.27	38.00 $\pm$ 1.2.2	340.00 $\pm$ 10.88	4.68 $\pm$ 0.15



Microorganism type	Time (weeks)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	pH
(DMP)	8	766.67±24.53	1200.00±38.40	21.67±0.69	110.00±352	4.91±0.16
	12	743.33±23.79	1200.00±38.40	18.00±0.58	226.67±725	4.72±0.15
	16	1100.00±35.20	2066.67±66.13	36.33±1.16	310.00±92	4.68±0.15
<i>Leucaena</i> fermented liquid inoculant (LFI)	4	236.67±7.57 ^c	1333.33±42.67 ^a	140.00±448	140.00±448 ^a	4.23±0.14 ^c
	8	396.67±12.69	1366.67±43.73	27.00±0.86	120.00±384	4.61±0.15
	12	460.00±14.72	1333.33±42.67	23.00±0.74	236.67±757	4.62±0.15
	16	776.67±24.85	2400.00±76.80	69.00±2.21	336.66±10.77	4.60±0.15

Note: Values are expressed as Mean ± SD (n=3). Different superscript letters within the same column (week 4) indicate statistically significant differences at p<0.05.

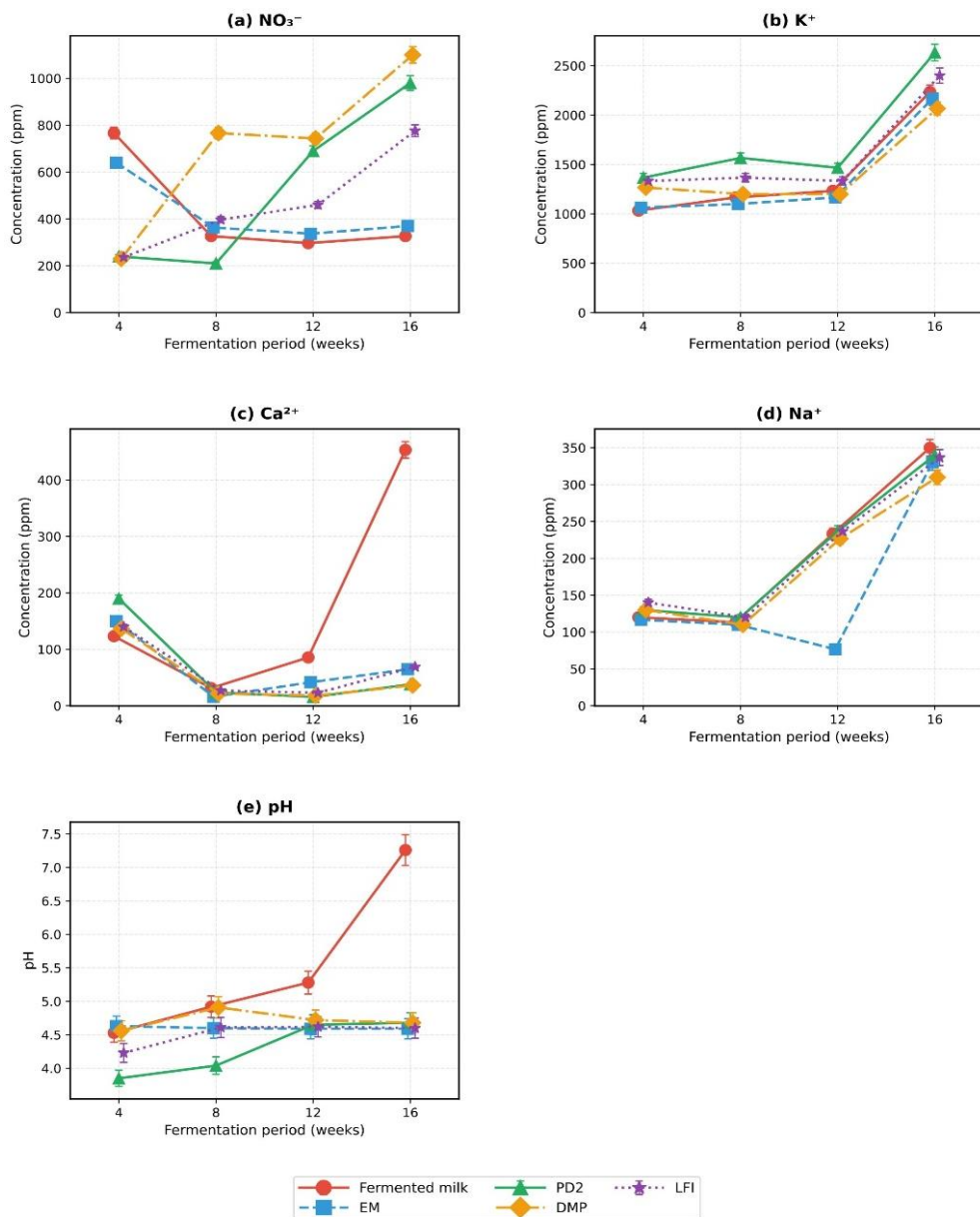


Figure 3. Nutrient concentrations in bio-fermented liquid fertilizer from different microorganism types (Fermented milk, EM, PD2, DMP, and LFI) over 16 weeks of fermentation: (a) NO_3^- , (b) K^+ , (c) Ca^{2+} , (d) Na^+ , and (e) pH. Values are expressed as means $\pm$ SD (n=3).

Table 8. Chemical composition of bio-fermented liquid fertilizer from different microorganism types (% by weight, Mean $\pm$ SD, n=3)

Microorganism type	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	pH
<i>Leucaena</i> fermented liquid inoculant (LFI)	0.020 $\pm$ 0.001	0.013 $\pm$ 0.000	0.180 $\pm$ 0.005	4.74 $\pm$ 0.14
Effective Microorganisms (EM)	0.040 $\pm$ 0.001 ^a	0.009 $\pm$ 0.000	0.260 $\pm$ 0.008 ^a	3.74 $\pm$ 0.11 ^a
Deodorizing microbial powder (DMP)	0.040 $\pm$ 0.001 ^a	0.002 $\pm$ 0.000	0.190 $\pm$ 0.006	3.87 $\pm$ 0.12
Fermented milk (<i>Lactobacillus</i> sp.)	0.043 $\pm$ 0.001 ^a	0.008 $\pm$ 0.000	0.112 $\pm$ 0.003	3.44 $\pm$ 0.10 ^a

Note: Superscript letters indicate the optimal value for each parameter.

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยด้านปริมาณวัตถุดิบ ระยะเวลา และชนิดของจุลินทรีย์ที่มีต่อคุณภาพด้านธาตุอาหารและสมบัติทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

1. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณใบกระถินและกากน้ำตาล

การทดสอบปริมาณใบกระถินที่ระดับ 10, 15 และ 20 กิโลกรัม พบว่าปริมาณ 10 กิโลกรัมเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณธาตุอาหารหลักสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าไนโตรเจนรวมเท่ากับ $0.130 \pm 0.003\%$ by weight ฟอสฟอรัส $0.021 \pm 0.001\%$ by weight และโพแทสเซียม $0.227 \pm 0.006\%$ by weight ในขณะที่การเพิ่มปริมาณกากน้ำตาลเป็น 6 กิโลกรัม (15% by weight) ส่งผลดีที่สุดในการสกัดสารอาหาร และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญแก่จุลินทรีย์ในการผลิตกรดอินทรีย์เพื่อควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

2. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารตามระยะเวลาการหมัก

ระยะเวลาการหมักมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพน้ำหมักชีวภาพ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลา 4 สัปดาห์ เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณไนโตรเจนรวมสูงสุด ($0.100 \pm 0.003\%$ by weight) และมีปริมาณโพแทสเซียม (1,400.00 ppm) ในระดับที่ปลอดภัยต่อการนำไปใช้งาน การขยายระยะเวลาการหมักออกไปเกินกว่า 8 สัปดาห์ ส่งผลให้เกิดการสะสมของโพแทสเซียมในระดับที่สูงเกินความจำเป็น โดยในสัปดาห์ที่ 16 พบปริมาณโพแทสเซียมสูงถึง 2,800-3,200 ppm ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชหากนำไปใช้โดยไม่มีการเจือจางที่เหมาะสม

3. ประสิทธิภาพของชนิดจุลินทรีย์ต่อความเสถียรของผลิตภัณฑ์

จากการเปรียบเทียบจุลินทรีย์ 5 ชนิด พบว่า จุลินทรีย์ EM (Effective Microorganisms) มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตในเชิงคุณภาพ เนื่องจากสามารถควบคุมค่า pH ให้มีความเสถียรอยู่ในช่วง 4.59-4.63 ตลอดระยะเวลาการศึกษา และให้สมดุลธาตุอาหารที่ดี สำหรับการใช้นมเปรี้ยว แม้จะช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนได้สูงในช่วงแรก แต่พบปัญหาด้านความเสถียรเมื่อเก็บรักษานานเกิน 8 สัปดาห์ เนื่องจากค่า pH จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (pH 7.26 ในสัปดาห์ที่ 16) ซึ่งอาจเกิดจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ปนเปื้อนที่ผลิตแอมโมเนียหลังแหล่งพลังงานคาร์บอนหมดลง

งานวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Conditions) ในการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากใบกระถิน คือการใช้ ใบกระถิน 10 กิโลกรัม ร่วมกับกากน้ำตาล 6 กิโลกรัม และใช้จุลินทรีย์ Effective Microorganisms (EM) เป็นหัวเชื้อ โดยใช้ระยะเวลาการหมักที่ 4 สัปดาห์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีธาตุอาหารสูงสุดและมีความเสถียรทางเคมีเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอย่างปลอดภัย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการเปลี่ยนผ่านสู่เกษตรกรรมที่ยั่งยืน รักษาความสมดุลของระบบนิเวศ และสนับสนุนความมั่นคงทางอาหาร อย่างไรก็ตามการนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ควรเพิ่มการทดสอบภาคสนาม (Field validation) เพื่อยืนยันผลในสภาวะจริง จึงช่วยให้เกษตรกรไทยสามารถลดต้นทุนการผลิต เพิ่มคุณภาพผลผลิต และมีส่วนร่วมในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกอย่างเป็นรูปธรรม

References

- Babuska, R., Oosterhoff, J., Oudshoorn, A., & Bruijn, P. M. (2002). Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15(1), 3-15.
- Bai, Z., Ma, W., Ma, L., Velthof, G. L., Wei, Z., Havlik, P., ... & Zhang, F. (2018). China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 4(7), eaar8534.
- Chanchay, N., & Poosaran, N. (2009). The reduction of mimosine and tannin contents in leaves of *Leucaena leucocephala*. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 2, 137-144.
- Department of Agriculture. (2005). *Notification of the Department of Agriculture: Re: Organic fertilizer standards B.E. 2548 (2005) and its amendment B.E. 2565 (2022)*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. [in Thai]
- Department of Agriculture. (2008). *Organic fertilizer analysis manual*. Ministry of Agriculture and Cooperatives.



- Doan, T. T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J. L., & Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 514, 147-154.
- Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., ... & Huang, J. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7), 4907-4921.
- González-García, S., Bacenetti, J., Negri, M., Fiala, M., & Arroja, L. (2013). Comparative environmental performance of three different annual energy crops for biogas production in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 43, 71-83.
- Higa, T., & Parr, J. F. (1994). *Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment* (Vol. 1). International Nature Farming Research Center.
- Kumawat, K. C., Nagpal, S., & Sharma, P. (2021). Present scenario of bio-fertilizer production and marketing around the globe. In *Biofertilizers* (pp. 389-413). Woodhead Publishing.
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., ... & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 721-732.
- Olle, M., & Williams, I. H. (2013). Effective microorganisms and their influence on vegetable production—a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 88(4), 380-386.
- Phibunwatthanawong, T., & Riddech, N. (2019). Liquid organic fertilizer production for growing vegetables under hydroponic condition. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(4), 369-380.
- Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 73.
- Van Rijn, F., Bulte, E., & Adekunle, A. (2012). Social capital and agricultural innovation in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Systems*, 108, 112-122.