Journal of Agricultural Research and Extension 43(3): 137-150

การพัฒนาต้นแบบสารชีวภัณฑ์ในรูปแบบอัดเม็ดจากวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร (ขี้เลื่อยยางพาราและซังข้าวโพด) ผสมเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*

Development of a Prototype Bio-product in Pellet Form from Agricultural Residues (Rubber Wood Sawdust and CornCobs) Incorporated with *Bacillus subtilis*

ฮุสนา ตีมุง[1,*] อัญรินทร์ ภู่มีสุข[2] ซูไฮมิน เจ๊ะมะลี[3] และนริศรา ดารากัย[4]

Husna Teemung[1,*], Anyarin Phumeesuk[2], Suhaimin Chehmalee[3] and Narissara Darakai[4]

[1]สำนักวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยฟาฏอนี ปัตตานี 94160

[2]สาขาเคมี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยฟาฏอนี ปัตตานี 94160

[3]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยฟาฏอนี ปัตตานี 94160

[4]บริษัท กาตีนา เนเชอรัล โปรดักส์ นครศรีธรรมราช 80000

[1]Research and Innovation Institute, Fatoni University, Pattani, Thailand 94160

[2]Department of Chemistry, Faculty of Education, Fatoni University, Pattani, Thailand 94160

[3]Faculty of Science and Technology, Fatoni University, Pattani, Thailand 94160

[4]KATINA NATURAL PRODUCT Co., LTD, Nakhon Si Thammarat, Thailand 80000

*Corresponding author: Husnateemung@gmail.com

**ORCID iD: https://orcid.org/0009-0007-7019-5674

Received: *September 16, 2026*

Revised: March *10, 2026*

Accepted: *June 11, 2026*

Abstract

At present, the production of agricultural bio-products has become increasingly diverse in both powder and liquid forms. However, limitations in user convenience remain, as most products require mixing or microbial activation prior to application. This study aimed to develop a pelletized bio-product using *Bacillus subtilis* in combination with agricultural residues, namely, rubberwood sawdust and corn cobs, which serve as carrier materials and nutrient sources. The prototype product was evaluated for bacterial growth efficiency and hydrogel coating performance. The hydrogel coating was prepared from corncob extract mixed with maltodextrin at a ratio of 1:1, which demonstrated effective coating properties using an encapsulation technique to delay the degradation of the pelletized bio-product. The pelletized bio-product exhibited an initial microbial concentration of 1.52×10^8 CFU g^{-1}. After a storage period of 3 months, the survival rate of *Bacillus subtilis* remained at 6.3×10^6 CFU g^{-1}. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed a clearly defined coating layer, which effectively prevented a reduction in bacterial performance. Biodegradation tests conducted through soil burial demonstrated that the hydrogel-coated pellets degraded within 3–4 months, whereas uncoated pellets degraded within 2 days. In distilled water, the coated product maintained its structural stability for more than 2 months.

Furthermore, the hydrogel-coated pellets extended the shelf life to more than 6 months, with a microbial survival level of 1.84×10^5 CFU g^{-1}. Toxicity and contamination assessments confirmed the absence of harmful residues, highlighting the strong potential of the developed pelletized bio-product for sustainable application in organic agricultural systems.

Keywords: agricultural waste, *Bacillus subtilis*, bioformulation, corn cobs, rubberwood sawdust

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน การผลิตสารชีวภัณฑ์เพื่อการเกษตรมีความหลากหลายมากขึ้นทั้งในรูปแบบผงและของเหลว อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดด้านความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากต้องมีการผสมหรือขยายเชื้อก่อนนำไปใช้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสารชีวภัณฑ์ในรูปแบบอัดเม็ด โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยยางพารา และซังข้าวโพด เป็นวัสดุตัวกลางและแหล่งอาหาร ผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้รับการทดสอบด้านประสิทธิภาพการเจริญของเชื้อ และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดซังข้าวโพดที่มีการผสมสารมอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:1 ที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบ โดยใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชัน (encapsulation) เพื่อชะลอการย่อยสลายสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยมีปริมาณเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 1.52×10^8 โคโลนีต่อกรัม และทดสอบการเก็บรักษา 3 เดือน พบว่าอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ยังคงอยู่ที่ 6.3×10^6 โคโลนีต่อกรัม การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบชั้นสารเคลือบอย่างชัดเจน ซึ่งช่วยป้องกันการลดลงของประสิทธิภาพของเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลือบย่อยสลายภายใน 3–4 เดือน ขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลย่อยสลายภายในระยะเวลา 2 วัน การทดสอบในน้ำกลั่นพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลือบคงสภาพได้นานมากกว่า 2 เดือน และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานมากกว่า 6 เดือน โดยมีอัตราการรอดชีวิต 1.84×10^5 โคโลนีต่อกรัม ทั้งนี้ ไม่พบสารตกค้างที่เป็นอันตราย สะท้อนศักยภาพการประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรอินทรีย์อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร บาซิลลัส ซับทิลิส สารชีวภัณฑ์ ซังข้าวโพด ขี้เลื่อยยางพารา

บทนำ

ในปัจจุบันการใช้ปุ๋ยเคมีในระบบการเกษตรมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตพืช โดยเฉพาะในระบบปลูกข้าวและพืชชนิดต่าง ๆ เพื่อชดเชยการสูญเสียธาตุอาหารจากดิน และส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่ต้องการสารอาหารอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยเคมีอย่างต่อเนื่องและมีการใช้เป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น การเสื่อมสภาพของดิน การปนเปื้อนของสารอาหารในน้ำ และการปรับสมดุลของจุลินทรีย์ดินลดลง ซึ่งมีผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว (Krasilnokov *et al*., 2022) ข้าวเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในสกุล *Oryza* และเป็นอาหารหลักของประชากรกว่า 3 พันล้านคน ส่วนใหญ่ในประเทศกำลังพัฒนา โดย 90% ของผลผลิตข้าวโลกอยู่ในทวีปเอเชีย ประเทศไทยใช้ปุ๋ยเคมีจำนวนมาก โดยปี พ.ศ. 2568 คาดว่ายอดขายปุ๋ยเคมีจะอยู่ที่ 94,602 ล้านบาท เติบโตชะลอลงจากปี พ.ศ. 2567 เนื่องจากความต้องการและราคาที่ลดลง (Kasikorn Research, 2025) ไทยมุ่งสู่เศรษฐกิจสีเขียว ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม แต่เกษตรกรยังพึ่งพาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชสูง (Pearvongnukul *et al*., 2023) ซึ่งส่งผลเสีย

ต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพ การใช้ชีววิธี เช่น ตัวห้ำ สารสกัดจากพืช และสารชีวภัณฑ์ จึงได้รับความสนใจ (Department of Agricultural Extension, 2020) โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค และส่งเสริมการเจริญเติบโตพืช (Kawicha *et al*., 2020) ผลิตภัณฑ์ชีวภัณฑ์ปัจจุบันยังมีรูปแบบที่ซับซ้อน และจากการศึกษางานวิจัยหลายฉบับพบว่า การใช้สารชีวภัณฑ์สามารถลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี โดยยังคงรักษาหรือเพิ่มผลผลิตได้ นอกจากนี้ การใช้สารชีวภัณฑ์ยังช่วยฟื้นฟูโครงสร้างดิน เพิ่มความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปุ๋ยปริมาณสูงอีกด้วย (Ali *et al*., 2024) ทีมวิจัยจึงพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยตรึง *B. subtilis* บนวัสดุตัวกลางจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อยยางพารา และซังข้าวโพด และมีปริมาณมากในประเทศไทย การใช้ซังข้าวโพดซึ่งส่วนใหญ่จะนำทำเป็นอาหารสัตว์ และส่วนหนึ่งของชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้ ประโยชน์เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้ แทนการเผาทิ้งกองรวมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและดิน เนื่องจากสิ่งดังกล่าวประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำเป็นวัตถุดิบต่าง ๆ อาทิเช่น ไบโอเฟอร์ทิลไลเซอร์และไฮโดรเจล เพื่อใช้งานทางการเกษตร ซึ่งการนำชีวมวลเหล่านี้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สามารถเชื่อมโยงให้เกิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างยั่งยืน (Almeida *et al*., 2025)

การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นตัวกลางในการตรึงเชื้อแบคทีเรียสามารถช่วยรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น เนื่องจากเศษเหลือทิ้งดังกล่าวเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ และปรับปรุงดินได้ดีขึ้น (Randima *et al*., 2023) นอกจากนี้ ยังเคลือบสารสกัดซังข้าวโพดในรูปไฮโดรเจลด้วยเทคโนโลยีเอนแคปซูเลชัน (encapsulation) สามารถปกป้องสารสำคัญและควบคุมการปล่อยสารในสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน (Rithmanee and Phonpannawi, 2018) สารไฮโดรเจลสามารถกักเก็บน้ำและสารอาหารไว้ภายในโครงสร้าง และค่อย ๆ ปล่อยออกมาเมื่ออยู่ในดิน ซึ่งจะช่วยลดการชะล้างไนโตรเจน และเพิ่มการใช้ธาตุอาหารโดยพืชได้ดีกว่าวัสดุตัวอย่างที่ไม่มีการเคลือบสารไฮโดรเจล (E *at el*., 2024) สารไฮโดรเจลมีคุณสมบัติการคงความชื้นสูง และสามารถควบคุมการปล่อยสารจึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด เพื่อเพิ่มการรอดชีวิตของเชื้อและประสิทธิภาพการใช้งาน ทั้งนี้ การใช้ชีวมวลทางการเกษตรและสารไฮโดรเจลร่วมกัน ช่วยสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีความยั่งยืน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหาร ลดการปล่อยก๊าซ และเสริมสร้างคุณภาพดินในระบบการเกษตรในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างวัสดุตัวกลางในการตรึงเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียมวัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวอย่างขี้เลื่อยยางพารา และซังข้าวโพดได้รับการผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 2 มม. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 100 กรัม จำนวน 3 ชุด (replicates) บรรจุในขวดชมพู่ขนาด 250 มล. ปิดฝาโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ และนำไปฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121°ซ ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 2 รอบ โดยดัดแปลงวิธีการของ Han *et al*. (2020)

การเตรียมตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ

นำเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ซึ่งอยู่ในกลุ่มส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยการเตรียมเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวให้มีความเข้มข้นเชื้อที่ 10^8 โคโลนี/มล. จากนั้นทำการเจือจางเชื้อเป็น 10 เท่า ในปริมาตร 40 มล. บรรจุในขวดฝาเกลียว ขนาด 500 มล.

เติมน้ำกลั่น 360 มล. ในขวดเดียวกัน และผสมให้เข้ากัน เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป โดยดัดแปลงจากวิธีของ Saengsanga and Rattana (2017)

การผสมแบคทีเรียในตัววัสดุตัวกลาง และการศึกษาปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่เหมาะสมต่อการตรึงเชื้อบนวัสดุตัวกลาง

ดำเนินการผสมเชื้อแบคทีเรียความเข้มข้น 10^8 โคโลนี/มล. กับวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ขี้เลื่อยยางพารา และซังข้าวโพดที่ผ่านการฆ่าเชื้อ ในอัตราส่วน 20 มล. ต่อวัสดุตัวกลาง 100 กรัม ตามวิธีดัดแปลงของ Crouzet *et al*. (2014) โดยคลุกเคล้าให้เข้ากันสม่ำเสมอ และทำการบ่มเชื้อแบคทีเรียที่อุณหภูมิ 37°ซ เป็นระยะเวลา 60 วัน โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการตรึงเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุตัวกลาง (Table 1)

Table 1 Appropriate ratio of carrier material and bacterial suspension volume for immobilization on the carrier

Method	Bacterial suspension volume (ml)	Carrier material ration (sawdust : corncob)
1	20	50:50
2	40	50:50
3	60	50:50
4	80	50:50
5	100	50:50
6	120	50:50

การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุตัวกลาง

ศึกษาการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียที่ตรึงบนวัสดุตัวกลางโดยดัดแปลงวิธี Kouam *et al*. (2024) นำวัสดุตัวกลางผสม (ขี้เลื่อยยางพาราและซังข้าวโพด) 1 กรัม ใส่ในหลอดเซนทริฟิวจ์ เติมน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 9 มล. เซนติฟิวจ์ที่ 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที เก็บส่วนใสเจือจาง 10 เท่า และใช้เทคนิค pour plate นำตัวอย่าง 1 มล. บ่มที่ 37°ซ นาน 24 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณปริมาณเชื้อ (โคโลนี/กรัม) = (จำนวนโคโลนีที่นับได้) / ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในจานเพาะเชื้อ (มล.) x (ค่าความเจือจางของจานนั้น)

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์

การศึกษาอัตราที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์โดยการทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ ขี้เลื่อยยางพารา ซังข้าวโพดบดละเอียด ซังข้างโพดบดหยาบ แป้งข้าวโพด สารมอลโทเดกซ์ทริน เชื้อแบคทีเรีย และน้ำกลั่น ตามลำดับ โดยการดัดแปลวิธีการของ Kumar *et al*. (2022) โดยอัตราส่วนดัง Table 2 ด้วยการนำส่วนผสมทุกส่วนผสมรวมกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 37°ซ เป็นระยะเวลา 30 วัน เพื่อให้เชื้อแบคทีเรียที่เติมลงไปเจริญได้ดี จึงจะสามารถนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้

Table 2 Study of the optimal ratio for forming biological product formulations

Ingredients (g)	Method		
	1	2	3
Rubber wood sawdust	50	30	30
Finely ground corncob	25	30	25
Coarsely ground corncob	25	30	25
Cornstarch	30	30	20
Maltodextric	43	30	20
Bacterial culture + distilled water	200	150	300
Total	**373**	**300**	**420**

การผลิตสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพด

การเตรียมสารสกัดซังข้าวโพดโดยการชั่งซังข้าวโพดจำนวน 50 กรัมต่อน้ำกลั่น 500 มล. ทำการสกัดโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำกรองตัวอย่างซึ่งเป็นสารสกัดที่ได้จากซังข้าวโพด หลังจากนั้นนำสารสกัดซังข้าวโพดมาผสมมอลโทเดกซ์ทริน โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยการให้ความร้อนที่ 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้เกิดเจลสำหรับการเคลือบผลิตภัณฑ์ โดยดัดแปลงวิธีของ Enawgaw *et al*. (2021)

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

ศึกษาการยึดเกาะของเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุตัวกลางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างเคลือบและไม่เคลือบสารเอนแคปซูเลชัน (ดัดแปลงจาก Gamez *et al*., 2019)

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

ทดสอบการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์โดยวิธีฝังกลบ (ดัดแปลงจาก Hazrol *et al*., 2023) ใช้ตัวอย่าง 6 สูตรผสมแตกต่างกัน ตากแห้ง 1 สัปดาห์ ผสมดินและน้ำให้มีความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบในขวดแก้วฝาเกลียวพร้อมระบบให้อากาศนาน 45 วัน เก็บตัวอย่างทุก 15 วัน รายงานเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง นอกจากนี้ทดสอบการย่อยสลายในน้ำและดินของสารชีวภัณฑ์ 3 แบบ ได้แก่ เคลือบไฮโดรเจลจากซังข้าวโพด เคลือบไฮโดรเจลจากน้ำกลั่นและไม่เคลือบ โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Weight loss (\%)} = (Wi - Wf) / Wi \times 100$$

Wi = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนการทดสอบการย่อยสลาย

Wf = น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างหลังการทดสอบการย่อยสลาย

การทดสอบสารพิษตกค้าง

ทดสอบสารตกค้างกลุ่ม Organochlorine, Organophosphate, Pyrethroid และ Carbamate โดยวิธี In-house based on QuEChERS และเทคนิค GC-FPD, GC/μ-ECD, LC-MS ตามลำดับ รวมถึงการทดสอบโลหะหนัก Arsenic, Cadmium, Lead และ Mercury ตามวิธี Manual for Organic Fertilizer Analysis (APSRDO, DOA:4/2551)

การทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

เก็บตัวอย่างสารชีวภัณฑ์ (1 กก.) ในถุงพลาสติกปิดผนึก จำนวน 3 ซ้ำ ที่ 0, 2, 4 และ 6 เดือน วิเคราะห์โดยใช้การวางแผนการทดลองแบบ CRD ทดสอบการปล่อยเชื้อแบคทีเรีย โดยเจือจางตัวอย่างชีวภัณฑ์ให้มีระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-3}, 10^{-4} และ 10^{-5} จากสารละลาย 10 กรัมในน้ำกลั่น 90 มล. ทำการปั่นและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอน

ผลการวิจัย

การศึกษาอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุตัวกลางของเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร (ขี้เลื่อยยางพาราและซังข้าวโพด)

การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบตัวกลางที่เป็นเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร (ขี้เลื่อยยางพาราและซังข้าวโพด) เพื่อใช้เป็นตัวตรึงเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* พบว่าขนาดของวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมในการอัดเม็ดเป็นสารชีวภัณฑ์มีขนาด 80 mesh (Figure 1A) และเมื่อทำการทดสอบอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวโดยการเติมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่ระดับความเข้มข้น 1.52×10^{8} โคโลนี/กรัม โดยการนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°ซ เป็นระยะเวลา 3 เดือน ทำการทดสอบจำนวน 6 กรรมวิธี ทำมีการเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลทดสอบปริมาณการรอดชีวิตของเชื้อทุก 7 วัน พบว่า อัตราการรอดชีวิตของเชื้อมีการลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้ง 6 กรรมวิธี และมีกรรมวิธีที่มีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียได้น้อยที่สุด คือ กรรมวิธีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.65×10^{4} โคโลนี /กรัม และกรรมวิธีที่มีอัตราการรอดชีวิตมากที่สุด คือ กรรมวิธีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 6.3×10^{6} โคโลนี/กรัม (Table 3)

การทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดของสารชีวภัณฑ์

การทดสอบปริมาณอัตราของส่วนผสมการอัดเม็ดของสารชีวภัณฑ์จำนวน 3 กรรมวิธี Table 2 พบว่าปริมาณการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่ดีที่สุด คือ กรรมวิธีที่ 1 เนื่องจากปริมาณสัดส่วนของน้ำ 373 มล. ส่งผลทำให้การขึ้นรูปอัดเม็ดที่ดีและมีความชื้นที่เหมาะสม ทำให้การขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์เหมาะสมที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น ๆ ลักษณะของสารชีวภัณฑ์ทางกายภาพที่ผ่านการอัดเม็ดมีลักษณะรูปร่างเม็ดทรงกระบอกสั้นหรือแท่งเล็ก ๆ ขนาดสม่ำเสมอ ลักษณะสีน้ำตาลอ่อนเทา เกิดจากการผสมของขี้เลื่อยยางพารา (สีน้ำตาลอ่อน) และซังข้าวโพด (สีเหลืองนวล) และลักษณะกลิ่นเป็นกลิ่นไม้ธรรมชาติหรือกลิ่นขี้เลื่อยอ่อน ๆ และกลิ่นหมักอ่อน ๆ คล้ายดินหรือฟางหมัก (Figure 1B)



Figure 1 Size and appearance of corncob and rubberwood sawdust sample and pellet formation of Bioformulation using agricultural waste materials; (A) rubberwood sawdust and (B) corn cobs

Table 3 Bacterial survival rate on carrier materials over a 3-month period

Method	7 Day (cfu/g)	30 Day (cfu/g)	60 Day (cfu/g)	90 Day (cfu/g)
1	$1.52x10^8$	$7.89x10^6$	$8.94x10^5$	$1.65x10^4$
2	$1.52x10^8$	$7.20x10^6$	$4.65x10^5$	$5.30x10^4$
3	$1.52x10^8$	$1.20x10^6$	$1.20x10^5$	$2.08x10^4$
4	$1.52x10^8$	$2.25x10^6$	$6.40x10^5$	$4.40x10^4$
5	$1.52x10^8$	$3.82x10^6$	$3.52x10^5$	$3.82x10^4$
6	$1.52x10^8$	$8.95x10^7$	$2.89x10^7$	$6.30x10^6$

การผลิตสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดเพื่อใช้ในการเคลือบเอนแคปซูเลชั่นของสารชีวภัณฑ์อัดเม็ด

การผลิตสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพด โดยชั่ง 250 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80°ซ เป็นเวลา 30 นาที นำส่วนน้ำที่สกัดได้ผสมกับสารมอลโทเดกซ์ทริน อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยการให้ความร้อนที่ 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดเจล คือ 1:1 ทำให้เกิดเจลได้ดีที่สุดเหมาะสมต่อนำไปใช้ในการเคลือบสารไฮโดรเจลโดยเทคนิคเอนแคปซูเลชั่น เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสี L*, a* และ b* ค่าสีของอัตราส่วนที่เหมาะสม 1:1 มีค่าเท่ากับ 21.750±1.100, 2.477±0.565 และ 7.813±1.272 (Table 4)

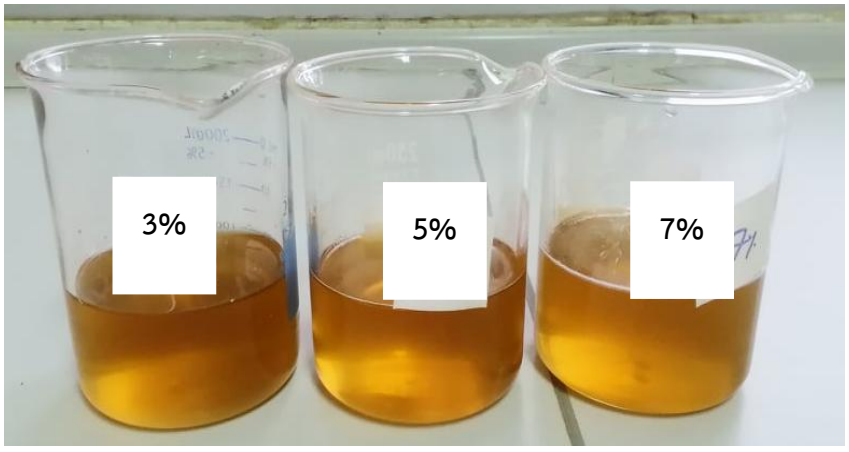


Figure 2 Evaluation of the optimal maltodextrin concentration for hydrogel production from corncob

Table 4 Color measurement values of corncob samples and corn extract

Sample	Color analysis values (mean±SD)			
	L*	a*	b*	ΔE
Corn starch extract	22.177±1.431	2.267±1.434	7.957±1.832	12.037±1.431
1:1 maltodextrin	21.750±1.100	2.477±0.565	7.813±1.272	13.120±1.715
1:2 maltodextrin	22.107±1.381	2.253±0.660	6.943±1.023	14.087±1.644
1:3 maltodextrin	21.233±1.222	2.867±0.617	7.900±1.000	12.690±1.558

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียในการยึดเกาะบนวัสดุตัวกลางโดยการส่องกล้องจุลทรรศอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ในรูปแบบไม่มีการเคลือบสารพบลักษณะของโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้เกิดการแตกได้ง่ายเมื่อมีความชื้น และการเคลือบสารไฮโดรเจลบนวัสดุตัวกลางจะช่วยในเรื่องการปลดปล่อยสารแบบช้า ๆ จากการเคลือบชั้นไฮโดรเจลที่เตรียมจากซังข้าวโพดที่มีส่วนที่เกิดจากโครงสร้างพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นโครงสร้างสามมิติที่ช่วยให้มีรูพรุนและกึ่งซึมผ่านได้ ส่งผลทำให้การแพร่ของน้ำและสารออกฤทธิ์ถูกควบคุมทำให้สารถูกปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง และที่สำคัญการเคลือบสารไฮโดรเจลมีกลไกการปลดปล่อยของสาร เกิดจากซึมผ่านของน้ำเข้าสู่โครงสร้างไฮโดรเจลทำให้พองตัว และเปิดช่องว่างระดับไมโคร-นาโน ส่งผลให้สารค่อย ๆ แพร่ออกมาตามความหนาแน่นและขนาดรูพรุนของผลิตภัณฑ์

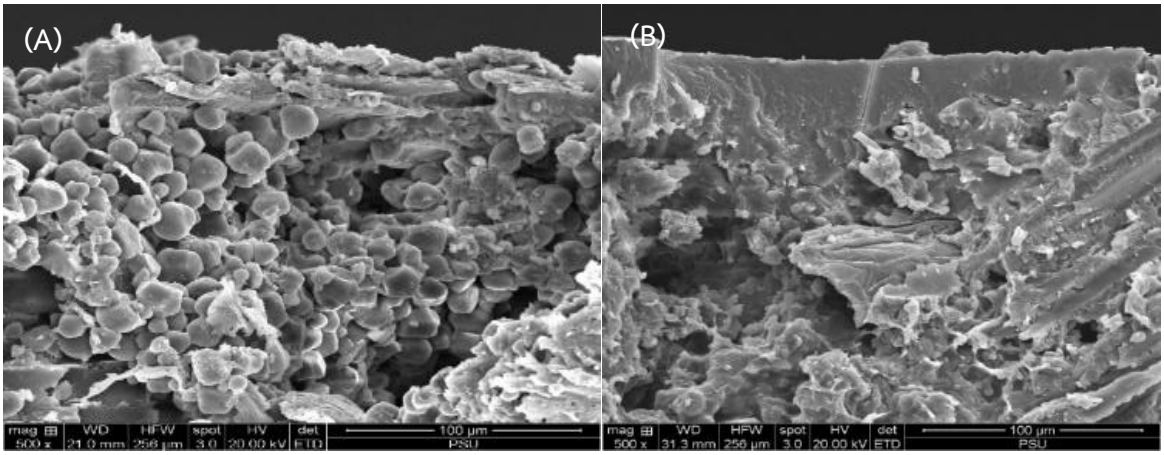


Figure 3 Structure of pelletized biological products; (A) pelletized biological product without hydrogel coating and (B) pelletized biological product with hydrogel coating

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

การทดสอบการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์โดยทำการทดสอบจำนวน 2 แบบด้วยกัน คือ การทดสอบการย่อยสลายในน้ำ และการทดสอบการย่อยสลายในรูปแบบการฝังดิน พบว่าสารชีวภัณฑ์ที่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดมีความสามารถในการย่อยสลายในน้ำเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ และการทดสอบการย่อยสลายในดินใช้ระยะเวลาประมาณ 3–4 เดือน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสารชีวภัณฑ์ที่ไม่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลเมื่อทำการทดสอบการย่อยในน้ำเกิดการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 2 นาที และเมื่อทำการทดสอบการย่อยสลายในดินมีความสามารถในการย่อยได้ 2 วัน (Table 5)

การทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

การทดสอบอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดในรูปแบบที่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพด ผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์ที่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลจากน้ำกลั่น และผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์ที่ไม่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลพบว่า อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์มีระยะเวลาเป็น 6 เดือน 10 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ (Table5)

Table 5 Degradation test results of pelletized biological products and shelf life test results of pelletized biological products

Sample	Degradation time		Shelf life
	in water	in soil	
Biological product coated with corncob hydrogel	More than 1 week	More than 3-4 months	More than 6 months
Biological product coated with hydrogel from distilled water	21 hours	7 day	10 day
Biological product without hydrogel coating	2 mins	2 day	7 day

การทดสอบสารพิษตกค้าง

ทดสอบสารตกค้างกลุ่ม Organochlorine, Organophosphate, Pyrethroid และ Carbamate โดยวิธี In-house based on QuEChERS และเทคนิค GC-FPD, GC/μ-ECD, LC-MS ตามลำดับ รวมถึงการทดสอบโลหะหนัก Arsenic, Cadmium, Lead และ Mercury ตามวิธี Manual for Organic Fertilizer Analysis (APSRDO, DOA:4/2551) ไม่มีการปนเปื้อนของสารตกค้างดังกล่าว

วิจารณ์ผลการวิจัย

การพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อยยางพาราและซังข้าวโพดผสมเชื้อ *Bacillus subtilis* ลงในวัสดุอัดเม็ดถือเป็นการตรึงจุลินทรีย์ (immobilization) ในเมทริกซ์ของแข็ง (Bashan *et al*., 2024) และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดในรูปแบบเอนแคปซูเลชัน จะช่วยในการลดการปลดปล่อยของจุลินทรีย์ ป้องกันการย่อยสลาย

รวดเร็วของเม็ดชีวภัณฑ์ในธรรมชาติ เนื่องจากสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถสร้างโครงข่ายสามมิติ มีคุณสมบัติการพองตัวเมื่อสัมผัสน้ำ และมีโครงสร้างรูพรุนระดับไมโคร-นาโน ทำให้เกิดการควบคุมการแพร่ของน้ำ ออกซิเจน และสารอาหารเข้าสู่เม็ดชีวภัณฑ์ ส่งผลทำให้ช่วยลดการย่อยสลายเร็วในธรรมชาติ และควบคุมการปลดปล่อยสารชีวภัณฑ์ไม่ให้เกินความจำเป็นต่อพืช (Mikhailidi *et al*., 2024) โดยพบว่าเชื้อแบคทีเรียสามารถรอดชีวิตบนวัสดุดังกล่าวได้นานถึง 3 เดือน เนื่องจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดังกล่าวเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่เป็นประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง ทำให้เอื้อต่อการทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวกลาง จึงมีความเหมาะสมต่อการยึดเกาะ และมีผลต่อการอัตรารอดของเชื้อจุลินทรีย์ (Cruz-Barrera *et al*., 2025) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phiromatan *et al.* (2013) ที่ศึกษาการรอดชีวิตของ *Azotobacter vinelandii* NDD-CK-1 บนวัสดุตัวกลาง 4 ชนิด ได้แก่ พีท พีทผสมปุ๋ยหมักจากซังข้าวโพด ใบทองกวาว และเศษเห็ด โดยพบว่าพีทผสมปุ๋ยใบทองกวาวให้ผลดีที่สุดในระยะเวลา 90 วัน (6.41 log cfu/g) ซึ่ง Parveen *et al.* (2023) ศึกษาการตรึงเชื้อบนวัสดุ 5 ชนิด ได้แก่ กลูเตน ทัลก์ ถ่าน เบนโทไนต์ และน้ำเลี้ยงเชื้อ พบว่าทัลก์ผสมกลูเตนให้ผลการเก็บรักษาเชื้อดีที่สุด (9.03×10^{10} cfu/g) นานถึง 360 วัน โดยความชื้นที่เหมาะสม (53.6%) มีผลต่อการเจริญและการขึ้นรูปเม็ดอย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับงานของ Hettiarachchi *et al.* (2019) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารช่วยยึดเกาะ (แป้งข้าวเจ้า ปูนขาว ฟอสเฟตหิน) ในสัดส่วน 1–3% ช่วยเพิ่มความสามารถในการแตกตัวและการปลดปล่อยธาตุอาหารในดินได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ การเคลือบด้วยสารไฮโดรเจลยังช่วยควบคุมการปลดปล่อยสารชีวภัณฑ์ได้ดีขึ้น ตามผลวิจัยของ Skrzypczak *et al.* (2022) ซึ่งใช้แคปซูลไฮโดรเจลแบบหลายชั้นที่ประกอบด้วยโซเดียมอัลจิเนต 0.79% คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 0.24% และแป้ง 8.07% โดยวิธีจุ่มและพ่นสามารถควบคุมการปลดปล่อยไอออนของปุ๋ยและยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ถึง 6 เดือน สอดคล้องกับงาน ของ Sattar *et al*. (2024) ที่พัฒนาปุ๋ยนาโนเคลือบไฮโดรเจล จาก LNR/AAc/pectin ซึ่งสามารถย่อยสลายในดินได้ถึง 96.3% ภายใน 120 วัน

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยยางพารา และซังข้าวโพด โดยใช้เชื้อ *Bacillus subtilis* และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเคลือบไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดในรูปแบบเอนแคปซูเลชัน ผลการทดสอบพบว่าวัสดุตัวกลางขนาด 80 mesh เหมาะสมต่อการอัดเม็ดและการตรึงเชื้อ สามารถรักษาอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ได้ดีตลอด 3 เดือน โดยคงจำนวนเชื้อในระดับสูงสุด 6.3×10^{6} โคโลนี/กรัม การใช้น้ำ 373 มล. ให้การขึ้นรูปเม็ดที่มีคุณภาพและสม่ำเสมอ ขณะที่การเคลือบไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดที่อัตราส่วนสารสกัดต่อสารมอลโทเดกซ์ทริน 1:1 ให้เจลที่มีเสถียรภาพ และเหมาะสมต่อการควบคุมการปลดปล่อยสาร จากการวิเคราะห์ SEM พบว่าไฮโดรเจลช่วยสร้างโครงข่ายพอลิเมอร์กึ่งซึมผ่านได้ ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสารชีวภัณฑ์อย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบไฮโดรเจลมีการย่อยสลายในน้ำและดินช้าลงอย่างมีนัยสำคัญ ยืดอายุการเก็บรักษาได้มากกว่า 6 เดือน และไม่พบสารพิษตกค้างหรือโลหะหนัก โดยสรุปแนวทางดังกล่าวช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ควบคุมการปลดปล่อยและยืดอายุการใช้งานของสารชีวภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ทางการเกษตรอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ที่ให้ทุนวิจัยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 และขอขอบคุณบริษัทกาตีนา เนเซอรัล โปรดักส์ ที่เป็นบริษัทร่วมวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยฟาฏอนี ที่ให้การอนุเคราะห์ด้านสถานที่ และวัสดุอุปกรณ์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

Ali, A., X. Liu, W. Yang, W. Li, J. Chen, Y. Qiao, Z. Gao and Z. Yang. 2024. Impact of bio-organic fertilizer incorporation on soil nutrients, enzymatic activity and microbial community in wheat-maixe rotation system. **Journal Agronomy** 14(1942): 1–18. https://doi.org/10.3390/agronomy 14091942

Almeida, B.P., L.F.S. Pavao, M.S.D. Farias, N.M. Nicolodi, M.T. Petry, M.M. Leal, P.C. Coradi, V.L. Souza, M.D.S. Queiros and G.L. Zabot. 2025. Agricutural biomass as a resource for biomaterials biofertilizers and bioproducts: a systematic review. **Journal Agrochemicals** 4(23): 1–27. https://doi.org/10.3390/agrochemicals 4040023

Bashan, Y., L.E. De-Bashan, S.R. Prabhu and J.P. Hernandez. 2024. Advances: in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013). **Plant Soil** 214(378): 1–33. https://doi10.1007/s11104-013-1956-x

Crouzet, M., C.L. Senechal, V.S. Brozel, P. Costaglioli, C. Barthe, M. Bonneu, B. Garbay and S. Vilain. 2014. Exploring early steps in biofilm formation: set-up of an experimental system for molecular studies. **BMC Microbiology** 14(253): 1–12. https://doi.org/10.1186/s12866-014-0253

Cruz-barrera, M., M. Chaparro, J. Mendoza, D. Torres-Cuesta, M. Gomez and G.A. Estrada-Bonilla. 2025. Hydrogel capsules as carriers for PGPB consortia enhance compost efficacy and nuytrient uptake in oat (*Avena sativa*) fertilization. **Plant and Soil** 500(2): 245–260. https://doi.org/10.1007/s11104 -025-0754-y

Department of Agricultural Extension. 2020. **Application of Microbial Agents (Biological Products) for Pest Control.** Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives. 1 p. [in Thai]

Enawgaw, H., T. Tesfaye, K.T. Yilma and D.Y. Limeneh. 2021. Synthesis of a cellulose – Co-AMPS hydrogel for personal hygienen applications using cellulose extracted from corncobs. **Gels** 7(236): 1–10. https://doi.org/10.3390/gels7040236

E, P., S. Sarkar and P.K. Maji. 2024. A review on slow-release fertilizer: nutrient release mechanism and agricultural sustainability. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 12(4): 113211. https://doi.ord/10.1016/j.jece.2024.113211

Gamez, R., M. Cardinale, M. Montes, S. Ramirez, S. Schnell and F. Rodriguez. 2019. Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* Ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006) on banana cv. williams (*Musa acumunata* colla). **Microbiological Research** 220: 1–20.

Han, M.L., Q. An, S.F. He, X.L. Zhang, M.H. Zhang, X.H. Gao, Q. Wu and L.S. Bian. 2020. Solid-state fermentation on poplar sawdust and corncob wastes for lignocellulolytic enzymes by different *Pleurotus ostreatus* strains. **BioResources** 15(3): 4982–4995.

Hazrol, M.D., S.M. Sapuan, R.A. Ilyas, E.S. Zainudin, M.Y.M. Zuhri and N.I. Abdul. 2023. Effect of corn husk fibre loading on thermal and biodegradable properties of kenaf/cornhusk fibre reinforced corn starch-based hybrid composites. **Heliyon** 9(4): e15153.

Hettiarachchi, L., N. Jayathilake, S. Fernando and S. Gunawardena. 2019. Effects of compost particle size, moisture content and binding agents on co-compost pellet properties. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 12(4): 184–191. https://doi.org/10.25465/j.ijabe.20191204.4354

Kasikorn Research. 2025. **Thai chemical fertilizer business outlook**. Retrieved from https://media.setgroup.or.th/setlink/Documents/2025/May/Accessed [in Thai]

Kawicha, P., W. Natino and W. Phatthanasan. 2020. Development of encapsulated granule of trichoderma-based bioproduct for tomato fusarium wilt disease control. **Thai Journal of Science and Technology** 9(6): 832–843. [in Thai]

Kouam, I.D., L. Tchamani, G. Ntsoli, M.A. Bedine, R.W. Titti and A. Yaouba. 2024. Effect of different carriers and storage temperatires on the viability of *bacillus thuringiensis* B9 and *Bacillus pacificus* B11 isolated from tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Rhizosphere. **Biology and Life Sciences Forum** 30(27): 1–6. https://doi.org/10.3390/loCAG2023-17337

Krasilnikov, P., M.A. Taboada and Amanullah. 2022. Fertizer use , soil health and agricultural sustainability. **Journal Agricuture** 12(462): 1–5. https://doi.org/10.3390/agriculuve 12040462

Kumar, T., A. Kumar, V. Anshumali, B.L. Bruno and M. Rajkumar. 2022. Synergism of industrial and agricultural waste as a suitable carrier material for developing potential biofertolizer for sustainable agricultural production of eggplant. **Harticulturae** 8(444): 1–13. https://doi.org/10.3390/horticurae 8080444

Mikhailidi, A., E. Ungureanu, B.M. Tofanica, O.C. Ungureanu, M.E. Fortuna, D. Belosinschi and I. Volf. 2024. Agiculture 4.0: polymer hydrogels as delivery agents of active ingredients. **Journal MDPI** 10(368): 1–25.

Parveen, N., R. Mishra. D.V. Singh. P. Kumer and R.P. Singh. 2023. Preparation of microbial formulations to enhance the shelf life and its efficacy on the growth of spinach (*Spinacia oleracea* L.). **World Journal Microbiology & Biotechnology**. 39(180): 1–12. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03594-4

Pearvongnukul, S., K. Tunkananurk and A. Amnuaykanjanasin. 2023. Effects of biocontrol agents and pesticides on pest and disease management in green oak lettuce (*Lactuca sativa* L. var crispa) in greenhouses. **Khon Kaen Agriculture Journal** 51(4): 702–718. [in Thai]

Phiromtan, M., T. Mala and P. Srinives. 2013. Effect of various carriers and storage temperatures on survival of *Azotobacter vinelandii* NDD-CK-1 in powder inoculant. **Modern Applied Science** 7(6): 81–89.

Randima, G.W. A. P., Y.M.A.L.W. Yapa, K. Masakorala and W.G.S.M. Kumari. 2023. Evaluation of locally-available agicultural and industrial waste materials as effective carriers for bacterial inocula in freshwater bioremediation. **International Journal of Advanced and Applied Sciences** 10(7): 165–177 https://doi.org/10.21833/ijaas.2023.07.018

Rithmanee, T. and A. Phonpannawit. 2018. Anthocyanin encapsulation from purple corncob by spray drying. **EAU HERITAGE Journal Science and Technology** 12(2): 169–180. [in Thai]

Sattar, O.D.A., R.M. Khaild and S.F.M. Yusoff. 2024. Eco-friendiy natural rubber-based hydrogel loaded with nana-fertilizer as soil conditioner and improved plant growth. **International Journal of Biological Macromolecules** 280(1): 135555. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.1 35555

Saengsanga, T. and T. Rattana. 2017. Role of phosphate-solubilizing bacteria in enhancing phytoremediation efficiency of heavy-metal -contaminated soils. **Khon Kaen University Science Journal**. 46(4): 643–653. [in Thai]

Skrzypczak, D., F. Gil, G. Izydorczyk, K. Mikula, A. Gersz, V. Hoppe, K. Chojnacka and A. Witek-krowiak. 2022. Innovative bio-waste-based multilayer hydrogel fertilizers as a new solution for precision agriculture. **Journal of Environmental Management** 321(1): 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116002