

แอกติโนมัยซีทที่มีศักยภาพจากดินพื้นที่บางกระเจ้า  
เพื่อการผลิตสารชีวภัณฑ์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

POTENTIAL ACTINOMYCETES FROM BANG KRAJCHAO SOIL  
FOR THE PRODUCTION OF PLANT GROWTH-PROMOTING BIOPRODUCTS

พิชามณูช น้อยสุวรรณ<sup>1,2</sup> ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์<sup>3</sup> วาสนา พรหมเทวี<sup>1,2</sup> และพัชณี ศรีคำสุข<sup>1,2\*</sup>

Phichamon Noisuwan<sup>1,2</sup>, Chantamane Poonjarersilp<sup>3</sup>, Wasana Phantewee<sup>1,2</sup>

and Phatchani Srikhumsuk<sup>1,2\*</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการคัดแยกแอกติโนมัยซีท ที่มีศักยภาพในการสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโตต่อพืชในพื้นที่ดินเค็มสวนป่าวนเกษตรบางกระเจ้า จังหวัดสมุทรปราการจากดินตัวอย่าง 11 จุด พบว่ามีเชื้อแอกติโนมัยซีทที่แยกได้ทั้งสิ้น 219 ไอโซเลท และพบ 20 ไอโซเลทที่มีความสามารถในการละลายฟอสเฟตในอาหารทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ PKV agar LB agar และ NBRIP agar โดยวิธี spot test ที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 7 วัน พบว่าความสามารถในการย่อยสลายฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อ PKV agar ดีที่สุด และวัดค่า Phosphate Solubilization Index (PSI) ให้ค่าสูงมากกว่า 3.50 มีเพียง 3 ไอโซเลทจากทั้งหมด 20 ไอโซเลท เป็น  $5.02 \pm 0.07$   $4.30 \pm 0.50$  และ  $3.90 \pm 0.09$  คือ ไอโซเลท รหัส BJ01-4 BJ09-4 และ BJ01-2 ตามลำดับ และการหาลำดับเบสของยีน 16S rRNA ของไอโซเลท รหัส BJ01-4 พบว่ามีความคล้ายคลึงกับสายพันธุ์ *Streptomyces sennicompoti* และจากการทดสอบความสามารถในการใช้เป็นกล่าเชื้อสำหรับการผลิตผงปุ๋ยชีวภาพโดยเปรียบเทียบทั้ง 4 สูตรกับการปลูกพริก และมะเขือเทศ เป็นเวลา 30 วัน พบว่าแอกติโนมัยซีทไอโซเลท รหัส BJ01-4 มีความสามารถส่งเสริม

<sup>1</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

<sup>1</sup>Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon District, Bangkok 10120

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

<sup>2</sup>Biodiversity and Sustainable Utilization Research Unit, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon District, Bangkok 10120

<sup>3</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

<sup>3</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon District, Bangkok 10120

\*Corresponding author e-mail: phatchani.s@mail.rmutk.ac.th

Received: 23 September 2025; Revised: 10 November 2025; Accepted: 13 November 2025

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2025.30>

การเจริญของต้นพริกได้ผลดีที่สุดที่สุดในปุ๋ยสูตรที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย แปะข้าวเจ้าและรำข้าวในสัดส่วน 80:20 กรัม-และน้ำ 30 มิลลิลิตร ซึ่งมีโอกาสในการใช้แอกติโนไมซีทไอโซเลทนี้ในการผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อช่วยลดต้นทุนทางการเกษตรและลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** แอคติโนไมซีท ส่งเสริมการเจริญเติบโตพืช การย่อยสลายฟอสเฟต ปุ๋ยชีวภาพ

*Streptomyces sennicomposti*

## Abstract

This research aimed to isolate potent plant growth-promoting actinomycetes (PGPA) from the saline soil of the Bang Krachao agroforestry area in Samut Prakan Province. Soil samples were collected from 11 distinct locations. A total of 219 actinomycete isolates were successfully recovered. A Screening for phosphate-solubilizing ability revealed 20 isolates capable of solubilizing phosphate on three different test media: PKV agar, LB agar, and NBRIP agar, using the spot test method at 28 °C for 7 days. The results indicated that phosphate degradation was most effective on PKV agar. The phosphate solubilization index (PSI) was measured, and only 3 isolates out of the 20 exhibited a PSI value greater than 3.50. These isolates coded BJ01-4, BJ09-4, and BJ01-2 yielded PSI values of  $5.02 \pm 0.07$ ,  $4.30 \pm 0.50$  and  $3.90 \pm 0.09$ , respectively. 16S rRNA gene sequencing of isolate BJ01-4 showed high sequence similarity to *Streptomyces sennicomposti*. The promising isolate, BJ01-4, was subsequently tested as an inoculant for the production of a biofertilizer powder. Four different biofertilizer formulations were compared in growth trials with chili and tomato plants for 30 days. The results demonstrated that the BJ01-4 isolate maximized the growth promotion of chili plants when incorporated into Formulation 4, which consisted of a rice flour and rice bran mixture (80:20 w/w) with 30 mL of water. This actinomycete isolate presents a promising opportunity for developing a cost-effective biofertilizer to potentially reduce the reliance on chemical fertilizers in agricultural practices in the future.

**Keywords:** actinomycetes, plant growth-promoting, phosphate solubilization, biofertilizer,

*Streptomyces sennicomposti*

## บทนำ

การทำเกษตรอินทรีย์คือการเพาะปลูกพืชด้วยวิธีธรรมชาติ โดยหลีกเลี่ยงสารพิษและสารเคมี เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของดิน (Durán-Lara et al., 2020; Parizad et al., 2023) เกษตรอินทรีย์มุ่งเน้นการสร้างคุณสมบัติของระบบนิเวศ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มผลผลิตด้วยกระบวนการที่เป็นระบบตั้งแต่การจัดการไปจนถึงมาตรฐานการผลิต (Zimmermann et al., 2021) ซึ่งไม่เพียงแต่ให้ผลผลิตที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังช่วยลดต้นทุนและส่งเสริมเศรษฐกิจแบบพอเพียงอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมากในปัจจุบันยังคงไม่ปลอดภัยเนื่องจากการปนเปื้อนของสารเคมีและจุลินทรีย์ที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ (Tayoh, 2020) สถานการณ์การผลิตพืชอาหารในประเทศไทยเริ่มให้ความสำคัญกับการผลิตที่ปลอดภัยมากขึ้นทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากปัญหาด้านสาธารณสุขที่เพิ่มขึ้นและข้อจำกัดทางการค้าที่กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ต้องมีมาตรฐานการรับรองที่เข้มงวด

สถานการณ์การผลิตพืชอาหารในประเทศไทยเริ่มให้ความสำคัญกับการผลิตที่ปลอดภัยมากขึ้นทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากปัญหาด้านสาธารณสุขที่เพิ่มขึ้นและข้อจำกัดทางการค้าที่กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ต้องมีมาตรฐานการรับรองที่เข้มงวด จากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาดินเค็มในพื้นที่บางกระบือ จังหวัดสมุทรปราการ พบว่าพื้นที่นี้ได้รับผลกระทบจากน้ำทะเลหนุนสูง น้ำกร่อยได้ไหลเข้าท่วมพื้นที่การเกษตร ส่งผลให้พืชสวน และไม้ยืนต้นหลายชนิดเริ่มขาดแคลนน้ำ และตายลง โดยเฉพาะช่วงที่ระดับน้ำทะเลสูงกว่าปกติในแต่ละปี ทำให้ความสามารถในการเจริญเติบโตของพืชลดลง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนแปลงไป (Dusenge et al., 2019) ยิ่งไปกว่านั้น ภาวะดินเค็มยังส่งผลให้ฟอสฟอรัสในดินตกตะกอนกับไอออนต่าง ๆ (เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม) ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ (Wu et al., 2022; Teles et al., 2024) รวมไปถึงความเป็นด่างของเอนไซม์ฟอสฟาเตสยังส่งผลต่อการละลายของฟอสฟอรัสในดินด้วย (Xie et al., 2022) ดังนั้นการจัดการเพื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำในดินเค็มจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพาะปลูกในพื้นที่ดังกล่าว (Wu et al., 2022; Rana et al., 2024)

แอกติโนมัยซีต (Actinomycetes) เป็นกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวกที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศดิน (Alexander, 1977) เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth-Promoting Actinomycetes: PGPA) เช่น กรดอินโดล-3-แอซิดิก (IAA) และยังสามารถในการผลิตสารทุติยภูมิที่มีประโยชน์หลากหลาย (Nimnoi et al., 2017) คุณสมบัติที่โดดเด่นอย่างหนึ่งของแอกติโนมัยซีตคือความสามารถในการละลายฟอสเฟต (Phosphate Solubilization) ผ่านกลไกการผลิตกรดอินทรีย์ต่างๆ เพื่อเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่ตกตะกอนในรูปอนินทรีย์ให้เป็นฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ได้ (Pan & Cai, 2023) โดยมีการวัดศักยภาพด้วยค่าดัชนีการละลายฟอสเฟต (Phosphate Solubilization Index: PSI) ซึ่งเป็นมาตรวัดความสามารถของจุลินทรีย์ในการปลดปล่อยฟอสเฟตให้พืชนำไปใช้ได้ (Hameed et al., 2025) งานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

(PGPR) ที่สามารถทนเค็ม (Halotolerant PGPR) มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ภายใต้สภาวะดินเค็มและเพิ่มความพร้อมของธาตุอาหาร รวมถึงการละลายฟอสเฟต (Muzammil et al., 2024; Kaur & Suman, 2025) โดยเฉพาะ แอคติโนมัยซีททนเค็มได้รับการศึกษาว่ามีศักยภาพในการเป็นปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มผลผลิตในพื้นที่เกษตรที่ได้รับผลกระทบจากความเค็ม (Hameed et al., 2025) งานวิจัยของ (Gaya et al. 2020) ได้ศึกษาแบคทีเรียทนเค็มที่สามารถเจริญได้ดีในดินแห้งแล้ง และมีคุณสมบัติส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ยังพบว่า (Nurunnabi et al., 2020) ได้คัดแยกจุลินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ก่อโรคจากเชื้อราเอนโดไฟติก (Endophytic Fungi) ในป่าชายเลน นอกจากนี้ รายงานวิจัยของ (Pande et al., 2017) ยังพบว่าแบคทีเรียที่แยกได้จากดินเกษตรในประเทศอินเดียมีความสามารถในการย่อยสลายฟอสเฟตให้กลายเป็นปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยเฉพาะ *Alcaligenes aquatilis* และ *Burkholderia cepacia* ซึ่งมีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟต (PSI) สูงถึง  $4.88 \pm 0.69$  ถึง  $4.48 \pm 0.30$

แม้งานวิจัยเกี่ยวกับแอคติโนมัยซีทและศักยภาพในการละลายฟอสเฟตจะมีอยู่มาก แต่ยังคงขาดการศึกษาที่มุ่งเน้นการคัดแยก และคัดเลือกแอคติโนมัยซีทสายพันธุ์พื้นเมืองที่สามารถทนทานต่อสภาพดินเค็ม และน้ำกร่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัญหาเฉพาะของพื้นที่บางกระเจ้า ประเทศไทย การใช้ไอโซเลทพื้นเมืองที่ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสุดในการพัฒนาเป็นสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเกษตรยั่งยืนในพื้นที่ดินเค็ม ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะคัดแยก และคัดเลือกแอคติโนมัยซีทสายพันธุ์พื้นเมืองที่มีศักยภาพในการละลายฟอสเฟต และผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชจากพื้นที่ดินเค็มบางกระเจ้า เพื่อเป็นทางเลือกในการลดการใช้ปุ๋ยเคมี และพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพสำหรับเกษตรยั่งยืนในพื้นที่ดังกล่าว ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าแอคติโนมัยซีทหลายสายพันธุ์มีศักยภาพในการผลิตสารไซเดอโรฟอร์ (Siderophore) และ IAA ซึ่งมีคุณสมบัติยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคพืช (Sharma et al., 2014; Passari et al., 2016) และสารยับยั้งกระบวนการเมแทบอลิซึมของเชื้อราก่อโรค (Ko et al., 2010)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกและคัดเลือกแอคติโนมัยซีทที่มีศักยภาพในการละลายฟอสเฟตจากดินเค็มในพื้นที่บางกระเจ้า โดยจะศึกษาคุณสมบัติการผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และทำการจำแนกชนิดด้วยวิธีการทางสัณฐานวิทยา และลำดับเบสของยีน 16S rRNA เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นสารชีวภัณฑ์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่ดินเค็มต่อไป และงานวิจัยนี้เป็นโครงการที่สนองโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระเทพราชสุตาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) ของมหาวิทยาลัยฯ

## วิธีดำเนินการวิจัย

1. การคัดแยกแบคทีเรียกลุ่มแอคติโนมัยซีทจากดินเค็มในพื้นที่เกษตรกรรมบางกระเจ้า

การแยกแบคทีเรียกลุ่มแอคติโนมัยซีทจากดินในพื้นที่เกษตรกรรมบางกระเจ้าดำเนินการเก็บตัวอย่างดินดำเนินการในพื้นที่เกษตรกรรมของตำบลบางกระเจ้า อำเภอพระประแดง จังหวัด

สมุทรปราการ โดยเก็บตัวอย่างจำนวน 11 จุด ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร พร้อมบันทึกข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของดิน โดยใช้เครื่องวัดค่าความชื้นของดิน (Soil Meter; Takemura, model DM-15, Japan) และเครื่องวัดอุณหภูมิของดินแบบสแตนเลส (Stainless Steel Soil Thermometer; Huxaun, China) ตัวอย่างดินแต่ละจุดเก็บด้วยซองสแตนเลสที่ผ่านการฆ่าเชื้อ จำนวนประมาณ 100 กรัม บรรจุในถุงซิปล็อกปลอดเชื้อ เก็บในถังน้ำแข็ง และนำส่งห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาประยุกต์ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เพื่อทำการคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีท ตัวอย่างดินถูกตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นชั่งตัวอย่างละ 10 กรัม ใส่ในถุงพลาสติกชนิดหนาเติมสารละลาย 0.85% NaCl ปริมาตร 90 มิลลิลิตร และตีผสมด้วยเครื่องตีบดตัวอย่าง (Homogenizer; Mayo, code HG400V, Italy) ที่ระดับความแรง 3 เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการเจือจางลำดับส่วนของสารละลายตัวอย่างตั้งแต่  $10^{-1}$  ถึง  $10^{-6}$  โดยดูดสารละลายแต่ละระดับเจือจาง 1 มิลลิลิตรลงในจานเพาะเชื้อปลอดเชื้อ แล้วเทอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งชนิด ISP2 (International Streptomyces Project 2) ที่อุณหภูมิอุ่นพอตกลงไป พร้อมเขย่าจานเบา ๆ เพื่อให้ผสมอย่างทั่วถึง หลังจากอาหารแข็งตัวแล้ว บ่มจานเพาะเชื้อในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นคัดเลือกโคโลนีที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเฉพาะของแอคติโนมัยซีท ได้แก่ ลักษณะเป็นเส้นใยและผงฝุ่น (Filamentous and Powdery Colonies) บันทึกลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเก็บเชื้อที่คัดเลือกได้ไว้ในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง ISP2 เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

2. การคัดเลือกเชื้อแอคติโนมัยซีทที่สามารถละลายฟอสเฟต จำนวน 20 ไอโซเลทที่คัดเลือกจากลักษณะสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการละลายฟอสเฟตบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 3 ชนิด ได้แก่ Pikovskaya's agar (PKV agar) Luria Broth Agar (LB agar) และ National Botanical Research Institute's Phosphate Agar (NBRI-P agar) อ้างอิงจากงานวิจัยของ Amri et al. (2023) โดยใช้วิธี spot test โดยการจิ้มเชื้อจากหลอดสต็อกลงบริเวณกึ่งกลางจานเพาะเชื้อแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 7 วัน การทดลองทำซ้ำ 3 ครั้งต่อไอโซเลท หลังการบ่ม ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี (Colony Diameter, Dc) และเส้นผ่านศูนย์กลางรวมของโคโลนีและบริเวณใส (Total Diameter; DT) เพื่อคำนวณค่าดัชนีการละลายฟอสเฟต (Phosphate Solubilization Index; PSI) ตามสูตรของ Pande et al. (2017):  $PSI = DT / Dc$ . ผลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า PSI ระหว่างไอโซเลท

$$PSI = \frac{\text{Colony diameter} + \text{Halo zone diameter}}{\text{Colony diameter}}$$

3. การศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และการละลายฟอสเฟต ใช้วิธีเดียวกับการทดสอบการละลายฟอสเฟตบนอาหาร PKV โดยเลือกเชื้อที่มีศักยภาพสูงสุดมาทดลองที่อุณหภูมิ 28, 30 และ 37 องศาเซลเซียส ทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน และทำซ้ำ 3 ครั้งต่ออุณหภูมิ จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีและบริเวณใสเพื่อคำนวณค่า PSI และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One-way ANOVA เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการละลายฟอสเฟตของเชื้อแต่ละสายพันธุ์

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อแอคติโนมัยซีทที่ให้ผลบวกจากการทดสอบการละลายฟอสเฟตถูกนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเบื้องต้น โดยย้อมสีแกรม (Gram Staining) และสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์ประกอบ (Compound Microscope; Nikon, model MW1210N, Japan) เพื่อพิจารณารูปร่างของเส้นใย สปอร์ และผลการติดสีแกรม พร้อมบันทึกภาพจุลทรรศน์เพื่อใช้ในการระบุลักษณะจำแนกเบื้องต้น

4. การวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA ของสายพันธุ์แอคติโนมัยซีทที่มีศักยภาพสูงสุด (รหัส BJ01-4) ถูกนำมาวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA เพื่อระบุสายพันธุ์ โดยทำการขยายยีนด้วยเทคนิค PCR (Polymerase Chain Reaction) โดยใช้ Universal primers คือ 27F (5'-GAGTTTGAT CCTGGCTCA-3') และ 1492R (5'-TACGGCTACCTTGTTACGACTT-3') ผลผลิต PCR ที่ได้ถูกนำไปหาลำดับเบส (sequencing) และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลใน GenBank เพื่อระบุชนิดของเชื้ออย่างแม่นยำ

5. การศึกษาผลของการทำเชื้อผงเพื่อใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ โดยนำเชื้อรหัส BJ01-4 ทำเป็นสารแขวนลอยเซลล์ที่มีความเข้มข้น  $10^6$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และนำมาเป็นกล้าเชื้อเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งผง โดยเปรียบเทียบสูตรอาหารที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 ประกอบด้วย เมล็ดข้าวฟ่างบด : แป้งมันสำปะหลัง (90:10 กรัม) สูตรที่ 2 ประกอบด้วย แป้งข้าวเจ้า : ผงเมล็ดข้าวฟ่างบด (90:10 กรัม) สูตรที่ 3 ประกอบด้วย รำข้าว 100 กรัม และสูตรที่ 4 ประกอบด้วย รำข้าว : แป้งข้าวเจ้า (20:80 กรัม) ทั้ง 4 สูตรเติมน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 30 มิลลิลิตร เตรียมในถุงพลาสติกทึบร้อนขนาด 18×21 เซนติเมตร ที่สวมปากถุงด้วยหลอดพลาสติกที่เรียกว่าคอหัด และปิดด้วยจุกสำลีหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำเข้าหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ (Hirayama; Model HV-50II, Japan) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และเมื่อเย็นตัวลง นำมาเติมสารละลายแขวนลอยเชื้อจากข้างต้น ประมาณ  $2 \times 10^8$  CFU/ml แฉให้แห้งในถาดอะลูมิเนียม แล้วนำเข้าตูบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำออกจากถุงแล้วอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven; Memmert, model UNB 100 Oven, Netherlands) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเก็บใส่ขวดแก้วปราศจากเชื้อเพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อทดสอบในกระถางต้นไม้ต่อไป ในการทดลองนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อผงที่ผลิตได้จากเชื้อแอคติโนมัยซีทรหัส BJ01-4 ต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ พริกชี้ฟ้า (*Capsicum annuum*) และมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) โดยต้นกล้าทั้งสองชนิดถูกเพาะในวัสดุเพาะจนมีอายุประมาณ 30 วัน จากนั้นจึงย้ายลงปลูกในกระถางทดลอง โดยรองก้นกระถางด้วยเชื้อผงประมาณ 1 ซ่อนโต๊ะต่อกระถาง

ซึ่งบรรจุดินปลอดเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ การทดลองแต่ละสูตรทำซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ (Replications) เพื่อความถูกต้องทางสถิติ กระทั่งทดลองถูกจัดวางภายใต้สภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมปริมาณแสงและน้ำอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 3 เดือน หลังจากนั้นทำการวัดค่าความสูงของต้น (จากพื้นดินถึงปลายยอด) เพื่อประเมินผลการเจริญเติบโตของพืชที่ได้รับเชื้อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Control) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลความสูงกับสูตรปุ๋ย และระยะเวลาการปลูกโดยใช้โปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 19 โดยใช้สถิติ One way ANOVA

### ผลการวิจัย

#### 1. การแยกแบคทีเรียแอคติโนมัยซีทจากดินเค็มในพื้นที่เกษตรกรรมบางกระเจ้า

การเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลบางกระเจ้า อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ภายในเขตพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ จำนวนทั้งหมด 11 จุด ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร ผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพของดินพบว่า ค่าความชื้นเฉลี่ย  $3 \pm 1.8\%$  RH (ช่วง 1–8 % RH) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง  $6.3 \pm 0.5$  และอุณหภูมิดินเฉลี่ย  $33.2 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาพที่ 1 (Figure 1) จากการคัดแยกเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง ISP2 (International Streptomyces Project Medium No. 2) พบการเจริญของโคโลนีที่มีลักษณะเป็นเส้นใย พุคคล้ายฝุ่น สีเทาอ่อนถึงน้ำตาลอมเทา และมีกลิ่นดินเฉพาะตัว ซึ่งเป็นลักษณะของแอคติโนมัยซีท โดยแยกได้ทั้งหมด 219 ไอโซเลท ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 (Figure 2 and 3) ไอโซเลทที่ได้แสดงความแตกต่างในสีของโคโลนี (ขาว เทา น้ำตาล เหลืองอ่อน) และรูปแบบการสร้างสปอร์ (เส้นใยตรง หรือโค้งงอ) ถูกนำไปคัดเลือกต่อไป



**Figure 1** Soil Sampling Moisture Measurement Soil Temperature and Acidity-Alkalinity.

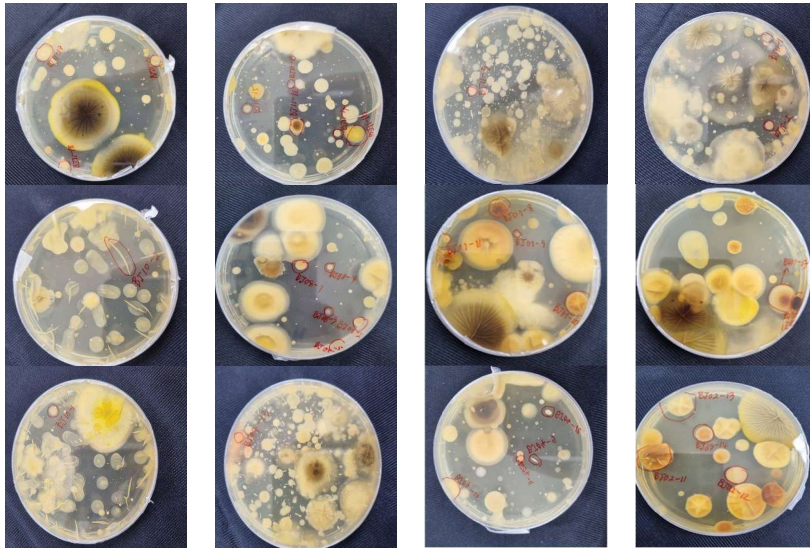


Figure 2 Selection of bacteria on ISP2 agar media and isolate coding.



Figure 3 Colony characteristics of bacteria growing on ISP2 agar.

## 2. การคัดเลือกแอคติโนมัยซีทที่สามารถละลายฟอสเฟต

ผลการทดสอบความสามารถในการละลายฟอสเฟตในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง 3 สูตร ได้แก่ LB, NBRIP และ PKV โดยใช้วิธี spot test แสดงให้เห็นว่าเชื้อส่วนใหญ่สร้างวงใส (halo zone) รอบโคโลนีในอาหาร PKV ได้ชัดเจนกว่าอาหารสูตรอื่น โดยเฉพาะไอโซเลท รหัส BJ01-4 ซึ่งให้ค่า Phosphate Solubilization Index (PSI) เฉลี่ย  $5.02 \pm 0.13$  สูงที่สุดในกลุ่ม ตารางที่ 1 (Table 1) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่าค่า PSI ของไอโซเลท BJ01-4 แตกต่างจากไอโซเลทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในภาพที่ 4 (Figure 4) นอกจากนี้ค่า PSI ของ BJ01-4 ยังสูงกว่าแอคติโนมัยซีทที่รายงานในงานวิจัยของ Singh et al. (2022) ซึ่งรายงานค่า PSI ของ *Streptomyces griseus* เฉลี่ย  $4.1 \pm 0.2$  และ *S. rimosus* เฉลี่ย  $3.9 \pm 0.3$  แสดงให้เห็นว่าไอโซเลท BJ01-4 มีศักยภาพสูงกว่าในการละลายฟอสเฟตในสภาวะดินเค็ม

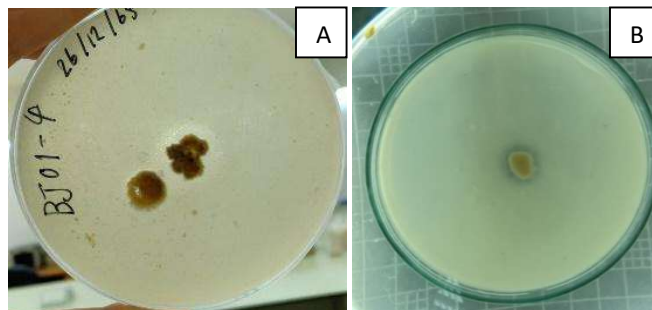


**Table 1** Phosphate Degradation Test in PKV agar media to obtain Biofertilizer.

| Isolate code | Halo zone diameter<br>(zone of solubilization<br>in mm) | Colony diameter<br>(mm) | Phosphate<br>Solubilization<br>Index (PSI) |
|--------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| 1. BJ09-4    | 15.17±0.29                                              | 4.67±0.58               | 4.30±0.50 <sup>2</sup>                     |
| 2. BJ09-3    | 11.33±0.33                                              | 8.83±0.29               | 2.30±0.06                                  |
| 3. BJ01-2    | 13.67±0.58                                              | 6.03±0.06               | 3.30±0.08                                  |
| 4. BJ01-4    | 16.27±0.25                                              | 4.10±0.10               | 5.02±0.07 <sup>1</sup>                     |
| 5. BJ07-9    | 8.33±0.25                                               | 6.23±0.21               | 2.30±0.01                                  |
| 6. BJ11-17   | 4.17±0.29                                               | 3.07±0.12               | 2.40±0.12                                  |
| 7. BJ09-11   | 9.07±0.12                                               | 8.07±0.12               | 2.10±0.01                                  |
| 8. BJ05-1    | 12.5±0.50                                               | 12.10±0.12              | 2.00±0.03                                  |
| 9. BJ11-1    | 14.37±0.40                                              | 4.97±0.15               | 3.90±0.09 <sup>3</sup>                     |
| 10. BJ04-17  | 11.33±0.58                                              | 8.00±1                  | 2.40±0.18                                  |
| 11. BJ02-5   | 12.33±0.58                                              | 8.67±0.58               | 2.40±0.16                                  |
| 12. BJ01-6   | 8.30±0.26                                               | 6.27±0.25               | 2.30±0.14                                  |
| 13. BJ04-16  | 9.13±0.23                                               | 7.93±0.12               | 2.20±0.04                                  |
| 14. BJ04-18  | 7.37±0.64                                               | 5.90±0.17               | 2.30±0.14                                  |
| 15. BJ07-5   | 10.53±0.61                                              | 7.33±0.58               | 2.40±0.51                                  |
| 16. BJ07-1   | 12.13±0.23                                              | 8.13±0.47               | 2.50±0.18                                  |
| 17. BJ04-2   | 8.17±0.29                                               | 6.90±0.17               | 2.20±0.03                                  |
| 18. BJ04-19  | 14.33±0.29                                              | 11.23±0.25              | 2.30±0.17                                  |
| 19. BJ04-4   | 4.10±0.17                                               | 3.23±0.21               | 2.30±0.08                                  |
| 20. BJ07-11  | 8.07±0.31                                               | 7.30±0.52               | 2.10±0.04                                  |

**Remark** Phosphate Solubilization index (PSI)= (Colony diameter+Halozone diameter)/ Colony diameter.

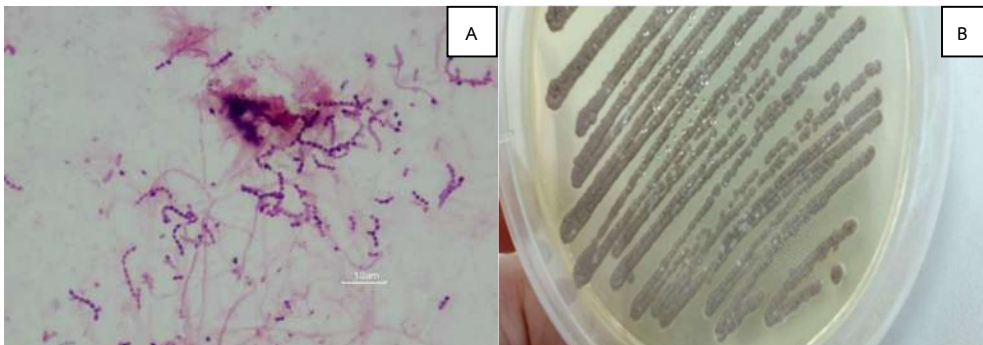
Mean values (mean ± SD) (n=3), The superscript number 1-3 are the three highest-ranked.



**Figure 4** Phosphorous solubilization and halo zone formation on Pikovskaya's agar plate of isolate BJ01-4 (A) and BJ09-4 (B).

### 3. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเบื้องต้นของแอคติโนมัยซีท

จากการย้อมสีแกรมและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์ประกอบ (Nikon MW1210N) พบว่า ไอโซเลทรหัส BJ01-4 เป็นแบคทีเรียแกรมบวก มีรูปร่างเป็นเส้นใยยาวแตกแขนง ต่อกันเป็นสายโซ่ มีการสร้างสปอร์รูปทรงกลมขนาดเล็กเรียงตัวบนสปอเรนเจีย (sporophore) และมีการสร้างรงควัตถุสีน้ำตาลอมเทาอบโคโลนี ดังแสดงในภาพที่ 5 (Figure 5) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับกลุ่ม *Streptomyces* ซึ่งมักพบในดินเค็มและสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยฟอสเฟตได้ดี



**Figure 5** Imaging of isolate BJ01-4 under a light microscope, 100X magnification and Gram stained: gram-positive coccus shape (A). Colony of isolate BJ01-4 on ISP2 media (B).

### 4. การวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA และการจัดจำแนกสายพันธุ์

การหาลำดับเบสของยีน 16S rRNA ของไอโซเลท BJ01-4 ได้ลำดับยาว 1,470 bp เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MEGA 11 (Molecular Evolutionary Genetics Analysis) พบว่า มีความคล้ายคลึงกับ *Streptomyces sennicomposti* ในกิ่งของสายความสัมพันธ์ทางพันธุกรรม และอยู่ในกลุ่มเดียวกันทางสายวิวัฒนาการ ดังแสดงในภาพที่ 6 (Figure 6) ผลนี้ยืนยันว่าเชื้อ BJ01-4 มีความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมใกล้เคียงกับ *Streptomyces sennicomposti* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีรายงานว่ามีความสามารถละลายฟอสเฟตและส่งเสริมการเจริญของพืชได้ดี

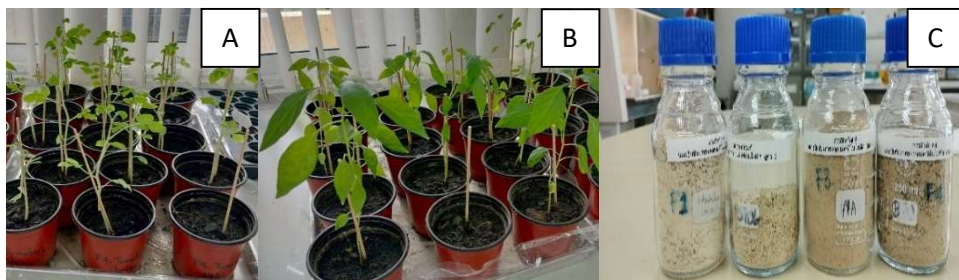


ควบคุม (ไม่ใส่เชื้อ) มีค่าเฉลี่ย  $11.80 \pm 1.35$  ซม. และ  $13.17 \pm 0.99$  ซม. ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของความสูงระหว่างกลุ่มทดลอง และกลุ่มควบคุมมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าพืชในชุดทดลองมีใบขนาดใหญ่ขึ้น สีเขียวเข้มขึ้น และระบบรากหนาแน่นกว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเชื้อแอกติโนมัยซีทรหัส BJ01-4 ไม่เพียงมีความสามารถในการละลายฟอสเฟตสูง แต่ยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นหัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเศรษฐกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**Table 2** Effect of biofertilizer formulations on the growth of chili and tomato plants.

| Formulation | Chili plant height (cm) | Tomato plant height (cm) |
|-------------|-------------------------|--------------------------|
| 0           | $11.80 \pm 1.35^b$      | $13.17 \pm 0.99^b$       |
| 1           | $20.67 \pm 0.76^b$      | $22.33 \pm 0.58^a$       |
| 2           | $18.67 \pm 1.64^b$      | $24.01 \pm 0.50^a$       |
| 3           | $20.20 \pm 1.13^{ab}$   | $22.67 \pm 0.58^a$       |
| 4           | $26.53 \pm 1.15^a$      | $22.67 \pm 1.04^a$       |

**Remark** Data are presented as mean  $\pm$ SD (n=3). Means within the same column followed by different superscript letters a-c are significantly different ( $p < 0.05$ ) based on Tukey's Honestly Significant Difference (HSD). Formulation 0 serves as the control group.



**Figure 7** Effects of the Actinomycete Isolate BJ01-4 Biofertilizer Powder on the Growth of Tomato (A) and Chili (B) Plants, and an Image of the 4 Formulation Biofertilizer Powder Product (C).

## อภิปรายผล

การศึกษานี้มุ่งค้นหาและพัฒนาแบคทีเรียกลุ่มแอคติโนมัยซีทจากดินเค็มในพื้นที่เกษตรกรรมบางกระเจ้า จังหวัดสมุทรปราการ โดยได้แยกเชื้อจำนวน 219 ไอโซเลท และคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีศักยภาพในการละลายฟอสเฟต พบว่า ไอโซเลท รหัส BJ01-4 มีค่า Phosphate Solubilization Index (PSI) สูงสุด เท่ากับ 5 เมื่อเทียบกับการทดลองของ Teles et al., 2024 อยู่ในระดับสูง และสามารถส่งเสริมการเจริญของพริกชี้ฟ้า (*Capsicum annuum*) และมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) ได้ดีกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ผลดังกล่าวอาจเกิดจากกลไกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับการละลายฟอสเฟต เช่น การหลั่งกรดอินทรีย์ (organic acid production) เอนไซม์ phosphatase และ phytase รวมถึงการผลิต siderophore ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช (Xie et al., 2022; Pan & Cai, 2023) โดยสอดคล้องกับรายงานของ Gil et al. (2023) ที่พบว่าแอคติโนมัยซีทที่ทนเค็มสามารถคงประสิทธิภาพการละลายฟอสเฟตได้ในสภาวะดินเค็ม ผลการวิเคราะห์สายพันธุ์ของ BJ01-4 ยืนยันว่าอยู่ในกลุ่ม *Streptomyces* ซึ่งมีรายงานว่าผลิตสารส่งเสริมพืชได้ดี (Nazari et al., 2023) การควบคุมเชื้อราก่อโรคพืช (Sadeghi et al., 2006; Sharifi et al., 2007) และการสร้างสารยับยั้งแบคทีเรียได้ (Nuanjohn et al., 2023) นอกจากนี้ เชื้อ BJ01-4 อาจมีคุณสมบัติในการผลิต IAA และ ACC deaminase ที่ช่วยกระตุ้นการเจริญของราก และลดความเครียดของพืช (Meethangdee, 2024) เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตชนิดอื่น พบว่า BJ01-4 ให้ผลใกล้เคียงหรือสูงกว่า *Streptomyces griseus* และ *S. rimosus* ที่มี PSI เฉลี่ย  $4.1 \pm 0.2$  และ  $3.9 \pm 0.3$  ตามลำดับ การผลิตเชื้อผงด้วยสูตรอาหารรำข้าว: แป้งข้าวเจ้า (20:80 w/w) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งเสริมการเจริญของพริกมากกว่ามะเขือเทศซึ่งอาจจะเป็นความแข็งแรงของพืชสองชนิดที่แตกต่างกัน และจากการใช้รำข้าวเป็นวัสดุในการผลิตปุ๋ยชีวภาพชนิดผงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pal et al. (2022) ได้มุ่งพัฒนาสูตรปุ๋ยชีวภาพที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นตัวพาหรือ carrier ของจุลินทรีย์ส่งเสริม การเจริญของพืช (PGPR) โดยเลือกใช้วัสดุหลัก ได้แก่ รำข้าวสาลี (wheat bran) รำงา (sesame bran) และกากอ้อย (bagasse) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาความคงตัวและความสามารถในการคงสภาพของจุลินทรีย์ เช่น *Lysinibacillus varians* และ *Pseudomonas putida* และจากข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้แอคติโนมัยซีท ไอโซเลท BJ01-4 น่าจะสามารถพัฒนาเป็นหัวเชื้อชีวภาพสำหรับพื้นที่ดินเค็มได้ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังจำกัดเพียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และพืชเพียงสองชนิด จึงควรมีการทดลองภาคสนาม และการประเมินความคงทนของเชื้อในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Ughamba et al. (2025) ที่ระบุว่าการประเมิน PSM (phosphate-solubilizing microorganisms) ในสภาวะจริงยังเป็นสิ่งจำเป็นต่อการยืนยันความยั่งยืนของเทคโนโลยี โดยสรุป แอคติโนมัยซีท ไอโซเลท BJ01-4 เป็นสายพันธุ์ที่มีศักยภาพสูงในการละลายฟอสเฟตและส่งเสริมการเจริญของพืชเศรษฐกิจ และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

### สรุปผลการวิจัย

แอสคิโนไมซีที่แยกได้จากดินในพื้นที่บางกระเจ้าซึ่งมีสภาพเป็นดินเค็ม พบเชื้อแอสคิโนไมซี 3 ไอโซเลท ที่มีศักยภาพในการย่อยสลายฟอสเฟตในห้องปฏิบัติการได้ ได้แก่ ไอโซเลท รหัส BJ01-4 BJ09-4 และ BJ11-1 ซึ่งให้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับแอสคิโนไมซีไอโซเลทอื่นที่แยกได้ และจากผลการทดสอบใช้เป็นกล้ำเชื้อในผลิตการปุ๋ยชีวภาพของไอโซเลท BJ01-4 มีความสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ดีในพริกที่ปลูกในสูตรที่ 4 ที่มีส่วนผสมของรำข้าวและแป้งข้าวเจ้าเป็นแหล่งอาหาร และนอกจากนี้ยังอาจจะส่งเสริมการสร้างกรดอินทรีย์ (organic acid) ชนิดต่าง ๆ เช่น กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดกลูโคนิก (gluconic acid) กรดซิตริก (citric acid) กรดซัคซินิก (succinic acid) และเอนไซม์ฟอสฟาเทส (phosphatase) ละลายเกลือฟอสเฟต เป็นการเพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และพืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ดียิ่งขึ้น ช่วยลดโอกาสการแคระแกร็น หรือ การเจริญหยุดชะงักของพืช แต่จำเป็นต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในความสามารถในการผลิตสารชีวภาพอื่นอีก รวมถึงการประยุกต์ใช้ด้านสิ่งแวดล้อมและการเกษตร อาทิ การบำบัดน้ำเสีย การลดปัญหาดินเค็ม หรือการสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น เช่น IAA ต่อไป เพื่อเป็นการลดการใช้ปุ๋ยเคมีในการเกษตรเพื่อให้เกิดผลดีต่อดินและระบบนิเวศอย่างยั่งยืน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยทีมงานคณะวิจัย ขอขอบพระคุณเกษตรกรและนักวิชาการอิสระในพื้นที่เกษตรกรรมบางกระเจ้าที่ให้ความร่วมมือและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ให้การสนับสนุนการวิจัยด้านเอกสาร การประสานงานกับแหล่งทุน ขอขอบคุณทางสาขาวิชาชีววิทยาที่ให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการงานวิจัย ขอขอบคุณคณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และคณะผู้บริหารคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการใช้อาคาร ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสนา เป็นเครือ ที่ช่วยอนุเคราะห์โปรแกรมวิเคราะห์สร้างแผนภูมิวิวัฒนาการ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิสิต เรืองสว่าง และอาจารย์เพชร สุธิกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านโปรแกรมทางสถิติ และขอขอบคุณทุนวิจัยในครั้งนี้จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว) (รหัสทุน 2388579) ที่ให้การสนับสนุน

### เอกสารอ้างอิง

- Alexander M. Introduction to soil microbiology. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1977; 467.
- Amri M, Rjeibi MR, Gatrouni M, Mateus DMR, Asses N, Pinho HJO, Abbes C. Isolation, Identification, and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Tunisian Soils. *Microorganisms* 2023; 11(3):783.

- Durán-Lara EF, Valderrama A, Marican A. Natural organic compounds for application in organic farming. *Agriculture* 2020;10(2):41.
- Dusenge ME, Duarte AG, Way DA. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO<sub>2</sub> and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*. 2019;221(1):32-49.
- Gaya Karunasinghe T, Hashil Al-Mahmooli I, Al-Sadi AM, Velazhahan R. The effect of salt-tolerant antagonistic bacteria from tomato rhizosphere on plant growth promotion and damping-off disease suppression under salt-stress conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science* 2020;70(1):69-75.
- Gil MA, Elbasiouny H, Abdel-Fattah GM. Salt-tolerant phosphate solubilizing actinobacteria improve phosphorus availability and plant growth under saline conditions. *Frontiers in Plant Science* 2023;14:1324056.
- Hameed A, Hnini M, Krouti A, Jamal A. Potential use of phosphate solubilizing actinobacteria as plant enhancers: Involvement in plant nutrition and stress tolerance. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2025;6(1):100412.
- Kaur R, Suman S. Assessing the effectiveness of granular and cell suspension PGPR biofertilizers in enhancing rice growth in saline soils. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. Published online February 15, 2025. doi:10.4014/jmb.2502.02008.
- Ko WH, Tsou YJ, Lin MJ, Chern LL. Activity and characterization of secondary metabolites produced by a new microorganism for control of plant diseases. *New Biotechnology* 2010;27(4):397-402.
- Meethangdee P. Multifunctional actinobacteria with plant-growth-promoting traits isolated from bryophyte rhizospheres. *Biotechnology Reports* 2024;42:1-10.
- Muzammil S, Ali B, Kour D, Devi P. Role of halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria in mitigating salinity stress: Recent advances and possibilities. *Microorganisms* 2024;13(1):168.
- Nazari M, Smith D, Kim J. Diversity and biocontrol potential of *Streptomyces* species isolated from agricultural soils. *Current Research in Microbial Sciences* 2023;4:100192.
- Nimnoi P, Pongsilp N, Ruanpanun P. Monitoring the efficiency of *Streptomyces galilaeus* strain KPS-C004 against root knot disease and the promotion of plant growth in the plant-parasitic nematode infested soils. *Biological Control* 2017;114:158-166.
- Nuanjohn T, Suphrom N, Nakaew N, Pathom-Aree W, Pensupa N, Siangsuepchart A, Dell B. et al. Actinomycins from Soil-Inhabiting *Streptomyces* as Sources of Antibacterial Pigments for Silk Dyeing. *Molecules*. 2023;28:5949.
- Nurunnabi TR, Sabrin F, Sharif DI, Naha L, Sohrab MH, Sarker SD, Rahman SMM. et al. Antimicrobial activity of endophytic fungi isolated from the mangrove plant *Sonneratia apetala* (Buch-Ham) from the Sundarbans mangrove forest. *Advances in Traditional Medicine* 2020;20(3):419-425.

- Pal AK, Sarkar D, Sengupta C. Carrier development for PGPR-biofertilizer and its exploitation under cadmium and lead stressed condition. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences* 2022;11(3):e2506.
- Pan L, Cai B. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms* 2023; 11(12):2904.
- Pande A, Pandey P, Mehra S, Singh M, Kaushik S. Phenotypic and genotypic characterization of phosphate solubilizing bacteria and their efficiency on the growth of maize. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* 2017;15(2):379-391.
- Parizad S, Bera S. The effect of organic farming on water reusability, sustainable ecosystem, and food toxicity. *Environmental Science and Pollution Research* 2023;30(28):71665-71676.
- Passari AK, Chandra P, Mishra VK, et al. Detection of biosynthetic gene and phytohormone production by endophytic actinobacteria associated with *Solanum lycopersicum* and their plant-growth-promoting effect. *Research in Microbiology* 2016;167(8):692-705.
- Sadeghi A, Hessian AR, Askari H, Aghighi S, Shahidi Bonjar GH. Biological control potential of two *Streptomyces* isolates on *Rhizoctonia solani* the causal agent of damping-off of sugarbeet. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 2006;9(5):904-910.
- Sharifi F, Shahidi Bonjar GH, Aghighi S, Rashid Farrokhi P, Khalesi E, Mahdavi MJ. and Taraz Antagonistic H. Potential of Iranian native *Streptomyces* strains in biocontrol of *Pythium aphanidermatum*. *Research Journal of Biological Sciences* 2007;2(3):232-235.
- Sharma M, Dangi P, Choudhary M. Actinomycetes: source, identification, and their applications. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 2014;3(2):801-832.
- Tayoh LN. Destruction of soil health and risk of food contamination by application of chemical fertilizer. In: *Ecological and practical applications for sustainable agriculture*. Springer Singapore 2020:53-64.
- Teles EAP, Xavier JF, Arcênio FS, Amaya RL, Gonçalves JVS, Rouws LFM, Zonta E. et al. Characterization and evaluation of potential halotolerant phosphate solubilizing bacteria from *Salicornia fruticosa* rhizosphere. *Frontiers in Plant Science* 2024;14:1324056.
- Ughamba MA, Turner BL, Singh BK. Harnessing phosphate-solubilizing microorganisms for sustainable agriculture: Challenges and opportunities. *Soil Systems* 2025;9(1):6.
- Wu J, Wang J, Hui W, Zhao F, Zhao F, Wang P, Su C. et al. Physiology of plant responses to water stress and related genes: A review. *Forests* 2022;13(2):324.
- Xie W, Yang J, Gao S, Yao R, Wang X. The effect and influence mechanism of soil salinity on phosphorus availability in coastal salt-affected soils. *Water* 2022; 14(18), 2804.
- Zimmermann B, Claß-Mahler I, von Cossel M, Lewandowski I, Weik J, Spiller A, Nitzko S. et al. Mineral-ecological cropping systems—a new approach to improve ecosystem services by farming without chemical synthetic plant protection. *Agronomy* 2021;11(9):1710.