

การคัดเลือกแบคทีเรียละลายฟอสเฟตที่มีความสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของกล้าข้าว

Screening for Phosphate Solubilizing Bacteria Capable of Enhancing Rice Seedling Growth

สรลณี พรหมมาเยกุล¹ อรุพงษ์ เดียวก็¹ ศศิพร จอมคำ¹ และจุฑามาศ อาจนาลีเยว^{1*}
Saralee Prommayakul¹ Arupong Deawkee¹ Sasipron Jomkham¹ and
Chuthamat Atnaseo^{1*}

บทคัดย่อ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบต่าง ๆ ของพืช แต่ในสภาพดินที่ไม่เหมาะสมพืชสามารถนำฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ได้น้อย แบคทีเรียละลายฟอสเฟตสามารถช่วยให้พืชใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสในดินได้มากขึ้นโดยการเปลี่ยนฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวในสภาพฟอสฟอรัสต่ำ จึงคัดเลือกแบคทีเรียละลายฟอสเฟตจำนวน 10 ไอโซเลต และทดสอบผลที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยให้แบคทีเรีย 3 วิธี คือ การแช่ข้าว การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าว และการรดต้นกล้าข้าว วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 4 ซ้ำ เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นข้าวที่อายุ 14 21 และ 28 วันหลังปลูก การวิจัยให้ผลว่าการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้ต้นกล้าข้าวส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและรวดเร็วกว่าวิธีการอื่น ในขณะที่การรดต้นกล้าข้าวเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว ทั้งนี้ไอโซเลต C13 สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของกล้าข้าวได้ดีที่สุดในทุกวิธีการ การแช่เมล็ดข้าวด้วยไอโซเลต C13 ทำให้น้ำหนักสดราก น้ำหนักสดรวม และน้ำหนักแห้งรวมของกล้าข้าวอายุ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 85.82 57.77 และ 49.19 ตามลำดับ ในขณะที่การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าวทำให้น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และความยาวทุกค่าของกล้าข้าวอายุ 14 วันสูงกว่ากรรมวิธีควบคุม โดยเฉพาะการเจริญเติบโตของรากที่เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 60 การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการให้แบคทีเรียและชนิดของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตมีผลต่อประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว

คำสำคัญ: แบคทีเรียละลายฟอสเฟต แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ข้าว ปุ๋ยชีวภาพ

¹ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

* Corresponding author e-mail: chuthamat@mju.ac.th

Received: 8 April 2022, Revised: 10 June 2022, Accepted: 17 June 2022

Abstract

Phosphorus is a plant nutrient essential for normal plant functions but in problematic soil, phosphorus becomes less available for plants use. Phosphate solubilizing bacteria can enable plants to use more soil phosphorus by changing it to available forms for plant absorption. In order to select for bacterial isolate with potential to enhance rice growth under low phosphorus, 10 isolates of phosphate solubilizing bacteria were selected and evaluated for their growth promoting abilities in rice cultivar KDML 105 grown by using rock phosphate as a phosphorus supplement. Bacteria were applied using 3 different methods, which were seed soaking, seed soaking with soil drenching, and soil drenching alone. Each experiment was arranged in CRD with 4 replications and plant growth parameters were collected at 14, 21 and 28 days after sowing. Results indicated that seed soaking with soil drenching elicited stronger growth enhancing response in shorter time, while soil drenching alone had no effect on seedling growth. Seedlings received isolate C13 performed best in all tested methods. Soaking rice seeds with isolate C13 resulted in increasing root fresh weight, total fresh weight, and total dry weight of 28 days old plants by 85.82, 57.77 and 49.19%, respectively. When given by seed soaking with soil drenching, it increased all parameters of fresh weight, dry weight, and plant length of 14 days old plants, especially root growth by more than 60%. This result suggests that both the method of bacterial applications and the type of phosphate solubilizing bacteria contribute to the effectiveness of a bacterium to enhance rice seedling growth.

Keywords: Phosphate solubilizing bacteria, Plant growth promoting bacteria, Rice, Biofertilizer

บทนำ

ข้าวถือเป็น 1 ใน 3 ของพืชอาหารหลักที่สำคัญของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย และในประเทศไทยที่ข้าวนอกจากจะเป็นแหล่งอาหารหลักแล้วยังเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ในปี พ.ศ. 2564 ไทยมีการส่งออกข้าวมากถึง 2,167,591 ตัน คิดเป็นมูลค่า 41,506.52 ล้านบาท (สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรม, 2564) ในกระบวนการผลิตข้าวนั้นจำเป็นต้องให้ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยฟอสฟอรัสมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช การแบ่งเซลล์ การถ่ายทอดและการถอดรหัสทางพันธุกรรม เพราะพบได้ในโมเลกุลสำคัญต่าง ๆ เช่น อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (ATP) ฟอสโฟลิพิด กรดนิวคลีอิก และโปรตีน (Heuer *et al.*, 2017) และถึงแม้ว่าภายในดินจะมีฟอสฟอรัสอยู่เพียงพอนานหลายพื้นที่ แต่ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายได้ และเป็นประโยชน์ต่อพืชได้นั้นมีปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณที่มีอยู่ในดิน (Bünemann, 2015) การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายได้ เช่น ซูเปอร์ฟอสเฟต สามารถทดแทนฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในดินน้อยได้ (สุภาพร และคณะ, 2553) แต่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายได้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนในดินได้อย่างรวดเร็ว และถูกเปลี่ยนรูปเป็นฟอสฟอรัสที่พืช

ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Stevenson, 1986; Mclaughlin *et al.*, 1988) ทำให้พื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกรมีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมเพิ่มขึ้น แต่พืชนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ (Lindsay *et al.*, 1989) เช่น ในรูปของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) เฟอริกฟอสเฟต (FePO_4) หรืออลูมินัมฟอสเฟต (AlPO_4) เป็นต้น (สุภาพร และคณะ, 2553) ด้วยเหตุนี้การแก้ปัญหาคาดฟอสฟอรัสในพืชด้วยการให้ปุ๋ยจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้ใช้ปุ๋ยในปริมาณเกินความจำเป็น ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth-promoting bacteria: PGPB) สามารถพบได้ทั้งในดินรอบรากพืชและภายในเนื้อเยื่อของพืช และมีคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่หลากหลาย เช่น การละลายฟอสเฟต การตรึงไนโตรเจน การสร้างฮอร์โมนพืช การเพิ่มความทนทานต่อสภาพความเครียดที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต (Glick, 2012) การใช้ประโยชน์จาก PGPB ที่มีความสามารถในการละลายฟอสเฟต (phosphate-solubilizing bacteria) เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคาดฟอสฟอรัสในพืช โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้หลั่งกรดอินทรีย์ เช่น กรดกลูโคนิก (gluconic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดซิตริก (citric acid) และกรดซัคซินิก (succinic acid) ซึ่งมีบทบาทในการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสจาก PO_4^{3-} ที่ไม่ละลายน้ำเป็นรูป HPO_4^{2-} หรือ H_2PO_4^- ซึ่งพืชสามารถใช้ได้ (Rawat *et al.*, 2021) แบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการละลายฟอสเฟตที่มีการศึกษามากที่สุด ได้แก่ แบคทีเรียในสกุล *Pseudomonas* *Bacillus* *Azotobacter* และ *Rhizobium* (Alori *et al.*, 2017) โดยมีการศึกษาพบว่าแบคทีเรียละลายฟอสเฟตสามารถส่งเสริมการเติบโตของพืชได้ เช่น ข้าวพันธุ์ กข47 ที่ได้รับแบคทีเรียกลุ่ม *Burkholderia* sp. และ *Pantoea dispersa* ซึ่งแยกจากดินนาข้าวที่มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสเฟตได้สูง ให้การเจริญเติบโตด้านความสูง จำนวนใบ ความยาวของราก และน้ำหนักแห้งของลำต้นสูงขึ้น เมื่อทำการให้ด้วยการผสมแบคทีเรียในดิน (เกตุณณินา และสมพร, 2557) ข้าวพันธุ์ Jyothi PTB 39 ที่ได้รับแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *Gluconacetobacter* sp. ร่วมกับ *Burkholderia* sp. ซึ่งแยกได้จากดินบริเวณรอบรากข้าว ด้วยการผสมในดินและย้ายกล้าปลูก มีระดับการดูดใช้ฟอสฟอรัสสูงขึ้น ส่งผลให้มีผลผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย (Stephen *et al.*, 2015) การแช่เมล็ดข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 ในแบคทีเรียที่แยกจากดินรอบรากข้าว ที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนและละลายฟอสเฟต ส่งผลให้การดูดใช้ฟอสฟอรัสและการเติบโตของต้นกล้าข้าวเพิ่มขึ้น (อนุสร และอรรณ, 2562) นอกจากข้าวแล้ว อ้อยที่ได้รับแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *Kosakonia radicincitans* และ *B. subtilis* ซึ่งแยกจากดินบริเวณรอบรากอ้อยทำให้อ้อยมีความสูง น้ำหนักสดลำ จำนวนลำ ความยาวปล้อง ความยาวลำ และเส้นผ่านศูนย์กลางลำเพิ่มขึ้น เมื่อให้แบคทีเรียด้วยการราดท่อนพันธุ์อ้อยร่วมกับรดต้นกล้า (เพชรดา และคณะ, 2564) จากศักยภาพในการส่งเสริมการเติบโตของพืชของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตดังกล่าว การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการส่งเสริมการเติบโตของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต ที่แยกได้จากดินบริเวณรอบราก และภายในรากพืช เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์ต่อไป ตลอดจนทดสอบวิธีการที่เหมาะสมในการให้แบคทีเรียต่อข้าวซึ่งจะทำให้ได้ผลในการส่งเสริมการเติบโตของต้นกล้าข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษาและการตรวจสอบความสามารถในการละลายฟอสเฟต

แบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวน 10 ไอโซเลต ซึ่งคัดแยกได้จากดินบริเวณรอบรากและจากภายในราก (เอนโดไฟต์) ของข้าวโพด ข้าวสาลี หรือบักวีต แบคทีเรียทั้งหมดถูกประเมิน

ความสามารถในการละลายฟอสเฟต โดยสังเกตจากความสามารถในการทำให้เกิดวงใสเมื่อเลี้ยงบนอาหาร Pikovskaya's agar (Himedia, India) ที่มีฟอสฟอรัสในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน ประเมินระดับความสามารถในการละลายฟอสเฟตโดยใช้ค่าดัชนีการละลายฟอสเฟต (phosphate solubilization index: PSI) ซึ่งคำนวณจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวงใสซึ่งรวมกับเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีแล้วหารด้วยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี (Oves *et al.*, 2017) แบบที่เรียกว่าถูกคัดเลือกมาใช้ในการศึกษามีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตเท่ากับ 2 ขึ้นไป

2. การเตรียมแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบการส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าว

เลี้ยงแบคทีเรียในอาหาร tryptic soy broth (TSB) (Himedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงตกตะกอนเซลล์และล้างเซลล์ด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.85 เปอร์เซ็นต์ ปรับความเข้มข้นของแขวนลอยแบคทีเรียด้วยโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้ 2×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร โดยการเปรียบเทียบกับค่าความขุ่นของเซลล์ที่วัดได้จากเครื่อง spectrophotometer (Metertech, SP8001, Taiwan) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD_{600})

3. การเตรียมเมล็ดข้าว วัสดุปลูก และการปลูก

ขั้นตอนการเตรียมเมล็ดข้าวโดยการทำความสะอาดเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยการล้างด้วยน้ำนิ่งฆ่าเชื้อที่มีการเติม triton x 0.02 เปอร์เซ็นต์ คัดเลือกเมล็ดข้าวที่เสียออกล้างต่อด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) 2 เปอร์เซ็นต์ นาน 3 นาที และน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 3 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอทานอล (ethanol) 70 เปอร์เซ็นต์ นาน 3 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อจนกว่าจะสะอาด ซับเมล็ดข้าวให้แห้งด้วยกระดาษที่นิ่งฆ่าเชื้อแล้ว

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุปลูก โดยผสมขุยมะพร้าวและดินอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร และเติมฟอสฟอรัสในรูปของหินฟอสเฟตในปริมาณเทียบเท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อไร่ แล้วนำไปนิ่งฆ่าเชื้อ 2 ครั้ง เพาะเมล็ดข้าวในภาตหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลุม 5 เซนติเมตร ลึก 4.2 เซนติเมตร

ขั้นตอนการปลูก โดยรดน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อให้ต้นกล้าข้าวทุกวัน วันละ 2 ครั้ง เช้า-เย็น ครั้งละ 6 มิลลิลิตรต่อหลุม และให้สารละลายธาตุอาหารพืชที่ดัดแปลงจากสูตรของ Insalud *et al.* (2006) โดยปรับลดระดับฟอสเฟตลงเหลือ 2 ไมโครโมลาร์ หรือลดลง 100 เท่าของสูตรปกติ (KNO_3 3,750.0 ไมโครโมลาร์ KH_2PO_4 2.0 ไมโครโมลาร์ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 312.5 ไมโครโมลาร์ $(NH_4)_2 SO_4$ 312.5 ไมโครโมลาร์ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 400.0 ไมโครโมลาร์ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 1,187.5 ไมโครโมลาร์ NaCl 50.0 ไมโครโมลาร์ $MnSO_4 \cdot H_2O$ 2.0 ไมโครโมลาร์ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 2.0 ไมโครโมลาร์ $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 1.0 ไมโครโมลาร์ $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.5 ไมโครโมลาร์ $NaMoO_4 \cdot H_2O$ 0.5 ไมโครโมลาร์ $H_3B_3O_3$ 25.0 ไมโครโมลาร์ Fe-EDTA 50.0 ไมโครโมลาร์ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็น 6.5 โดยให้ครั้งละ 6 มิลลิลิตร แทนการให้น้ำในช่วงเช้า เมื่อต้นกล้าข้าวอายุ 7 14 และ 21 วัน

4. การทดสอบผลของการแช่เมล็ดข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว (การทดลองที่ 1)

แช่เมล็ดข้าวที่เตรียมไว้ข้างต้นในแขวนลอยแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 2×10^8 CFU ต่อ มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับกรรมวิธีควบคุม เมล็ดข้าวถูกแช่ในโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์ และบ่มในสภาวะเดียวกัน ก่อนที่จะนำลงเพาะในภาตหลุม

5. การทดสอบผลของการแช่เมล็ดข้าวและการรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว (การทดลองที่ 2)

ปฏิบัติกับเมล็ดข้าวเช่นเดียวกับการแช่เมล็ดข้าวในแขวนลอยแบคทีเรีย เมื่อต้นข้าวมีอายุ 10 วัน ทำการรดด้วยแขวนลอยแบคทีเรีย ความเข้มข้น 2×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 3 มิลลิลิตรต่อหลุม สำหรับกรรมวิธีควบคุมรดด้วยโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์

6. การทดสอบผลของการรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว (การทดลองที่ 3)

แช่เมล็ดข้าวที่ผ่านการล้างแล้วในโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์ นำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเพาะในถาดหลุม เมื่อต้นข้าวมีอายุ 10 วัน ทำการรดด้วยแขวนลอยแบคทีเรีย ความเข้มข้น 2×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 3 มิลลิลิตรต่อหลุม หรือรดด้วยโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรรมวิธีควบคุม

7. แผนการทดลองและวิเคราะห์

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 4 ซ้ำ 11 กรรมวิธี (แบคทีเรีย 10 ชนิด และ 1 กรรมวิธีควบคุม) เก็บตัวอย่างเมื่อต้นข้าวมีอายุ 14 21 และ 28 วัน เก็บ 2 ต้นต่อซ้ำต่อกรรมวิธี โดยเก็บข้อมูลความยาวต้นและราก จำนวนราก น้ำหนักสัดต้นและราก และน้ำหนักแห้งต้นและราก โดยอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ โดยใช้โปรแกรม R

ผลการวิจัย

1. ความสามารถในการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียที่ศึกษา

จากการตรวจสอบความสามารถในการละลายฟอสเฟตโดยการเลี้ยงบนอาหาร Pikovskaya's agar และสังเกตการเกิดวงใสรอบโคโลนีของแบคทีเรียหลังจากบ่มนาน 7 วัน พบว่าสามารถจัดกลุ่มแบคทีเรียที่มีความสามารถในการละลายฟอสเฟตได้ 2 กลุ่ม ประกอบด้วยแบคทีเรียที่มีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตตั้งแต่ 4 ขึ้นไป จำนวน 4 ไอโซเลต คือ CR02 C02 C20 และ W12 และแบคทีเรียที่มีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตระหว่าง 2.00-2.71 จำนวน 6 ไอโซเลต คือ B11 B09 WR06 C13 C16 และ C15 (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ดัชนีการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ 10 ไอโซเลตซึ่งประเมินจากการสร้างวงใสบนอาหาร Pikovskaya's agar หลังจากบ่มนาน 7 วัน

ไอโซเลต	ดัชนีการละลายฟอสเฟต	ไอโซเลต	ดัชนีการละลายฟอสเฟต
CR02	4.68±0.14 ^a	B09	2.67±0.33 ^b
C02	4.60±0.00 ^a	WR06	2.66±0.00 ^b
C20	4.40±0.00 ^a	C13	2.37±0.55 ^b
W12	4.00±0.07 ^a	C16	2.22±0.36 ^b
B11	2.71±0.00 ^b	C15	2.00±0.25 ^b

หมายเหตุ: - ระดับนัยสำคัญของ F-test $p \leq 0.001$ CV 16.38% mean±SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT

2. ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว

จากการทดสอบผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตที่แตกต่างกันจำนวน 10 ไอโซเลตต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีการให้แบคทีเรียด้วยวิธีการต่างกัน 3 วิธีการ คือ การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับแบคทีเรีย การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว และการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว พบว่าวิธีการที่แตกต่างกันในการให้แบคทีเรียกับข้าวให้ผลที่แตกต่างต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว (ตารางที่ 2) การแช่เมล็ดข้าวเพียงอย่างเดียว และการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว มีผลทำให้การเจริญเติบโตของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่การรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าวเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว (ตารางที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับแบคทีเรีย และการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว พบว่าการแช่เมล็ดข้าวอย่างเดียวมีผลทำให้การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวแตกต่างกันในทุกระยะการเจริญเติบโต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อข้าวอายุ 21 วัน ในขณะที่การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว มีผลทำให้การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อข้าวมีอายุ 14 วัน แต่เห็นผลลดลงเมื่อข้าวอายุ 21 วัน และไม่พบความแตกต่างของการเจริญเติบโตเมื่อข้าวอายุ 28 วัน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ได้รับแบคทีเรียละลายฟอสเฟต ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธีการ เมื่อข้าวอายุ 14 21 และ 28 วัน

	น้ำหมักสด			น้ำหมักแห้ง			ความยาว			จำนวนราก
	ต้น	ราก	รวม	ต้น	ราก	รวม	ต้น	ราก	รวม	
การทดลองที่ 1										
14 วัน	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***
21 วัน	**	***	***	*	***	***	ns	ns	ns	***
28 วัน	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
การทดลองที่ 2										
14 วัน	**	***	**	**	**	**	*	***	**	ns
21 วัน	**	***	***	**	ns	***	ns	ns	ns	ns
28 วัน	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
การทดลองที่ 3										
14 วัน	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
21 วัน	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
28 วัน	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ: - * ** *** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

- ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

- การทดลองที่ 1 ให้แบคทีเรียโดยการแช่เมล็ดข้าว

- การทดลองที่ 2 ให้แบคทีเรียโดยการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าว

- การทดลองที่ 3 ให้แบคทีเรียโดยการรดแบคทีเรียต้นกล้าข้าว

2.1 ผลของการแช่เมล็ดข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว

เมื่อประเมินการเติบโตของต้นกล้าข้าวที่แช่เมล็ดข้าวผ่านการแช่ในแขวนลอยแบคทีเรีย เมื่อข้าวอายุ 14 และ 21 วัน พบว่าการเจริญเติบโตของข้าวที่แช่เมล็ดข้าวผ่านการแช่ร่วมกับไอโซเลต WR06 ให้ค่าที่ต่ำกว่ากรรมวิธีควบคุม แต่การแช่ในแบคทีเรียไอโซเลตอื่น ๆ ให้ผลไม่แตกต่างจากกรรมวิธีควบคุม (ไม่แสดงข้อมูล) ในขณะที่เมื่อข้าวอายุ 28 วัน พบว่าการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับไอโซเลต C13 มีผลทำให้ต้นกล้าข้าวมีน้ำหนักสดราก น้ำหนักสดรวม และน้ำหนักแห้งรวมเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 85.82 57.77 และ 49.19 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการแช่เมล็ดข้าวในสารละลายที่ไม่มีแบคทีเรีย นอกจากไอโซเลต C13 แล้ว ไอโซเลต C02 B11 และ C16 ยังมีผลในการกระตุ้นการสร้างน้ำหนักสดรากเช่นกัน ในขณะที่การแช่เมล็ดข้าวด้วยไอโซเลต C16 ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีน้ำหนักสดรวมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลของการแช่เมล็ดข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อน้ำหนักสดราก น้ำหนักสดรวม และน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อข้าวอายุ 28 วัน

กรรมวิธี	น้ำหนักสดราก (มิลลิกรัมต่อต้น)	น้ำหนักสดรวม (มิลลิกรัมต่อต้น)	น้ำหนักแห้งรวม (มิลลิกรัมต่อต้น)
control	671.2±96.89 ^{bc}	1201.6±126.97 ^{bc}	184.6±18.32 ^{bc}
CR02	926.6±92.63 ^{abc}	1516.4±133.73 ^{ab}	214.5±14.31 ^{abc}
C02	1143.8±146.80 ^a	1733.1±222.97 ^{ab}	233.1±36.02 ^{ab}
C20	1075.9±87.38 ^{ab}	1676.9±123.97 ^{ab}	231.0±16.45 ^{abc}
W12	1103.4±147.09 ^{ab}	1743.8±150.97 ^{ab}	252.5±14.53 ^{ab}
B11	1128.6±227.68 ^a	1672.4±300.54 ^{ab}	233.7±35.47 ^{ab}
B09	937.7±59.53 ^{abc}	1435.9±101.07 ^{abc}	194.8±18.89 ^{bc}
WR06	526.1±151.73 ^c	891.6±222.94 ^c	138.5±37.12 ^c
C13	1247.2±91.24 ^a	1895.8±102.83 ^a	275.4±12.21 ^a
C16	1235.7±85.09 ^a	1866.5±81.27 ^a	261.6±3.07 ^{ab}
C15	952.6±166.69 ^{abc}	1488.1±231.62 ^{ab}	215.3±33.65 ^{abc}
F-test	*	*	*
CV (%)	26.47	21.82	22.62

หมายเหตุ: - mean±SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT

- * ** *** ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

2.2 ผลของการแช่เมล็ดข้าวและการรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าว

การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว นั้น พบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ตลอดจนความยาวต้นสูงขึ้น แต่ไม่แตกต่างจากต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย (กรรมวิธีควบคุม) มีเพียงไอโซเลต C13 เท่านั้นที่ส่งผลต่อค่าการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวทุกดัชนีที่ทำการประเมิน ยกเว้นจำนวนราก เมื่อข้าวอายุ 14 วัน (ตารางที่ 4 5 และ 6) ทั้งนี้การแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยไอโซเลต C13 ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสดต้น

น้ำหนักสดราก และน้ำหนักสดรวมของต้นกล้าข้าว คิดเป็นร้อยละ 30.03 91.78 และ 49.45 ของกรรมวิธีควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 4) สำหรับค่าน้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักแห้งราก และน้ำหนักแห้งรวมของต้นกล้าข้าว การได้รับไอโซเลต C13 ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 34.98 68.75 และ 40.57 ของกรรมวิธีควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 5) เมื่อพิจารณาการเติบโตด้านการยืดของต้นและรากพบว่าต้นกล้าข้าวที่ได้รับแบคทีเรียไอโซเลต C13 มีความยาวต้น ความยาวราก และความยาวรวมมากกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 24.96 63.73 และ 33.01 ตามลำดับ นอกจากนี้ไอโซเลต C13 แล้ว แบคทีเรียไอโซเลต CR02 และ C16 ยังสามารถส่งเสริมการยืดยาวของต้นกล้าข้าวได้ ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีความยาวต้นที่สูงขึ้น ในขณะที่ไอโซเลต C20 และ B11 ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีความยาวรากที่สูงขึ้น และไอโซเลต CR02 และ C20 ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีความยาวรวมที่สูงขึ้นกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 4 ผลของการแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อน้ำหนักสดต้น น้ำหนักสดราก และน้ำหนักสดรวมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อข้าวมีอายุ 14 วัน

กรรมวิธี	น้ำหนักสด (มิลลิกรัมต่อต้น)		
	ต้น	ราก	รวม
control	186.5±10.93 ^{bcd}	85.2±7.29 ^{bc}	271.6±18.10 ^b
CR02	225.8±8.57 ^{ab}	138.0±29.95 ^{abc}	363.8±25.58 ^{ab}
C02	160.6±9.63 ^{cd}	99.4±11.45 ^{abc}	259.9±19.73 ^{bc}
C20	195.4±15.17 ^{abc}	150.7±22.59 ^{ab}	346.1±36.47 ^{ab}
W12	202.3±19.02 ^{abc}	83.7±11.04 ^c	286.0±28.36 ^b
B11	187.5±20.14 ^{bc}	125.9±27.4 ^{abc}	313.4±46.86 ^{ab}
B09	199.5±16.15 ^{abc}	113.1±16.93 ^{abc}	312.5±32.34 ^{ab}
WR06	123.8±8.59 ^d	42.6±4.39 ^d	166.4±12.16 ^c
C13	242.5±6.22 ^a	163.4±19.87 ^a	405.9±25.51 ^a
C16	195.7±14.01 ^{abc}	107.2±12.73 ^{abc}	302.9±25.82 ^{ab}
C15	175.3±23.88 ^{bcd}	98.1±9.79 ^{abc}	273.4±31.59 ^b
F-test	**	***	**
CV (%)	32.42	35.92	22.11

หมายเหตุ: - mean±SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT

- * ** *** ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ผลของการแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อน้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักแห้งราก และน้ำหนักแห้งรวมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อข้าวมีอายุ 14 วัน

กรรมวิธี	น้ำหนักแห้ง (มิลลิกรัมต่อต้น)		
	ต้น	ราก	รวม
control	32.3±2.14 ^{bcd}	6.4±0.66 ^{cd}	38.7±2.7 ^{bc}
CR02	41.1±1.52 ^{ab}	8.3±0.67 ^{abc}	49.4±1.95 ^{ab}
C02	29.2±1.37 ^{cd}	6.4±0.12 ^{cd}	35.7±1.34 ^{cd}
C20	35.7±2.86 ^{abc}	10.6±1.23 ^{ab}	46.3±4.05 ^{abc}

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กรรมวิธี	น้ำหนักแห้ง (มิลลิกรัมต่อต้น)		
	ต้น	ราก	รวม
W12	36.7±2.85 ^{abc}	6.8±0.73 ^{cd}	43.5±3.54 ^{abc}
B11	34.9±3.61 ^{bc}	8.2±1.11 ^{abc}	43.1±4.72 ^{abc}
B09	36.7±2.29 ^{abc}	7.9±0.93 ^{abc}	44.5±3.17 ^{abc}
WR06	21.9±1.50 ^d	4.0±0.44 ^d	25.9±1.88 ^d
C13	43.6±1.22 ^a	10.8±1.31 ^a	54.4±2.47 ^a
C16	35.3±1.66 ^{bc}	7.3±0.8 ^{bc}	42.7±2.26 ^{abc}
C15	32.5±4.62 ^{bc}	8.0±1.04 ^{abc}	40.5±5.30 ^{bc}
F-test	**	**	**
CV (%)	16.27	26.46	17.31

หมายเหตุ: - mean±SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT

- * ** *** ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลของการแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อความยาวต้น ความยาวราก และความยาวรวมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อข้าวมีอายุ 14 วัน

กรรมวิธี	ความยาว (เซนติเมตร)		
	ต้น	ราก	รวม
control	30.29±1.85 ^d	7.94±1.19 ^c	38.23±2.81 ^{cd}
CR02	36.33±0.41 ^{ab}	10.67±0.65 ^{abc}	47.00±1.05 ^{ab}
C02	32.09±0.89 ^{bcd}	8.56±1.01 ^c	40.65±0.99 ^{bcd}
C20	33.38±1.61 ^{abcd}	14.25±1.95 ^a	47.63±3.43 ^{ab}
W12	33.98±1.60 ^{abcd}	8.81±0.84 ^c	42.79±2.27 ^{bcd}
B11	32.88±0.92 ^{bcd}	12.96±1.03 ^{ab}	45.84±1.53 ^{abc}
B09	34.10±1.15 ^{abcd}	9.88±0.87 ^{bc}	43.98±2.01 ^{abcd}
WR06	30.56±1.19 ^{cd}	6.81±0.39 ^c	37.38±0.95 ^d
C13	37.85±0.08 ^a	13.00±0.84 ^{ab}	50.85±0.82 ^a
C16	35.40±1.11 ^{abc}	8.21±0.81 ^c	43.61±1.77 ^{abcd}
C15	34.17±1.52 ^{abcd}	8.75±0.59 ^c	42.92±2.01 ^{bcd}
F-test	*	***	**
CV (%)	8.42	23.53	10.38

หมายเหตุ: - mean±SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT

- * ** *** ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

เมื่อข้าวมีอายุ 21 วัน พบว่าการแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรีย ไอโซเลต CR02 C20 W12 B11 B09 และ C13 ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีน้ำหนักสดรากมากกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย โดยต้นข้าวที่ได้รับไอโซเลต C20 ให้น้ำหนักสดรากเพิ่มขึ้นสูงที่สุดคิดเป็น 85.98

เปอร์เซ็นต์ ของต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย ไอโซเลต CR02 C20 และ B11 ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีน้ำหนักสดรวมเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย โดยต้นข้าวที่ได้รับไอโซเลต B11 ให้น้ำหนักสดรวมเพิ่มขึ้นสูงที่สุดคิดเป็น 33.73 เปอร์เซ็นต์ ของต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย (ตารางที่ 7) เมื่อพิจารณาการเติบโตด้านน้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น และน้ำหนักแห้งรวมของต้นกล้าข้าว ที่แม้จะมีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบทุกกรรมวิธี แต่ไม่พบว่าต้นกล้าข้าวที่ได้รับแบคทีเรียชนิดใดมีค่าดังกล่าวที่มากกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย (ไม่แสดงข้อมูล)

เมื่อพิจารณาทั้งสองการทดลองร่วมกัน พบว่าแบคทีเรียไอโซเลต C13 มีผลทำให้การเติบโตของต้นกล้าข้าวทั้งในด้านน้ำหนักและความยาวมีค่าสูงกว่าเมื่อต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย ไม่ว่าจะทดสอบด้วยวิธีการแช่เมล็ดข้าวเพียงอย่างเดียวหรือแช่ร่วมกับกรดให้กับต้นกล้าข้าวก็ตาม ในขณะที่แบคทีเรียส่วนใหญ่มีผลต่อการเติบโตของกล้าข้าวไม่แตกต่างจากไอโซเลต C13 แม้ว่าบางไอโซเลตจะทำให้การเติบโตของต้นกล้าข้าวดีขึ้นในบางดัชนีและในบางวิธีการ ทั้งนี้ในทุกการทดสอบ ไอโซเลต WR06 มีผลทำให้การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวมีค่าน้อยที่สุดอย่างสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าข้าวมีการตอบสนองต่อการทดสอบในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะทดสอบด้วยวิธีการใด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการละลายฟอสเฟตและการเจริญเติบโตของต้นข้าว พบว่าแบคทีเรียที่ให้ค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตที่ระดับ 4 ขึ้นไป คือ ไอโซเลต CR02 C02 C20 และ W12 ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวดีกว่าชุดควบคุมในบางค่า แต่ในภาพรวมมีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวน้อยกว่าแบคทีเรียไอโซเลต C13 ซึ่งมีการละลายฟอสเฟตที่ต่ำกว่าที่ 2.37 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลายฟอสเฟตที่ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการของแบคทีเรีย และความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตในสภาพการทดสอบปลูกในระดับโรงเรือนไม่สัมพันธ์กัน

ตารางที่ 7 ผลของการแช่เมล็ดข้าวและรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตต่อน้ำหนักสดราก และน้ำหนักสดรวมของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เมื่อข้าวมีอายุ 21 วัน

กรรมวิธี	น้ำหนักสด (มิลลิกรัมต่อต้น)	
	ราก	รวม
control	466.6±21.48 ^c	992.3±7.58 ^{bc}
CR02	803.2±53.06 ^a	1270.8±51.69 ^a
C02	442.4±45.39 ^c	933.2±59.04 ^c
C20	867.8±63.41 ^a	1324.6±86.33 ^a
W12	728.5±13.12 ^{ab}	1181.4±18.77 ^{ab}
B11	841.0±54.08 ^a	1327.0±85.11 ^a
B09	674.7±47.82 ^{ab}	1164.3±52.31 ^{ab}
WR06	527.4±104.7 ^{bc}	905.9±97.58 ^c
C13	672.3±24.03 ^{ab}	1185.6±25.18 ^{ab}
C16	561.2±61.31 ^{bc}	979.1±60.15 ^{bc}
C15	401.5±48.54 ^c	864.6±58.62 ^c
F-test	***	***
CV (%)	20.01	13.03

หมายเหตุ: - mean $\pm$ SE ที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT
 - * ** *** ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$ 0.01 และ 0.001 ตามลำดับ

การอภิปรายผลการวิจัย

แบคทีเรียที่พบในดินรอบรากและแบคทีเรียเอนโดไฟต์ที่อาศัยอยู่ในรากของพืชมีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในหลาย ๆ ด้าน รวมถึงความสามารถในการละลายฟอสเฟต ทำให้แบคทีเรียเหล่านี้มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพ (biofertilizer) โดยในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแบคทีเรียที่มีความสามารถในการละลายฟอสเฟตที่คัดเลือกโดยพิจารณาจากการให้ค่า PSI มากกว่า 2 ซึ่งทำให้ได้แบคทีเรียทั้งหมดจำนวน 10 ไอโซเลต ที่แยกได้จากดินบริเวณรอบรากพืช และจากภายในรากของพืช 3 ชนิด ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกโดยการให้หินฟอสเฟตเป็นแหล่งของฟอสฟอรัสหลัก ทั้งนี้เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการส่งเสริมการเติบโตของต้นกล้าข้าว โดยมีการทดสอบการให้แบคทีเรียแก่พืชด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธีการ คือ การแช่เมล็ดข้าวในแบคทีเรียเพียงอย่างเดียว การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้ต้นกล้าข้าว และการรดแบคทีเรียให้ต้นกล้าข้าวเพียงอย่างเดียว

การแช่เมล็ดข้าวในแบคทีเรียละลายฟอสเฟต (อนุสร และอรวรรณ, 2562; Bakhshandeh *et al.*, 2015) และการให้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตในดินที่ใช้ในการปลูกข้าว (เกตนันธินา และสมพร, 2557; Stephen *et al.*, 2015) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต ซึ่งสามารถช่วยในการคัดเลือกแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดี อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่า การให้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตด้วยการรดต้นกล้าข้าวไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว ในขณะที่การแช่เมล็ดข้าวและการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียมีผลทำให้ต้นกล้าข้าวที่ได้รับแบคทีเรียบางไอโซเลตเจริญเติบโตได้ดีกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย นอกจากนี้การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับแบคทีเรียมีผลทำให้ต้นกล้าข้าวมีการเติบโตที่ดีกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรียเมื่อข้าวมีอายุ 28 วัน ซึ่งช้ากว่าการแช่ร่วมกับการรดต้นกล้าข้าวซึ่งให้ผลเมื่อต้นกล้าข้าวมีอายุ 14 และ 21 วัน ตลอดจนการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าวด้วยแบคทีเรียยังมีผลต่อการเติบโตด้านความยาวของต้นและราก ซึ่งไม่พบในการแช่เมล็ดข้าวเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าวิธีการในการให้แบคทีเรียแก่พืชมีอิทธิพลต่อการเกิดกิจกรรมของแบคทีเรีย ทั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาการให้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตด้วยวิธีการแช่เปรียบเทียบกับวิธีการฉีดพ่นเมล็ดข้าวที่กำลังงอก ซึ่งพบว่า การฉีดพ่นเมล็ดข้าวขณะงอกมีผลในการกระตุ้นการเติบโตของต้นข้าวที่ดีกว่า (ฤชญา และคณะ, 2560) การที่วิธีการที่แตกต่างกันในการให้แบคทีเรียแก่พืชส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ต่างกัน อาจเป็นผลมาจากความเหมาะสมของปริมาณแบคทีเรียที่พืชได้รับ ความสามารถในการคงอยู่ของแบคทีเรียในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ หรือความเหมาะสมของช่วงเวลาให้แบคทีเรีย ซึ่งมีผลต่อการเกิดกิจกรรมทางเคมีระหว่างพืชกับแบคทีเรียได้ การแช่เมล็ดข้าวในแบคทีเรียเพียงอย่างเดียวอาจทำให้เมล็ดข้าวได้รับแบคทีเรียเริ่มต้นที่น้อยกว่า ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาที่นานกว่าในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียให้มากเพียงพอต่อการเกิดกิจกรรมในระดับที่มีผลต่อพืชได้ ในขณะที่การแช่ร่วมกับการรดเพิ่มปริมาณแบคทีเรียและโอกาสให้กับแบคทีเรียได้มีการสัมผัสกับเมล็ดข้าวและต้นกล้าข้าวมากขึ้น ซึ่งทำให้เห็นผลได้รวดเร็วกว่าและพืชมีการตอบสนองที่สูงกว่า ทั้งนี้ปริมาณแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชส่งผลต่อความสามารถในการส่งเสริมการเติบโตของพืชนั่นเอง (Banik *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2022)

ถึงแม้ว่าวิธีการในการให้แบคทีเรียที่แตกต่างกันมีผลต่อการแสดงออกของประสิทธิภาพของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต แต่ในทุกวิธีการให้ผลสรุปที่สอดคล้องกันคือไอโซเลต C13 เป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวได้ในระดับที่สูงที่สุดในภาพรวม โดยในการทดสอบด้วยการแช่เมล็ดข้าวในไอโซเลต C13 ซึ่งมีผลชัดเจนที่สุดเมื่อข้าวมีอายุ 28 วัน มีผลทำให้น้ำหนักรวมของต้นกล้าข้าว ทั้งน้ำหนักสดและแห้ง มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมมากกว่า 1.5 เท่า และโดยเฉพาะน้ำหนักสดรากของข้าวที่ได้รับไอโซเลต C13 มีค่ามากกว่าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรียถึง 1.9 เท่า ในทางเดียวกันการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดต้นกล้าข้าวด้วยไอโซเลต C13 ซึ่งมีผลชัดเจนที่สุดเมื่อข้าวมีอายุ 14 วัน ส่งผลให้การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักทุกค่าสูงกว่าชุดควบคุม โดยน้ำหนักสดรวมและน้ำหนักแห้งรวมมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.4 เท่า ตลอดจนมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักรากมากกว่า 1.7 เท่า แสดงให้เห็นว่าไอโซเลต C13 มีผลในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของรากอย่างชัดเจน ซึ่งอาจมีผลให้ต้นกล้าข้าวที่ได้รับแบคทีเรียชนิดนี้มีความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหาร โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของราก ได้ดีกว่าต้นกล้าข้าวที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย จึงมีผลต่อเนื่องทำให้การเจริญเติบโตด้านลำต้นเพิ่มขึ้น ตลอดจนส่งผลถึงความสามารถในการสร้างมวลรวมของต้นที่เพิ่มขึ้นของต้นกล้าข้าวที่ได้รับไอโซเลต C13 ทั้งนี้ฟอสฟอรัสมีความจำเป็นต่อการพัฒนาระบบรากของพืช ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสมากขึ้นมีพัฒนาการของระบบรากที่ดีขึ้น มีจำนวนและมวลของรากมากกว่าข้าวที่ขาดฟอสฟอรัส (ทศพร และคณะ, 2560) เช่นเดียวกันกับการศึกษาในข้าวสาลีที่แสดงว่าแบคทีเรียละลายฟอสเฟตส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของต้น โดยผ่านการส่งเสริมการสร้างรากและการทำงานของระบบรากที่ดีขึ้น (Elhaissofi *et al.*, 2020) การเจริญเติบโตของรากที่มากขึ้นประกอบกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่มากขึ้น เป็นผลให้น้ำหนักต้นและผลผลิตที่ดีขึ้นด้วย (Panhwar *et al.*, 2011; Stephen *et al.*, 2015; Bakhshandeh *et al.*, 2015)

เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียทั้ง 10 ไอโซเลต พบว่าความสามารถในการละลายฟอสเฟตมีความแตกต่างกัน โดยแบ่งเป็นกลุ่มที่มีค่า PSI มากกว่า 4 และกลุ่มที่มีค่า PSI น้อยกว่า 4 ซึ่งมีผลต่อการเติบโตของต้นกล้าข้าวในระดับที่แตกต่างกันด้วย โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่มีผลต่อการเติบโตของต้นกล้าข้าวไม่แตกต่างจากกรรมวิธีควบคุม ยกเว้นไอโซเลต C13 ที่มีผลทำให้การเติบโตของต้นกล้าข้าวดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม แม้ว่าจะให้ผลไม่แตกต่างจากไอโซเลตอื่น ๆ และไอโซเลต WR06 ที่มีผลทำให้การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างข้าวและแบคทีเรียต่างชนิดกัน ที่อาจส่งผลทั้งในเชิงบวกและลบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ทั้งนี้ไอโซเลต C13 และ WR06 มีค่า PSI ที่ใกล้เคียงกันแต่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวต่างกัน นอกจากนี้แบคทีเรียที่มีระดับความสามารถในการละลายฟอสเฟตมากกว่า 4 ส่วนมากมีผลต่อการเติบโตของต้นกล้าข้าวไม่แตกต่างจากไอโซเลต C13 แสดงให้เห็นว่าระดับความสามารถในการละลายฟอสฟอรัส ซึ่งทดสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ โดยไม่มีปัจจัยของพืชและสิ่งแวดล้อมมาเกี่ยวข้อง อาจไม่สัมพันธ์กับความสามารถของแบคทีเรียในการส่งเสริมการเติบโตของพืชในสภาพของการปลูกพืชได้ ตลอดจนแบคทีเรียส่งเสริมการเติบโตของพืชอาจมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น การผลิตฮอร์โมนพืช และการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารชนิดอื่น ๆ ที่อาจมีผลทำให้แบคทีเรียแต่ละชนิดส่งผลต่อการเติบโตของพืชต่างกัน ดังรายงานของ Elhaissofi *et al.* (2020) ที่ทำการทดสอบการเจริญเติบโตของข้าวสาลีที่ได้รับแบคทีเรียละลายฟอสเฟต และพบว่าความสามารถในการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียอาจไม่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการกระตุ้นการเติบโตของข้าวสาลี แต่ความสามารถในการกระตุ้นการสร้างรากอาจ

เป็นปัจจัยที่ทำให้พืชสามารถดูดใช้ธาตุอาหารจากดินได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี เมื่ออยู่ในสภาวะที่ในดินมีฟอสฟอรัสต่ำ นอกจากนี้ความสามารถในการอยู่รอดในดิน ตลอดจนความสามารถที่ต่างกันในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่างรูปแบบกันของของแบคทีเรียแต่ละชนิด (Chen and Liu, 2019) ยังอาจเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบคทีเรียได้เช่นกัน

สรุปผลการวิจัย

การคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการส่งเสริมการเติบโตของต้นกล้าข้าว โดยมีวิธีการให้แบคทีเรียที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับแบคทีเรีย การแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว และการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าว แสดงให้เห็นว่าวิธีการให้แบคทีเรียมีผลต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว ทั้งนี้วิธีการแช่เมล็ดข้าวร่วมกับการรดแบคทีเรียให้กับต้นกล้าข้าวให้ผลที่ดีที่สุด นอกจากนี้ไม่ว่าจะให้แบคทีเรียด้วยวิธีการใด ไอโซเลต C13 ก็มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวที่เด่นชัดกว่าแบคทีเรียไอโซเลตอื่น แม้ว่าจะมีค่าดัชนีการละลายฟอสเฟตน้อยกว่าก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติอื่น ๆ ของแบคทีเรียร่วมด้วย ซึ่งเป็นประเด็นหนึ่งที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม ตลอดจนความจำเพาะของชนิดของแบคทีเรียแต่ละชนิดที่มีผลต่อความสามารถในการทำให้เกิดกิจกรรมการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้แตกต่างกัน ออกไปตามชนิดของพืช อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียละลายฟอสเฟตที่แยกได้จากดินบริเวณรอบรากพืชมีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ได้ แต่จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมทั้งในประเด็นที่ได้กล่าวไปแล้ว และประเด็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต รวมทั้งช่วงเวลาและอัตราการใส่เชื้อที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎา ปัญญา เนตรนภา อินสลุต และสายสมร ล้ายอง. (2560). ผลของการใช้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวในสภาพแอโรบิก. *แก่นเกษตร*, 45(1), 1093-1098.
- เกตนันนิภา วันชัย และสมพร เรืองสังข์. (2557). ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตที่ตรึงอยู่บนขี้เถ้ากลบต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ กข47. *วิทยาศาสตร์เกษตร*, 45(2), 513-516.
- ทศพร บ่อบัวทอง เนตรนภา อินสลุต วิษณุภาส สังพาลี และจุฑามาศ อาจนาสี. (2560). ผลของระดับฟอสฟอรัสต่อการพัฒนาระบบรากข้าว. *แก่นเกษตร*, 45(1), 997-1002.
- เพชรดา ปินใจ ฉัตรารณณ์ ทองปนแก้ว และชนิดาภา ธนะศรีรางกูร. (2564). การศึกษาความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและการส่งเสริมการเจริญเติบโตของอ้อยโดยแบคทีเรียละลายฟอสเฟตในสภาพโรงเรือนเพื่อการพัฒนาเป็นชีวภัณฑ์. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 39(2), 109-118.
- สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรม. (2564). *ข้าว*. สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2565, จาก: https://www.ditp.go.th/contents_attach/750851/750851.pdf.
- สุภาพร จันรุ่งเรือง เบญจมาศ รสโสภา และกรณิการ์ สัจจาพันธ์. (2553). ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *Burkholderia* sp. สายพันธุ์ Rs01 ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2. *วิทยาสารกำแพงแสน*, 8(1), 1-14.
- อนุสรณ์ พิศนอย และอรรณณ ฉัตรสีรุ่ง. (2562). การคัดกรองและการประเมินประสิทธิภาพของไรโซแบคทีเรีย เพื่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว. *วารสารเกษตร*, 35(3), 461-473.

- Alori, E.T., Glick, B.R. and Babalola, O.O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>.
- Bakhshandeh, E., Rahimian, H., Pirdashti, H. and Nematzadeh, G.A. (2015). Evaluation of phosphate solubilizing bacteria on the growth and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) cropped in northern Iran. *Journal of Applied Microbiology*, 119(5), 1371-1382, doi: <https://doi.org/10.1111/jam.12938>.
- Banik, A., Dash, G.K., Swain, P., Kumar, U., Mukhopadhyay, S.K. and Dangar, T.K. (2019). Application of rice (*Oryza sativa* L.) root endophytic diazotrophic *Azotobacter* sp. strain Avi2 (MCC 3432) can increase rice yield under green house and field condition. *Microbiological Research*, 219, 56-65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.11.004>.
- Bünemann, E.K. (2015). Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus-A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 82-98, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.026>.
- Chen, Q. and Liu, S. (2019). Identification and characterization of the phosphate-solubilizing bacterium *Pantoea* sp. S32 in reclamation soil in Shanxi, China. *Frontiers in microbiology*, 10, doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02171>.
- Elhaissofi, W., Khourchi, S., Ibnyasser, A., Ghoulam, C., Rchiad, Z., Zeroual, Y., Lyamlouli, K. and Bargaz, A. (2020). Phosphate solubilizing rhizobacteria could have a stronger influence on wheat root traits and aboveground physiology than rhizosphere P solubilization. *Frontiers in Plant Science*, 11, doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00979>.
- Glick, B.R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, doi: <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
- Heuer, S., Gaxiola, R., Schilling, R., Herrera-Estrella, L., López-Arredondo, D., Wissuwa, M., Delhaize, E. and Rouached, H. (2017). Improving phosphorus use efficiency: A complex trait with emerging opportunities. *The Plant Journal*, 90(5), 868-885, doi: <https://doi.org/10.1111/tpj.13423>.
- Insalud, N., Bell, R.W., Colmer, T.D. and Rerkasem, B. (2006). Morphological and physiological responses of rice (*Oryza sativa*) to limited phosphorus supply in aerated and stagnant solution culture. *Annals of Botany*, 98(5), 995-1004, doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcl194>.
- Lindsay, W.L., Vlek, P.L. and Chien, S.H. (1989). Phosphate minerals. In Dixon, J.B. and Weed, S.B. (Eds.). *Minerals in Soil Environment*, pp. 1089-1130. Wisconsin: Soil Science Society of America Inc.

- Liu, Z., Zhang, X., Li, L., Xu, N., Hu, Y., Wang, C., Shi, Y. and Li, D. (2022). Isolation and characterization of three plant growth-promoting rhizobacteria for growth enhancement of rice seedling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1382-1393, doi: <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10393-4>.
- McLaughlin, M.J., Alston A.M. and Martin J.K. (1988). Phosphorus cycling in wheat-pasture rotations. I. The source of phosphorus taken up by wheat. *Australian Journal of Soil Research*, 26(2), 323-331, doi: <https://doi.org/10.1071/SR9880323>.
- Oves, M., Khan, M.S. and Qari, H.A. (2017). *Ensifer adhaerens* for heavy metal bioaccumulation, biosorption, and phosphate solubilization under metal stress condition. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, 540-552, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.08.026>.
- Panhwar, Q.A., Radziah, O., Zaharah, A.R., Sariah, M. and Razi, I.M. (2011). Role of phosphate solubilizing bacteria on rock phosphate solubility and growth of aerobic rice. *Journal of Environmental Biology*, 32(5), 607-617.
- Rawat, P., Shankhdhar, D. and Shankhdhar, S.C. (2021). Synergistic impact of phosphate solubilizing bacteria and phosphorus rates on growth, antioxidative defense system, and yield characteristics of upland rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Plant Growth Regulation*, 41, 2449-2461, doi: <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10458-4>.
- Stephen, J., Shabanamol, S., Rishad, K.S. and Jisha, M.S. (2015). Growth enhancement of rice (*Oryza sativa*) by phosphate solubilizing *Gluconacetobacter* sp. (MTCC 8368) and *Burkholderia* sp. (MTCC 8369) under greenhouse conditions. *3 Biotech*, 5(5), 831-837, doi: <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0286-5>.
- Stevenson, F.J. (1986). *Cycles of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. New York: John Wiley.