

การนำจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในระบบเกษตรกรรมแบบยั่งยืน

อรุณ ชาญชัยหาวิวัฒน์^{1*} สุวิทย์ เกิดทับทิม² และสมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ³

¹สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ ²สาขาวิชารัฐประศาสนศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ถนนบุรี กรุงเทพฯ 10600

³ภาควิชาชีววิทยา และหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วัฒนา กรุงเทพฯ 10110

*E-mail: arunchan_57@hotmail.com

รับบทความ: 3 กันยายน 2559 ยอมรับตีพิมพ์: 4 พฤศจิกายน 2559

บทคัดย่อ

การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อระบบการเกษตรแบบยั่งยืนได้รับการพัฒนาจนสามารถนำไปใช้เพิ่มผลผลิตอย่างได้ผลและเป็นที่ยอมรับของเกษตรกรในปัจจุบัน โดยทั่วไปนิยมนำจุลินทรีย์ไปใช้ในรูปของปุ๋ยชีวภาพ สารสกัดส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และสารกำจัดศัตรูพืช ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้ต้องมีสมบัติพิเศษคือ สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศมาเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ หรือมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินได้อย่างรวดเร็ว ทำให้พืชสามารถดูดซึมสารอาหารเข้าสู่ระบบรากได้ดี จุลินทรีย์บางชนิดสร้างฮอร์โมนหรือวิตามินส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช บางชนิดดำรงชีวิตเป็นปฏิปักษ์ต่อจุลินทรีย์ก่อโรคพืชโดยสร้างสารปฏิชีวนะต่อต้านจุลินทรีย์ก่อโรค แข่งแย่งพื้นที่หรือสารอาหารจากจุลินทรีย์ก่อโรค หรือสามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันต้านทานโรคของต้นพืชโดยไม่ทำอันตราย จุลินทรีย์เหล่านี้ได้นำมาใช้เป็นสารชีวภาพกำจัดศัตรูพืชในรูปของเซลล์หรือสารสกัดจากเซลล์ อย่างไรก็ตาม การใช้จุลินทรีย์ให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริง เกษตรกรควรได้รับคำแนะนำหรือเข้ารับอบรมจากผู้เชี่ยวชาญในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์อย่างถูกต้องเพื่อให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ยังเจริญได้ดีหรือไม่ทำให้สารชีวภาพสูญเสียประสิทธิภาพไป

คำสำคัญ: จุลินทรีย์ การเกษตรแบบยั่งยืน ปุ๋ยชีวภาพ การตรึงแก๊สไนโตรเจน สารชีวภาพกำจัดศัตรูพืช

Application of Microorganisms in Sustainable Agriculture

Arun Chanchaichavivat^{1*}, Suwinai Kirdtabtim² and Somkiat Phornphisutthimas³

¹Program Study of Microbiology, Faculty of Science and Technology, and ²Program Study of Public Administration, Faculty of Humanities and Social Science, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thanburi, Bangkok 10600, Thailand

³Department of Biology and Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Wattana, Bangkok 10110, Thailand
*E-mail: arunchan_57@hotmail.com

Received: 3 September 2016 Accepted: 4 November 2016

Abstract

The microbial screenings to enhance productivity in sustainable agriculture are very successful and acceptable. In general, microorganisms were mostly used in the forms of bio-fertilizer, extracted plant promoting agent and pesticide. These microorganisms must have special properties including nitrogen fixation ability in converting gas nitrogen to usable compounds for plants, or have ability to rapidly degrade soil organic matters that plants can absorb its nutrients through root system effectively. In addition, some microorganisms produce hormones and vitamins to promote plant growth and development. Some microorganisms are antagonistic to plant pathogens by producing antibiotics against them, compete for space or nutrients from plant pathogens, or stimulate plant immune system by harmless. These microorganisms are used as biopesticide agents produced from cells or cell extracts. However, for effective application of agricultural microorganisms, the farmers should take some trainings or suggestions from the experts to maintain the microbial products correctly in order to survive most cells, as well as keep their activities.

Keywords: Microorganism, Sustainable agriculture, Biofertilizer, Nitrogen fixation, Biopesticide

บทนำ

จุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญในธรรมชาติและมีความสัมพันธ์กับพืช สัตว์ และมนุษย์ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลาย บางชนิดเป็นผู้ผลิตและผู้สร้างสารทางชีวภาพ แต่บางชนิดก่อ-

ให้เกิดโทษ เช่น การก่อให้เกิดโรค ปนเปื้อน และทำลายคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือวัสดุต่าง ๆ จุลินทรีย์มีทั้งพวกที่เป็นโปรแคริโอตและยูแคริโอต ซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรหลายชนิด มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสารต่าง ๆ ใน

ดินทำให้เกิดการหมุนเวียนและเป็นประโยชน์ต่อพืช การเจริญและการสร้างสารชีวภาพของจุลินทรีย์บางชนิดอาจนำมาใช้ในการควบคุมโรคพืชได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่มีร่วตฤในการเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีของแสงให้เป็นพลังงานเคมีสะสมในเซลล์ยังทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารให้กับสิ่งมีชีวิตอื่นด้วย

ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกสนใจนำจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในกระบวนการบริหารจัดการเกษตรแบบยั่งยืนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นระบบการเกษตรกรรมที่สอดคล้องกับกรอบหลักการพัฒนาในช่วงปี พ.ศ. 2559 – 2573 ของที่ประชุมสหประชาชาติ โดยกำหนดเป็นเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development goals, SDGs) ของประเทศสมาชิก เพื่อแก้ปัญหาภาวะโลกร้อนและระบบนิเวศของโลกที่เสื่อมโทรมลงตั้งที่มนุษย์ชาติกำลังเผชิญอยู่ การทำเกษตรยั่งยืนให้ความสำคัญกับความสมบูรณ์ของดินที่ประกอบด้วยอินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร แร่ธาตุ และน้ำ เป็นหลัก รูปแบบของระบบเกษตรแบบยั่งยืน ได้แก่ เกษตรธรรมชาติ เกษตรอินทรีย์ วนเกษตร และเกษตรตามแนวทฤษฎีใหม่ ซึ่งมีลักษณะการดำเนินกิจกรรมที่สอดคล้องกับระบบนิเวศผสมผสานกับการนำองค์ความรู้จากภูมิปัญญาท้องถิ่นหรือประสบการณ์ของกลุ่มเกษตรกรในพื้นที่นั้นมาใช้ ทำให้เกิดความมั่นคงในอาชีพและไม่เบียดเบียนสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำจุลินทรีย์มาช่วยย่อยสลายสารให้อยู่ในสภาพที่พืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ เช่น นำมาผลิตในรูปของปุ๋ยชีวภาพ และการใช้จุลินทรีย์ปฏิปักษ์ (antagonistic microorganism) (Chanchaichavivat and Wongsrirat, 2009; Phornphisutthimas, 2012; Raksapol and Phornphisutthimas, 2016) ในกระบวนการควบคุมโรคพืช

ด้วยวิธีจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของระบบเกษตรแบบยั่งยืน กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในเรื่องนี้ได้แก่ แบคทีเรีย พังใจ (fungi) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) และแอกทิโนมัยซิส (actinomycetes) ซึ่งพบในธรรมชาติหลายชนิด (Singh, 2010)

จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ (microorganisms in biofertilizer)

ปุ๋ยชีวภาพประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตซึ่งส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถเพิ่มสารอาหารในดิน เช่น แบคทีเรีย พังใจ ไซยาโนแบคทีเรีย จุลินทรีย์เหล่านี้มีความสามารถด้านใดด้านหนึ่ง ได้แก่ ตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศ สามารถละลายฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ ผลิตฮอร์โมนเร่งการเจริญเติบโตของพืช และย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ อาจช่วยให้พืชดูดซึมแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ดีขึ้น เช่น เหล็ก ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม โดยความสามารถและสมบัติของจุลินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ยชีวภาพมีดังนี้

1. จุลินทรีย์ตรึงแก๊สไนโตรเจน (nitrogen fixing microorganism)

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิตของพืชผลการเกษตร แต่มีปริมาณค่อนข้างจำกัดในดิน การให้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนแก่พืชมักให้ผลการนำไปใช้ค่อนข้างต่ำและสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของอากาศมีปริมาณมากกว่าแก๊สอื่น ๆ (ร้อยละ 79) และพืชนำมาใช้ได้ยากเนื่องจากต้องอาศัยพลังงานสูงในการเปลี่ยนแปลงพันธะสาม (triple bond) ระหว่างไนโตรเจนสองอะตอม แต่มีจุลินทรีย์บางชนิดสามารถสร้าง

เอนไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) เร่งปฏิกิริยาการตรึงแก๊สไนโตรเจนในอากาศและเปลี่ยนโมเลกุลแก๊สไนโตรเจน (N_2) เป็นแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งจะเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์และรวมกับโมเลกุลอื่นภายในเซลล์ได้เป็นการดอะมิโนและเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อด้วยพันธะเพปไทด์ระหว่างโมเลกุลของกรดอะมิโนได้เป็นโมเลกุลโปรตีนสะสมอยู่ในเซลล์จุลินทรีย์เมื่อจุลินทรีย์ตายและเกิดการย่อยสลายไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์ ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มอื่นในดินเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรต์ (NO_2^-) จุลินทรีย์ที่สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนได้เป็นพวกโพรแคริโอตทั้งหมด เรียกพวกนี้ว่า ไดอะโซโทรฟ (diazotrophs) ที่พบในธรรมชาติแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มดำรงชีวิตแบบซิมไบโอซิส (symbiotic microorganism) กลุ่มดำรงชีวิตแบบอิสระ (free living) และกลุ่มดำรงชีวิตเชื่อมโยงกับซิมไบโอซิส (associative symbiosis) (Scragg, 2005) จุลินทรีย์ตรึงแก๊สไนโตรเจนในธรรมชาติมีหลากหลายชนิด โดยสามารถเติมธาตุไนโตรเจนให้กับดินประมาณ 1.80×10^8 ตันไนโตรเจนต่อปี แต่ยังไม่เพียงพอที่จะทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนได้ทั้งหมด

การศึกษาบทบาทของจุลินทรีย์ตรึงแก๊สไนโตรเจนทำให้ได้ข้อมูลระบบและกลไกการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในระบบตรึง รวมถึงสามารถนำมาพัฒนาเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ดังกล่าวเพื่อเป็นประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม ตัวอย่างจุลินทรีย์ตรึงแก๊สไนโตรเจนที่มีการศึกษาวิจัยค่อนข้างมาก เช่น *Rhizobium* spp. *Azospirillum* spp. *Azotobacter* spp. *Azotobacter diazotrophicus* และไซยาโนแบคทีเรีย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 แบคทีเรียกลุ่มไรโซเบียม (rhizobium) สัมพันธ์กับพืชที่มีผลเป็นฝัก โดยพบเจริญอยู่ร่วมกับพืชตระกูลถั่วหลายชนิด เช่น *Rhizobium Azorhizobium Bradyrhizobium Mesorhizobium* และ *Sinorhizobium* แบคทีเรียกลุ่มนี้มีลักษณะคอลลีบนอาหาร yeast extract mannitol agar (YEMA) เป็นมันวาว นูน และขอบเรียบ คอลลีนีโปร่งแสงหรือทึบแสง ดำรงชีวิตแบบพึ่งพาอาศัยกับพืชที่มีผลเป็นฝักและแบคทีเรียเจริญเพิ่มจำนวนในรากพืชหรือส่วนของลำต้นจนกระทั่งเกิดปม (nodule) ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจน วงศ์ของพืชที่มีผลเป็นฝักซึ่งพบปมของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ วงศ์ถั่ว (Fabaceae) ความสามารถในการตรึงแก๊สไนโตรเจนของกลุ่มไรโซเบียมขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ (Das, 1991) และชนิดของพืชและภาวะแวดล้อม ปัจจุบันแบคทีเรียกลุ่มไรโซเบียมมีการค้นพบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การนำไรโซเบียมไปใช้กับพืชในการเกษตรส่วนใหญ่คาดหวังให้เชื้อสามารถอยู่รอดและแข่งขันกับเชื้อที่ปรากฏอยู่ในธรรมชาติ ได้รวมทั้งเจริญอยู่ร่วมกับพืชได้ทันที ดังนั้นจึงนิยมผสมไรโซเบียมกับเมล็ดพืชก่อนนำไปหว่านในแปลงเพาะปลูก นอกจากนี้อาจผสมสารช่วยยึดติดเชื้อกับเมล็ดพืช เช่น ยางไม้จากต้นอะคาเซีย (*Acacia senegal*) เมทิลเซลลูโลส (methyl cellulose) น้ำตาล โดยนำสารช่วยยึดติดพันให้ทั่วเมล็ดพืชและคลุกกับวัสดุตัวพาที่มีไรโซเบียมอยู่ ซึ่งทำให้แต่ละเมล็ดมีเชื้อเกาะอยู่ประมาณ 1,000 เซลล์ นำเมล็ดทั้งหมดไปตากแห้งบนกระสอบป่านหรือพื้นซีเมนต์ในที่ร่มและไม่ควรนำไปตากแดดเพราะอาจทำลายเชื้อได้ จากนั้นจึงนำเมล็ดไปเพาะปลูก ด้วยวิธีดังกล่าว ไรโซเบียมสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชออกฝักได้อย่างน่าพอใจ (ตาราง 1)

ตาราง 1 ร้อยละของผลผลิตที่เพิ่มขึ้นในพืชบางชนิดเนื่องจากการเติมปุ๋ยไรโซเบียม

พืชที่มีผลเป็นผัก ร้อยละของผลผลิตที่เพิ่มขึ้น	
ถั่วแขก	41
ถั่วลิสง	49
ถั่วแดง	50
ถั่วเหลือง	61
ถั่วเขียว	33
อาร์ชาร์ (achar)	32

ที่มา: Tamil Nadu Agricultural University, 2011

1.2 แบคทีเรียสกุล *Azotobacter*

ดำรงชีวิตแบบอิสระ โดยเป็นผู้ย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิต มีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศและพบมากบริเวณรอบรากพืช โดย *Azotobacter* ที่สำคัญต่อการเกษตรมี 6 ชนิด ได้แก่ *A. armeniacus* *A. beijerinckii* *A. chroococcum* *A. vine-landii* *A. nigricans* และ *A. paspali* แบคทีเรียสกุลนี้ดำรงชีวิตแบบต้องการอากาศ เซลล์ติดสีแกรมลบ รูปท่อน อาจพบเป็นเซลล์เดี่ยว เซลล์ต่อกันเป็นสาย หรือเป็นกลุ่มเซลล์ สร้างซิสต์ (cyst) ที่มีผนังหนา ทนต่อความแห้งและสารเคมีอย่างไรก็ตาม เชื้อนี้ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ ในขณะที่เซลล์สร้างซิสต์ไม่สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจน *Azotobacter* spp. พบได้ในดินที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลางหรือเบส แหล่งน้ำบริเวณรอบรากพืช และต้นพืช โดยทั่วไปพบ *A. chroococcum* ในดินมากกว่าชนิดอื่น (Tamil Nadu Agricultural University, 2011)

Azotobacter มีประโยชน์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชจากความสามารถหลายด้านของแบคทีเรียนี้ ได้แก่ การตรึงแก๊สไนโตรเจน สร้างฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของ

พืช เช่น ไอเอเอ (indol-3-acetic acid, IAA) จิบเบอเรลลิน (gibberellins) และสารคล้ายจิบเบอเรลลิน (gibberellins-like substance) นอกจากนี้ยังสร้างวิตามิน แอมโมเนีย สารเมแทบอลิต์ต่อต้านรา และละลายฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่รากพืชดูดซึมไปใช้ได้ จากการศึกษาพบว่า การคลุกเมล็ดพืชกับ *A. chroococcum* ทำให้เพิ่มผลผลิตพืชประมาณร้อยละ 10 และเพิ่มผลผลิตเมล็ดธัญพืชประมาณร้อยละ 15 – 20 นอกจากนี้หากใช้เชื้อร่วมกับจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น เช่น *Rhizobium* spp. *Azospirillum* spp. จุลินทรีย์สามารถละลายสารประกอบฟอสเฟต และไมคอร์ไรซา (mycorrhiza) จะช่วยเพิ่มผลผลิตพืชได้หลายชนิด เช่น พืชที่มีผลเป็นผัก ธัญพืช ผัก (ตาราง 2) *Azotobacter* spp. ที่เจริญในดิน ต้องการแหล่งคาร์บอนในการเจริญค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรเติมปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก หรือซากกิ่งไม้เพื่อเพิ่มสารอาหารให้กับแบคทีเรีย (Ahmad et al., 2011)

1.3 แบคทีเรียสกุล *Azospirillum*

พบแพร่กระจายในดิน เจริญได้ดีบริเวณรากพืชหลายชนิด และบริเวณบนผิวดินที่มีพืชเจริญอยู่ ดำรงชีวิตเกี่ยวข้องกับซิมไบโอซิส เซลล์ติดสีแกรมลบ เคลื่อนที่ได้ เซลล์เป็นรูปโค้ง มีแกรนูลสะสมพอลิบิวตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต (poly-B-hydroxy butyrate granule) มีแฟลเจลลา (flagella) 1 เส้นหรือรอบเซลล์ รูปร่างเซลล์และขนาดอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเพาะเลี้ยง และสามารถสร้างซิสต์ได้ แบคทีเรียสกุลนี้เจริญได้ในสภาพไร้อากาศ โดยใช้ไอออนไนเตรต (NO₃⁻) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชัน (nitrification) หรือในภาวะมีอากาศน้อย ใช้แก๊สไนโตรเจนหรือแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน เจริญในภาวะมีอากาศ และควรให้แหล่งไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย

ไนเตรต หรือกรดอะมิโน

ตาราง 2 ผลผลิตทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ *Azotobacter* spp.

ชนิดของพืช	ร้อยละผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากกว่าผลผลิตจากการใช้ปุ๋ยเคมี
ธัญพืช	
ข้าวสาลี	8 – 15
ข้าวเจ้า	5
ข้าวโพด	15 – 20
ข้าวฟ่าง	15 – 20
พืชอื่น ๆ	
มันฝรั่ง	13
แครอท	16
ผักกะหล่ำ	40
มะเขือเทศ	2 – 24
ฝ้าย	7 – 27
อ้อย	9 – 24

ที่มา: Das, 1991

แบคทีเรียสกุล *Azospirillum* ประกอบด้วย 5 ชนิด ได้แก่ *A. brasilense* *A. lipoferum* *A. amazonense* *A. halopraeferens* และ *A. irakense* การศึกษาใช้ *Azospirillum* spp. ผสมกับเมล็ดพืช พบว่า ให้ปริมาณไนโตรเจนกับพื้นที่เกษตรกรรม 20 – 30 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อเฮกเตอร์ (hectare) ประโยชน์ของปุ๋ย *Azospirillum* ต่อการเพาะปลูกพืชมีมากกว่าการเพิ่มแหล่งไนโตรเจนให้กับพืช กล่าวคือ มีผลต่อรูปร่างลักษณะและสรีรวิทยาของรากพืช ได้แก่ เซลล์รากขนอ่อนบริเวณปลายรากมีลักษณะแตกต่างจากพืชปกติโดยเซลล์ผิว (epidermal cell) ขยายขนาดขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่ดูดซึมน้ำและสารอาหารในดิน นอกจากนี้ยังส่งผลให้จำนวนและความยาวของราก

ขนอ่อนเพิ่มขึ้นด้วย พืชจึงสามารถยึดเกาะกับดินได้แน่นมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับรากแขนงและระบบรากอื่นๆ ของพืชด้วย *Azospirillum* spp. สามารถสร้างซิเดอโรฟอร์ (siderophore) ซึ่งเป็นสารประกอบยึดจับธาตุเหล็กจากดินได้ดีและปลดปล่อยธาตุเหล็กอิสระออกมาเมื่ออยู่ในภาวะขาดแคลนธาตุเหล็ก ส่งผลให้พืชสามารถนำธาตุเหล็กอิสระไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ นอกจากนี้ซิเดอโรฟอร์ยังมีสมบัติต่อต้านเชื้อก่อโรคพืชบางชนิดด้วย เมื่อ *Azospirillum* spp. เจริญเพิ่มจำนวนมากขึ้น จะสร้างสารหลายชนิดที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น IAA จิบเบอเรลลิน สารคล้ายไซโทไคนิน (cytokinin-like substance) วิตามินบางชนิดสร้างสารปฏิชีวนะต่อต้านราก่อโรคพืช เช่น *Thielaviopsis basicola* และ *Fusarium oxysporum* ในต้นฝ้าย การใช้ปุ๋ย *Azospirillum* spp. พบว่า สามารถเพิ่มผลผลิตของพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ข้าวโพด ทั้งในแปลงปลูก (field) และเรือนกระจก (green house) จากการตรวจสอบพบว่าพืชได้รับแร่ธาตุเพิ่มขึ้น เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แร่ธาตุอื่น ๆ จากดินที่ผสมปุ๋ย *Azospirillum* (Madigan et al., 2003)

ปัจจุบันมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง *Azospirillum* และจุลินทรีย์ชนิดอื่นในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น การใส่เชื้อ *Azospirillum* spp. และ *Rhizobium* spp. สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชที่มีผลเป็นฝักมากกว่าการใช้ *Azospirillum* ชนิดเดียว โดยทำให้พืชสร้างปมที่รากมากขึ้นและส่งเสริมการสร้างรากแขนงและรากขนอ่อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปลดปล่อยฮอร์โมนจากเชื้อกระตุ้นการเจริญเติบโตและขยายขนาดของเซลล์พืช รวมทั้งมีผลการศึกษาที่

แสดงให้เห็นว่า การใส่ *Azospirillum brasilense* ร่วมกับ *Azospirillum chroococcum* ให้กับพืชส่งผลเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้กับดินและเพิ่มผลผลิตของพืชมากกว่าใช้เชื้อเพียงชนิดเดียว

1.4 แบคทีเรีย *Acetobacter diazotrophicus* ติดสีแกรมลบ ต้องการอากาศน้อย สำหรับการเจริญ สามารถตรึงไนโตรเจน แยกได้จากรากและลำต้นของอ้อย ในอาหารกึ่งแข็งผสมน้ำตาลและปราศจากแหล่งไนโตรเจน *A. diazotrophicus* เป็นแบคทีเรียประเภทเอ็นโดไฟติกไดอะโซโทรฟ (endophytic diazotroph) มักพบอยู่กับพืชที่มีน้ำตาลสะสมอยู่มาก เช่น อ้อย มันฝรั่งหวาน (sweet potato) ข้าวฟ่างหวาน (sweet sorghum) ต้นกาแฟ แบคทีเรียนี้สามารถเจริญอยู่กับรากพืช ลำต้น และใบ โดยช่วยตรึงแก๊สไนโตรเจนให้กับอ้อยมากกว่าพืชชนิดอื่น จากการทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ แสดงให้เห็นว่า *A. diazotrophicus* ตรึงแก๊สไนโตรเจนและเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์พร้อมกับปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาในรูปของแอมโมเนียสะสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชชนิด IAA ออกมาด้วย การเติมแบคทีเรียชนิดนี้ให้กับพืชร่วมกับการใส่เชื้อไมคอร์ไรซาสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตของอ้อย มันฝรั่งหวาน และข้าวฟ่าง (Kango, 2010)

1.5 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ดำรงชีวิตแบบอิสระในธรรมชาติ พบแพร่กระจายในน้ำและดินชื้นแฉะ ดำรงชีวิตเป็นเซลล์เดี่ยวเป็นกลุ่ม หรือเซลล์มีลักษณะเป็นสายยาว บางชนิดมีโครงสร้างพิเศษทำหน้าที่ตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศ เรียกว่า เฮเทอโรซิสต์ (heterocyst) ปัจจุบันพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่

ไม่มีเฮเทอโรซิสต์สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนได้ หากเจริญอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ ชนิดที่นิยมใช้เติมแหล่งไนโตรเจนให้กับพืช ได้แก่ สกุล *Aulosira* *Tolypothrix* *Scytonema* *Nostoc* *Anabaena* และ *Plectonema* ไชยาโนแบคทีเรียมีประโยชน์ด้านเกษตรกรรมหลายประการ ได้แก่ มีความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งสำคัญต่อวัฏจักรคาร์บอนและออกซิเจน สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจนให้กับพืช สามารถอุ้มน้ำไว้ให้ดินชุ่มชื้น ยึดเหนี่ยวดินไว้เป็นกลุ่มก้อน เพิ่มแร่ธาตุให้กับดิน เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส คาร์บอน โซเดียม รวมทั้งลดฤทธิ์ของซัลไฟด์และธาตุเหล็กในการทำลายพืช เช่น ต้นข้าว นอกจากนี้ไชยาโนแบคทีเรียยังผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เช่น กรดแอมิโน โปรตีน เพปไทด์ขนาดเล็ก น้ำตาล สารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ซับซ้อน วิตามิน และฮอร์โมนเร่งการเติบโต (growth hormone) จากการศึกษพบว่าไชยาโนแบคทีเรียปริมาณ 5–20 ตัน โดยน้ำหนักเซลล์สดต่อเฮกเตอร์ สามารถตรึงไนโตรเจนประมาณ 30 กิโลกรัมต่อฤดูกาลต่อเฮกเตอร์ในแปลงปลูกข้าว มวลเซลล์สาหร่ายซึ่งเป็นแหล่งสารอินทรีย์ยังคงอยู่ในดินและเป็นปุ๋ยให้กับการปลูกพืชในครั้งต่อไป (Sumbali and Mehrotra, 2009)

1.6 แหนแดง (*Azolla*) แหนแดง เป็นเฟิร์นน้ำ (water fern) ขนาดเล็ก พบทั่วไปในแหล่งน้ำจืดธรรมชาติ ใบเป็นเกลียวแบน ด้านหลังใบมีสีเขียวเข้ม และพบไชยาโนแบคทีเรียชนิด *Anabaena azollae* เจริญอยู่ร่วมกับแหนแดงแบบซิมไบโอซิส แอนาบีน่า (anabaena) มีเซลล์เฮเทอโรซิสต์ สามารถตรึงแก๊สไนโตรเจน การดำรงชีวิตแบบพึ่งพาอาศัยระหว่างแอนาบีน่าและแหนแดงเป็นแบบได้ประโยชน์ทั้งสองฝ่าย โดยแหน-

แดงสังเคราะห์อาหารด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงให้แก่สาหร่ายและเป็นที่อยู่ปลอดภัยสำหรับสาหร่าย ส่วนแอนาบีนาช่วยตรึงแก๊สไนโตรเจนและเปลี่ยนไปเป็นปุ๋ยไนโตรเจนหรือไนไตรต์ให้แทนแดงใช้ในการเจริญเติบโต โดยทั่วไปแทนแดงเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนชื้น พบในแหล่งน้ำนิ่ง เช่น บ่อน้ำ หนอง บึง คูน้ำ นาข้าว แทนแดงที่พบในธรรมชาติมี 7 ชนิด ได้แก่ *Azolla pinnata* *A. caroliniana* *A. rubra* *A. filiculoides* *A. nilotica* *Azolla mexicana* และ *A. microphylla* การใช้แทนแดงในการเกษตรมีข้อดีหลายประการจากสมบัติการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ให้มวลเซลล์ครั้งละมาก ๆ และเป็นแหล่งไนโตรเจนสูง จึงนิยมใช้ในการเพิ่มผลผลิตการเพาะปลูกข้าวที่มีต้นทุนต่ำ ความสามารถในการตรึงไนโตรเจนของแอนาบีนาในแทนแดงมีประมาณ 1.1 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อเฮกเตอร์ต่อวัน อัตราการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าของแทนแดงใช้เวลา 2 – 10 วัน ขึ้นอยู่กับชนิด โดยให้มวลเซลล์สูงสุดระหว่าง 0.8 – 5.2 ตัน (น้ำหนักแห้ง) ต่อเฮกเตอร์ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 ตันต่อเฮกเตอร์ (FNCA Biofertilizer Project Group, 2006)

2. จุลินทรีย์ละลายและเคลื่อนย้ายฟอสเฟต (phosphate solubilizing and mobilizing microorganisms)

ธาตุฟอสฟอรัส (P) เป็นสารอาหารหลักซึ่งมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ธาตุนี้มีมากในดินแต่พืชนำมาใช้ได้น้อยมาก โดยทั่วไปพบฟอสฟอรัสในรูปของสารประกอบฟอสเฟต เช่น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate) หรือเรียกว่า หินฟอสเฟต (rock phosphate) อะลูมิเนียมฟอสเฟต ($AlPO_4$) และเหล็กฟอสเฟต ($FePO_4$) ซึ่งไม่ละลายน้ำ (insoluble phos-

phate) พืชจึงไม่สามารถนำไปใช้ได้ อย่างไรก็ตาม มีจุลินทรีย์หลายชนิดในดินที่สามารถละลายฟอสเฟตจากสารประกอบเหล่านี้และเคลื่อนย้ายให้กับพืชดูดซึมไปใช้ได้ง่ายขึ้น กลุ่มจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (phosphate solubilizing microorganism, PSM) ที่สำคัญพบบริเวณรอบรากพืช ช่วยเพิ่มสารอาหารฟอสฟอรัสในรูปของไอออนฟอสเฟต (PO_4^{2-}) ให้กับพืชเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต จึงมีการศึกษาพัฒนาจุลินทรีย์เหล่านี้มาใช้เป็นส่วนหนึ่งของปุ๋ยอินทรีย์เสริมฟอสฟอรัสและเติมในดินเพาะปลูกพืช จุลินทรีย์กลุ่มนี้ ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ รา และแอกทิโนมัยซิสที่สามารถเปลี่ยนฟอสเฟตอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ ชนิดของแบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟตได้ดี เช่น *Pseudomonas striata* *P. rathonis* และ *Bacillus polymyxa* กลุ่มรา เช่น *Aspergillus awamori* *A. niger* *Penicillium digitatum* และยีสต์ เช่น *Schwanniomyces occidentalis* กลไกการละลายฟอสเฟตของจุลินทรีย์ เช่น การปลดปล่อยเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาละลายฟอสเฟต การปล่อยกรดอินทรีย์ละลายฟอสเฟต การเกิดปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือไอออนของสาร

นอกจากนี้ยังมีบทบาทของฟังไจที่อยู่ร่วมกับรากพืช เช่น ไมคอร์ไรซา ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายฟอสเฟตเข้าสู่รากพืช ซึ่งมีการศึกษาค่อนข้างมากและเป็นที่ยอมรับถึงประสิทธิภาพของรากกลุ่มนี้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด ไมคอร์ไรซาดำรงชีวิตร่วมกับพืชแบบพึ่งพาอาศัยกัน โดยราได้รับสารอาหารจากพืช ในขณะที่พืชได้รับสารอาหารจากดินเพิ่มขึ้นจากการช่วยนำเข้าสู่สารของราไมคอร์ไรซา การอยู่ร่วมกันนี้พบในพืชมีท่อลำเลียงเป็นส่วนใหญ่

และพบได้ทั้งในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ไมคอร์ไรซาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะการเจริญบุกรุกเข้าสู่รากพืช ได้แก่ เอนโดไมคอร์ไรซา (endomycorrhiza) เอกโทไมคอร์ไรซา (ectomycorrhiza) และเอกโทเอนโดไมคอร์ไรซา (ectoendomycorrhiza) พวกเอนโดไมคอร์ไรซานำมาใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยอินทรีย์มากกว่ากลุ่มอื่น โดยพบในระบบรากพืชร้อยละ 90 ของพืชทั้งหมด และมีลักษณะการสร้างเส้นใยล้อมรอบรากและบางส่วนเจริญเข้าสู่ภายในเซลล์รากพืชบริเวณคอร์เทกซ์ (root cortex) เรียกเส้นใยที่เจริญภายในรากนี้ว่า ฮาร์ติกเน็ต (hartig net) กลุ่มราไมคอร์ไรซาอยู่ในชั้นเบสิดีโอไมซีทีส (Basidiomycetes) แอสโคไมซีทีส (Ascomycetes) และไซโกไมซีทีส (Zygomycetes) สมาชิกที่มีความจำเพาะกับพืชวงศ์กุหลาบป่า (Ericaceae) เรียกโดยทั่วไปว่า อิริคอยด์ไมคอร์ไรซา (ericoid mycorrhizae) และพวกจำเพาะกับพืชวงศ์กล้วยไม้ (Orchidaceae) เรียกว่า ออร์คิดาเซียสไมคอร์ไรซา (orchidaceous mycorrhizae) ไมคอร์ไรซาที่พบแพร่กระจายในรากพืชส่วนใหญ่เป็นอาร์บัสคูลาไมคอร์ไรซา (arbuscular mycorrhiza) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า เวสิคูลาร์-อาร์บัสคูลาไมคอร์ไรซา (vesicular-arbuscular mycorrhiza) ประกอบด้วย 120 ชนิดอยู่ในชั้นไซโกไมซีทีส ทุกชนิดอยู่ในอันดับ Glomales และมี 6 สกุล ได้แก่ *Glomus Acaulospora Gigaspora Sclerocystis Entrophospora* และ *Scutellospora* ทุกชนิดไม่สามารถเพาะเลี้ยงเพียงลำพังชนิดเดียวในสภาพปลอดเชื้อได้ (Alonso et al., 2008)

การศึกษาถึงกลไกการอยู่ร่วมกันระหว่างไมคอร์ไรซากับพืช พบว่า ราไมคอร์ไรซา มีความสามารถช่วยเพิ่มการดูดซึมสารอาหารของ

รากพืช เช่น ละลายสารประกอบฟอสเฟตอินทรีย์หรือย่อยสลายฟอสเฟตอินทรีย์ (organic phosphate) ให้อยู่ในรูปที่พืชดูดซึมไปใช้ได้ เส้นใยภายนอก (external hyphae) ของราช่วยจับและส่งแร่ธาตุต่าง ๆ เข้าสู่รากพืช เช่น NH_4^+ NO_3^- K^+ Ca^{2+} SO_4^{4-} Cu^{2+} Zn^{2+} Fe^{2+} ซึ่งจากการตรวจสอบประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหารของไมคอร์ไรซา พบว่า เส้นใยภายนอกของไมคอร์ไรซาส่งฟอสฟอรัสให้กับพืชได้ร้อยละ 80 ไนโตรเจนร้อยละ 25 โพแทสเซียมร้อยละ 10 สังกะสี (Zn) ร้อยละ 25 และทองแดง (Cu) ร้อยละ 60 นอกจากนี้ร่ายังสร้างเอนไซม์ (ectoenzyme) และหลั่งออกมาโดยรอบรากพืช ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ทำให้รากพืชดูดซึมไปใช้ได้ง่ายขึ้น (Willey et al., 2009)

การนำจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชไปใช้ในแปลงเพาะปลูกสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

(1) การใส่เชื้อโดยตรง เริ่มจากการเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ในระดับใหญ่ซึ่งควรเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว และนำน้ำหมักมาผสมกับดิน นำไปโปรยในร่องดินเพาะปลูกพืช หากเป็นนาข้าวให้ใช้วิธีนำน้ำหมักไปพ่นให้ทั่วแปลง

(2) ใช้วิธีจุ่มหรือแช่เมล็ดพืชหรือหน่อพืชในน้ำหมักจุลินทรีย์ที่ระยะการเจริญแบบทวีคูณ (log phase) นาน 30 นาที จึงนำไปหว่านเพื่อเพาะปลูกต่อไป

(3) ใช้วิธีพ่นน้ำหมักจุลินทรีย์บนใบพืช ทำให้เซลล์จุลินทรีย์และของเหลวถูกดูดซึมเข้าสู่ช่องปากใบและช่องว่างที่ผิวเซลล์ (epidermal cell) ของใบ และเคลื่อนย้ายไปบริเวณเนื้อเยื่อเจริญของพืชแล้วเกิดผลการส่งเสริมการเจริญเติบโต

ต่อพืช

(4) ใช้ในรูปจุลินทรีย์ยึดเกาะกับวัสดุตัวพา เช่น ถ่าน เศษไม้ ถ่านหิน โดยนำน้ำหมักจุลินทรีย์ผสมกับวัสดุตัวพา ตากให้แห้งแล้วจึงนำมาใช้ในแปลงเพาะปลูก วิธีนี้นิยมใช้กับจุลินทรีย์เร่งการเจริญเติบโตของพืชที่เป็นแบคทีเรีย วัสดุตัวพาช่วยให้เกิดภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมของจุลินทรีย์ ยังคงมีกิจกรรม (active) มีชีวิตรอดอยู่ได้นานขึ้น และขนส่งได้สะดวกโดยไม่ทำให้จุลินทรีย์สูญเสียประสิทธิภาพ วิธีนี้นิยมใช้กับกลุ่มไรโซเบียม

อย่างไรก็ตาม เกษตรกรควรได้รับคำแนะนำในการนำจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชไปใช้อย่างถูกวิธีเพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้และไม่เกิดการตายจำนวนมากก่อนการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ควรให้ความรู้เกี่ยวกับประโยชน์ของการใช้จุลินทรีย์เป็นปุ๋ยอินทรีย์และข้อได้เปรียบของการใช้ เช่น ราคาถูกกว่าปุ๋ยเคมี ไม่ก่อมลพิษกับสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน ผู้ให้ความรู้และขอแนะนำควรเป็นนักวิชาการด้านจุลชีววิทยาและเป็นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดการพัฒนาเกษตรกรรมแบบยั่งยืนต่อไป

จุลินทรีย์สำหรับการควบคุมโรคพืชด้วยชีววิธี (microorganisms for biological control)

โดยทั่วไปความหมายของการควบคุมโรคพืชด้วยชีววิธีคือ การยับยั้งหรือลดอัตราการเกิดโรคพืชด้วยสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวหรือหลายชนิดรวมกัน แต่ความหมายในด้านจุลชีววิทยามีหมายถึงการใช้จุลินทรีย์ในการจัดการควบคุมโรคพืชหรือการใช้จุลินทรีย์ก่อโรคจำเพาะต่อวัชพืชในการควบคุมการแพร่กระจายของวัชพืชเหล่านี้ จุลิน-

ทรีย์ที่ใช้ในการควบคุมโรค เรียกว่า ตัวควบคุมโรค (biological control agent, BCA) นอกจากนี้ความหมายของการควบคุมโรคพืชด้วยชีววิธีได้ครอบคลุมถึงการใช้สารสกัดจากสิ่งมีชีวิตหรือน้ำหมักจุลินทรีย์ในการนำมาใช้ควบคุมโรคพืชอีกด้วย ศัตรูในการทำลายพืชผลทางการเกษตรมีมากมายหลายชนิด เช่น แมลง รา แบคทีเรีย ไวรัส วัชพืช สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีศัตรูทางธรรมชาติเช่นกัน ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงมีแนวคิดในการใช้สิ่งมีชีวิตควบคุมสิ่งมีชีวิตด้วยตัวเอง การศึกษาวิธีควบคุมโรคพืชด้วยชีววิธีเกิดขึ้นมานานมากกว่า 80 ปี จนกระทั่งทุกวันนี้เป็นที่ยอมรับของประชาชนว่าเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสภาพแวดล้อมและสุขภาพของผู้บริโภคพืชผลทางการเกษตร ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทดแทนวิธีควบคุมโรคพืชด้วยสารเคมีสังเคราะห์มากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากความตระหนักในฤทธิ์ของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นที่ไม่ได้ก่อโรคพืช ส่วนใหญ่เป็นสารก่อมะเร็งและก่อให้เกิดการดื้อสารเคมีของเชื้อก่อโรคพืช ทำให้กำจัดยากขึ้น ซึ่งในบรรดาเชื้อก่อโรคนั้น กลุ่มราหลายชนิดเป็นศัตรูต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยสร้างเส้นใยแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชและดูดซึมสารอาหารพร้อมกับสร้างเส้นใยในต้นพืชที่ติดเชื้อ เราสามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่เพาะปลูกอย่างรวดเร็วด้วยการสร้างสปอร์จำนวนมากและปนเปื้อนมากับเมล็ด ต้นพืชมักตายและผลไม้น่าเสียหายจากการแพร่กระจายของเชื้อรา ปัจจุบันการค้นหาจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่สามารถต่อต้านหรือทำลายราก่อโรคพืชได้รับการพัฒนาไปมากและบางชนิดถูกผลิตและนำมาใช้เชิงการค้า อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตจุลินทรีย์กำจัดศัตรูพืชจำเป็นต้องเข้าใจกลไกการกำจัดเชื้อโรคพืชและวิธีการใช้งานอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ประ-

สิทธิภาพการควบคุมโรคสูงสุด ดังนี้

(1) กลไกการควบคุมโรคพืชโดยจุลินทรีย์ปฏิปักษ์

กลไกการต่อต้านหรือทำลายเชื้อก่อโรคพืชมีหลายแบบขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวควบคุมโรคหรือตัวปฏิปักษ์และเชื้อก่อโรคพืช ซึ่งจากการศึกษา กลไกการต่อต้านหรือทำลายเชื้อก่อโรคพืชมีรายละเอียดดังนี้

(1.1) กลไกการสร้างสารปฏิชีวนะ (antibiosis) ทำลายเชื้อก่อโรคพืช สารปฏิชีวนะที่ผลิตจากจุลินทรีย์บางชนิด แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็มีความเป็นพิษและสามารถฆ่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นได้ เช่น สารฟีนาซีน (phenazine) ผลิตจาก *Pseudomonas fluorescens* 2-79 สามารถทำลายเชื้อราก่อโรคพืชชนิด *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* นอกจากนี้ยังพบว่า *P. fluorescens* สามารถสร้างกรดแอนทรานิลิก (anthranilic acid) ที่มีบทบาทในการยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรคพืชด้วย *Pseudomonas fluorescens* CHAO ผลิตสารปฏิชีวนะ 2,4 ไดอะซิติลฟลอโรกลูซินอล (2,4-diacetylphloroglucinol) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide) และไพโลลูทีโอรีน (pyloluteorin) ทำลายเชื้อ *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* และ *Thielaviopsis basicola* ที่ก่อให้เกิดโรคน้ำสีดำ (black rot) ในต้นยาสูบ (tobacco) และเชื้ออื่น ๆ ที่ก่อโรคในรากพืช แบคทีเรีย *Agrobacterium radiobacter* K84 สามารถสร้างสารปฏิชีวนะอะโกรซิน 84 (agrocin 84) ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Agrobacterium tumefaciens* สายพันธุ์ก่อโรคที่ก่อให้เกิดตุ่มที่รากและโคนต้นพืช นอกจากนี้ *Bacillus subtilis* สร้างสารปฏิชีวนะอิทูริน (iturin) ทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคหลายชนิดโดยมีการศึกษาในระดับยีนที่ควบคุม

การสร้างสารนี้ในห้องปฏิบัติการได้สำเร็จ แบคทีเรีย *Streptomyces hygroscopicus* var. *geldanus* ผลิตสารเจลดานามัยซิน (geldanamycin) ยับยั้งโรครากเน่าในพืชตระกูลถั่วจากรา *Rhizoctonia solani* แบคทีเรีย *Enterobacter cloacae* เป็นตัวควบคุมโรคจากรา *Pythium* spp. ที่ดี ที่ก่อให้เกิดโรคของต้นอ่อนพืชจากการติดเชื้อในดิน นอกจากสารปฏิชีวนะแล้ว ยังพบว่า จุลินทรีย์ปฏิปักษ์อาจปลดปล่อยแอมโมเนียที่มีผลต่อการควบคุมโรคด้วย สำหรับสารปฏิชีวนะที่ผลิตจากราคควบคุมโรคพืช เช่น *Trichoderma virens* สามารถสร้างสารกลิโอวิริน (gliovirin) ทำลายรา *Pythium ultimum* ซึ่งก่อโรคโรคมักต้นอ่อนผ่าย นอกจากนี้รา *Chaetomium globosum* สร้างสารคีโทมิน (chaetomin) *Trichoderma harzianum* ผลิตสารเพปไทโบลัส (peptaibols) และ *Trichoderma* spp. ผลิตไพโรนัส (pyrones) ที่ใช้กำจัดเชื้อก่อโรคด้วย (Kun, 2006)

(1.2) การแข่งขันใช้พื้นที่และอาหาร (competition) โดยจุลินทรีย์ปฏิปักษ์เจริญครอบคลุมพื้นที่และดูดซึมสารอาหารไปอย่างรวดเร็วทำให้เชื้อก่อโรค เช่น ราอาจเจริญได้ช้ากว่าขาดสารอาหารโดยเฉพาะธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญ ตัวอย่างกรณีนี้ เช่น ผลการวิจัยของ Chanchaichaovivat and Wongsrirat (2009) ที่พบว่า ยีสต์ *Pichia guilliermondii* R13 *Candida musae* R6 *Issatchenkia orientalis* ER1 และ *Candida quercitrusa* L2 สามารถเจริญแก่งแย่งสารอาหารจากรา *Colletotrichum gloeosporioides* ที่ก่อให้เกิดโรคแทรกนอส (anthracnose) ในผลพริกชี้ฟ้าหลังการเก็บเกี่ยว อีกตัวอย่างหนึ่งคือการแข่งขันใช้ธาตุเหล็กในดินที่เป็นเบสโดยแบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescens* 3551 สามารถ

สร้างสารซีเตอโรฟอรัสที่มีสมบัติจับธาตุเหล็กไว้ได้ดี ทำให้บริเวณนั้นมีธาตุเหล็กอิสระจำกัดต่อการเจริญของราก่อโรค สารซีเตอโรฟอรัสผลิตจาก *Pseudomonas putida* เรียกว่า ไพโอเวอร์ดีน (pyoverdine) ประเภทของซีเตอโรฟอรัสที่พบในจุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นแบบแคทีโคล (catechol type) หรือแบบไฮโดรซามาต (hydroxamate type) ในธรรมชาติ ธาตุเหล็กในดินพบในรูปของสารประกอบเฟอร์ริก (ferric form) ซึ่งไม่ละลายน้ำ เนื่องจากธาตุเหล็กถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ได้ง่ายในสภาพที่มีอากาศ บริเวณรอบรากพืช จึงเป็นบริเวณหนึ่งที่พบธาตุเหล็กน้อยมาก ดังนั้นหากจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสร้างสารซีเตอโรฟอรัสจับธาตุเหล็กเอามาใช้ได้เพียงพอ ก็จะขาดสารนี้ในการเจริญและเพิ่มจำนวนได้น้อยลง กลไกนี้ทำให้มีการนำแบคทีเรีย *Pseudomonas* หลายชนิดมาใช้เป็นตัวควบคุมราก่อโรค เช่น *Fusarium oxysporum* โดยยับยั้งการงอกของคลอมาโยโดสปอร์ (chlamydospore) ใช้ยับยั้งการเจริญของรา *Pythium* spp.

กลไกแข่งขันอีกประการหนึ่งคือ การจำกัดสารกระตุ้นการงอกของสปอร์รา โดยจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่เจริญเร็วกว่าแย่งใช้ปัจจัยหรือสารที่พืชหลั่งออกมาและมีผลกระตุ้นการงอกของสปอร์ราก่อโรค สารดังกล่าวอาจมาจากเมล็ดพืชที่กำลังงอกหรือหลั่งมาจากรากพืชที่อยู่ในดิน เช่น กรดไขมัน ผลิตภัณฑ์จากเพอร็อกซิเดชัน (peroxidation product) สารระเหย (เอทานอล และแอซีทัลดีไฮด์) จากการศึกษาวิจัยพบว่าแบคทีเรีย *Enterobacter cloacae* E6 ย่อยสลายกรดไขมันจากพืชทำให้สปอร์รา *Pythium* spp. ไม่งอก จุลินทรีย์ปฏิปักษ์อื่น ๆ เช่น *Trichoderma harzianum* *Pseudomonas putida* สามารถลดปริมาณสารระเหย เช่น เอทานอล แอซีทัลดีไฮด์

ของเมล็ดพืชตระกูลถั่วและเมล็ดฝ้าย ทำให้มีปริมาณไม่มากพอที่จะกระตุ้นการงอกของสปอร์ราก่อโรค กลไกการแข่งขันที่ง่ายที่สุดคือการแย่งใช้พื้นที่สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่เจริญเร็วกว่าเชื้อก่อโรค เช่น การพ่นรา *Phlebia gigantean* ในสวนเพาะปลูกต้นสนสามารถป้องกันการติดเชื้อ *Heterobasidion annosum* เนื่องจากราไม่สามารถแย่งชิงพื้นที่สำหรับเกาะกับพืชและไม่สามารถแผ่ขยายเส้นใยออกไปได้ จึงลดการเกิดโรคในพืชโดยเฉพาะโรครากสน (Singh, 2010)

(1.3) ภาวะปรสิตร เป็นภาวะเบียดเบียนของสิ่งมีชีวิตหนึ่งต่อสิ่งมีชีวิตอื่น เชื้อก่อโรคพืชบางชนิดอาจมีปรสิตรเข้าทำลายเซลล์ได้โดยตรง มนุษย์จึงใช้เชื้อปรสิตรเหล่านี้เป็นตัวควบคุมโรคด้วยชีววิธี ปรสิตรที่ทำลายราก่อโรคพืชเรียกว่า ไมคอร์พาราไซต์ (mycoparasite) บางชนิดเป็นปรสิตรต่อราหลายชนิดที่ก่อโรคพืชและนำมาใช้เป็นจุลินทรีย์ควบคุมโรคพืช เช่น *Daluca filum* (ปัจจุบันคือ *Sphaerellopsis filum*) สามารถลดการเกิดโรคราสนิม (rust fungi) ที่เกิดจากรา *Puccinia* sp. *Uromyces* sp. ไมคอร์พาราไซต์ที่มีประสิทธิภาพสูงและผลิตเป็นการค้าในรูปผงสปอร์ คือ ราในสกุล *Trichoderma* เช่น *Trichoderma lignorum* (ชื่อเดิมคือ *Trichoderma viride*) เป็นปรสิตรทำลายเส้นใยรา *Rhizoctonia solani* นิยมใช้สปอร์ของ *Trichoderma lignorum* ผสมกับดินปลูกเมล็ดพืชตระกูลส้มเพื่อป้องกันโรคให้กับต้นอ่อนในระหว่างการงอกและการเจริญเติบโต *Trichoderma* หลายชนิดสามารถทำลายรา *Rhizoctonia bataticola* และ *Armillaria mellea* ชนิดที่ผลิตเป็นการค้าและใช้งานแล้ว ได้แก่ *Trichoderma harzianum* และ *T. hamatum* ไมคอร์พาราไซต์ชนิดอื่น เช่น *Pythium*

oligandrum และ *P. nunn* เป็นปรสิตใน *Pythium* spp. ชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่ารา *Coniothyrium minitans* และ *Sporidesmium sclerotivorum* เป็นปรสิตของรากกลุ่มสร้างสเกอโรเทีย (sclerotia) หลายชนิด เช่น รา *Sclerotinia minor* และ *Sclerotium cepivorum* ที่ก่อโรคในผักกาดหอม (Scragg, 2005)

กระบวนการเข้าทำลายรากก่อโรคพืชของไมคอร์ราไรซาต์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การกระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical stimuli) จากรากก่อโรคที่สร้างขึ้นแล้วเจริญเข้าหา ซึ่งอาจเป็นสารระเหยหรือสารที่มีสมบัติละลายน้ำได้ (2) การจดจำได้ (recognition) ของตำแหน่งระหว่างเลกทิน (lectin) ของผู้ให้อาศัย (รากก่อโรคพืช) และตำแหน่งรับ (receptor) ที่เป็นคาร์โบไฮเดรตบนผิวเซลล์ของปรสิต ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์จำเพาะระหว่างกัน (specific interaction) (3) การเข้าเกาะของปรสิตบนเส้นใยของผู้ให้อาศัยและย่อยทำลายโดยเจริญพันรอบเส้นใยหรือแตะกับเส้นใยราที่ให้อาศัยและปล่อยเอนไซม์ย่อยสลาย เช่น บีตา-1,3-กลูแคนเนส (β -1,3-glucanase) และโปรตีนเชิงซ้อนอื่น ๆ มาร่วมกันทำงาน และ (4) การบุกรุกของเส้นใยปรสิตผ่านผนังเซลล์ราผู้ให้อาศัยด้วยโครงสร้างคล้ายอะเพรสซอเรีย (appressoria-like structure) เข้าไปเจริญภายในเซลล์

(1.4) การสร้างเอนไซม์ย่อยสลายผนังเซลล์รากก่อโรคพืช โดยจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ปลดปล่อยเอนไซม์ทำลายเส้นใยรากก่อโรค เอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญ ได้แก่ เอนไซม์ไคตินเนส (chitinase) และบีตา-1,3-กลูแคนเนส จุลินทรีย์หลายประเภทสามารถสร้างเอนไซม์ดังกล่าวได้ เช่น ยีสต์แบคทีเรีย รา เอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายไคติน (chitin) และบีตา-1,3-กลูแคนที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ราส่วนใหญ่ ซึ่งจากผล-

การวิจัยของ Chanchaichavivat et al. (2007) พบว่า เชลล์ *Pichia guilliermondii* R13 สามารถเกาะติดกับเส้นใยและท่อเจริญของสปอร์รา *Colletotrichum capsici* ที่ก่อให้เกิดโรคแอนแทรกโนสบนผลพริกชี้ฟ้าหลังการเก็บเกี่ยว รวมทั้งยีสต์ชนิดนี้สามารถสร้างเอนไซม์ไคตินเนสและบีตา-1,3-กลูแคนเนส เพื่อย่อยสลายผนังเซลล์รา *Colletotrichum capsici* ได้ ตัวอย่างจุลินทรีย์ปฏิปักษ์อื่น ๆ ที่สร้างเอนไซม์ไคตินเนส เช่น *Serratia marcescens* *Candida oleophila* *Trichoderma harzianum* ATCC 36042 จุลินทรีย์ที่สร้างเอนไซม์บีตา-1,3-กลูแคนเนส เช่น *Pichia membranifaciens* *Wicherhamomyces anomalus* *Candida oleophila*

(1.5) การชักนำระบบต้านทานของพืช (induction of systemic resistance in plant) โดยการกระตุ้นภูมิต้านทานของพืชด้วยจุลินทรีย์ควบคุมโรคพืช จุลินทรีย์ก่อโรคที่ทำให้หมดฤทธิ์หรือจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ก่อโรค กลไกการชักนำให้เกิดความต้านทานโรคของพืชเรียกว่า ระบบเอสเออาร์ (systemic acquired resistance, SAR) นอกจากนี้อาจใช้สารกระตุ้นจากธรรมชาติ หรือสารเคมีสังเคราะห์บางชนิดให้กับพืช จะส่งผลให้เกิดกลไกการต้านทานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ผนังเซลล์พืชหนาขึ้นจากการสะสมของลิกนิน (lignin) และเซลลูโลส เกิดการสร้างและสะสมสารต่อต้านจุลินทรีย์ เช่น ไฟโตอะเล็กซิน (phytoalexin) ไลติกเอนไซม์หลายชนิด ได้แก่ ไคตินเนส กลูแคนเนส เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) และโปรตีนเกี่ยวข้องกับการต่อต้านโรค (pathogenesis related proteins, PR proteins) มีการศึกษานำจุลินทรีย์ที่ไม่ก่อโรคพืชมาใส่ลงในรอยแผลที่ผิวพืช โดยให้ทางใบหรือทางรากเพื่อกระตุ้นระบบต้านทานของพืชให้ป้องกันโรคที่ติดเชื้องอกโรคที่แท้จริง งานทดลองที่ประ-

ประสบความสำเร็จคือการเติมแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ให้กับพืชเป้าหมาย เช่น *Pseudomonas fluorescens* WCS417r พบว่า พืชมีการสะสมสารไฟโทอะลิกซินเพิ่มขึ้น และการให้รา *Trichoderma* spp. ส่งผลกระทบระบบต้านทานในพืชหลายชนิด สำหรับสารที่มีผลกระทบระบบต้านทานของพืชที่ได้จากจุลินทรีย์และสารเคมีกำจัดวัชพืชบางชนิดที่ได้รับการศึกษาแน่ชัดแล้ว ได้แก่ กรดพอลิอะคริลิก (polyacrylic acid) เอทิลีน (ethylene) กรดซาลิซิลิก (salicylic acid) กรดแอสซิติลซาลิซิลิก (acetyl salicylic acid) อนุพันธ์ของกรดอะมิโนหลายชนิด ยากำจัดวัชพืชฟอสฟิโนทริซิน (phosphinotricin) และฮาร์พิน (harpin) ผลิตจาก *Erwinia amylovora* นอกจากนี้พบว่าสารประกอบลิโปพอลิแซคคาไรด์ (lipopolysaccharide) ที่มีโอ-แอนติเจน (O-antigen) จาก *Pseudomonas fluorescens* WCS374 ชักนำระบบต้านทานโรคใบเหี่ยวฟิวซาเรียม (*Fusarium* wilt) ในหัวผักกาด รวมทั้ง *Pseudomonas fluorescens* CHAO สามารถสร้างแมแทบอไลต์ก่อให้เกิดภาวะกดดันต่อพืช ส่งผลให้พืชเกิดระบบต้านทานต่อสิ่งแปลกปลอมรวมทั้งเชื้อก่อโรคต่าง ๆ เช่น *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* ที่ก่อโรคกับต้นอ่อนของข้าวสาลีซึ่งพบมากบริเวณคอร์เทกซ์ของรากพืช (Chanchaichaovivat, 2015)

(2) วิธีการใช้จุลินทรีย์ควบคุมโรคพืช

จุลินทรีย์ควบคุมโรคพืชอาจนำไปใช้ก่อนการเก็บเกี่ยวพืชผล (preharvest biological control) เพื่อควบคุมยับยั้งการเกิดโรคในระหว่างการเพาะปลูก อย่างไรก็ตาม ผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวเมื่อเก็บไว้ก่อนถึงผู้บริโภคสามารถเกิดอาการของโรคเนื่องจากการปนเปื้อนเชื้อใน

ระหว่างการเก็บเกี่ยวหรือเกิดจากกระบวนการเก็บรักษาผลผลิตไม่สะอาดเพียงพอ ดังนั้นจึงอาจควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยว (preharvest biological control) ด้วยจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค สามารถช่วยลดการเน่าเสียของผลผลิตและทดแทนการใช้สารเคมี เช่น น้ำคลอรีน แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (calcium hypochlorite) จุลินทรีย์ที่นิยมใช้กับผลพืชหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่ ยีสต์หลายชนิด เช่น *Candida sake* *Cryptococcus albidus* *Rhodotorula glutinis* หรือใช้ยีสต์ร่วมกับวิธีอื่น เช่น ไซลมาร้อน เกลือไคโทซาน (chitosan salt) เอนไซม์ย่อยสลาย (lytic enzyme) การใช้ยีสต์ปฏิปักษ์อาจใช้วิธีการพ่น (spray) หรือจุ่มผลพืชในเซลล์แขวนลอยของยีสต์ (yeast cell suspension) และนำผลพืชไปเก็บในที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยยืดการเก็บรักษา (Chanchaichaovivat, 2015) ตัวอย่างการใช้จุลินทรีย์ควบคุมโรคพืชก่อนการเก็บเกี่ยวหรือในระหว่างการเพาะปลูก ได้แก่ การใส่เซลล์จุลินทรีย์จำนวนมากบริเวณที่ติดเชื้อมีการทาหรือพ่นไปที่ผิวพืชบริเวณเหนือพื้นดิน เเทงบนดินที่หว่านเมล็ดพันธุ์เพาะปลูกไว้ จุ่มเมล็ดพืชในเซลล์แขวนลอยของเชื้อปฏิปักษ์ การเติมจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ในแปลงเพาะปลูกให้ทั่ว และทิ้งระยะให้เจริญแพร่กระจายไปรอบบริเวณ รวมทั้งการเติมเชื้อก่อโรคที่เป็นสายพันธุ์ไม่รุนแรงหรือทำให้หมดฤทธิ์ในแปลงปลูกพืชปริมาณน้อยเพียงหนึ่งครั้งหรือเป็นระยะ ๆ เพื่อกระตุ้นระบบต้านทานของต้นพืชไม่ให้ติดเชื้อโรคที่ก่อโรครุนแรง

บทสรุป

การนำจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรมเริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน

สาเหตุจากผลกระทบที่เกิดจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำนวนมากในภาคการเกษตรที่ส่งผลทำลายสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของเกษตรกรและผู้บริโภคผลผลิตทางการเกษตร ภาครัฐและประชาชนจึงให้ความสนใจในระบบเกษตรแบบยั่งยืนที่สร้างความสมดุลให้กับธรรมชาติ มีความปลอดภัยและลดต้นทุนในการเพาะปลูกพืชอย่างมีประสิทธิภาพ จุลินทรีย์ที่ผ่านการวิจัยจนกระทั่งมีการนำมาใช้ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ สารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และสารกำจัดศัตรูพืชสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) กลุ่มจุลินทรีย์เพิ่มธาตุอาหารในดินประกอบด้วยจุลินทรีย์ตรึงแก๊สไนโตรเจนจากอากาศเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีประโยชน์ต่อพืช พวกที่สามารถย่อยสลายสารในดินได้อย่างรวดเร็วและไม่เป็นอันตรายต่อพืชผลทางการเกษตร (2) กลุ่มจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ จุลินทรีย์ที่สามารถละลายและเคลื่อนย้ายฟอสเฟตให้กับพืชนำไปใช้ได้ง่ายขึ้น จุลินทรีย์สร้างซีเดอโรฟอรัส (siderophores) ซึ่งเป็นสารประกอบยึดจับธาตุเหล็กจากดินได้ดีและปลดปล่อยธาตุเหล็กอิสระออกมาเมื่ออยู่ในภาวะขาดแคลนธาตุเหล็ก ส่งผลให้พืชสามารถนำธาตุเหล็กอิสระไปใช้ในการเจริญเติบโตได้และจุลินทรีย์สร้างฮอร์โมนหรือวิตามินส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (3) กลุ่มจุลินทรีย์ควบคุมศัตรูพืชซึ่งมีความสามารถต่อต้านหรือทำลายเชื้อก่อโรคพืชได้หลายแบบ เช่น มีกลไกการสร้างสารปฏิชีวนะ แข่งขันใช้พื้นที่และอาหาร มีภาวะปรสิตร สร้างเอนไซม์ย่อยสลายผนังเซลล์รากก่อโรคพืช ชักนำระบบต้านทานของพืชอย่างไรก็ตาม ในการนำจุลินทรีย์ไปใช้ในระบบการเกษตรให้ได้ผลดี เกษตรกรควรได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญเสียก่อน เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถ

ทำงานได้และไม่เกิดการตายก่อนการนำไปใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, I., Ahmad, F., and Pichtel, J. (2011). **Microbes and Microbial Technology: Agricultural and Environmental Applications**. New York: Springer.
- Alonso, L. M., Kleiner, D., and Ortega, E. (2008). Spores of the mycorrhizal fungus *Glomus Mosseae* host yeasts that solubilized phosphate and accumulate polyphosphates. **Mycorrhiza** 18(4): 197–204.
- Chanchaichaovivat, A. (2015). **Yeast and Yeast Technology**. Bangkok: KaoThai Advertising and Printing.
- Chanchaichaovivat, A., Ruenwongsa, P., Panijpan, B. (2007). Screening and identification of yeast strains from fruits and vegetables: Potential for biological control of postharvest chilli anthracnose (*Colletotrichum capsici*). **Biological Control** 42(3): 326–335.
- Chanchaichavivat, A., and Wongsrirat, J. (2009). Biological control of chilli anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) by yeasts isolated from fruits and vegetables. **Advanced Science Journal** 9(1): 120–131.
- Das, H. K. (1991). Biological nitrogen fixation in the context of Indian agriculture. **Current Science** 60(9–10): 551–555.
- FNCA Biofertilizer Project Group. (2006). **Biofertilizer Manual**. Japan: Japan Atomic Industrial Forum.

- Kango, N. (2010). **Textbook of Microbiology**. New Delhi: IK. International Publishing House.
- Kun, Y. L. (2006). **Microbial Biotechnology**. 2nd ed. London: World Scientific.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., and Parker, J. (2003). **Brock's Biology of Microorganisms**. New Jersey: Pearson Education.
- Phomphisutthimas, S. (2012). Fermented bio-extracts and agricultures. **Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning** 3(1): 59–65.
- Raksaphol, K., and Phomphisutthimas, S. (2016). Control of *Fusarium* wilt on tomato fruit by antagonistic yeasts isolated from natural sources. **The 40th National Graduate Research Conference**. Songkla: Graduate School, Prince of Songkla University.
- Scragg, A. (2005). **Environmental Biotechnology**. 2nd ed. New York: Oxford University.
- Singh, R. K. (2010). **Role of Agriculturally Important Microorganisms in Sustainable Agriculture**. Retrieved from <http://agrope.dia.iitk.ac.in/openaccess/sites/default/files/WS%2020.pdf>, April 15, 2016.
- Sumbali, G., and Mehrotra, R. S. (2009). **Principles of Microbiology**. New Delhi: McGraw-Hill Education.
- Tamil Nadu Agricultural University. (2011). **Beneficial Microorganisms in Agriculture**. Retrieved from http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/india/2-living-soils/soils/microbial-wealth-regulates-crop-quality-and-soil/at_download/article_pdf, April 18, 2016.
- Willey, J. M., Sherwood, L. M. and Woolverton, C. J. (2009). **Prescott's Principles of Microbiology**. New York: McGraw-Hill.