

การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในอาหารเสริมสำหรับผึ้งพันธุ์ Probiotic Application in Dietary Supplements for *Apis mellifera*

บุญมี กวินเสกสรรค์¹, วนิดา ชื่นชนัน^{1*} และ สมนศักดิ์ อยู่บุรีบุญ²

Boonmee Kavinseksan¹, Wanida Chuenchan^{1*} and Somsak Yooboriboon²

¹ภาควิชาชีววิทยาการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประเทศไทย

²สาขาวิชาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประเทศไทย

¹Medical Biology Department, Faculty of Allied Health Sciences, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand

²Biology Department, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand

Received: 26 March 2026, Received in revised form: 28 July 2026, Accepted: 29 July 2026

Available online: 1 September 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้งพันธุ์ (*Apis mellifera*) ทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย กำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์ประชากรผึ้งลดลงอย่างรวดเร็ว หรือปรากฏการณ์รังผึ้งล่มสลาย (Colony Collapse Disorder; CCD) ทำให้เกิดกระทบโดยตรงต่อระบบนิเวศและความมั่นคงทางอาหาร สาเหตุหลักของวิกฤตนี้มาจากปัจจัยคุกคามร่วมกัน ทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน การปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในสิ่งแวดล้อม และการระบาดของโรคอเมริกันฟาวล์บรูต (American Foulbrood; AFB) ที่มีสาเหตุจากเชื้อ *Paenibacillus larvae* ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ผึ้งเกิดสภาวะเครียดและสูญเสียสมดุลของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหาร (Gut dysbiosis) ทำให้ระบบภูมิคุ้มกันตามธรรมชาติอ่อนแอ แม้ว่าการใช้อาหารเสริม (Supplementary diets) จะเป็นแนวทางหลักในการประคับประคองประชากรผึ้งในช่วงขาดแคลนเกสรธรรมชาติ แต่อาหารเสริมทั่วไปขาดองค์ประกอบเชิงชีวภาพที่จำเป็น บทความวิชาการฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอแนวทางการใช้โพรไบโอติกส์ผสมในอาหารเสริมเพื่อเป็นนวัตกรรมทางชีวภาพในการบรรเทาผลกระทบจากวิกฤตการณ์ดังกล่าว และยกระดับสุขภาพของผึ้งพันธุ์อย่างยั่งยืนในบริบทของประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย: ศึกษาผ่านกระบวนการรวบรวม วิเคราะห์ และสังเคราะห์องค์ความรู้จากรายงานวิจัยเชิงทดลองและเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในผึ้งพันธุ์ โดยเฉพาะโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่น (Autochthonous strains) ในประเทศไทย เช่น *Lactobacillus*, *Bacillus* และ *Priestia* ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นในการทนทานต่อสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น รวมถึงศึกษาวิธีการบริหารจัดการอาหารเสริม ทั้งในรูปแบบการผสมในเกสรเทียม (Pollen substitute) และการละลายในน้ำเชื่อม (Sugar syrup) เพื่อใช้ในการฉีดพ่นเป็นละอองฝอยภายในรัง พร้อมทั้งประเมินดัชนีชี้วัดทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ อัตราการรอดชีวิต การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัว และคุณภาพของเซลล์สืบพันธุ์ในผึ้งตัวผู้ภายใต้สภาวะแวดล้อมเขตร้อนที่มีความจำเพาะของประเทศไทย

ข้อมูลสำคัญ: อาหารเสริมแบบเดิมที่ขาดโพรไบโอติกส์ส่งผลให้กลุ่มจุลินทรีย์แกนหลัก (Core microbiota) ในลำไส้ผึ้งขาดสมดุล ทำให้ผึ้งสูญเสียปราการชีวภาพในการป้องกันโรค แต่เมื่อมีการเติมโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่นลงในอาหารเสริมพบว่าจุลินทรีย์เหล่านี้ช่วยทำหน้าที่แทนจุลินทรีย์จากธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านกลไกการกีดกันเชิงแข่งขัน (Competitive exclusion) เพื่อแย่งชิงพื้นที่เกาะติดที่ผนังลำไส้และผลิตสารต้านจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีริโอซิน (Bacteriocins)

รวมถึงกรดอินทรีย์ที่ช่วยยับยั้งเชื้อ *P. larvae* ในด้านสรีรวิทยา ผึ้งที่ได้รับโพรไบโอติกส์เสริมมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 10-15 และมีอายุขัยเฉลี่ยยืนยาวกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากโพรไบโอติกส์ช่วยในการย่อยสลายสารอาหารเชิงซ้อนและกระตุ้นการส่งสัญญาณผ่านเปปไทด์ที่คล้ายอินซูลิน (Insulin-like peptides) นอกจากนี้ยังพบผลลัพธ์ที่สำคัญในผึ้งตัวผู้ โดยโพรไบโอติกส์ช่วยส่งเสริมกระบวนการสร้างอสุจิ (Spermatogenesis) ทำให้ความเข้มข้นและความแข็งแรงของสเปิร์มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จในการขยายพันธุ์ในระดับโมเลกุล โพรไบโอติกส์ช่วยกระตุ้นการแสดงออกของยีนภูมิคุ้มกันให้หลังเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial peptides, AMPs) เช่น Apidaecin และ Defensin เพื่อป้องกันภัยคุกคามจากสิ่งแวดล้อม

แนวทางการใช้ประโยชน์: การพัฒนาอาหารเสริมผึ้งที่ผสมโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่นเป็นกลยุทธ์ที่มีศักยภาพสูงในการแก้ปัญหาราชาดแคลนพืชอาหารตามธรรมชาติ เนื่องจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นมีความทนทานต่อสภาพอากาศร้อนชื้นได้ดี แนวทางนี้ช่วยให้เกษตรกรสามารถลดต้นทุนจากการสูญเสียประชากรผึ้งในช่วงนอกฤดูกาลดอกไม้บาน และช่วยยกระดับมาตรฐานน้ำผึ้งให้ปราศจากยาปฏิชีวนะตกค้าง (Antibiotic-free) สอดคล้องกับข้อกำหนดการส่งออก นอกจากนี้ยังเป็นต้นแบบในการผลิตอาหารเสริมคุณภาพสูงที่เลียนแบบคุณลักษณะของอาหารธรรมชาติ เพื่อรักษาความแข็งแรงของรังผึ้งในการทำหน้าที่ผสมเกสรพืชเศรษฐกิจและรักษาความสมดุลของระบบนิเวศ

ข้อสรุป: การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในอาหารเสริมสำหรับผึ้งพันธุ์เป็นนวัตกรรมที่เข้ามาปิดช่องว่างความแตกต่างระหว่างอาหารเสริมและอาหารธรรมชาติ จุลินทรีย์เหล่านี้ไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันและสารยับยั้งเชื้อก่อโรค แต่ยังช่วยปรับปรุงระบบเมแทบอลิซึมและการสืบพันธุ์ของผึ้งให้มีความสมบูรณ์เทียบเท่ากับการได้รับอาหารจากธรรมชาติ ทำให้รังผึ้งมีความสมบูรณ์และสามารถต้านทานต่อโรคและสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ผึ้งพันธุ์, โพรไบโอติกส์, แบคทีเรียกรดแลคติก, อาหารเสริมผึ้ง, ภูมิคุ้มกันผึ้ง

Abstract

Background and Objectives: Currently, the honey bee (*Apis mellifera*) industry, including Thailand's, is experiencing a critical decline known as Colony Collapse Disorder (CCD), which poses an immediate threat to global ecosystems and food security. The primary causes of this crisis stem from combined threats, including fluctuating climate change, pesticide contamination in the environment, and the outbreak of American Foulbrood (AFB) caused by *Paenibacillus larvae*. These factors result in stress for the bees and a loss of balance in the gut microbiota (gut dysbiosis), which weakens the natural immune system. Although the use of supplementary diets is a primary approach to sustain bee populations during periods of natural pollen scarcity, general supplements lack essential biological components. Therefore, this academic article aims to analyze and present guidelines for the use of probiotics mixed into supplementary diets as a biological innovation to mitigate the impacts of such crises and sustainably enhance the well-being of honey bees in Thailand.

Methodology: The study was conducted by collecting, analyzing, and synthesizing knowledge from experimental research reports and academic documents on the application of probiotics in honey bees. The focus was

specifically on autochthonous probiotic strains in Thailand, such as *Lactobacillus*, *Bacillus*, and *Priestia*, which possess outstanding properties in enduring hot and humid climates. The study also covers management methods for supplementary diets, both in the form of mixing in pollen substitute and dissolving in sugar syrup for spray application. Furthermore, key biological indicators were evaluated, including survival rates, changes in body weight, and the quality of reproductive cells in drones, under the specific tropical environmental conditions of Thailand.

Key findings: Traditional supplementary diets lacking probiotics result in an imbalance of the core microbiota in the bee gut, causing bees to lose their biological barriers for disease prevention. However, when autochthonous probiotic strains are added to the supplements, it was found that these microorganisms effectively perform the functions of natural microbiota through the mechanism of competitive exclusion to compete for attachment space on the intestinal wall and produce antimicrobial substances in the bacteriocin group, as well as organic acids that inhibit *P. larvae*. In terms of physiology, bees receiving probiotic supplements showed an average weight increase of 10-15% and a longer average lifespan compared to the group receiving only supplementary diets. This is because probiotics assist in the digestion of complex nutrients and stimulate signaling through insulin-like peptides. Additionally, significant results were found in drones, where probiotics helped promote spermatogenesis, increasing the concentration and strength of sperm, which is an important factor for reproductive success. At the molecular level, probiotics also help stimulate the expression of immune genes to secrete antimicrobial peptides (AMPs), such as apidaecin and defensin, to protect against environmental threats.

Implications: The development of bee supplements mixed with autochthonous probiotics is a high-potential strategy for addressing the shortage of natural food plants, as local microorganisms adapt well to hot and humid climates. This approach helps beekeepers reduce costs from the loss of bee populations during the off-season of floral blooms and helps elevate honey standards to be antibiotic-free, aligning with export requirements. Furthermore, it serves as a model for producing high-quality supplementary diets that mimic the characteristics of natural food to maintain the strength of the beehive in performing pollination for economic crops and preserving the balance of the ecosystem.

Conclusions: The application of probiotics in supplementary diets for honey bees is an innovation that closes the gap between supplements and natural food. These microorganisms not only function as immunostimulants and pathogen inhibitors but also help improve the metabolism and reproductive systems of bees to a level of integrity comparable to receiving natural food, resulting in healthier beehives that can effectively resist diseases and fluctuating environmental conditions.

Keywords: *Apis mellifera*; probiotics; lactic acid bacteria; dietary supplements; bee immunity

*Corresponding author. E-mail: Wanida.ch@bsru.ac.th

Introduction

ผึ้งพันธุ์ (*Apis mellifera*) มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบนิเวศและความมั่นคงทางอาหารของมนุษย์ในฐานะที่เป็นแมลงช่วยผสมเกสร เพิ่มผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลก (Gallai *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมเลี้ยงผึ้งในปัจจุบันกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์ประชากรผึ้งลดลงอย่างต่อเนื่อง อันเกิดจากปัจจัยคุกคามหลายด้าน ทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Goulson *et al.*, 2015) การระบาดของเชื้อโรค เช่น โรคอเมริกันฟาวล์บรูด (American Foulbrood; AFB) และโรคยุโรปเบียนฟาวล์บรูด (European Foulbrood; EFB) การรบกวนของไรปรสิต เช่น *Varroa destructor* และ *Tropilaelaps mercedesae* และภาวะขาดสารอาหาร (Aurell *et al.*, 2024) ซึ่ง Wongsiri & Deowanish (2012) รายงานว่าการจัดการสุขภาพผึ้งพันธุ์ในเขตร้อนจำเป็นต้องใช้กลยุทธ์เฉพาะทาง เนื่องจากผึ้งต้องเผชิญกับแรงกดดันจากทั้งโรคผึ้งและสภาพภูมิอากาศที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อก่อโรคได้ง่ายกว่าในเขตนาน อีกทั้งยังสอดคล้องกับรายงานของ Chantawannakul *et al.* (2016) และ Tlak Gajger & Mutinelli (2024) ที่ยืนยันว่าสภาพภูมิอากาศร้อนขึ้นไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสรีรวิทยาของผึ้ง แต่ยังเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการแพร่ระบาดของโรคและเชื้อก่อโรคอุบัติใหม่ (Emerging pathogens) ได้ง่ายขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของรังผึ้งและประสิทธิภาพการผลิตน้ำผึ้ง (Le Conte & Navajas, 2008; Goulson *et al.*, 2015) ท่ามกลางวิกฤตดังกล่าว “โภชนาการ” ถือเป็นกลไกสำคัญในการดูแลสุขภาพของผึ้ง โดยเฉพาะในช่วงขาดแคลนเกสรดอกไม้ในธรรมชาติซึ่งทำให้ระบบภูมิคุ้มกันของผึ้งอ่อนแอลง (Brodschneider & Crailsheim, 2010) ยิ่งไปกว่านั้น การพึ่งพาพยาบาลผึ้งและสารเคมีในการป้องกันรักษาโรคอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ได้กลายเป็นปัจจัยเร่งที่ก่อให้เกิดปัญหาเชื้อดื้อยาอย่างรุนแรง ตลอดจนเพิ่มความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารเคมีตกค้างในผลิตภัณฑ์จากผึ้งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาทางเลือกใหม่ โดยมีผลการศึกษาในอดีตที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่า กลุ่มจุลินทรีย์แกนหลัก (Core microbiota) ในทางเดินอาหารของผึ้ง โดยเฉพาะกลุ่ม *Lactobacillus* spp. ที่พบในกระเพาะพักน้ำหวาน (Honey stomach) มีคุณสมบัติเป็น “โพรไบโอติกส์” (Probiotics) ที่มีฤทธิ์ด้านจุลินทรีย์ ช่วยย่อยสลายสารอาหารเชิงซ้อน สร้างปราการป้องกันเชื้อก่อโรค และเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันตามธรรมชาติให้แก่ผึ้ง (Vasquez *et al.*, 2012; Kwong & Moran, 2016; Raymann & Moran, 2018) สำหรับในประเทศไทย มีการศึกษาและคัดเลือกจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่มีลักษณะดังกล่าวมาประยุกต์ต่อยอด โดยงานวิจัยของ Yooboriboon *et al.* (2021a, 2021b, 2023) พบว่าการเสริมโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่นลงในอาหารเสริม สามารถเพิ่มความหนาแน่นของประชากรผึ้งภายในรัง ส่งเสริมคุณภาพสเปิร์มในผึ้งตัวผู้ ตลอดจนเพิ่มน้ำหนักตัวและยืดอายุขัยของผึ้งงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้และกลไกการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของโพรไบโอติกส์ในอาหารเสริมผึ้งพันธุ์มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาสมดุลประชากรผึ้งและการพัฒนาวัฏกรรมการเลี้ยงผึ้งที่ยั่งยืนในสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนเขตร้อน บทความทบทวนวรรณกรรมฉบับนี้จึงประมวลและเชื่อมโยงกลไกของโพรไบโอติกส์อย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การออกฤทธิ์ระดับโมเลกุลไปจนถึงผลลัพธ์ต่อสุขภาพผึ้ง รวมถึงวิเคราะห์ศักยภาพของจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่น เช่น *Bacillus* spp. และ *Priestia* spp. เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาวัฏกรรมอาหารเสริมโพรไบโอติกส์ทดแทนการใช้สารเคมีหรือยาปฏิชีวนะ ตลอดจนชี้ช่องว่างทางวิชาการ สำหรับงานวิจัยเชิงทดลองต่อไป

1. องค์ประกอบและบทบาทของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารผึ้ง (*Honey bee gut microbiota*)

ทางเดินอาหารของผึ้งพันธุ์เป็นระบบนิเวศจุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง โดยกลุ่มจุลินทรีย์แกนหลักพบความหนาแน่นสูงสุดบริเวณลำไส้ส่วนท้าย (Hindgut) ซึ่งประกอบด้วยไอลีียม (Ileum) และ เรกตัม (Rectum) จุลินทรีย์เหล่านี้มีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัย (Symbiosis) และมีบทบาทเชิงหน้าที่ อันส่งผลวิกฤตต่อสรีรวิทยาและการดำรงชีวิตของผึ้ง ดังนี้

1.1 ชนิดและสัดส่วนของกลุ่มจุลินทรีย์แกนหลัก (*Core microbiota diversity and composition*)

จากการศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลำดับสายพันธุ์กรรม พบว่าในทางเดินอาหารของผึ้งพันธุ์มีกลุ่มจุลินทรีย์หลักที่ค่อนข้างคงที่ประมาณ 5–9 ชนิด (Table 1) ซึ่งมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 95–99 ของประชากรจุลินทรีย์ทั้งหมดในทางเดินอาหาร (Kwong & Moran, 2016) โดยสามารถจำแนกชนิดและกลุ่มหน้าที่สำคัญได้ดังนี้

1) แบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria; LAB) โดยเฉพาะสกุล *Lactobacillus* (กลุ่ม Firm-4 และ Firm-5) และ *Bifidobacterium* พบกระจายตัวตั้งแต่กระเพาะพักน้ำหวาน จนถึงลำไส้ส่วนท้าย ทำหน้าที่หลักในการสร้างสภาวะแวดล้อมที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อก่อโรค (Vasquez *et al.*, 2012)

2) แบคทีเรียกลุ่ม Proteobacteria ได้แก่ *Snodgrassella alvi* และ *Gilliamella apicola* ซึ่งทำหน้าที่ย่อยเคาะผนังลำไส้และช่วยในกระบวนการเมแทบอลิซึมของน้ำตาลเชิงซ้อน (Raymann & Moran, 2018)

Table 1 Gut microbiota locations and functional roles in honey bees (*Apis mellifera*)

Microbial Groups	Locations	Functional Roles	References
<i>Lactobacillus</i> (Firm-4, Firm-5)	Honey stomach, Ileum, Rectum	Produce lactic acid, inhibit pathogens (AFB, EFB), and stimulate the immune system.	Vasquez <i>et al.</i> (2012)
<i>Bifidobacterium</i>	Rectum	Degrade complex carbohydrates and maintain intestinal homeostasis.	Kwong & Moran (2016)
<i>G. apicola</i>	Ileum	Produce enzymes for pectin degradation in pollen cell walls and metabolize toxic sugars.	Raymann & Moran (2018)
<i>S. alvi</i>	Ileum	Form biofilms to prevent pathogen invasion and consume oxygen to maintain anoxic conditions for other bacteria.	Kwong & Moran (2016)
<i>Bacillus</i> spp. (including Thai strain isolates)	Honey stomach, Ileum, Rectum	Secrete bacteriocins, exhibit high environmental tolerance, and inhibit the growth of honey bee pathogens.	Thacharoen <i>et al.</i> (2023)
<i>Priestia</i> spp. (e.g., <i>P. flexa</i> Thai strain)	Ileum, Rectum	Produce antioxidant enzymes (SOD, CAT), reduce cellular damage caused by oxidative stress, and promote bee health.	Disayathanoowat <i>et al.</i> (2012a)
<i>Frischella sanitaria</i>	Rectum (Pylorus region)	Stimulate local immune responses and participate in the development of scab-like structures in young bees.	Engel <i>et al.</i> (2013)
<i>Bartonella apis</i>	Ileum, Rectum	Contribute to nutrient recycling, nitrogen metabolism, and fermentation processes within the gut.	Kešnerová <i>et al.</i> (2017)

จากการศึกษาด้วยเทคนิค T-RFLP ของ Disayathanoowat *et al.* (2012b) พบว่าถึงแม้สภาพภูมิศาสตร์แตกต่างกัน แต่ผึ้งพันธุ์ (*A. mellifera*) และผึ้งโพรง (*A. cerana*) ในภาคเหนือของประเทศไทยมีจุลินทรีย์แกนหลักในระดับไฟลัมที่คล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะแบคทีเรียในไฟลัม Proteobacteria (กลุ่มแบคทีเรียแกรมลบ) และไฟลัม Firmicutes (กลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก) อย่างไรก็ตาม ความหลากหลายของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญเติบโตของผึ้ง โดยพบความหนาแน่นและซับซ้อนที่สุดในผึ้งงานที่ทำหน้าที่ออกหาอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทในการย่อยอาหารและการป้องกันโรค นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผึ้งป่าหรือผึ้งท้องถิ่นชนิดอื่นในเขตร้อน เช่น ผึ้งหลวง (*Apis dorsata*) ผึ้งมัม (*Apis florea*) รวมถึงชันโรง (Stingless bees) แม้ว่าจะพบกลุ่มจุลินทรีย์หลักที่ใกล้เคียงกันในระดับสกุล (Genus) เช่น *Lactobacillus* spp. และ *Bifidobacterium* spp. แต่โครงสร้างประชากรในระดับสายพันธุ์ (Species/Strain level) ของผึ้งป่ามีความหลากหลายทางชีวภาพสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของแหล่งอาหารในธรรมชาติ ถิ่นที่อยู่อาศัย และพฤติกรรมตามธรรมชาติ (Disayathanoowat *et al.*, 2012b; Suenami *et al.*, 2023) ดังนั้น องค์ความรู้ด้านสมดุลจุลินทรีย์ทางเดินอาหารและเทคโนโลยีการเสริมโพรไบโอติกส์ที่พัฒนาขึ้นในผึ้งพันธุ์ จึงมีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์เปรียบเทียบและต่อยอดเพื่อประเมินสุขภาพ ตลอดจนใช้เป็นแนวทางในการอนุรักษ์และฟื้นฟูประชากรผึ้งป่าและแมลงช่วยผสมเกสรท้องถิ่นที่กำลังเผชิญวิกฤตความเสื่อมโทรมของถิ่นที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน

1.2 บทบาทด้านโภชนาการและการย่อยสลายสารอาหาร (Nutritional role)

จุลินทรีย์ในทางเดินอาหารมีบทบาทสำคัญในการช่วยย่อยสลายสารอาหารซึ่งเอนไซม์ของผึ้งไม่สามารถย่อยได้เอง โดยเฉพาะผนังเซลล์ของเกสรดอกไม้ที่ประกอบด้วยโพลีแซ็กคาไรด์ที่ซับซ้อน (Complex polysaccharides) จุลินทรีย์กลุ่ม *G. apicola* และ *Lactobacillus* ผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารเหล่านี้ให้กลายเป็นกรดไขมันสายสั้น (Short-chain fatty acids, SCFAs) ซึ่งผึ้งสามารถดูดซึมไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ (Raymann & Moran, 2018) นอกจากนี้ กลุ่มจุลินทรีย์แกนหลักในทางเดินอาหาร โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* Firm-5 และ *Bifidobacterium asteroides* ยังมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์สารอาหารจำเป็นให้แก่ผึ้ง ทั้งวิตามินบีรวม (เช่น ไบโอดีน กรดโฟลิก และไรโบฟลาวิน) และกรดอะมิโนจำเป็นในกลุ่ม BCAAs (เช่น วาลีน ลิวซีน และไอโซลิวซีน) ซึ่งช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเนื้อเยื่อในผึ้ง (Zheng *et al.*, 2017) ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงและเพิ่มน้ำหนักตัวให้กับผึ้ง (Yooboriboon *et al.*, 2023) นอกจากนี้ในทางเดินอาหารแล้ว จุลินทรีย์ยังมีบทบาทสำคัญในแหล่งสะสมอาหารภายในรัง หรือ “ขนมปังผึ้ง” (Bee bread) โดย Disayathanoowat *et al.* (2020) พบการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียและรา ซึ่งมีแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่ทนกรดและทนน้ำตาลสูง ได้แก่ *Fructobacillus fructosus* และแบคทีเรียกรดแลคติกในสกุล *Lactobacillus* spp. ทำหน้าที่หมัก ย่อยสลายผนังเกสร และสร้างกรดอินทรีย์เพื่อยับยั้งเชื้อก่อโรค ช่วยถนอมคุณค่าทางโภชนาการ และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมสารอาหารของผึ้งงานและตัวอ่อน

กลไกที่น่าสนใจประการหนึ่งคือการสื่อสารระหว่างจุลินทรีย์และเจ้าบ้าน (Microbe-host crosstalk) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อสรีรวิทยาและภูมิคุ้มกันของผึ้งพันธุ์ โดย Zheng *et al.* (2017, 2019) ระบุว่าจุลินทรีย์แกนหลักบริเวณเรกตัม ได้แก่ *Lactobacillus* Firm-5 (เช่น *L. mellis* และ *L. apis*) และ *B. asteroides* สามารถสังเคราะห์กรดไขมันสายสั้น เพื่อกระตุ้นทางเดินสัญญาณเปปไทด์ที่คล้ายอินซูลินผ่านการแสดงออกของยีน *ILP1* และ *ILP2* ในสมอง ซึ่งส่งสัญญาณต่อไปยังเนื้อเยื่อไขมัน (Fat body) ให้เกิดการสังเคราะห์และสะสมโปรตีนไวเทลโลเจนิน (Vitellogenin) ช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวและเร่งการเจริญเติบโตของผึ้ง ควบคู่กับการทำงานของ *G. apicola* ในไอลิเยม ที่ช่วยย่อยสลายเพกติน (Pectin) และน้ำตาลที่เป็นพิษ

เช่น แมนโนส (Mannose) เพื่อเพิ่มการดูดซึมสารอาหาร ขณะที่ *S. alvi* สร้างชั้นฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ป้องกันการยึดเกาะของเชื้อก่อโรค เช่น *Nosema ceranae* และ *P. larvae* พร้อมทั้งรักษาสภาวะไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่ม *Lactobacillus* (Table 1)

1.3 บทบาทด้านระบบภูมิคุ้มกันและการป้องกันโรค (Immune modulation)

จุลินทรีย์ประจำถิ่นทำหน้าที่เป็นปราการชีวภาพ (Biological barrier) ในการป้องกันเชื้อก่อโรคผ่านกลไกสำคัญ 2 ประการ ได้แก่

1) การกระตุ้นภูมิคุ้มกันเชิงรับ (Immune stimulation) โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ช่วยกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันของผึ้ง โดยการสร้างเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial peptides, AMPs) เช่น Apidaecin และ Abaecin (Kwong & Moran, 2016) ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการชดเชยความเปราะบางของระบบภูมิคุ้มกันทางสังคม (Social immunity) ที่ถูกบั่นทอนโดยยาฆ่าแมลงและโรคระบาด (Chantawannakul et al., 2016) ดังนั้น การเสริมสร้างจุลินทรีย์ที่ดียังเป็นแนวทางการสร้างภูมิคุ้มกันเชิงรับที่สำคัญ

2) ปรับสมดุลสภาวะแวดล้อม (Environmental modulation) โดยแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* ผลิตกรดอินทรีย์หลายชนิด ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในทางเดินอาหารลดลง สร้างสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียก่อโรค เช่น *P. larvae* (เชื้อก่อโรค AFB) และ *Melissococcus plutonius* (เชื้อก่อโรค EFB) (Vasquez et al., 2012)

2. คุณลักษณะของโพรไบโอติกส์ที่เหมาะสมสำหรับผึ้ง (Characteristics of ideal probiotics for honey bees)

การคัดเลือกจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นโพรไบโอติกส์ในผึ้งมีความซับซ้อนและจำเพาะเจาะจงสูงกว่าในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากระบบทางเดินอาหารของผึ้งมีโครงสร้างที่เรียบง่ายแต่มีการจัดเรียงตัวของกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง รวมถึงต้องเผชิญกับความผันแปรของสารอาหารตามแหล่งอาหารและฤดูกาล จุลินทรีย์เป้าหมายที่มีศักยภาพในการใช้เป็นโพรไบโอติกส์ควรมีคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

2.1 ความสามารถในการยึดเกาะและการตั้งตัว (Colonization and adhesion ability)

จุลินทรีย์ต้องมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับผนังเซลล์บุผิวลำไส้ (Intestinal epithelial cells) หรือชั้นเมือก (Mucus layer) เพื่อสร้างกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ที่เสถียร โดยอาศัยกลไกการกีดกันเชิงแข่งขันเพื่อยับยั้งการเพิ่มจำนวนของเชื้อก่อโรค (Pathogens) โดยเฉพาะในลำไส้ส่วนท้าย ซึ่งประกอบด้วยไอลีียมและเรกตัม เป็นบริเวณที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูงสุดและเป็นตำแหน่งที่มีบทบาทสำคัญเชิงหน้าที่ในการรักษาสมดุลจุลินทรีย์ (Raymann & Moran, 2018)

2.2 ความสามารถในการรอดชีวิตในระบบทางเดินอาหาร (Survival under gastrointestinal conditions)

จุลินทรีย์ต้องสามารถรอดชีวิตผ่านกระเพาะพักน้ำหวาน และกระเพาะส่วนกลาง (Ventriculus) ซึ่งมีสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่แปรผันและมีเอนไซม์ย่อยอาหารเข้มข้น นอกจากนี้ ยังต้องสามารถทนทานต่อสารพิษจากพืชที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ (Antimicrobial phytochemicals) เช่น ฟีนอลิก (Phenolics) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พบในน้ำหวานและเกสรดอกไม้ (Kwong & Moran, 2016)

2.3 ความสามารถในการผลิตเอนไซม์เพื่อช่วยกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolic and enzymatic contribution)

โพรไบโอติกส์ที่มีประสิทธิภาพควรมีบทบาทเสริมในการย่อยสลายสารอาหารที่ผึ้งย่อยเองไม่ได้ เช่น การผลิตเอนไซม์เพื่อช่วยสลายโครงสร้างผนังเกสร (Pollen exine) ที่มีความทนทานสูง หรือย่อยสลายสารทุติยภูมิกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมสารอาหาร ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในสภาวะที่ผึ้งขาดแคลนเกสรตามธรรมชาติและต้องได้รับอาหารเสริมที่มีคุณค่าทางโภชนาการจำกัด (Brodtschneider & Crailsheim, 2010)

2.4 ความจำเพาะต่อเจ้าบ้านและความปลอดภัย (Host-specificity and biosafety)

การใช้จุลินทรีย์ท้องถิ่น (Autochthonous strains) ที่แยกได้จากผึ้งในพื้นที่ เช่น *Lactobacillus* spp. หรือ *Bifidobacterium* spp. จากผึ้งพันธุ์ในประเทศไทย มักให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสายพันธุ์นำเข้า เนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้มีวิวัฒนาการร่วม (Co-evolution) กับผึ้งในเขตร้อน ทำให้มีความสามารถในการปรับตัวต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในสภาวะแวดล้อมเฉพาะถิ่นได้ดีกว่า (Goli Mehdi Abadi *et al.*, 2023; Yooboriboon *et al.*, 2023) รวมถึงต้องผ่านการตรวจสอบความปลอดภัยว่าปราศจากยีนดื้อยาปฏิชีวนะ (Antibiotic resistance genes) เพื่อป้องกันการส่งผ่านหรือถ่ายโอนยีนดังกล่าวสู่สิ่งแวดล้อม

3. กลไกการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของโพรไบโอติกส์ในผึ้ง (Biological mechanisms of probiotics in honey bees)

การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในผึ้งพันธุ์ไม่เพียงแต่เป็นการปรับสมดุลประชากรจุลินทรีย์ประจำถิ่นในทางเดินอาหารเท่านั้น แต่ยังเป็นการส่งเสริมสุขภาพผ่านกลไกปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพที่ซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียกรดแลคติกในทางเดินอาหารผึ้ง เช่น กลุ่ม *Lactobacillus* Firm-4 (เช่น *L. mellifer*) และ Firm-5 (เช่น *L. apis* และ *L. mellis*) ซึ่งมีความโดดเด่นเชิงวิวัฒนาการร่วม (Co-evolution) ระดับเมแทบอลิซึม โดย LAB กลุ่ม Firm-5 มีกลุ่มยีน (Gene clusters) ที่จำเพาะต่อการย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนจากผนังเกสรดอกไม้ เช่น เฮมิเซลลูโลสและเพกติน ผ่านกระบวนการหมักแบบ Phosphoketolase pathway ได้เป็นกรดไขมันสายสั้น โดยเฉพาะกรดแอซิติกและกรดแลคติก (Ellegaard & Engel, 2019; Kešnerová *et al.*, 2017) ซึ่งไม่เพียงช่วยลดค่า pH เพื่อยับยั้งเชื้อก่อโรค แต่ SCFAs ยังทำหน้าที่เป็นโมเลกุลส่งสัญญาณ (Signaling molecules) ไปกระตุ้นเซลล์ไขมัน (Fat body) ของผึ้งให้สังเคราะห์โปรตีนไวเทเลโลเจนินและเพปไทด์ต้านจุลินทรีย์ (AMPs) ผ่านทางเดินสัญญาณ Toll และ Imd (Zheng *et al.*, 2017) รวมทั้งหลังไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารประกอบระเหยง่าย (VOCs) ที่ยับยั้งการงอกของสปอร์เชื้อราก่อโรคอย่าง *Nosema* spp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Vasquez *et al.*, 2012) ซึ่งกลไกปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพที่ซับซ้อนเหล่านี้ สามารถจำแนกออกเป็น 3 กลไกหลัก ดังนี้

3.1 การยับยั้งเชื้อก่อโรคผ่านการกีดกันเชิงพื้นที่และทรัพยากร (Competitive exclusion)

โพรไบโอติกส์ โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียกรดแลคติก มีประสิทธิภาพสูงในการยึดเกาะผนังลำไส้ ส่งผลให้เกิดกลไกยับยั้งเชื้อก่อโรคผ่านกระบวนการสำคัญ 2 ประการ

1) การแย่งตำแหน่งยึดเกาะ (Competition for adhesion sites) เมื่อโพรไบโอติกส์เข้ายึดครองพื้นที่บนเซลล์บุผิวลำไส้ จะสร้างชั้นฟิล์มทางชีวภาพที่ป้องกันไม่ให้แบคทีเรียก่อโรค เช่น *P. larvae* (สาเหตุโรคอเมริกันฟาล์บริด) เข้ามายึดเกาะและรุกรานเนื้อเยื่อได้ (Raymann & Moran, 2018)

2) การแก่งแย่งสารอาหาร (Competition for nutrients) การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของโพรไบโอติกส์ช่วยลดความพร้อมใช้งานของสารอาหารหลักในลำไส้ ส่งผลให้เชื้อก่อโรคขาดแคลนแหล่งพลังงานที่จำเป็นในการเพิ่มจำนวนและการแพร่กระจาย (Kwong & Moran, 2016)

3.2 การสร้างสารต้านจุลินทรีย์และกรดอินทรีย์ (Production of antimicrobial substances)

กลไกนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดการใช้ยาปฏิชีวนะในอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้ง โดยมีกระบวนการหลักดังนี้

1) การลดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH reduction) แบคทีเรียกลุ่ม LAB เปลี่ยนน้ำตาลให้กลายเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) และกรดน้ำส้ม (Acetic acid) ส่งผลให้ในลำไส้มีสภาวะความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งสามารถยับยั้งการงอกของสปอร์เชื้อก่อโรคและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ (Vasquez *et al.*, 2012)

2) การสังเคราะห์แบคเทอริโอซิน (Bacteriocins) โพรไบโอติกส์บางสายพันธุ์สามารถผลิตสารโปรตีนที่มีฤทธิ์ทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียก่อโรคอย่างเฉพาะเจาะจง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ของผึ้งหรือจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ ซึ่งเป็นแนวทางที่ปลอดภัยกว่าการใช้ยาปฏิชีวนะแบบกวาดล้าง (Vasquez *et al.*, 2012) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในประเทศไทย โดย Thacharoen *et al.* (2023) ที่ทำการคัดแยกแบคทีเรียจากน้ำผึ้งธรรมชาติในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่าจุลินทรีย์กลุ่ม *Bacillus* และ *Priestia* มีคุณสมบัติเด่นในการเป็นโพรไบโอติกส์ เนื่องจากมีความทนทานต่อสภาวะจำลองในทางเดินอาหาร (สภาวะ pH ต่ำและเกลือ น้ำตาล) และมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลนี้เป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่นเพื่อใช้ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

3.3 การควบคุมระบบภูมิคุ้มกันและกลไกป้องกันตัว (Immunomodulation)

โพรไบโอติกส์มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นและปรับสมดุลระบบภูมิคุ้มกันของผึ้ง (Immune priming) ผ่านกลไกดังต่อไปนี้

1) กระตุ้นการแสดงออกของยีนภูมิคุ้มกัน การได้รับโพรไบโอติกส์เข้าไปกระตุ้นทางเดินสัญญาณ (Signaling pathways) เช่น Toll หรือ Imd pathway ส่งผลให้เกิดการสังเคราะห์และหลั่งเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ เช่น defensin, abidaecin และ hymenoptaecin ออกมาหมุนเวียนในระบบเลือด (Hemolymph) เพื่อกำจัดเชื้อแปลกปลอม (Kwong & Moran, 2016)

2) การเสริมสร้างศักยภาพการต้านอนุมูลอิสระ มีงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่าโพรไบโอติกส์ช่วยเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant enzymes) ซึ่งช่วยลดความเสียหายของเซลล์ (Oxidative stress) ที่มีสาเหตุมาจากปัจจัยภายนอก เช่น การที่ผึ้งได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช หรือภาวะความเครียดจากการขาดสารอาหาร (Dietary stress) (Aurell *et al.*, 2024)

4. ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตและสุขภาพ: กรณีศึกษาในประเทศไทย (Impact on production efficiency and health: case study in Thailand)

การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้งของประเทศไทยได้รับการยืนยันถึงประสิทธิภาพผ่านงานวิจัยเชิงทดลองอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้แบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* ที่คัดแยกได้จากจุลินทรีย์ในท้องถิ่น ซึ่งส่งผลเชิงบวกต่อตัวชี้วัดสำคัญทางชีวภาพและเศรษฐกิจ ดังนี้

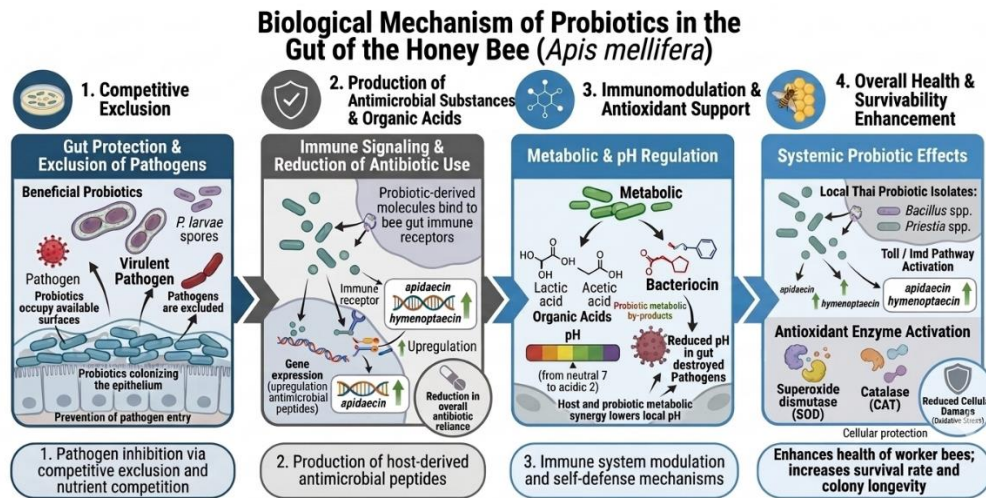


Figure 1 Schematic diagram illustrating the biological mechanisms of probiotics in the honey bee gut (Modified from Vasquez *et al.*, 2012; Raymann & Moran, 2018; Thacharoen *et al.*, 2023; Aurell *et al.*, 2024)

4.1 ส่งเสริมการเจริญเติบโตและน้ำหนักตัว (Growth promotion and body weight)

โพรไบโอติกส์มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนสารอาหารเป็นเนื้อเยื่อ (Feed conversion efficiency) ผ่านกลไกทางสรีรวิทยา

1) การเพิ่มมวลชีวภาพ (Biomass) งานวิจัยของ Yooboriboon *et al.* (2023) ระบุว่าผึ้งพันธุ์ที่ได้รับอาหารเสริมผสมโพรไบโอติกส์มีน้ำหนักตัวเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ปราศจากโพรไบโอติกส์อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 10–15 เนื่องจากจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายสารอาหารโมเลกุลใหญ่ในเกสรเทียม ส่งผลให้ผึ้งสามารถดูดซึมกรดอะมิโนและลิพิดไปใช้ในการสร้างกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับการค้นพบของ Zheng *et al.* (2017) ที่ระบุว่าจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารไม่ได้เพียงแค่ช่วยย่อยอาหาร แต่ยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณผ่านเปปไทด์ที่คล้ายอินซูลิน เพื่อควบคุมเมแทบอลิซึมและการสะสมพลังงานของผึ้งอย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานที่ช่วยอธิบายว่าเหตุใดการได้รับโพรไบโอติกส์จึงส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มมวลชีวภาพของผึ้ง

2) การพัฒนาในระยะตัวอ่อน (Larval development) การได้รับจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ตั้งแต่ระยะตัวอ่อนช่วยเสริมสร้างความสมบูรณ์ทางสรีรวิทยา ส่งผลให้ผึ้งตัวเต็มวัยที่เพิ่งออกมาจากเซลล์ที่ฟักออกมามีความพร้อมในการปฏิบัติหน้าที่ภายในรังได้อย่างเต็มศักยภาพ

4.2 การยืดอายุขัยและความทนทานของผึ้งงาน (Longevity of worker bees)

อายุขัยของผึ้งงานเป็นปัจจัยชี้วัดโดยตรงต่อปริมาณผลผลิตน้ำผึ้งและความมั่นคงของรัง

1) การจัดสรรพลังงานและลดภาระทางเมแทบอลิซึม (Energy allocation and metabolic burden mitigation) เกิดขึ้นเมื่อระบบทางเดินอาหารมีความสมดุลและปราศจากการรุกรานของเชื้อก่อโรค ทำให้ผึ้งไม่ต้องสูญเสียทรัพยากรทางเมแทบอลิซึมไปกับการตอบสนองต่อการอักเสบหรือการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ร่างกายสามารถนำพลังงานไปใช้ในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอและชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ (Cellular senescence) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Brodtschneider & Crailsheim, 2010; Raymann & Moran, 2018)

2) ผลต่อปริมาณการเก็บเกี่ยวผลผลิตจากผึ้ง งานวิจัยของ Yooboriboon *et al.* (2023) พบว่าอาหารเสริมที่ผสมโพรไบโอติกส์ช่วยยืดอายุขัยของผึ้งงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มจำนวน “ผึ้งหาอาหาร” (Foragers) ภายในรังให้คงอยู่ได้นานขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณการเก็บเกี่ยวผลผลิตน้ำหวานและเกสร นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการเพิ่มจำนวนประชากรผึ้งแล้ว โพรไบโอติกส์ยังมีบทบาทสำคัญในการบรรเทาผลกระทบจากสารเคมีทางการเกษตร โดย Alberoni *et al.* (2018) ระบุว่าโพรไบโอติกส์ช่วยฟื้นฟูสมดุลจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารที่ได้รับความเสียหายจากยาฆ่าแมลง ซึ่งสอดคล้องกับ Aurell *et al.* (2024) ที่รายงานว่าการจัดการด้านโภชนาการเป็นปัจจัยสำคัญในการลดอัตราการสูญเสียรังผึ้งจากสภาวะความเครียดสะสม (Combined stress)

4.3 การพัฒนาคุณภาพระบบสืบพันธุ์ในผึ้งตัวผู้ (Reproductive quality in drones)

ข้อมูลนี้ถือเป็นองค์ความรู้สำคัญสำหรับการผลิตผึ้งนางพญาในประเทศไทย

1) กระบวนการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ (Spermatogenesis) งานวิจัยโดย Yooboriboon *et al.* (2021b) พบว่าการเสริมโพรไบโอติกส์ส่งผลเชิงบวกต่อคุณภาพสเปิร์มของผึ้งตัวผู้ โดยช่วยเพิ่มความเข้มข้นของสเปิร์ม (Sperm concentration) และอัตราการอยู่รอด (Sperm viability) อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ซึ่งกลไกทางสรีรวิทยาที่คาดว่าใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่โพรไบโอติกส์ช่วยสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ กรดไขมันสายสั้น และกรดอะมิโนจำเป็น ซึ่งช่วยลดสภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) ที่ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์สเปิร์ม ควบคู่กับการส่งเสริมการดูดซึมสารอาหารที่จำเป็นต่อการบำรุงเซลล์สืบพันธุ์ (Raymann & Moran, 2018) เมื่อผึ้งตัวผู้ผสมพันธุ์ สเปิร์มคุณภาพสูงเหล่านี้จะถูกนำไปเก็บรักษาไว้ในถุงเก็บสเปิร์ม (Spermatheca) ของผึ้งนางพญา ซึ่งการรักษาสภาพแวดล้อมทางชีวเคมีและเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระภายในถุงเก็บสเปิร์มถือเป็นกลไกสำคัญในการชะลอการเสื่อมสภาพและรักษาสภาพความมีชีวิตของสเปิร์มให้คงอยู่ได้ยาวนานตลอดอายุขัย (Baer *et al.*, 2009) โดยมีผึ้งงานทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกระจายสารอาหารหมัก สารเมแทบอลิซึมสำคัญ และจุลินทรีย์ไปยังสมาชิกในรังผ่านกระบวนการป้อนอาหารแลกเปลี่ยนกันแบบปากต่อปาก (Trophallaxis) และการจัดการอาหารภายในรัง (Powell *et al.*, 2014)

2) ความสมบูรณ์ทางพันธุกรรมและปริมาณประชากรของผึ้งตัวผู้ที่มีความสมบูรณ์ทางเพศสูง ช่วยให้สามารถส่งถ่ายน้ำเชื้อที่มีความเข้มข้นและสเปิร์มที่แข็งแรงให้แก่ผึ้งนางพญาในระหว่างการผสมพันธุ์ ส่งผลให้ผึ้งนางพญาที่มีปริมาณสเปิร์มสะสมในถุงเก็บสเปิร์มเพียงพอสำหรับการวางไข่ปฏิสนธิได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดปัญหาการสร้างผึ้งนางพญาตัวใหม่ทดแทน (Queen supersedure) ที่มักเกิดจากการที่ผึ้งนางพญาได้รับสเปิร์มไม่เพียงพอหรือสเปิร์มด้อยคุณภาพ (Tarpy *et al.*, 2012; Pettis *et al.*, 2016) อันเป็นอุปสรรคสำคัญในการจัดการรังผึ้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่แปรปรวนในเขตร้อน (Chantawannakul *et al.*, 2016)

ผลของการเสริมโพรไบโอติกส์ต่อการยกระดับคุณภาพของผึ้งตัวผู้ผ่านการลดความเครียดระดับเซลล์ไม่ได้ปรากฏเฉพาะในผึ้งพันธุ์เท่านั้น แต่ยังสอดคล้องกับปรากฏการณ์ทางชีววิทยาในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มนุษย์ และสัตว์ปีก ผ่านกลไกเชื่อมโยงระหว่างระบบทางเดินอาหารและระบบสืบพันธุ์ (Gut-Testis axis / Gut-Reproductive axis) (Ding *et al.*, 2020; Sanchez-Rodriguez *et al.*, 2025) โดยการเสริมจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ลดการเกิดลิพิดเพอร์ออกซิเดชัน (Lipid peroxidation) ที่เยื่อหุ้มเซลล์อสุจิ และลดการแตกหักของดีเอ็นเอในอสุจิ (Prihadi *et al.*, 2026) สำหรับผึ้งตัวผู้ซึ่งมีลักษณะทางสรีรวิทยาพิเศษที่ต้องเก็บรักษาเซลล์อสุจิไว้ในถุงเก็บอสุจิ (Seminal vesicles) เพื่อรอการผสมพันธุ์ การได้รับเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (เช่น SOD และ CAT) จากจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์กลุ่ม *Priestia* spp. และ *Bacillus* spp. จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการปกป้องความสมบูรณ์ของอสุจิภายใต้สภาวะความเครียดจากความร้อน (Heat stress) ในพื้นที่เขตร้อน

5. การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในการเลี้ยงผึ้งและลดการใช้สารเคมี (Probiotic application in beekeeping and chemical reduction)

การเปลี่ยนผ่านจากแนวทางการใช้สารเคมีสังเคราะห์และยาปฏิชีวนะ (Antibiotics) มาสู่การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ จำเป็นต้องอาศัยกลยุทธ์การบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ เพื่อส่งเสริมให้จุลินทรีย์สามารถคงสภาพ (Viability) และแสดงฤทธิ์ทางชีวภาพ (Biological activity) ได้อย่างสูงสุดภายในรังผึ้ง โดยมีแนวทางที่สำคัญดังนี้

5.1 การบริหารจัดการอาหารเสริมผสมโพรไบโอติกส์ (Management of probiotic dietary supplements)

เพื่อให้โพรไบโอติกส์สามารถเข้าไปตั้งตัว (Colonization) ในระบบทางเดินอาหารของผึ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปแบบการนำส่งสารอาหารจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา เมื่อผึ้งเกิดภาวะจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารขาดสมดุลจากสภาวะเครียด การเสริมโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่น (Autochthonous probiotics) เช่น *Bacillus* spp., *Priestia* spp. และ *Lactobacillus* Firm-4 ในเกสรเทียมหรือน้ำเชื่อม จะช่วยชดเชยการทำงานของจุลินทรีย์แกนหลักบริเวณ ไอลียมและเรกตัม (Table 1) โดยมีกลไกยับยั้งเชื้อก่อโรคอเมริกันฟาล์วไรต์ (*P. larvae*) และยุโรปฟาล์วไรต์ (*M. plutonius*) ผ่านการสร้างกรดอินทรีย์ลดค่า pH และการหลั่งแบคเทอริโอซิน (Thacharoen *et al.*, 2023) พร้อมทั้งหลั่งเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (SOD และ CAT) ช่วยลดความเครียดระดับเซลล์ เพิ่มอัตราการรอดชีวิตของผึ้ง (Disayathanooat *et al.*, 2012b) และส่งเสริมคุณภาพอสุจิในผึ้งตัวผู้ภายใต้สภาพอากาศร้อนชื้น (Yooboriboon *et al.*, 2021b)

1) การเสริมโพรไบโอติกส์ในอาหารโปรตีนทดแทนเกสรธรรมชาติ (Pollen substitute enrichment) โดยผสมแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* spp. หรือกลุ่มจุลินทรีย์ผสม (Microbial consortium) ลงในเกสรเทียมที่ผลิตจากโปรตีนเสริม เช่น โปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองหรือยีสต์ ช่วยให้ผึ้งได้รับจุลินทรีย์ควบคู่ไปกับสารอาหารที่จำเป็นต่อการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะในช่วงวิกฤตที่ขาดแคลนเกสรดอกไม้ในธรรมชาติ (Brodschneider & Crailsheim, 2010)

2) การฉีดพ่นสารละลายน้ำเชื่อมผสมโพรไบโอติกส์ (Probiotic sugar spray) วิธีการนี้อาศัยกลไกพฤติกรรมทำความสะอาดร่างกาย (Grooming) และการป้อนอาหารแลกเปลี่ยนกันแบบปากต่อปาก ซึ่งช่วยกระตุ้นการกระจายตัวของจุลินทรีย์ไปยังสมาชิกภายในรังรวมถึงตัวอ่อนของผึ้งได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง (Yooboriboon *et al.*, 2021a)

5.2 การลดการใช้ยาปฏิชีวนะและแนวทางการเลี้ยงผึ้งแบบอินทรีย์ (Reduction of antibiotic use and organic beekeeping practices)

การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ถือเป็นนวัตกรรมสำคัญในการแก้ไขปัญหาเชื้อดื้อยา (Antimicrobial resistance) และยกระดับมาตรฐานการผลิตอาหารปลอดภัย

1) การป้องกันเชิงรุก (Proactive prevention) การเสริมโพรไบโอติกส์ลงในอาหารเสริมที่ใช้เลี้ยงผึ้งอย่างสม่ำเสมอช่วยรักษาภาวะความเป็นกรด (pH) ในลำไส้และกระตุ้นการหลั่งสารเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ ซึ่งช่วยลดอุบัติการณ์ของโรคอเมริกันฟาร์สบูตและโรคยูโรเบียนฟาร์สบูต โดยลดการพึ่งพาสารเคมี (Vasquez *et al.*, 2012) สอดคล้องกับรายงานของ Elenany & Hassan (2023) ที่ยืนยันว่าแบคทีเรียกรดแลคติก สามารถลดอัตราการติดเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในตัวอ่อนผึ้งภายใต้สภาวะภาคสนามได้

2) การยกระดับมาตรฐานและความปลอดภัยทางอาหาร การลดการใช้สารเคมีส่งผลโดยตรงต่อการลดสารตกค้างในน้ำผึ้งและไขผึ้ง (Beeswax) ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมน้ำผึ้งไทยในตลาดโลกที่มีมาตรการความปลอดภัยทางอาหารที่เข้มงวด (Goulson *et al.*, 2015)

5.3 แนวโน้มการพัฒนานวัตกรรมโพรไบโอติกส์ท้องถิ่น (Trends in the development of indigenous probiotic innovations)

ผลการวิจัยในประเทศไทยบ่งชี้ว่า การใช้จุลินทรีย์ประจำถิ่นที่แยกได้จากผึ้งในพื้นที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าสายพันธุ์นำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากมีความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพอุณหภูมิและความชื้นในเขตร้อนได้ดีกว่า (Yooboriboon *et al.*, 2023) ทิศทางการพัฒนาโพรไบโอติกส์ในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคโนโลยีการห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูล (Micro-encapsulation) เพื่อผลิตโพรไบโอติกส์ในรูปแบบผงแห้ง ซึ่งช่วยรักษาความคงตัวและคุณภาพของจุลินทรีย์ให้ยาวนานขึ้นในสภาวะการเลี้ยงกลางแจ้ง (Yooboriboon *et al.*, 2023) นอกจากนี้ Thacharoen *et al.* (2023) ได้แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมอาหารจากวัตถุดิบในท้องถิ่นร่วมกับโพรไบโอติกส์ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อ *P. larvae* ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของโรคอเมริกันฟาร์สบูต ในฟาร์มผึ้งพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

6. ศักยภาพการประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในการเลี้ยงผึ้งเชิงพาณิชย์ (Potential for probiotic application in commercial beekeeping)

ในบริบททางอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงผึ้ง การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์มิได้จำกัดอยู่เพียงบทบาทของสารทางเลือกเพื่อการรักษาโรคเท่านั้น แต่ถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการบริหารจัดการประสิทธิภาพการผลิตเพื่อยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์จากผึ้งในระดับสากล โดยมีประเด็นสำคัญดังนี้

6.1 การยกระดับมาตรฐานคุณภาพผึ้งนางพญา (Queen bee quality enhancement)

ในอุตสาหกรรมการผลิตผึ้งนางพญาเพื่อการจำหน่าย คุณภาพและความสมบูรณ์พันธุ์พันธุ์ของผึ้งนางพญาขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของอสุจิ (Sperm viability) ที่ได้รับจากผึ้งตัวผู้ (Drone) การเสริมโพรไบโอติกส์ในอาหารมีผลในการส่งเสริมกระบวนการสร้างอสุจิของผึ้งตัวผู้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Yooboriboon *et al.*, 2021b) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการยืดอายุการวางไข่ของผึ้งนางพญา และลดอัตราการสูญเสียรังที่จัดตั้งใหม่ (Colony failure rate) อันเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเสี่ยงทางเศรษฐกิจของผู้ประกอบการเลี้ยงผึ้ง

6.2 การบริหารจัดการรังในช่วงวิกฤต (Crisis management)

ภายใต้สภาวะความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ เช่น ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) ซึ่งส่งผลให้พืชอาหารไม่บานตามฤดูกาล การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ผสมในอาหารเสริมช่วยรักษาความหนาแน่นของประชากรผึ้งงาน หรือมวลชีวภาพของรังผึ้งให้คงที่ (Yoooriboon *et al.*, 2023) ส่งผลให้เกษตรกรสามารถรักษาความพร้อมของประชากรผึ้งเพื่อเข้าสู่ฤดูกาลเก็บเกี่ยวน้ำผึ้งได้ทันเวลาที่ โดยไม่ต้องเสียเวลาพักตัวอนุชนใหม่เพื่อทดแทนประชากรผึ้งงานที่สูญเสียไป

6.3 เพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์และการส่งออก (Value addition and export opportunity)

การเปลี่ยนผ่านจากการใช้ยาปฏิชีวนะมาสู่การใช้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ตามธรรมชาติ เป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้ผึ้งส่งออกผ่านมาตรฐานการตรวจสอบสารตกค้างที่เข้มงวดของสหภาพยุโรป (EU) และประเทศญี่ปุ่น (Goulson *et al.*, 2015) การผลิตน้ำผึ้งในระบบเกษตรปลอดภัยหรือ “น้ำผึ้งอินทรีย์” (Organic Honey) ไม่เพียงแต่ช่วยลดอุปสรรคทางการค้าเชิงเทคนิค แต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ให้สูงกว่าน้ำผึ้งทั่วไปในท้องตลาด

6.4 ความยั่งยืนของระบบนิเวศการเกษตร (Ecological sustainability)

การส่งเสริมสุขภาพผึ้งด้วยโพรไบโอติกส์ส่งผลบวกเชิงระบบต่อประสิทธิภาพการผสมเกสร (Pollination efficiency) ในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เช่น ลำไย ลิ้นจี่ และทุเรียน ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มผลผลิตทางการเกษตรและรายได้ให้แก่เกษตรกรเจ้าของสวน แต่ยังเป็นการสร้างระบบนิเวศการเกษตรที่สมดุล นำไปสู่การพัฒนาเศรษฐกิจฐานชีวภาพที่ยั่งยืน

7. หลักการออกแบบอาหารเสริมผสมโพรไบโอติกส์ (Design principles of probiotic dietary supplements)

การพัฒนาสูตรอาหารเสริมทดแทนเกสรธรรมชาติที่มีการเสริมโพรไบโอติกส์ จำเป็นต้องพิจารณามากกว่าเพียงการนำจุลินทรีย์มาผสมลงในสูตรอาหารพื้นฐาน แต่ต้องให้ความสำคัญกับ “ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ” (Biocompatibility) เพื่อรักษาความคงตัวและประสิทธิภาพของจุลินทรีย์จนกระทั่งเข้าไปในตัวผึ้ง

7.1 ความสมดุลของสารอาหารพื้นฐาน (Nutritional matrix)

อาหารเสริมต้องมีระดับโปรตีน ลิพิด และวิตามินที่เหมาะสม เพื่อให้ผึ้งได้รับสารอาหารครบถ้วน โดยแหล่งโปรตีนต้องย่อยง่ายและไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ (Brodschneider & Crailsheim, 2010)

7.2 การเลือกสารโพรไบโอติกส์ (Prebiotics integration)

การเติมใยอาหารหรือน้ำตาลเชิงซ้อนบางชนิดลงในอาหารเสริม ช่วยเป็นแหล่งอาหารให้แก่โพรไบโอติกส์ในระหว่างการผ่านทางเดินอาหาร รวมถึงช่วยในการยึดเกาะและเพิ่มจำนวนประชากรจุลินทรีย์ในลำไส้ของผึ้ง (Synbiotic effect) ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น (Borges *et al.*, 2021; Motta & Moran, 2024)

7.3 เทคนิคการรักษาสภาพ (Encapsulation and viability)

เนื่องจากจุลินทรีย์มีความไวต่อแสงและความร้อน การออกแบบในรูปแบบผงแห้ง หรือการใช้วัสดุธรรมชาติห่อหุ้มเซลล์ด้วยไมโครแคปซูลช่วยป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ตายในระหว่างกระบวนการผสมหรือขณะวางไว้ในรังผึ้งที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 34-36°C (Alberoni *et al.*, 2018; Killam *et al.*, 2024)

7.4 ความน่ากินและเนื้อสัมผัส (Palatability and texture)

อาหารเสริมต้องมีเนื้อสัมผัสที่ผึ้งงานสามารถกัดกินและนำไปเลี้ยงตัวอ่อนได้ง่าย รวมถึงต้องมีความน่าดึงดูดด้วยกลิ่นหรือรสชาติที่ใกล้เคียงกับเกสรธรรมชาติ เพื่อส่งเสริมให้เกิดการบริโภคในปริมาณที่เพียงพอต่อการได้รับปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสม (Effective dose)

8. ข้อจำกัดและความเสี่ยง (Limitations and risks)

แม้การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในผึ้งจะมีประโยชน์อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้ในภาคปฏิบัติยังคงมีข้อจำกัดและข้อควรระวังสำคัญที่นักวิจัยตลอดจนเกษตรกรจำเป็นต้องตระหนัก ดังนี้

8.1 ความแปรปรวนของสายพันธุ์และสภาวะแวดล้อม

ผลลัพธ์ของโพรไบโอติกส์อาจไม่เท่ากันในทุกรังผึ้ง เนื่องจากสภาพแวดล้อม และพันธุกรรมของผึ้งในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการยึดเกาะและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ในลำไส้ของผึ้ง (Raymann & Moran, 2018)

8.2 ความเสี่ยงจากการปนเปื้อน (Contamination risks)

หากกระบวนการผลิตอาหารเสริมผสมโพรไบโอติกส์ไม่ได้มาตรฐาน อาจเกิดการปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรคและเชื้อรา ซึ่งส่งผลเสียร้ายแรงต่อความแข็งแรงของรังผึ้งแทนที่จะเป็นการบำรุง

8.3 การสูญเสียประสิทธิภาพ (Loss of viability)

จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์มีอายุการเก็บรักษาจำกัด การเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิห้องหรือในสภาวะที่มีความชื้นสูงของประเทศไทย อาจส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตลดลง จนไม่เพียงพอที่จะแสดงประสิทธิภาพในการส่งเสริมสุขภาพของผึ้งได้อย่างเต็มที่ (Yooboriboon *et al.*, 2023)

8.4 ผลกระทบต่อพฤติกรรมทางธรรมชาติ

การเสริมโพรไบโอติกส์ในปริมาณที่มากเกินไป หรือการพึ่งพาอาหารเสริมเพียงอย่างเดียว อาจรบกวนพฤติกรรมหาอาหารในธรรมชาติของผึ้งในระยะยาวได้ (Goulson *et al.*, 2015)

Conclusions

การประยุกต์ใช้โพรไบโอติกส์ในอาหารเสริมสำหรับใช้เลี้ยงผึ้งพันธุ์เป็นนวัตกรรมทางชีวภาพที่มีศักยภาพสูง สามารถใช้ในการแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ประชากรผึ้งลดลงได้อย่างยั่งยืน จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียกรดแลคติกมีบทบาทเชิงหน้าที่สำคัญทั้งในด้านการย่อยสลายสารอาหารที่ซับซ้อน การสร้างกรดอินทรีย์เพื่อควบคุมสมดุลจุลินทรีย์ และการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันระดับโมเลกุล ซึ่งทำหน้าที่เป็นปราการสำคัญในการป้องกันโรคโดยไม่ต้องพึ่งพาสารปฏิชีวนะ อันเป็นต้นเหตุของปัญหาเชื้อดื้อยาและสารตกค้างในน้ำผึ้ง สำหรับในประเทศไทย การเลือกใช้โพรไบโอติกส์สายพันธุ์ท้องถิ่นที่ทนทานต่อสภาพอากาศเขตร้อน เมื่อนำมาผสมในอาหารเสริมอย่างเหมาะสม ไม่เพียงแต่ช่วยส่งเสริมสุขภาพพื้นฐานและยืดอายุขัยของผึ้งงาน แต่ยังส่งผลเชิงบวกต่อการเพิ่มคุณภาพระบบสืบพันธุ์ของผึ้งตัวผู้ ซึ่งช่วยรักษาความเสถียรของประชากรผึ้งในระดับรังได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการนำไปใช้จริงยังต้องอาศัยนวัตกรรมการรักษาความคงตัวของจุลินทรีย์ เช่น เทคโนโลยีการห่อหุ้มเซลล์ด้วยไมโครแคปซูล เพื่อให้มั่นใจในประสิทธิภาพการออกฤทธิ์ การส่งเสริม

โภชนาการด้วยโพรไบโอติกส์จึงเป็นกุญแจสำคัญในการยกระดับอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้งของประเทศไทยสู่มาตรฐานเกษตรปลอดภัยที่มีขีดความสามารถในการแข่งขันระดับสากล พร้อมทั้งช่วยรักษาความสมดุลของระบบนิเวศการเกษตรผ่านบทบาทของผึ้งในการเป็นแมลงผสมเกสรดอกไม้ที่มีประสิทธิภาพอย่างยั่งยืน

References

- Alberoni, D., Baffoni, L., Gaggia, F., Ryan, P. M., Murphy, K., Ross, R. P., Stanton, C., & Di Gioia, D. (2018). Impact of beneficial bacteria supplementation on the gut microbiota, colony development and productivity of *Apis mellifera* L. *Beneficial Microbes*, 9(2), 269-278. <https://doi.org/10.3920/BM2017.0061>
- Aurell, D., Bruckner, S., Wilson, M., Steinhauer, N., & Williams, G. R. (2024). A national survey of managed honey bee colony losses in the USA: Results from the Bee Informed Partnership for 2020–21 and 2021–22. *Journal of Apicultural Research*, 63(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2264601>
- Baer, B., Heazlewood, J. L., Taylor, N. L., Eubel, H., & Millar, A. H. (2009). The seminal fluid proteome of the honeybee *Apis mellifera*. *Proteomics*, 9(8), 2085-2097. <https://doi.org/10.1002/pmic.200800708>
- Borges, D., Guzman-Novoa, E., & Goodwin, P. H. (2021). Effects of prebiotics and probiotics on honey bees (*Apis mellifera*) infected with the microsporidian parasite *Nosema ceranae*. *Microorganisms*, 9(3), 481. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030481>
- Brodschneider, R., & Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3), 278–294. <https://doi.org/10.1051/apido/2010012>
- Chantawannakul, P., De Guzman, L., Li, J., & Williams, G.R. (2016). Parasites, pathogens, and pests of honeybees in Asia. *Apidologie*, 47(3), 301-324. <https://doi.org/10.1007/s13592-015-0407-5>
- Ding, N., Zhang, X., Zhang, X. D., Jing, J., Liu, S. S., Mu, Y. P., Peng, L. L., Yan, Y. J., Xiao, G. M., Bi, X. Y., Chen, H., Li, F. H., Yao, B., & Zhao, A. Z. (2020). Impairment of spermatogenesis and sperm motility by the high-fat diet-induced dysbiosis of gut microbes. *Gut*, 69(9), 1608-1619. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-319127>
- Disayathanoowat, T., Li, H., Supapimon, N., Suwannarach, N., Lumyong, S., Chantawannakul, P., & Guo, J. (2020). Different dynamics of bacterial and fungal communities in hive-stored bee bread and their possible roles:

- a case study from two commercial honey bees in China. *Microorganisms*, 8(2), 264.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms8020264>
- Disayathanoowat, T., Yoshiyama, M., Kimura, K., & Chantawannakul, P. (2012a) Isolation and characterization of bacteria from the midgut of the Asian honey bee (*Apis cerana indica*). *Journal of Apicultural Research*, 51(4), 312-319, <http://dx.doi.org/10.3896/IBRA.1.51.4.04>
- Disayathanoowat, T., Young, J. P. W., Helgason, T., & Chantawannakul, P. (2012b). T-RFLP analysis of bacterial communities in the midguts of *Apis mellifera* and *Apis cerana* honey bees in Thailand. *FEMS Microbiology Ecology*, 79(2), 273–281. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01216.x>
- Elenany, Y.E., & Hassan, A.A.M. (2023). Beneficial effect of honeybee-specific lactic acid bacteria on health and activity of *Apis mellifera* L. colonies. *Bulletin of the National Research Centre*, 47(1), <https://doi.org/10.1186/s42269-023-00997-z>
- Ellegaard, K. M., & Engel, P. (2019). Genomic diversity landscape of the honey bee gut microbiota. *Nature Communications*, 10(1), 446. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08303-0>
- Engel, P., Kwong, W. K., & Moran, N. A. (2013). *Frischella perrara* gen. nov., sp. nov., a gammaproteobacterium isolated from the gut of honeybees, *Apis mellifera*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63(10), 3646–3651. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.049569-0>
- Gallai, N., Salles, J. M., Settele, J., & Vaissière, B. E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics*, 68(3), 810–821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.014>
- Goli Mehdi Abadi, M. E., Hosseini-Safa, A., Habibi, S., Dehghan, M., Forouzani-Moghaddam, M. J., & Oshaghi, M. (2023). Isolation and characterization of the lactobacillus strain from honey and its probiotic properties. *Iranian Journal of Microbiology*, 15(3), 439–447. <https://doi.org/10.18502/ijm.v15i3.12905>
- Goulson, D., Nicholls, E., Botias, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), Article 1255957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>

- Kešnerová, L., Mars, R. A. T., Ellegaard, K. M., Troilo, M., Sauer, U., & Engel, P. (2017). Disentangling metabolic functions of bacteria in the honey bee gut. *PLoS Biol*, 15(12), e2003467.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003467>
- Killam, S. M., Daisley, B. A., Kleiber, M. L., Lacika, J. F., & Thompson, G. J. (2024). A case for microbial therapeutics to bolster colony health and performance of honey bees. *Frontiers in Bee Science*, 2(1422265). <https://doi.org/10.3389/frbee.2024.1422265>
- Kwong, W. K., & Moran, N. A. (2016). Gut microbial communities of social bees. *Nature Reviews Microbiology*, 14(10), 623–635. <https://www.nature.com/articles/nrmicro.2016.43>
- Le Conte, Y., & Navajas, M. (2008). Climate change: impact on honey bee populations and diseases. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 27(2), 499–510.
<https://doi.org/10.20506/rst.27.2.1819>
- Motta, E. V. S., & Moran, N. A. (2024). The honeybee microbiota and its impact on health and disease. *Nature Reviews Microbiology*, 22(3), 122–137. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00990-3>
- Pettis, J. S., Rice, N., Joselow, K., vanEngelsdorp, D., & Chaimanee, V. (2016). Colony failure linked to low sperm viability in honey bee (*Apis mellifera*) queens and an exploration of potential causative factors. *PLoS ONE*, 11(5), e0155833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155833>
- Powell, J. E., Martinson, V. G., Urban-Mead, K., & Moran, N. A. (2014). Routes of acquisition of the gut microbiota of the honey bee *Apis mellifera*. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(23), 7378–7387.
<https://doi.org/10.1128/AEM.01861-14>
- Prihadi, J. C., Hengky, A., Alvianto, S., Putranata, H., Putra, P. A., & Telium, H. D. (2026). Probiotic supplementation improved sperm parameters in idiopathic infertility male: a systematic review and meta-analysis. *Urologia Colombiana*. 35(1), 39-48. <https://doi.org/10.24875/RUC.25000029>
- Raymann, K., & Moran, N. A. (2018). The role of the gut microbiome in health and disease of adult honey bees workers. *Current Opinion in Insect Science*, 26, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.02.012>
- Sanchez-Rodriguez, A., Idrovo, I. I. D., Villafranca, R., Latorre, N., Rielo, J. A., Laburu, A., Nieto-Román, S., Heredia, D., González, R., García-Cañas, V., Laxalde, D., Simó, C., Vieites, D. R., & Roldan, E. R. S.

- (2025). Effect of probiotics on sperm quality in the adult mouse. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 17(6), 4480–4490. <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10388-z>
- Suenami, S., Koto, A., & Miyazaki, R. (2023). Basic structures of gut bacterial communities in eusocial insects. *Insects*, 14(5), 444. <https://doi.org/10.3390/insects14050444>
- Tarpy, D. R., Keller, J. J., Caren, J. R., & Delaney, D. A. (2012). Assessing the mating health of commercial honey bee queens. *Journal of Economic Entomology*, 105(1), 20-25. <https://doi.org/10.1603/EC11276>
- Thacharoen, C., Chuankid, W., Inkaewwong, T., Petchdee, P., Sompowloy, T., & Pisithkul, T. (2023). Biological properties and potential probiotic bacteria isolated from honey collected in Chiang Mai, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 57(3), 429–440. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/260142>
- Tlak Gajger, I., & Mutinelli, F. (2024). Impact of environmental factors and management practices on bee health. *Insects*, 15(12), 996 <https://doi.org/10.3390/insects15120996>
- Vasquez, A., Forsgren, E., Fries, I., Paxton, R. J., Flaberg, E., Schedwin, L., & Olofsson, T. C. (2012). Symbionts as major modulators of insect health: Lactic acid bacteria and honeybees. *PLoS ONE*, 7(3), Article e33188. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033188>
- Wongsiri, S., & Deowanish, S. (2012). *Biology of Bees* (3rd ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Yooboriboon, S., Chuenchan, W., & Sumpaoloi, T. (2021a). Effect of supplementary diet mixed with probiotics on colony population of *Apis mellifera* Linnaeus, 1758. *Burapha Science Journal*, 26(3), 1796-1813. (in Thai)
- Yooboriboon, S., Chuenchan, W., Sumpaoloi, T., & Pawara, T. (2021b). Effect of supplementary diets mixed with probiotics on sperms production of *Apis mellifera*. *Journal of Science Ladkrabang*, 30(1), 44–54. (in Thai)
- Yooboriboon, S., Chuenchan, W., & Sumpaoloi, T. (2023). Effect of dietary supplement mixed with probiotics on body weight and age of honeybee (*Apis mellifera*). *Journal of Science Ladkrabang*, 32(1), 106–119. (in Thai)
- Zheng, H., Perreau, J. J., Powell, E. J., Han, B., Zhang, Z., Kwong, W. K., Tringe, S. G., & Moran, N. A. (2019). Division of labor in honey bee gut microbiota for plant polysaccharide digestion. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 116(51), 25909–25916. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916224116>

Zheng, H., Powell, J. E., Steele, M. I., Dietrich, C., & Moran, N. A. (2017). Honeybee gut microbiota promotes host weight gain via bacterial metabolism and hormonal signaling. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 114(18), 4775-4780. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701819114>