

การใช้โพรไบโอติกเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

The Application of Postbiotics as Feed Additives in Aquaculture

ธูปนขจร ปันแจ่ม¹ และ ชนกันต์ จิตมนัส^{1*}Thapanakhajorn punjam¹ and Chanagun Chitmanat^{1*}¹คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่¹Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University, Chiangmai Province

*Corresponding Author: chanagun1@hotmail.com

Received: April 15, 2025

Revised: June 11, 2025

Accepted: June 13, 2025

บทคัดย่อ

โพรไบโอติก (Postbiotics) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากจุลินทรีย์โพรไบโอติก โดยประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์ที่ตายแล้ว ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียและเมแทบอไลต์ต่าง ๆ ที่ผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการเมตาบอลิซึม ซึ่งมีศักยภาพในการส่งเสริมสุขภาพและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความก้าวหน้าทางวิชาการเกี่ยวกับโพรไบโอติก โดยครอบคลุมถึงวิธีการเตรียม องค์ประกอบทางชีวภาพ กิจกรรมทางชีวภาพ ตลอดจนประสิทธิภาพของโพรไบโอติกในฐานะสารเติมแต่งอาหารสัตว์น้ำ จากการศึกษาวิจัย พบว่าโพรไบโอติกสามารถส่งผลเชิงบวกต่ออัตราการเจริญเติบโต การตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน สุขภาพของระบบทางเดินอาหารและความสามารถในการต้านทานโรคของสัตว์น้ำหลายชนิด อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการออกฤทธิ์ ปริมาณการใช้ที่เหมาะสมและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ อันเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเสนอแนะให้มีการวิจัยเชิงลึกเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาสูตรโพรไบโอติกที่มีประสิทธิภาพสูง และศึกษาศักยภาพในการเสริมฤทธิ์ร่วมกับสารเติมแต่งอาหารชนิดอื่น ซึ่งจะมีส่วนสำคัญในการยกระดับประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ลดการพึ่งพายาปฏิชีวนะ และส่งเสริมความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาว

คำสำคัญ : โพรไบโอติก, โพรไบโอติก, การเจริญเติบโต, ภูมิคุ้มกัน, การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

Abstract

Postbiotics are products derived from probiotic microorganisms, consisting of inactivated microbial cells, bacterial cell components, and various metabolites produced during microbial metabolism. These compounds exhibit potential in promoting the health and growth performance of aquatic animals. This article aims to present recent scientific advances in postbiotic research, encompassing preparation methods, bioactive components, biological activities, and the efficacy of postbiotics as feed additives in aquaculture. Current studies indicate that postbiotics can positively influence growth rates, immune responses, gut health, and disease resistance in various aquatic species. Nevertheless, limitations remain regarding the understanding of their mechanisms of action, optimal dosages, and the diversity of commercially available products, which hinder widespread industrial application. Therefore, further in-depth research is recommended to develop more effective postbiotic formulations and to study the potential for synergistic

effects with other feed additives. Such developments will play a crucial role in enhancing aquaculture efficiency, reducing antibiotic dependency, and promoting the long-term sustainability of the aquaculture industry.

Keywords: Postbiotics, probiotics, growth, immunity, aquaculture

1. บทนำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองความต้องการด้านอาหารโปรตีนคุณภาพสูงของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิตและระบบการจัดการ เพื่อเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพในการเลี้ยง ถึงแม้ว่าภาวะเศรษฐกิจโลกจะอยู่ในช่วงชะลอตัว แต่การส่งออกสินค้าประมงของไทยในปี 2567 ทำสถิติสูงสุดในรอบ 10 ปี ด้วยมูลค่ารวมกว่า 240,062 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี 2566 ที่มีมูลค่า 229,123 ล้านบาท (Prachachat, 2025) อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาแน่นของการเพาะเลี้ยงเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรค ซึ่งมีสาเหตุจากหลายปัจจัย ได้แก่ การนำเข้าสัตว์น้ำจากต่างถิ่น การเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อม และการเปิดเสรีทางการค้า (Ang et al., 2020) การสูญเสียจากโรคสัตว์น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกรรายย่อยและห่วงโซ่อุปทานโดยรวม เกษตรกรจึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี ยาปฏิชีวนะและวัคซีน (Assefa & Abunna, 2018) ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ขณะที่ในระดับสังคม ผู้บริโภคมีความกังวลเกี่ยวกับสารตกค้างในเนื้อสัตว์ ความปลอดภัยของผู้บริโภค และการเพิ่มขึ้นของเชื้อจุลินทรีย์ดื้อยา (Okocha et al., 2018) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสารเติมแต่งอาหารจากธรรมชาติและผลิตภัณฑ์กระตุ้นภูมิคุ้มกันที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิต เพื่อสนับสนุนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

จุลินทรีย์มีชีวิตที่มีประโยชน์หรือโปรไบโอติก (Probiotics) ได้รับความสนใจในฐานะสารเสริมอาหารที่ช่วยเสริมสุขภาพสัตว์น้ำและเพิ่มผลผลิต (Ringø et al., 2020; Wang et al., 2019a, 2019b) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดด้านความคงตัว การจัดเก็บและความสามารถในการมีชีวิตรอดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แปรปรวน (Dianawati et al., 2016) ส่งผลให้เกิดการพัฒนาโอสไบโอติก (Postbiotics) ซึ่งหมายถึง สารชีวโมเลกุล เมตาโบไลต์ หรือชิ้นส่วนของเซลล์จุลินทรีย์ที่ผ่านการทำลายหรือยับยั้งการเจริญ แต่ยังคงคุณสมบัติทางชีวภาพที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต (Tsilingiri & Rescigno, 2013)

โอสไบโอติกมีข้อดีเหนือโปรไบโอติก เช่น ลดความเสี่ยงจากการติดเชื้อ การแพร่กระจายยีนดื้อยา (Salminen et al., 2021) เพิ่มเสถียรภาพและความปลอดภัย (Rad et al., 2020) ช่วยต่อการจัดเก็บและขนส่ง เพิ่มความทนทานต่อน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร เอนไซม์ย่อยอาหารและน้ำดี ส่งผลให้ได้รับการยอมรับในภาคอาหารและการแพทย์ (Aguilar-Toalá et al., 2018) โอสไบโอติกมีบทบาทสำคัญต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและจุลินทรีย์ในลำไส้ โดยช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต ส่งเสริมการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ ทำให้มีความต้านทานโรคและความสามารถทนต่อสภาวะความเครียด (Sudhakaran et al., 2022) แม้ว่างานวิจัยที่ศึกษาการใช้โอสไบโอติกในสัตว์บก แต่การศึกษาผลกระทบของโอสไบโอติกในสัตว์น้ำยังคงเป็นเรื่องใหม่และมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในส่วนของการประเมินผลกระทบในแง่ของการเจริญเติบโตและการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยง ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการใช้โอสไบโอติกในอาหารสัตว์น้ำด้วยคุณสมบัติดังกล่าว โอสไบโอติกจึงได้รับการพิจารณาว่าเป็นหนึ่งในเครื่องมือทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการส่งเสริมสุขภาพและความยั่งยืนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในระบบการเลี้ยงแบบเปิดและปิด รวมถึงการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์และในฟาร์มขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มของการลดการใช้ยาปฏิชีวนะในอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ ซึ่งถือเป็นทิศทางที่ได้รับการส่งเสริมในระดับนโยบายทั้งภายในประเทศและนานาชาติ แม้ว่าผลลัพธ์ของการใช้โอสไบโอติกมีแนวโน้มที่ดี แต่ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อกำหนดขอบเขตของประโยชน์และส่งเสริมการยอมรับ

ในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีพรีไบโอติก (Prebiotics) ซึ่งเป็นสารอาหารที่ไม่สามารถย่อยได้ซึ่งทำหน้าที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในระบบทางเดินอาหาร บทความนี้ต้องการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พรีไบโอติกเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้ยาและสารเคมีในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2. ส่วนประกอบหลักของพรีไบโอติก

พรีไบโอติกประกอบด้วยสารประกอบสามกลุ่มหลัก ได้แก่ 1) เซลล์จุลินทรีย์ที่ไม่ทำงาน 2) ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรีย และ 3) เมตาบอไลต์จากจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่เลือกสำหรับการผลิตพรีไบโอติกต้องเป็นจุลินทรีย์ที่ได้รับการยืนยันว่าปลอดภัยผ่านการประเมินความปลอดภัยที่เข้มงวด ซึ่งรวมถึงสายพันธุ์ของแบคทีเรียและเชื้อรา (Collado et al., 2019) แบคทีเรียสกุลหลักได้แก่ *Lactobacillus* spp. (เช่น *L. plantarum*, *L. fermentum*, *L. helveticus*, *L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. brevis*, *L. xylosum*), *Bifidobacterium* spp. (เช่น *B. bifidum*, *B. animalis*), *Enterococcus* spp. (เช่น *E. faecalis*, *E. faecium*), *Bacillus* spp. (เช่น *B. coagulans*, *B. subtilis*) และ *Pseudomonas* spp. (เช่น *P. stutzeri*, *P. putida*) โดยพรีไบโอติกต้องไม่ใช่เชื้อก่อโรคที่ไม่ทำงาน ไวรัส หรือ สารเมตาบอไลต์ของจุลินทรีย์ที่เป็นอันตราย

2.1 เซลล์จุลินทรีย์ที่ไม่ทำงาน

การอบด้วยความร้อนเป็นวิธีหลักในการทำให้เซลล์พรีไบโอติกไม่ทำงาน โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ทำงานยังคงความสมบูรณ์ของโครงสร้างองค์ประกอบพื้นฐานของพรีไบโอติก สิ่งสำคัญคือต้องแยกความแตกต่างระหว่างเซลล์พรีไบโอติกที่ไม่ทำงานกับวัคซีนที่ไม่ทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วได้มาจากจุลินทรีย์ก่อโรคและไม่ถือเป็นส่วนหนึ่งของหมวดหมู่พรีไบโอติก (Salminen et al., 2021)

2.2 ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรีย

ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียประกอบด้วยพิลิ (pili) แฟล็กเจลลา (flagella) เปปติโดไกลแคน (peptidoglycan, PGN) กรดไทโคอิก (teichoic acids, TA) และ cell surface proteins โดย PGN และ TA เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์และองค์ประกอบสำคัญของพรีไบโอติก PGN เป็นโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง ห่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยกรด N-acetylmuramic และ N-acetylglucosamine ที่เชื่อมกันด้วยพันธะ glycosidic β -1,4 โดยกรด N-acetylmuramic ยังเชื่อมกับเปปไทด์สั้นอีกด้วย เปปไทด์ที่อยู่ติดกันจะสร้างการเชื่อมขวางซึ่งในที่สุดจะก่อตัวเป็นโครงสร้างคล้ายตาข่ายทำให้ช่วยป้องกันการแตกของเซลล์จากแรงดันออสโมติก (Teame et al., 2020) PGN มีบทบาทสำคัญในการควบคุมภูมิคุ้มกัน (Dhar et al., 2018) TA (Teichoic acids) ประกอบด้วย lipoteichoic acid (LTA) และ wall teichoic acid (WTA) เป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก และมีบทบาทในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ LTA มีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลของประจุบวกในผนังเซลล์ ป้องกันการอักเสบและจดจำตัวรับของเซลล์โฮสต์ WTA ช่วยรักษาเสถียรภาพของเซลล์ ควบคุมกลุ่มแบคทีเรียและการยึดเกาะ ส่งผลต่อความต้านทานเปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ ทั้ง LTA และ WTA สามารถเสริมการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวในการจับและทำลายเชื้อแบคทีเรีย

2.3 เมตาบอไลต์ของแบคทีเรีย

เมตาบอไลต์ของแบคทีเรียประกอบด้วยสารประกอบทางชีวภาพที่หลากหลายซึ่งสังเคราะห์โดยพรีไบโอติกในระหว่างการเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ เมตาบอไลต์เหล่านี้ประกอบด้วยสารต่าง ๆ มากมายรวมทั้งวิตามินบี วิตามินเค กรดอะมิโนอะโรมาติก กรดไขมันสายสั้น (Short-chain fatty acids: SCFAs) ได้แก่ อะซิเตท (acetate) โพรพิโอเนต (propionate) และบิวทีเรต (butyrate) เป็นผลิตภัณฑ์เมตาบอลิซึมหลักที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ในลำไส้

ของสัตว์น้ำ กลูตาไรโอนที่ผลิตโดยแบคทีเรียกรดแลกติก เปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ที่จัดอยู่ในกลุ่ม แบคทีริโอซิน (bacteriocins) และดีเฟนซิน (defensins) กรดฟีนอลแลกติก กรดอะมิโน-ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ไฟโตเอสโตรเจน พาราเบน (parahydroxybenzoic acid) และสารโพลีเมอร์นอกเซลล์ (extracellular polysaccharide, EPS) เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้เรียกอีกอย่างว่า ส่วนใสปราศจากเซลล์ (cell-free supernatants, CFS) (Ai et al., 2022; Dadi et al., 2022; Tao et al., 2023; Wang et al., 2021b; Yang et al., 2023)

แบคทีริโอซินเป็นกลุ่มของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายซึ่งรวมถึงโปรตีน เปปไทด์และรูปแบบสารตั้งต้น ซึ่งสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ ผ่านไรโบโซม (Zimina et al., 2020) โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะคือมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สายพันธุ์โปรไบโอติกภายในสกุลแลคโตบาซิลลัสและบาซิลลัส ถือเป็นสายพันธุ์ที่ผลิตแบคทีริโอซินที่ได้รับการศึกษามากที่สุด (Khochamit et al., 2015) แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัสมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในวงกว้างและมีบทบาทในการปรับการตอบสนองของภูมิคุ้มกัน (Mokoena et al., 2021)

กรดอินทรีย์เป็นกลุ่มย่อยสำคัญของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งทำหน้าที่ที่สำคัญต่อสุขภาพทางเดินอาหาร ซึ่งรวมถึงการลดค่า pH ในลำไส้และการยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรค (Dittoe et al., 2018) ประโยชน์ของกรดไขมันสายสั้น (SCFAs) ต่อโฮสต์นั้นมีหลากหลายแง่มุมครอบคลุมถึงการควบคุมสมดุลของระบบภูมิคุ้มกัน โดยเฉพาะในการกระตุ้นการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันแต่กำเนิด (innate immunity) และการควบคุมการอักเสบ (inflammation modulation) การแบ่งตัวของเซลล์แมโครฟาจ (macrophage) และเซลล์ T ควบคุม (Regulatory T cells, Treg) (Duan et al., 2023) SCFAs มีส่วนช่วยปรับสภาพแวดล้อมจุลภาคของลำไส้ เพิ่มการทำงานของผนังลำไส้และเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของเยื่อเมือก (Ma et al., 2022) การเสริม sodium butyrate ในอาหารปลาสามารถส่งเสริมโครงสร้างทางจุลพยาธิวิทยาของลำไส้ โดยเฉพาะการเพิ่มความยาวและความหนาแน่นของ villi ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่เพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซึมสารอาหาร การเพิ่มความหนาแน่นของ villi ยังสัมพันธ์กับการเพิ่มจำนวนของ goblet cells ซึ่งมีหน้าที่ผลิต mucin ทำให้เยื่อเมือกลำไส้มีความแข็งแรงมากขึ้น และป้องกันการเกาะของเชื้อโรค คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อการรักษาสมดุลระหว่างการอักเสบของลำไส้ (Hou et al., 2023) สารโพลีเมอร์นอกเซลล์ (EPS) หลั่งออกมาจากจุลินทรีย์ที่หลากหลาย มีบทบาทในการปรับเปลี่ยนจุลินทรีย์ในลำไส้และมีคุณสมบัติต้านการอักเสบ ด้านอนุมูลอิสระและควบคุมภูมิคุ้มกัน (Sheppard & Howell, 2016)

3. การเตรียมโพรไบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทำให้โพรไบโอติกที่มีชีวิตเป็นโพรไบโอติกมีหลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การฉายรังสีไอออนไนซ์ การฉายรังสียูวี การบำบัดด้วยแรงดันสูงและอัลตราโซนิก (Salminen et al., 2021) เทคโนโลยีที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบและประสิทธิภาพของโพรไบโอติกแตกต่างกัน โดยการทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนเป็นวิธีที่ใช้บ่อยที่สุด

3.1 การทำให้เซลล์ไม่ทำงานด้วยความร้อน

การทำให้โพรไบโอติกไม่ทำงานด้วยความร้อนขึ้นอยู่กับความทนทานของจุลินทรีย์ การสัมผัสความร้อนจะทำลายความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์โพรไบโอติก ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อการจับตัวกันของไรโบโซม การแตกของสายดีเอ็นเอ การยับยั้งเอนไซม์และการแข็งตัวของโปรตีน ควบคู่ไปกับการสูญเสียสารอาหารและไอออนที่สำคัญ (Cuevas-González et al., 2020) แบคทีเรียสายพันธุ์ต่างกันต้องการอุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 55°C ถึง 150°C Wang et al. (2021b) เตรียม *Lactococcus lactis* Z-2 โดยใช้ 100°C นาน 10 นาที ในขณะที่ Yang et al. (2023) ใช้การพาสเจอร์ไรซ์ที่ 70°C 30 นาที เตรียม *Akkermansia muciniphila*

3.2 การทำให้เซลล์ไม่ทำงานด้วยคลื่นอัลตราซาวนด์

การใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้เกิดโพรงอากาศ ส่งผลให้เซลล์แตกและโครงสร้างถูกทำลาย (Bariya et al., 2023) กลไกหลักของการทำให้จุลินทรีย์ไม่ทำงาน ได้แก่ การแตกของผนังเซลล์ การรบกวนเยื่อหุ้มเซลล์ การสร้างความเสียหายของดี

เอ็นเอ (Xiao et al., 2019) Wang et al. (2023b) ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง 350 วัตต์ 20 นาที เตรียมโพลีโบโอติกจากยีสต์แดง *Rhodotorula mucilaginosa* ในขณะที่ Tao et al. (2023) ผลิตโพลีโบโอติกจากเชื้อ *Bacillus subtilis* จากเครื่องรบกวนคลื่นเสียงความถี่สูง 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อผลิตโพลีโบโอติก LCBS1 นอกจากนี้ ยังมีการทดลองผลิตโพลีโบโอติกจาก *Enterococcus faecalis* และ *Bacillus cereus* ด้วยเสียงความถี่สูง เพื่อใช้เป็นอาหารกุ้งขาว (Ai et al., 2022; Li et al., 2021)

3.3 การทำให้ไม่ทำงานด้วย UV

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยทำให้ DNA เสื่อมสภาพและเกิด pyrimidine dimers ซึ่งขัดขวางกระบวนการถอดรหัส ส่งผลให้เซลล์ตาย (Desnous et al., 2010; Raeiszadeh & Taghipour, 2021; Bana's et al., 2020) UV ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น การฆ่าเชื้อในน้ำและอากาศ (Singh et al., 2021) รังสี UV ทำให้เกิดความผิดปกติของการสร้างดีเอ็นเอ ส่งผลให้การถอดรหัสและการแปลรหัสถูกยับยั้ง ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และนำไปสู่การตายของเซลล์และโปรตีนเสื่อมสภาพ (Bana's et al., 2020)

4. การใช้โพลีโบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

โพลีโบโอติกมีบทบาทสำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย Table 1 ได้สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับสายพันธุ์โพลีโบโอติกที่ใช้ วิธีการเตรียม แหล่งที่มาของสายพันธุ์เหล่านี้ ชนิดของสัตว์น้ำที่ทดลองใช้ ปริมาณที่ใช้ วิธีการใช้ และหน้าที่หลักของสายพันธุ์เหล่านี้ มีการใช้โพลีโบโอติกในการเลี้ยงสัตว์น้ำในปริมาณที่แตกต่างกันทั้งในรูปแบบที่เป็นสารละลายและผง แต่ส่วนใหญ่จะใช้ผสมอาหารที่ความเข้มข้น 0.1 – 1.0 กรัม/กิโลกรัม หรือ 10 – 100 มิลลิลิตร/กิโลกรัม

4.1 การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน

Rodriguez-Estrada et al. (2013) รายงานว่าโพลีโบโอติกมีบทบาทสำคัญในการป้องกันและรักษาโรคของสัตว์น้ำผ่านกลไกต่าง ๆ ดังนี้ (1) ยึดติดกับเซลล์เยื่อบุลำไส้เพื่อปรับการทำงานของภูมิคุ้มกันโดยตรง (2) ถูกส่งไปยังเซลล์ภูมิคุ้มกันโดยเซลล์บริเวณเยื่อบุผิว และ (3) ยึดเกาะกับเซลล์เดนไดรติก (dendritic) เพื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาภูมิคุ้มกันที่กระตุ้นการตอบสนองของภูมิคุ้มกัน ผลการควบคุมภูมิคุ้มกันของโพลีโบโอติกอาจเกิดจากเปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ โปรตีนจากแบคทีเรีย polysaccharides, LTA กรดไขมันสายสั้นหรือการรวมกันของสิ่งเหล่านี้ ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนเซลล์ภูมิคุ้มกัน เช่น เซลล์เดนไดรติกและเซลล์เม็ดเลือดขาวกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน

การปรับโครงสร้างของลำไส้ เยื่อเมือกและเซลล์เยื่อบุลำไส้ ซึ่งเป็นกลไกป้องกันสำคัญต่อการติดเชื้อ การเสริมโพลีโบโอติกช่วยเพิ่มความหนาของเยื่อเมือกและความยาวของไมโครวิลลี ลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Dawood, 2021; Zhang et al., 2020) การผสมแบคทีเรียกรดแลคติกที่ฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (เช่น *Lactobacillus farciminis* CNCM MA27/6R และ *L. rhamnosus* CNCM MA27/6B) ในอาหารปลากะพงขาว (*Dicentrarchus labrax*) สามารถปรับโครงสร้างของลำไส้ (Frou'el et al., 2007) การให้ *Lactobacillus paracasei* (06TCa22) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนกับปลาปักเป้าญี่ปุ่น (*Takifugu rubripes*) เป็นเวลาสามวัน พบว่าสามารถลดจำนวนเซลล์ *Vibrio harveyi* ที่มีชีวิตในเลือด ม้าม ตีระและไตเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Biswas et al., 2013)

Table 1. Biological responses of postbiotics in aquaculture

Postbiotic Strains	Type	Preparation method	Study Subject	Dosage	Application method	Administration route and duration	Effects of Postbiotic	References
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Dead bacteria (DB)	DB: water bath (65°C, 30 min)	Shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	10 mL/kg	Added to diets	Diet; 15 days	Effectively improved growth performance through the improvement of digestive enzyme activities and enterocyte height	(Zheng et al., 2018)
<i>Bacillus subtilis</i> LCBS1	Heat inactivated bacteria, HIB	HIB: heated by high-pressure steam sterilization pot at 121°C for 15 min	Bullfrog (<i>Lithobates catesbeianus</i>)	100 mL/kg	Added to diets	Diet; 56 days	Improved growth performance and immune responses of bullfrogs; ameliorated SM-induced enteritis in bullfrogs	(Tao et al., 2023)
<i>L. plantarum</i> product (ImmunoLP20)	Inactivated bacteria	Heat-killed	Black sea bream (<i>Acanthopagrus schlegelii</i>)	0.1 – 0.4 g/ kg	Added to diets	Diet; 8 weeks	Positive effects on growth, feed utilization, and serum health indicators	(Sagada et al., 2021)
Yeast, <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Inactivated bacteria	80 °C for 30 min	Nile Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	1 g/kg	Added to diets	Diet; 8 weeks	Enriched intestinal Lactococcus spp. numbers and protected the host against infection by <i>A. hydrophila</i>	(Ran et al., 2015)
SWFC (cultured supernatant mixture of <i>Cetobacterium somerae</i> and <i>Lactococcus lactis</i>)	Metabolite	Centrifuge and filter	Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	0.3 g/kg	Added to diets	Diet; 6 weeks	Improved host metabolic disorders and immunity	(Li et al., 2023)
<i>Bacillus cereus</i> A4	Fermentation supernatant	FS: microfiltration	Juvenile shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	10 mL/kg	Added to diets	Diet; 42 days	Improvements in growth, intestinal morphology, and digestive function	(Li et al., 2021)
<i>Lactobacillus casei</i> K17	Fermentation supernatant, FS	FS: 3000 xg for 10 min at 4°C	Largemouth bass (<i>Micropterus salmoides</i>)	100 mL/kg	Added to diets	Diet; 69 days	Improved growth performance, gut nutrient absorption capability, and nonspecific immunity	(Wang et al., 2021a, 2021b)

โพลีไบโอติกสามารถเพิ่มการตอบสนองของภูมิคุ้มกันทั้งแบบไม่จำเพาะและแบบจำเพาะในสัตว์น้ำ หลังจากปลา กะพงดำ (*Acanthopagrus schlegelii*) ได้รับอาหารเสริมโพลีไบโอติกจาก *L. plantarum* 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าโปรตีนในซีรัมและกิจกรรมไลโซไซม์มีค่าสูงกว่าปลาในกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (Sagada et al., 2021) การให้อาหารโพลีไบโอติก *Pediococcus pentosaceus* PP4012 อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 12 สัปดาห์ช่วยเพิ่มการทำงานของเซลล์จับกินสิ่งแปลกปลอมในกุ้ง (*L. vannamei*) (Ballantyne et al., 2023) การให้โพลีไบโอติก *B. subtilis* (HIB) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน 1.42 – 1.66 กรัมต่อกิโลกรัม แก่ปลาสาวย (*Pangasianodon hypophthalmus*) 60 วัน ช่วยปรับปรุงการทำงานของ lysozyme และ phagocytosis รวมถึงเพิ่มการทำงานของ SOD, CAT และ glutathione peroxidase (GPx) (Shawky et al., 2023) นอกจากนี้กบอเมริกันบูลฟร็อก (*Lithobates catesbeianus*) ที่ได้กินอาหารผสมโพลีไบโอติก *Bacillus subtilis* LCBS1 ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน เป็นเวลา 56 วัน ส่งผลให้ระดับคอมพลีเมนต์ในซีรัมและกิจกรรมของ AKP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Tao et al., 2023)

ปลาลิ้นหมา (*P. olivaceus*) วัยอ่อนที่ได้รับอาหารที่มีโพลีไบโอติกจาก *Pseudoalteromonas piscicida* 35 วัน พบว่า เอนไซม์ peroxidase (POD) และกิจกรรม lysozyme ในซีรัมเพิ่มขึ้น รวมถึงการแสดงออกของ IL-10 และ TNF- α ในม้ามที่เพิ่มขึ้น และการแสดงออกของ IL-1 β ในไตเพิ่มขึ้น (Wang et al., 2022) การให้ *Bacillus* sp. ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนแก่ปลาลิ้นหมา (*Paralichthys olivaceus*) สามารถกระตุ้นการทำงานของไลโซไซม์ (lysozyme) และเอนไซม์ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (superoxide dismutase) ในซีรัม รวมถึงเพิ่มการแสดงออกของปัจจัยภูมิคุ้มกัน (TNF- α , IL-6 และ IL-1 β) ในตับ ไตและเหงือก จึงช่วยเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อ *Streptococcus iniae* (Hasan et al., 2019)

ปลากระพงปากกว้าง (*Micropterus salmoides*) ที่ได้รับโพลีไบโอติกจาก *Lactobacillus casei* K17 69 วัน ระดับ lysozyme ในซีรัมและ SOD เพิ่มขึ้น 1.5 เท่าและ 1.2 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Wang et al., 2021a, 2021b) การให้โพลีไบโอติกจาก *Pseudomonas aeruginosa* strain VSG2 8 สัปดาห์แก่ปลาไน (*C. carpio*) ส่งผลให้กิจกรรมของ lysozyme กิจกรรมของ AKP และกิจกรรมของเส้นทางการเสริมทางเลือกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Giri et al., 2020) ผลการวิจัยเหล่านี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของโพลีไบโอติกในฐานะสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่มีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานโรคและสุขภาพโดยรวมในสัตว์น้ำหลากหลายชนิด

การเสริมด้วยโพลีไบโอติกจาก *L. plantarum* 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ช่วยเพิ่มการแสดงออกของ IgM และ C3 ใน *A. schlegelii* วัยอ่อนได้ (Sagada et al., 2022) การให้โพลีไบโอติกจาก *Psychrobacter* sp. SE6 ในปลากระรัง (*Epinephelus coioides*) เป็นเวลา 60 วัน ส่งผลให้การแสดงออกของ IgM และ Epinecidin-1 เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Sun et al., 2014) ปลาหมอสี (*Danio rerio*) ที่ได้รับโพลีไบโอติกจาก *L. plantarum* เป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่ามีศักยภาพในการกระตุ้นการตอบสนองภูมิคุ้มกันแบบ Th1/ILC1 โดยมีเปอร์เซ็นต์เซลล์ CD8 $^{+}$ ที่สูงขึ้นและการแสดงออกของ ยีน IFN- γ ที่เพิ่มขึ้น (Rawling et al., 2023)

4.2 ประสิทธิภาพการเติบโต

โพลีไบโอติกช่วยเพิ่มการดูดซึมสารอาหารและพลังงาน ปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้และรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Ai et al., 2022; Dawood et al., 2020) Tao et al. (2024) สรุปกลไกที่โพลีไบโอติกส่งเสริมการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ โดยแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการดังนี้

4.2.1 กระตุ้นความอยากอาหารและเพิ่มปริมาณสารอาหารที่สัตว์น้ำสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้สัตว์น้ำได้รับสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้นและส่งเสริมการเจริญเติบโต

4.2.2 กระตุ้นการยึดตัวของวิลลัสในลำไส้และการขยายพื้นที่ผิวในการดูดซึม ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสารอาหาร ช่วยให้เจริญเติบโตได้ดีขึ้น การให้ *Lactobacillus plantarum* (LP20) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน แก่ปลากระพงแดง (*Pagrus major*) ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการกินอาหาร (Dawood et al., 2015)

4.2.3 รักษาสมดุลของระบบนิเวศจุลินทรีย์ โดยการปรับองค์ประกอบของจุลินทรีย์ในลำไส้ ความสมดุลนี้สามารถนำไปสู่การดูดซึมสารอาหารที่เพิ่มขึ้นและการใช้สารอาหารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของร่างกาย การทดลองให้อาหารที่มีโพลีโอดีคจาก *L. plantarum* เป็นเวลา 56 วัน กับปลาเกะพงดำวัยอ่อน (*A. schlegelii*) ทำให้กิจกรรมของ trypsin ในลำไส้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตดีขึ้น อัตราแลกเนื้อลดลงจาก 1.36 ± 0.06 เหลือ 1.10 ± 0.05 (Sagada et al., 2022) โพลีโอดีคทำให้ประสิทธิภาพการกินอาหารเพิ่มขึ้น พบได้ในกุ้งแม่น้ำตะวันออก (*Macrobrachium nipponense*) (Wang et al., 2023a, 2023b) กุ้งขาว (*L. vannamei*) (Ballantyne et al., 2023) และปลาสาวย (*Pangasianodon hypophthalmus*) (Shawky et al., 2023)

การใช้โพลีโอดีคจาก *L. plantarum* (L-137) ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเพิ่มการแสดงออกของ mRNA ของ insulin-like growth factor-I (IGF-I) ซึ่งเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ควบคุมกระบวนการเจริญเติบโตได้อย่างมาก (Hassaan et al., 2021) นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีโอดีคเหล่านี้สามารถกระตุ้นกิจกรรมของ lipase และ protease จึงช่วยเพิ่มการใช้ไขมันและโปรตีนในอาหารซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นที่ให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต การทดลองให้อาหารปลิงทะเล (*Apostichopus japonicus*) เป็นเวลา 60 วัน พบว่าอาหารเสริมที่มีโพลีโอดีคจาก *L. plantarum* 0.05 กรัมต่อกิโลกรัม ช่วยเพิ่มกิจกรรมของ protease และ amylase ส่งผลให้ค่าของน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Yang et al., 2016) หลังจากกุ้งขาวกินโพลีโอดีคจาก *L. plantarum* 3 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 300 กรัม 15 วัน พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหาร (amylase, lipase, pepsin) ในตับอ่อนและลำไส้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Zheng et al., 2018)

4.3 ความสามารถในการปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อม

การใช้โพลีโอดีคผสมในอาหารของสัตว์น้ำสามารถลดความเครียดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความหนาแน่นของสัตว์น้ำสูง การขาดออกซิเจนและระดับความเค็มที่ลดลง ความผันผวนของอุณหภูมิ ความเค็ม หรือการสะสมของแอมโมเนีย จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการฟื้นตัวและการปรับตัว (Abdel-Latif et al., 2022) การให้โพลีโอดีคจาก *L. plantarum* (HK L-137) ผสมอาหารในปลานิล สามารถลดการหลั่งคอร์ติซอล (cortisol) ทำให้บรรเทาความเครียดที่เกิดจากการสัมผัสกับแอมโมเนียมคลอไรด์ (Van Nguyen et al., 2019) การเสริมด้วยโพลีโอดีคจาก *L. plantarum* ความเข้มข้น 1 กรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ปลาเกะพงแดง (*P. major*) ทนต่อความเครียดออกซิเดชันและสภาพความเค็มที่ลดลง (Dawood et al., 2016a) การให้โพลีโอดีค *Pediococcus pentosaceus* ในปลา *P. major* ทำให้กิจกรรมเปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) สูงขึ้นและมีความทนทานต่อความเค็มต่ำเพิ่มขึ้น (Dawood et al., 2016a, 2016b) การใช้โพลีโอดีคช่วยเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (SOD) และกลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (GPx) ซึ่งช่วยลดความเสียหายจากความเครียดออกซิเดชันที่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้โพลีโอดีคยังสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับภูมิคุ้มกัน เช่น อินเตอร์ลิวคิน-1 เบตา (IL-1 β) และโปรตีนฮีทช็อก 70 (HSP70) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถของปลาต่อการตอบสนองต่อความเครียดและการติดเชื้อ (Sudhakaran et al., 2022)

4.4 ความต้านทานต่อเชื้อโรค

โพลีโอดีคช่วยฟื้นฟูการทำงานของลำไส้โดยลดการอักเสบและกระตุ้นการผลิตเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ ซึ่งช่วยยับยั้งเชื้อก่อโรค (Hernandez-Granados & Franco-Robles, 2020) การศึกษาในสัตว์น้ำ เช่น ปลาม้าลาย ปลาไนและกุ้ง พบว่าการเสริมโพลีโอดีคช่วยปรับสมดุลจุลินทรีย์และเพิ่มการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกัน (Li et al., 2023; Yu et al., 2023; Wang et al., 2023b)

การให้โพลีโอดีคที่ได้จาก *L. plantarum* ผสมอาหารกุ้งก้ามกรามสามารถเพิ่มอัตราการรอดหลังจากการติดเชื้อ *Aeromonas hydrophila* อย่างเห็นได้ชัด (Dash et al., 2015) การให้อาหารผสมโพลีโอดีคจาก *Clostridium butyricum* CBG01 แก่กุ้งขาวสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการติดเชื้อ *V. parahaemolyticus* (Luo et al., 2021) กุ้งขาว

ที่ได้รับอาหารผสมโพลีโอดีจาก *Bacillus cereus* A4 ช่วยลดอัตราการตาย หลังจากการทดสอบกับเชื้อ *V. parahaemolyticus* (Li et al., 2021) นอกจากนี้ปลาชนิดที่ได้รับอาหารผสมโพลีโอดีจากยีสต์ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันการติดเชื้อ *A. hydrophila* (Ran et al., 2015)

5. บทสรุป ความท้าทายและโอกาส

การประยุกต์ใช้โพลีโอดีในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโต เสริมสร้างภูมิคุ้มกันและเพิ่มอัตราการรอดของสัตว์น้ำ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการดื้อยาปฏิชีวนะหรือความเสี่ยงจากการใช้ จุลินทรีย์มีชีวิต นอกจากนี้โพลีโอดียังมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมสารอาหาร รวมถึงกระตุ้นกลไก การควบคุมการเจริญเติบโตภายในลำไส้ของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามการนำโพลีโอดีไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงเผชิญกับ ข้อจำกัดที่สำคัญ ซึ่งสามารถสรุปเป็นประเด็นหลักได้ดังนี้

1) องค์ประกอบและกลไกการออกฤทธิ์

การทำความเข้าใจองค์ประกอบทางชีวภาพและกลไกการออกฤทธิ์ของโพลีโอดีในระดับโมเลกุลเป็นพื้นฐาน สำคัญในการควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยควรมุ่งเน้นการคัดกรองสารออกฤทธิ์หลัก การศึกษาเชิง ฟังก์ชันของสาร และการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่เฉพาะเจาะจง

2) การกำหนดระดับการใช้ที่เหมาะสม

ความหลากหลายของสายพันธุ์จุลินทรีย์ แหล่งผลิต และชนิดของสัตว์น้ำ ทำให้การกำหนดปริมาณและความถี่ในการ ใช้ยังคงเป็นเรื่องท้าทาย การศึกษาที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขนาดโดส และการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนในแต่ละ ระบบการเลี้ยงจึงมีความจำเป็น

3) การศึกษาภายใต้สภาวะการเลี้ยงจริง

ข้อมูลจำนวนมากในปัจจุบันยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการหรือระบบกึ่งควบคุม การศึกษาภายใต้เงื่อนไขการเลี้ยงจริง โดยเฉพาะในด้านเศรษฐศาสตร์การผลิตและผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ จะช่วยให้การใช้โพลีโอดีมีความเป็นไปได้ในเชิง พาณิชย์มากขึ้น

4) ความปลอดภัยและการยอมรับของผู้บริโภค

แม้โพลีโอดีจะมีความปลอดภัยสูงกว่าจุลินทรีย์มีชีวิต แต่ยังคงจำเป็นต้องมีการประเมินสารตกค้าง ความเป็นพิษ เฉียบพลันและเรื้อรัง ตลอดจนผลกระทบระยะยาวต่อผู้บริโภค เพื่อรองรับการขยายการใช้ในระดับตลาด

5) การพัฒนาและการบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่น

ควรส่งเสริมการพัฒนาสูตรโพลีโอดีที่หลากหลาย ทั้งในแง่สายพันธุ์จุลินทรีย์ วิธีการผลิต และการผสมผสานกับ สารเสริมอื่น เช่น โปรไบโอติก แร่ธาตุ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ที่อาจเสริมฤทธิ์หรือเกิดผลขัดแย้งต่อกัน

แนวโน้มในอนาคตควรเน้นการพัฒนาโพลีโอดีเฉพาะกลุ่มที่เหมาะสมกับชนิดของสัตว์น้ำ เป้าหมายของการใช้ งาน (เช่น การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน หรือการเร่งการเจริญเติบโต) และสภาพแวดล้อมของระบบการเลี้ยง นอกจากนี้การพัฒนา เทคโนโลยีการสกัด การทำแห้ง และการห่อหุ้มที่สามารถรักษาสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ รวมถึงการบูรณาการกับ เทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยี จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งมอบสารออกฤทธิ์อย่างตรงเป้าหมาย การวิเคราะห์ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนจากการลงทุน ถือเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างแรงจูงใจให้เกษตรกรและผู้ผลิต ยอมรับและนำเทคโนโลยีโพลีโอดีไปใช้จริงในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการวิจัย จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2568 โดยการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

7. เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Latif, H.M.R., Yilmaz, E., Dawood, M.A.O., Ringø, E., Ahmadifar, E. & Yilmaz, S. (2022). Shrimp vibriosis and possible control measures using probiotics, postbiotics, prebiotics, and synbiotics: A review. *Aquaculture*, 551, 737951.
- Aguilar-Toalá, J.E., García-Varela, R., García, H.S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A.F., Vallejo-Cordoba, B. & Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105-114.
- Ai, Y., Cai, X., Liu, L., Li, J., Long, H., Ren, W., Huang, A.Y., Zhang, X. & Xie, Z.Y. (2022). Effects of different dietary preparations of *Enterococcus faecalis* F7 on the growth and intestinal microbiota of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 53(8), 3238-3247.
- Ang, Q. Y., Alexander, M., Newman, J. C., Tian, Y., Cai, J., Upadhyay, V., Turnbaugh, J. A., Verdin, E., Hall, K. D., Leibel, R. L., Ravussin, E., Rosenbaum, M., Patterson, A. D., & Turnbaugh, P. J. (2020). Ketogenic Diets Alter the Gut Microbiome Resulting in Decreased Intestinal Th17 Cells. *Cell*, 181(6), 1263–1275.e16.
- Assefa, A., & Abunna, F. (2018). Maintenance of Fish Health in Aquaculture: Review of Epidemiological Approaches for Prevention and Control of Infectious Disease of Fish. *Veterinary medicine international*, 2018, 5432497.
- Ballantye, R, Lee, J.W., Wang, S.T., Lin, J.S., Tseng, D.Y., Liao, Y.C., Chang, H.T., Lee, T.Y., & Liu, C.H. (2023). Dietary administration of a postbiotic, heat-killed *Pediococcus pentosaceus* PP4012 enhances growth performance, immune response and modulates intestinal microbiota of white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Fish & Shellfish Immunology*, 139, 108882.
- Banaś, A.K., Zgłobicki, P., Kowalska, E., Bażant, A., Dziga, D., & Strzałka, W. (2020) All you need is light. Photorepair of uv-induced pyrimidine dimers. *Genes*, 4(11), 1304.
- Bariya, A. R., Rathod, N. B., Patel, A. S., Nayak, J. K. B., Ranveer, R. C., Hashem, A., Abd Allah, E. F., Ozogul, F., Jambrak, A. R., & Rocha, J. M. (2023). Recent developments in ultrasound approach for preservation of animal origin foods. *Ultrasonics sonochemistry*, 101, 106676.
- Biswas, G., Korenaga, H., Nagamine, R., Kawahara, S., Takeda, S., Kikuchi, Y., Dashnyam, B., Yoshida, T., Kono, T., & Sakai, T. (2013). Elevated cytokine responses to *Vibrio harveyi* infection in the Japanese pufferfish (*Takifugu rubripes*) treated with *Lactobacillus paracasei* spp. paracasei (06Tca22) isolated from the Mongolian dairy product. *Fish & Shellfish Immunology*, 35(3), 756-765.
- Collado, M.C., Vinderola, G., & Salminen, S. (2019). Postbiotics: facts and open questions. A position paper on the need for a consensus definition. *Beneficial microbes*, 10(7), 711–719.
- Cuevas-González, P. F., Liceaga, A. M., & Aguilar-Toalá, J. E. (2020). Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications. *Food research international* (Ottawa, Ont.), 136, 109502.
- Dadi, N.C.T., Yatip, P., Krataitong, K., Unagul, P., Suetrong, S., Preedanon, S., Klayuban, A., Sangtuan, T., Sakayaroj, J., & Soowannayan, J. (2022). Culture medium from a marine endophytic fungus protects shrimp against acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture*, 737528.
- Dash, G., Raman, R. P., Pani Prasad, K., Makesh, M., Pradeep, M. A., & Sen, S. (2015). Evaluation of paraprobiotic applicability of *Lactobacillus plantarum* in improving the immune response and disease protection in giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man, 1879). *Fish & shellfish immunology*, 43(1), 167–174.

- Dawood, M. A., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., El Basuini, M. F., Hossain, M. S., Nhu, T. H., Dossou, S., & Moss, A. S. (2016b). Effects of dietary supplementation of *Lactobacillus rhamnosus* or/and *Lactococcus lactis* on the growth, gut microbiota and immune responses of red sea bream, *Pagrus major*. *Fish & shellfish immunology*, 49, 275–285.
- Dawood, M.A.O. (2021) Nutritional immunity of fish intestines: important insights for sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 642–663.
- Dawood, M.A.O., Koshio, S., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2016a). Immune responses and stress resistance in red sea bream, *Pagrus major*, after oral administration of heat-killed *Lactobacillus plantarum* and vitamin C. *Fish & Shellfish Immunology*, 54, 266-275.
- Dawood, M.A.O., Koshio, S., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2015). Interaction effects of dietary supplementation of heat-killed *Lactobacillus plantarum* and β -glucan on growth performance, digestibility and immune response of juvenile red sea bream, *Pagrus major*. *Fish & Shellfish Immunology*, 45(1), 33-42.
- Dawood, M.A.O., Magouz, F.I., Salem, M.F.I., Elbially, Z.I., & Abdel-Daim, H.A. (2020). Synergetic effects of *Lactobacillus plantarum* and β -glucan on digestive enzyme activity, intestinal morphology, growth, fatty acid, and glucose-related gene expression of genetically improved farmed Tilapia. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12(2):389-399.
- Desnous, C., Guillaume, D., & Clivio, P. (2010). Spore photoproduct: a key to bacterial eternal life. *Chemical reviews*, 110(3), 1213–1232.
- Dhar, S., Kumari, H., Balasubramanian, D., & Mathee, K. (2018). Cell-wall recycling and synthesis in *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa* - their role in the development of resistance. *Journal of medical microbiology*, 67(1), 1–21.
- Dianawati, D., Mishra, V., & Shah, N. P. (2016). Viability, Acid and Bile Tolerance of Spray Dried Probiotic Bacteria and Some Commercial Probiotic Supplement Products Kept at Room Temperature. *Journal of food science*, 81(6), M1472–M1479.
- Dittoe, D. K., Ricke, S. C., & Kiess, A. S. (2018). Organic Acids and Potential for Modifying the Avian Gastrointestinal Tract and Reducing Pathogens and Disease. *Frontiers in veterinary science*, 5, 216.
- Duan, H., Wang, L., Huangfu, M., & Li, H. (2023). The impact of microbiota-derived short-chain fatty acids on macrophage activities in disease: Mechanisms and therapeutic potentials. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 165, 115276.
- Giri, S. S., Jun, J. W., Yun, S., Kim, H. J., Kim, S. G., Kim, S. W., Woo, K. J., Han, S. J., Oh, W. T., Kwon, J., Sukumaran, V., & Park, S. C. (2020). Effects of dietary heat-killed *Pseudomonas aeruginosa* strain VSG2 on immune functions, antioxidant efficacy, and disease resistance in *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 514, 734489.
- Hasan, M. T., Jang, W. J., Lee, B. J., Kim, K. W., Hur, S. W., Lim, S. G., Bai, S. C., & Kong, I. S. (2019). Heat-killed *Bacillus* sp. SJ-10 probiotic acts as a growth and humoral innate immunity response enhancer in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Fish & shellfish immunology*, 88, 424–431.
- Hassaan, M.S., Mohammady, E.Y., Soaudy, M.R., Elashry, M.A., Moustafa, M.M.A., Wassel, M.A., El-Garhy, H.A.S., El-Haroun, E.R., & Elsaied, H.E. (2021). Synergistic effects of *Bacillus pumilus* and exogenous protease on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth, gut microbes, immune response and gene expression fed plant protein diet. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114892.
- Hernández-Granados, M. J., & Franco-Robles, E. (2020). Postbiotics in human health: Possible new functional ingredients?. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 137, 109660.
- Hou, D., Li, M., Li, P., Chen, B., Huang, W., Guo, H., Cao, J., & Zhao, H. (2023). Effects of sodium butyrate on growth performance, antioxidant status, inflammatory response and resistance to hypoxic stress in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Frontiers in immunology*, 14, 1265963.
- Khochamit, N., Siripornadulsil, S., Sukon, P., & Siripornadulsil, W. (2015). Antibacterial activity and genotypic-phenotypic characteristics of bacteriocin-producing *Bacillus subtilis* KKU213: potential as a probiotic strain. *Microbiological Research*, 170, 36-50.

- Li, H., Fan, S., Gao, Y., Cai, Y., Chu, Z., & Wang, L. (2021). Evaluation of modulatory properties of *Bacillus cereus* isolated from the gut of *Litopenaeus vannamei* on growth, intestinal morphology, digestive enzyme activities, immune responses and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Research*, 52(3), 1299-1310.
- Li, S., Yang, H., Jin, Y., Hao, Q., Liu, S., Ding, Q., Yao, Y., Yang, Y., Ran, C., Wu, C., Li, S., Cheng, K., Hu, J., Liu, H., Zhang, Z., & Zhou, Z. (2023). Dietary cultured supernatant mixture of *Cetobacterium somerae* and *Lactococcus lactis* improved liver and gut health, and gut microbiota homeostasis of zebrafish fed with high-fat diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 142, 109139.
- Luo, K., Tian, X., Wang, B., Wei, C., Wang, L., Zhang, S., Liu, Y., Li, T., & Dong, S. (2021). Evaluation of paraprobiotic applicability of *Clostridium butyricum* CBG01 in improving the growth performance, immune responses and disease resistance in Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Aquaculture*, 544, 737041.
- Ma, J., Piao, X., Mahfuz, S., Long, S., & Wang, J. (2021). The interaction among gut microbes, the intestinal barrier and short chain fatty acids. *Animal nutrition (Zhongguo xu mu shou yi xue hui)*, 9, 159–174.
- Mokoena, M. P., Omatola, C. A., & Olaniran, A. O. (2021). Applications of Lactic Acid Bacteria and Their Bacteriocins against Food Spoilage Microorganisms and Foodborne Pathogens. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(22), 7055.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O., & Adediji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public health reviews*, 39, 21.
- Prachachat. (2023). Thailand Breaks 10-Year Record for Fishery Exports, Earning 240 Billion Baht in Revenue [Online]. Retrieved May 31, 2025, from: <https://www.prachachat.net/economy/news-1743956>. (in Thai)
- Rad, A.H., Aghebati Maleki, L., Samadi Kafil, H., Fathi Zavoshti, H., & Abbasi, A. (2020). Postbiotics as novel health-promoting ingredients in functional foods. *Health promotion perspectives*, 10(1), 3–4.
- Raeiszadeh, M. & Taghipour, F. (2021). Inactivation of microorganisms by newly emerged microplasma UV lamps. *Chemical Engineering Journal*, 413, 127490.
- Ran, C., Huang, L., Liu, Z., Xu, L., Yang, Y., Tacon, P., Auclair, E., & Zhou, Z. (2015). A Comparison of the Beneficial Effects of Live and Heat-Inactivated Baker's Yeast on Nile Tilapia: Suggestions on the Role and Function of the Secretory Metabolites Released from the Yeast. *PloS one*, 10(12), e0145448.
- Rawling, M., Schiavone, M., Mugnier, A., Leclercq, E., Merrifield, D., Foey, A., & Apper, E. (2023). Modulation of Zebrafish (*Danio rerio*) Intestinal Mucosal Barrier Function Fed Different Postbiotics and a Probiotic from *Lactobacilli*. *Microorganisms*, 11(12), 2900.
- Ringø, E., Van Doan, H., Lee, S. H., Soltani, M., Hoseinifar, S. H., Harikrishnan, R., & Song, S. K. (2020). Probiotics, lactic acid bacteria and bacilli: interesting supplementation for aquaculture. *Journal of applied microbiology*, 129(1), 116–136.
- Rodriguez-Estrada, U., Satoh, S., Haga, S., Fushimi, H., Sweetman, J. (2013). Effects of Inactivated *Enterococcus faecalis* and Mannan Oligosaccharide and Their Combination on Growth, Immunity, and Disease Protection in Rainbow Trout. *North American Journal of Aquaculture*, 75(3), 416–428.
- Sagada, G., Gray, N., Wang, L., Xu, B., Zheng, L., Zhong, Z., Ullah, S., Tegomo, A.F., & Shao, O. (2021). Effect of dietary inactivated *Lactobacillus plantarum* on growth performance, antioxidative capacity, and intestinal integrity of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) fingerlings. *Aquaculture*, 535, 736370.
- Sagada, G., Wang, L., Xu, B., Tegomo, F.A., Chen, K., Zheng, L., Sun, Y., Liu, Y., Yang, Y., Ullah, S., Shao, Q. (2022). Synergistic Effect of Dietary Inactivated *Lactobacillus plantarum* and Berberine Supplementation on Growth Performance, Antioxidant Capacity, and Immune Function of Juvenile Black Sea Bream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Aquaculture Nutrition*, 2022, 053724.
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature reviews. Gastroenterology & hepatology*, 18(9), 649–667.

- Shawky, A. Abd El-Razek, I. El-Halawany, R. & Zaineldin, A. (2023). Dietary effect of heat-inactivated *Bacillus subtilis* on the growth performance, blood biochemistry, immunity, and antioxidative response of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Aquaculture*, 575, 739751.
- Sheppard, D. C., & Howell, P. L. (2016). Biofilm Exopolysaccharides of Pathogenic Fungi: Lessons from Bacteria. *The Journal of biological chemistry*, 291(24), 12529–12537.
- Singh, H., Bhardwaj, S.K., Khatri, M., Kim, K.H., & Bhardwaj, N. (2021). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128084.
- Sudhakaran, G., Guru, A, Muthu, H.D., & Murugan, R. (2022). Molecular properties of postbiotics and their role in controlling aquaculture diseases. *Aquaculture Research*, 53(9), 1 - 17.
- Sun, Y.Z., Xia, H.Q., Yang, H.L., Wang, Y.L., & Zou, W.C. (2014). TLR2 signaling may play a key role in the probiotic modulation of intestinal microbiota in grouper *Epinephelus coioides*. *Aquaculture*, 430, 50-56.
- Tao, B., Zhang, C., Li, X., Li, X., Lu, K., Song, K., & Wang, L. (2023). Postbiotics of *Bacillus subtilis* LCBS1 have beneficial effects on bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*). *Aquaculture*, 574, 739699.
- Tao, L.T., Lu H., Xiong J., Zhang L., Sun W.W., & Shan X.F. (2024). The application and potential of postbiotics as sustainable feed additives in aquaculture, *Aquaculture*, 592, 741237.
- Teame, T., Wang, A, Xie, M., Zhang, Z., Yang, Y, Ding, Q., Gao, C., Olsen, R.E., Ran, C., & Zhou Z. (2020). Paraprobiotics and Postbiotics of Probiotic Lactobacilli, Their Positive Effects on the Host and Action Mechanisms: A Review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 570344.
- Tsilingiri, K., & Rescigno, M. (2013). Postbiotics: what else?. *Beneficial microbes*, 4(1), 101–107.
- Van Nguyen, N., Onoda, S., Van Khanh, T., Duy Hai, P., Trung, N.T., Hoang, L., Koshio, S. (2019). Evaluation of dietary Heat-killed *Lactobacillus plantarum* strain L-137 supplementation on growth performance, immunity and stress resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 498, 371-379.
- Wang, A., Ran, C., Wang, Y., Zhang, Z., Ding, Q., Yang, Y., Olsen, R. E., Ringø, E., Bindelle, J., & Zhou, Z. (2019a). Use of probiotics in aquaculture of China-a review of the past decade. *Fish & shellfish immunology*, 86, 734–755.
- Wang, B., Liu, Y., Luo, K., Zhang, S., Wei, C., Wang, L., Qiu, Y, & Tian, X. (2023a). ‘Biotic’ potential of the red yeast *Rhodotorula mucilaginosa* strain JM-01 on the growth, shell pigmentation, and immune defense attributes of the shrimp, *Penaeus vannamei*. *Aquaculture*, 572, 739543.
- Wang, F., Ghonimy, A., Wang, X., Zhang, Y., Zhu, N. (2022). Heat-killed *Pseudoalteromonas piscicida* 2515 decreased bacterial dose and improved immune resistance against *Vibrio anguillarum* in juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture Research*, 53(13), 4724-4739.
- Wang, J., Li, S., Jian, Y., Song, J., Zheng, J., Zhou, D., Kong, Y., Limbu, S.M., Ye, J., & Ding, Z. (2023b). Dietary postbiotics supplementation improves growth, survival rate, antioxidant capacity, non-specific immunity and gut health of juvenile oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*). *Aquaculture Reports*, 33, 101771.
- Wang, J., Zhu, Z., Li, R., Wang, X., Leng, X., & Chen, L. (2021a). Impact of supplementary *Lactobacillus casei* K17 on growth and gut health of largemouth bass *Micropterus salmoides*. *Aquaculture Reports*, 20, 100734.
- Wang, J., Feng, J., Liu, S., Cai, Z., Song, D., Yang, L., Nie, G. (2021 b). The probiotic properties of different preparations using *Lactococcus lactis* Z-2 on intestinal tract, blood and hepatopancreas in *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 543, 736911.
- Wang, K., Cao, G., Zhang, H., Li, Q., & Yang, C., (2019b). Effects of *Clostridium butyricum* and *Enterococcus faecalis* on growth performance, immune function, intestinal morphology, volatile fatty acids, and intestinal flora in a piglet model. *Food & function*, 10(12), 7844–7854.
- Xiao, R., Liu, K., Bai, L., Minakata, D., Seo, Y., Göktas, R.K, Dionysiou, D.D., Tang, C.J., Wei, Z., & Spinney, R. (2019). Inactivation of pathogenic microorganisms by sulfate radical: Present and future. *Chemical Engineering Journal*, 371, 222-232.

- Yang, G., Jiang, A., Cai, H., You, F., Wu, S., Zhang, Y., Zhang, X., Shen, Y., Chang, X., Huc, W., Li, K., & Meng, X. (2023). Supplementation with *Akkermansia muciniphila* improved glucose metabolism disorder in common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Aquaculture*, 572, 739465.
- Yang, H., Han, Y., Ren, T., Jiang, Z., Wang, F., & Zhang, Y. (2016). Effects of dietary heat-killed *Lactobacillus plantarum* L-137 (HK L-137) on the growth performance, digestive enzymes and selected non-specific immune responses in sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. *Aquaculture Research*, 47(9), 2814-2824.
- Yu, Z., Hao, Q., Liu, S.B., Zhang, Q.S., Chen, X.Y., Li, S.H., Ran, C., Yang, Y.L., Teame, T., Zhang, Z., & Zhou, Z.G. (2023). The positive effects of postbiotic (SWF concentration®) supplemented diet on skin mucus, liver, gut health, the structure and function of gut microbiota of common carp (*Cyprinus carpio*) fed with high-fat diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 135, 108681.
- Zheng, X., Duan, Y., Dong, H., & Zhang, J. (2018). Effects of Dietary *Lactobacillus plantarum* on Growth Performance, Digestive Enzymes and Gut Morphology of *Litopenaeus vannamei*. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 10(3), 504–510.
- Zimina, M., Babich, O., Prosekov, A., Sukhikh, S., Ivanova, S., Shevchenko, M., & Noskova, S. (2020). Overview of Global Trends in Classification, Methods of Preparation and Application of Bacteriocins. *Antibiotics*, 9(9), 553.