

ปริมาณสารฟีนอลิกรวมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ องค์ประกอบทางชีวเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปผสมสารสกัดสาหร่ายเตา

วราทิพย์ ดลสุจิตต์^{1*}, วรรณพร แซ่เตีย¹, นฤมล บุญกระจ่าง² และ รวินิภา ศรีมูล³

¹สาขาวิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี 20110

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ชลบุรี 20110

³สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

*Corresponding author: waratit_do@rmutto.ac.th

(Received: May 31, 2025; Revised: November 14, 2025; Accepted: November 17, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางชีวภาพและทางกายภาพของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปที่ผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.) ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0, 5, 10 และ 20% โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกรวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ องค์ประกอบทางชีวเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูป ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณสารฟีนอลิกรวมในอาหารปลาเม็ดมีค่ามากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) ขณะที่ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$) โดยความเข้มข้น 20% ให้ค่าสูงที่สุด ส่วนองค์ประกอบทางชีวเคมี ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อใย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$) คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซับน้ำและความเป็นฝุ่น มีแนวโน้มลดลงตามระดับสารสกัดที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ($P < .05$) ส่วนความสามารถในการลอยตัว ความคงทน และความหนาแน่นของอาหารไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสารสกัดจากสาหร่ายเตาจึงมีศักยภาพในการเป็นส่วนผสมทางเลือกเพื่อพัฒนาอาหารปลาให้มีคุณภาพสูง เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และส่งเสริมสุขภาพปลาในระบบการเลี้ยงเชิงพาณิชย์ได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สารสกัดสาหร่ายเตา; สารฟีนอลิกรวม; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; คุณสมบัติทางกายภาพ; อาหารปลา

Total phenolic content, antioxidant activity, biochemical composition and physical properties of fish feed pellets supplemented macroalgae (*Spirogyra* sp.) extract

Waratit Donsujit^{1*}, Wannaporn Saetia¹, Narumon Boonkrachang² and Rawinipa Srimoon³

¹Division of Fisheries, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi 20110

²Division of Agriculture Engineering and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi 20110

³Division of Animal Production Technology, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi 22210

*Corresponding author: waratit_do@rmutto.ac.th

(Received: May 31, 2025; Revised: November 14, 2025; Accepted: November 17, 2025)

Abstract

The objective of this research was to investigate the biochemical and physical properties of fish feed pellets supplemented with crude extract of freshwater green macroalgae (*Spirogyra* sp.) at different concentrations (0, 5, 10, and 20%). Analyses were conducted to determine the total phenolic content, antioxidant activity, biochemical composition, and physical properties of the formulated pellets. Results revealed that total phenolic content in fish feed pellets increased with higher extract concentrations and showed a statistically significant difference ($P < .05$). In contrast, the antioxidant activity exhibited a similar increasing trend; however, the differences were not statistically significant ($P > .05$). The highest values were observed at 20% concentration. Biochemical parameters such as protein, carbohydrate, and fiber content slightly increased, although not significantly ($P > .05$). In terms of physical properties, water absorption and dust percentage significantly decreased ($P < .05$) with increasing extract concentration, while water stability, floating ability, and bulk density remained statistically unchanged. These findings indicate that *Spirogyra* extract possesses potential as a natural additive in aquafeed to enhance nutritional value and support fish health, providing a promising and sustainable approach for commercial fish farming.

Keywords: *Spirogyra* extract; Total phenolic content; Antioxidant activity; Physical properties; Fish feed pellets



บทนำ

สาหร่ายเตาหรือเทาน้ำ เป็นสาหร่ายสีเขียวน้ำจืดขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเส้นผม ไม่แตกแขนง มีสีเขียวอ่อนจนกระทั่งถึงสีเขียวเข้ม มีเมือกปกคลุม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Spirogyra* sp. พบในแหล่งน้ำแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จัดเป็นสาหร่ายที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมด้วยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Peerapornpisal et al., 2009; Tipnee et al., 2015; Wongsawad and Peerapornpisal, 2015; Yosboonrung et al., 2020)

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือสารประกอบฟีนอล มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติในพืช ผัก ผลไม้ สมุนไพร รวมทั้งในสาหร่าย ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิดที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเป็นสารสังเคราะห์ เช่น บิวทิลเลทไฮดรอกซีอะนิโซล (butylated hydroxyanisole หรือ BHA) และบิวทิลเลทไฮดรอกซีโทลูอีน (butylated hydroxytoluene หรือ BHT) อาจมีการสะสมได้เมื่อรับประทานเข้าไปในร่างกายเป็นเวลานาน ๆ และมีผลทำลายการทำงานของตับรวมทั้งเป็นสารก่อมะเร็ง (Sun et al., 2011) ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มที่จะเลือกใช้สารต้านอนุมูลอิสระจากพืชธรรมชาติเนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่า มีการศึกษาพบว่าสารสกัดจากสาหร่ายเตามีฤทธิ์ทางชีวภาพและแสดงประสิทธิภาพเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณสูงและมีประสิทธิภาพ (Hu and Kitts, 2000; Nalin et al., 2005; Ganesan et al., 2008; Peerapornpisal et al., 2012; Junthip et al., 2013) มีการนำสาหร่ายเตามาใช้ประโยชน์ในการส่งเสริมสุขภาพของสัตว์น้ำ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเสริมสาหร่ายเตาในอาหารเลี้ยงปลาไนที่ระดับ 2.5% ทำให้ปลาไนมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดเพิ่มขึ้นดีกว่าระดับอื่น ซึ่งกลไกการออกฤทธิ์ของสาหร่ายเตาอาจมาจากการควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระให้อยู่ในระดับสมดุลด้วยสารต้านอนุมูลอิสระที่ประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกในสาหร่ายเตา หรือจากการเพิ่มขึ้นของเอนไซม์ในการป้องกันอนุมูลอิสระ เช่น เอนไซม์ SOD, CAT และ GSH อย่างไรก็ตามจากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายเตาสามารถช่วยส่งเสริมสุขภาพสัตว์น้ำและนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงสัตว์น้ำได้ (ธีระวัฒน์ รัตนพจน์ และคณะ, 2555) การเพาะเลี้ยงมักเกิดการสะสมของของเสียในระบบการเลี้ยง ปัญหาคุณภาพน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดความเครียด และโรคระบาดได้ง่าย ซึ่งมีรายงานการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการเสริมสารต้านอนุมูลอิสระในอาหารสัตว์น้ำโดยเฉพาะในสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่มีมูลค่าสูง เป็นสิ่งที่น่าสนใจและเป็นอีกแนวทางหนึ่งเพื่อส่งเสริมสุขภาพ กระตุ้นภูมิคุ้มกัน ป้องกันโรค ทำให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำที่มีคุณภาพดี เพิ่มการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำให้ดีขึ้น โตเร็ว มีอัตราการรอดสูง และลดต้นทุนในการเลี้ยงได้ (Jahazi et al., 2020; Gunathilake et al., 2022; Hu et al., 2025) ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์สารสกัดที่มีคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระที่ผลิตมาจากวัตถุดิบธรรมชาติและนำมาใช้กับอาหารปลา จึงเป็นทางเลือกที่มีความปลอดภัยกว่าสารเคมีสังเคราะห์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกรวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ องค์ประกอบทางชีวเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปที่ผสมสารสกัดสาหร่ายเตาในระดับที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้ในสัตว์น้ำอื่น ๆ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสาหร่ายเตาผง

นำสาหร่ายเตาสดจากโรงเรือนของฟาร์มสาหร่ายและปลาสวยงาม สาขาวิชาประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก มาล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง นำสาหร่ายเตาแห้งที่ได้ทำให้เป็นผงด้วยเครื่องบดไฟฟ้า รุ่น DPA130 ยี่ห้อ Tafal จนละเอียด เก็บรักษาผงสาหร่ายเตาในบรรจุภัณฑ์ที่บดแสงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การสกัดสาหร่ายเตาและผสมสารสกัดหยาบในอาหารปลา

นำสาหร่ายเตาผง 100 กรัม ผสมเอทานอล 70% ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ทำซ้ำ 2 ครั้ง และระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ รุ่น R-100 ยี่ห้อ BUCHI นำวัสดุผงสาหร่ายเตาที่ได้มาเจือจางด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้มีความเข้มข้น 5, 10 และ 20% และฉีดพ่นบนผิวอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปชนิดลอยน้ำ ยี่ห้อ ไฮเกรต 9950 โดยระบุคุณค่าทางโภชนาการ คือ โปรตีนไม่น้อยกว่า 30% ไขมันไม่น้อยกว่า 3% คาร์โบไฮเดรตไม่น้อยกว่า 8% ความชื้นไม่น้อยกว่า 12% ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ SGE ที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

นำวัสดุผงของสารสกัดสาหร่ายเตาไปวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu phenol reagent ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Wong et al. (2006) ปิเปตสารละลายมาตรฐาน gallic acid และสารสกัดสาหร่ายเตา ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 10% v/v Folin-Ciocalteu phenol reagent ลงไป 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมสารละลาย 7.5% w/v Na_2CO_3 ลงไป 2 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดด้วยพาราฟิล์ม ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารฟีนอลรวมเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก และรายงานในรูปของมิลลิกรัมเทียบกับกรดแกลลิกต่อกรัม (mg GAE/g) วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay โดยใช้วิธีการที่ดัดแปลงจาก Shimada et al. (1992) ผสมสารละลายมาตรฐาน Trolox เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หรือสารสกัดในปริมาตรต่าง ๆ กับสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 5.0 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร พร้อมทั้งทำตัวอย่างควบคุม (control) โดยใช้สารละลาย blank คือ น้ำกลั่น:เมทานอล ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร คำนวณค่าร้อยละของ DPPH ที่เหลืออยู่



การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี

นำสารสกัดสาหร่ายเตาและอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปเคลือบสารสกัดสาหร่ายเตาความเข้มข้นต่าง ๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมี หรือองค์ประกอบทางโภชนาการ (proximate analysis) ได้แก่ โปรตีน (crude protein) โดยวิธี Kjeldahl ไขมัน (crude fat) โดยวิธี Soxhlet extraction ความชื้น (moisture content) โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เถ้า (ash content) โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) คำนวณโดยวิธีส่วนต่าง และเยื่อใย (crude fiber) ด้วยเครื่อง Fiber analyzer (AOAC, 2023)

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของอาหารปลา

นำอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปเคลือบสารสกัดสาหร่ายเตาความเข้มข้นต่าง ๆ มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความคงทนของอาหารในน้ำ การดูดซับน้ำ ความหนาแน่นของอาหาร การลอยตัวของอาหาร ความเป็นฝุ่น ขนาดเม็ด และน้ำหนัก (Lovell, 1981; Kraugerud et al., 2011)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดไปหาค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลอง โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (Analysis of variance) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ โดยวิธี Tukey's HSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลและวิจารณ์

ปริมาณสารฟีนอลิกรวมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบทางชีวเคมี

ผลของปริมาณสารฟีนอลิกรวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบทางชีวเคมีในอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปเมื่อมีการผสมสารสกัดสาหร่ายเตาในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน พบว่า ปริมาณสารฟีนอลิกรวมมีการเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารสกัด โดยชุดการทดลองที่เติมสารสกัดในระดับ 20% มีค่าสารฟีนอลิกรวมสูงที่สุดที่ 13.19 ± 0.34 mg GAE/g อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) (Table 1) สารสกัดจากสาหร่ายเตามีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ลดภาวะความเครียดออกซิเดชันในร่างกายสัตว์ (Peerapornpisal et al., 2012; Junthip et al., 2013; Yosboonrung et al., 2020) สอดคล้องกับ Dawczynski et al. (2007) และ Wong and Cheung (2001) รายงานว่าสาหร่ายทะเล *Ulva* spp. มีสารฟีนอลิกในปริมาณสูงและสามารถเสริมคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระเมื่อนำมาใช้ในการผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ได้ ทั้งนี้ สารฟีนอลิกมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเสริมภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความทนทานต่อความเครียดและโรค (Rajauria and Abu-Ghannam, 2013) สำหรับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระซึ่งวัดจากค่าการต้าน DPPH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$) แต่ก็แสดงแนวโน้มในทิศทางเดียวกับค่าสารฟีนอลิกรวม (Table 1) ซึ่งยืนยันถึงบทบาทของสาร

ฟีนอลิกในการเป็นสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Heo et al., 2005) สอดคล้องกับ Kongkachuichai et al. (2010) ที่พบว่าสาหร่ายทะเลจากชายฝั่งประเทศไทยมีศักยภาพในการเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ

Table 1. Total phenolic content, antioxidant activity and biochemical composition of fish feed pellets supplemented with different concentration of *Spirogyra* extract

Parameter	<i>Spirogyra</i> extract	Treatment			
		0%	5%	10%	20%
Total phenolic content (mg GAE/g)	26.59±0.47	2.94 ^a ±0.17	9.53 ^b ±0.23	10.67 ^c ±0.20	13.19 ^d ±0.34
antioxidant activity (mg/g)	3.04±0.13	0.79±0.01	0.81±0.10	0.85±0.11	0.97±0.17
protein (%)	12.24±0.46	31.55±1.53	31.60±1.01	31.75±0.63	31.92±0.95
carbohydrate (%)	57.66±0.27	39.11±1.12	40.95±1.60	41.21±1.50	41.35±0.55
fat (%)	2.89±0.22	9.36±0.38	8.64±0.38	8.71±0.43	8.68±0.48
fiber (%)	5.05±0.17	6.16±0.18	6.75±0.34	6.81±0.35	6.92±0.34
ash (%)	13.21±0.19	11.58±0.60	11.93±0.40	12.01±0.18	12.13±0.94
moisture (%)	14.00±0.23	6.70±0.50	6.87±0.64	6.89±0.14	6.92±0.45
energy (Kcal/g)	305.61±1.40	366.88±7.07	368.05±9.83	369.54±15.47	371.05±18.09

Note: Superscripts a, b, c, d indicate statistically significant differences ($P<.05$) among treatments.

มีงานวิจัยรายงานการใช้สาหร่ายสไปรูลิน่าแทนที่ปลาป่นหรือเป็นสารเสริมในสูตรอาหารเม็ดสำเร็จรูป เช่น การศึกษาของ Saleh et al. (2023) พบว่าการเสริมสาหร่ายสไปรูลิน่าในอาหารปลานิลส่งผลเพิ่มการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนอาหารดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ในขณะที่ Rahman et al. (2024) รายงานว่าการเสริมสไปรูลิน่าในอาหารกุ้งก้ามกราม (*Macrobrachium rosenbergii*) ช่วยเพิ่มน้ำหนักสุดท้าย การรอดตาย และปรับปรุงกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งการเสริมสไปรูลิน่ามีผลชัดเจนต่อการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและการต้านอนุมูลอิสระของสัตว์น้ำหลายชนิด โดยกุ้งที่ได้รับอาหารเสริมสไปรูลิน่ามีระดับ superoxide dismutase (SOD) และ catalase (CAT) สูงขึ้น ในขณะที่ malondialdehyde (MDA) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเกิด lipid peroxidation ลดลง ซึ่งอาหารกุ้งที่เสริมสไปรูลิน่ามีค่าปริมาณสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบชีวเคมีของสาหร่ายที่มีสารฟีนอลิกและรงควัตถุออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง (Benedetti et al., 2024) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mabrouk (2024) ในปลา



นิตที่แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนของสาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถเพิ่มสมรรถนะการเจริญเติบโตและการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าสูตรปกติ ในปลาเทราต์สายรัง งานของ Sharma et al. (2024) ยังรายงานว่าการเสริมสไปรูลิน่าส่งผลเพิ่มการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับภูมิคุ้มกันและการต้านออกซิเดชัน ทำให้สัตว์มีความทนทานต่อสภาวะเครียดมากขึ้น ในด้านองค์ประกอบทางชีวเคมี พบว่าปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อใย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารสกัด แม้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>.05$) (Table 1) ปริมาณโปรตีนอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อความต้องการของปลาน้ำจืดทั่วไป และระดับที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 28-32% ขึ้นอยู่กับชนิดและช่วงวัยของปลา (De Silva & Anderson, 1995) นอกจากนี้ปริมาณเยื่อใยและเถ้าซึ่งเพิ่มขึ้นในชุดการทดลองที่ผสมสารสกัดมากขึ้น อาจมาจากองค์ประกอบของผนังเซลล์สาหร่ายที่มีเส้นใยอาหารและแร่ธาตุสูง โดยเฉพาะแคลเซียม แมกนีเซียม และไอโอดีน (Ortiz et al., 2006) ข้อมูลนี้สอดคล้องกับงานของ López-López et al. (2009) ที่พบว่าการเติมสาหร่ายทะเลในอาหารปลาช่วยเพิ่มปริมาณแร่ธาตุในผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ค่าความชื้นของอาหารปลาที่ผสมสารสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากความสามารถในการกักเก็บน้ำของโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ เช่นในสาหร่าย โดยเฉพาะ *ulvans* ซึ่งเป็นเส้นใยละลายน้ำในกลุ่ม polysaccharide ในสาหร่ายทะเลสีเขียว (Lahaye and Robic, 2007) ส่วนค่าพลังงานของอาหารปลาพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 366.88 ± 7.07 Kcal/g ในชุดควบคุม เป็น 371.05 ± 18.09 Kcal/g ในชุดการทดลองที่ผสมสารสกัด 20% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>.05$) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้สารสกัดจากสาหร่ายเตาเป็นส่วนผสมในอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปส่งผลต่อการเพิ่มค่าทางชีวภาพบางประการของอาหาร โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกธรรมชาติและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ อาจช่วยส่งเสริมสุขภาพปลาผ่านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและป้องกันโรคในระยะยาวได้ และอาจนำไปสู่การพัฒนาอาหารปลาที่มีคุณภาพสูงขึ้นในอนาคตได้

คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปที่ผสมสารสกัดจากสาหร่ายเตา พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพบางรายการมีความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) โดยเฉพาะในด้านการดูดซับน้ำและความเป็นฝุ่น ซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณภาพของอาหารเม็ดในด้านการคงรูปและและความคงทนของอาหารในน้ำ อาหารที่มีการดูดซับน้ำสูงเกินไปอาจเสื่อมสภาพเร็วหรือยากต่อการให้อาหารปลาในระบบการเลี้ยง การควบคุมการดูดซับน้ำของอาหารปลาจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาและผลิตอาหารปลาที่มีคุณภาพ (Kaushik and Seiliez, 2010) ความคงทนของอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูปในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน (86.13–87.07%) โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>.05$) ซึ่งสอดคล้องกับ Glencross et al. (2007) ที่ระบุว่าการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบบางชนิดในอาหารเม็ด เช่น สารสกัดจากพืชหรือสาหร่าย อาจไม่มีผลชัดเจนต่อโครงสร้างทางกายภาพของเม็ดอาหาร หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนของแป้งหรือโปรตีนหลักของสูตรอาหาร การดูดซับน้ำแสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการผสมสารสกัดและชุดการทดลองที่ผสมสารสกัด 5% มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<.05$)

เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ผสมสารสกัดในระดับ 10% และ 20% ซึ่งอาจเกิดจากการที่ปริมาณสารฟีนอลิกในระดับสูงมีผลต่อการเชื่อมโยงทางโครงสร้างของอาหารเม็ด ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง (Olsen and Hasan, 2012) Tacon (1996) ได้ระบุว่าส่วนประกอบของอาหารที่มีเส้นใยสูง หรือมีสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติในปริมาณมากอาจลดความสามารถในการดูดซึมน้ำของอาหารได้ ส่วนความเป็นฝุ่นของอาหารเม็ดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น โดยลดจาก 0.06% (ชุดควบคุม) เป็น 0.03% ในชุดการทดลองที่ผสมสารสกัด 20% ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับ Yahyavi et al. (2020) ที่แสดงว่าการเติมสารสกัดจากพืชหรือสาหร่ายที่มีเนื้อสัมผัสเหนียวและมีเส้นใยธรรมชาติสามารถช่วยลดการสึกหรอของอาหารเม็ดได้ ทำให้อาหารมีค่าความเป็นฝุ่นต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารสกัดอาจช่วยยึดเกาะหรือเป็นสารประสาน (binder) เพิ่มเติม ในอาหารเม็ดได้ และสารโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) จากสาหร่าย สามารถทำหน้าที่ เป็นสารยึดเกาะในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.46–0.47 g/ml ขนาดของเม็ดอาหารอยู่ระหว่าง 3.07–3.23 มม. และน้ำหนักเท่ากันทุกชุดที่ 0.01 กรัม โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > .05$) แสดงให้เห็นว่าการผสมสารสกัดจากสาหร่ายในระดับต่าง ๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางกายภาพพื้นฐานของเม็ดอาหารในระดับที่ตรวจวัดได้ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Glencross et al. (2007) ที่ศึกษาผลของการเติมส่วนผสมจากพืชต่อโครงสร้างของอาหารปลา และพบว่าหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงสารยึดเหนียวหรือสารหลักในสูตร อาหารจะมีขนาดและความหนาแน่นที่คงที่ ส่วนความสามารถในการลอยตัว พบว่าอาหารในทุกชุดการทดลองลอยน้ำได้ 100% ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการให้อาหารปลาที่กินอาหารประเภทลอยน้ำ เช่น ปลานิล ปลาดุก โดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งการลอยตัวเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ได้รับการยอมรับว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการให้อาหารปลาในระบบฟาร์มเปิดและลดการสูญเสียอาหารในน้ำ (Desilva and Anderson, 1995)

Table 2. Physical properties of fish feed pellets supplemented with *spirogyra* extract at different concentrations

physical property	Treatment			
	0%	5%	10%	20%
water stability (%)	86.67±0.86	87.07±1.29	86.80±1.06	86.13±1.40
water absorption (%)	130.53 ^b ±6.90	131.2 ^b ±2.23	118.67 ^a ±3.06	116.27 ^a ±9.42
bulk density (g/ml)	0.47	0.47	0.47	0.47
floating ability (%)	100	100	100	100
dust percentage (%)	0.06 ^d ±0.00	0.05 ^c ±0.00	0.04 ^b ±0.00	0.03 ^a ±0.00
pellet size (mm)	3.18±0.16	3.12±0.12	3.07±0.10	3.23±0.27
pellet weight (g)	0.01	0.01	0.01	0.01

Note: Superscripts a, b, c, d indicate statistically significant differences ($P < .05$) among treatments.



สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้สารสกัดจากสาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.) เป็นส่วนผสมในอาหารปลาเม็ดสำเร็จรูป โดยการผสมสารสกัดในระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณสารฟีนอลิกรวมในอาหารปลามีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ โดยความเข้มข้น 20% ให้ค่าสูงที่สุด ซึ่งสามารถช่วยเสริมศักยภาพด้านสุขภาพให้กับปลาโดยเฉพาะในด้านการต้านอนุมูลอิสระ และอาจช่วยลดภาวะเครียดออกซิเดชันในระบบการเลี้ยง องค์กรประกอบทางชีวเคมีของอาหารปลา เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อใย แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของสารสกัด ในขณะเดียวกันคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ เช่น ความคงทน ความหนาแน่น และการลอยตัวของอาหารยังคงอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ยกเว้นการดูดซับน้ำ และความเป็นฝุ่นที่ลดลงอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของสารสกัด ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีต่อคุณภาพอาหาร ผลการวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารปลาที่มีคุณค่าทางโภชนาการและเสริมสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีหรือสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ในอาหารสัตว์น้ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสาขาวิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก พื้นที่เขตบางพระ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา งานวิจัยสำเร็จลงแล้วไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ธีระวัฒน์ รัตนพจน์ เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน ชุติมา ศรีมะเร็ง รัตนภรณ์ จันทร์ทิพย์ และดวงพร อมรเลิศพิศาล. (2555). ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและผลการเสริมสาหร่ายเตาต่อการเจริญเติบโตของปลานิลในกระชัง. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง*, 6(2), 23-34.

AOAC. (2023). *Official methods of analysis of AOAC International* (22nd ed.). AOAC International.

Benedetti, A., Dini, I., Dini, A., Russo, C., & Lombardi, A. (2024). Chemical composition, bioactivities, and applications of *Spirulina* spp. *Foods*, 13(2), 123–135.

Dawczynski, C., Schubert, R., & Jahreis, G. (2007). Amino acids, fatty acids, and dietary fiber in edible seaweed products. *Food Chemistry*, 103(3), 891–899.

Desilva, S. S., & Anderson, T. A. (1995). *Fish nutrition in aquaculture*. London: Chapman & Hall.

- Ganesan, P., S. Chandini, & N. Bhaskar. (2008). Antioxidant properties of methanol extract and its solvent fractions obtained from selected Indian red seaweeds. *Bioresource Technology*, 99, 2717-2723.
- Glencross, B. D., Booth, M., & Allan, G. L. (2007). A feed is only as good as its ingredients – a review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds. *Aquaculture Nutrition*, 13(1), 17–34.
- Gunathilake, T., Akanbi, T. O., Suleria, H. A. R., Nalder, T. D., Francis, D. S., & Barrow, C. J. (2022). Seaweed phenolics as natural antioxidants, aquafeed additives, veterinary treatments and cross-linkers for microencapsulation. *Marine Drugs*, 20(7), 445.
- Heo, S. J., Park, E. J., Lee, K. W., & Jeon, Y. J. (2005). Antioxidant activities of enzymatic extracts from brown seaweeds. *Bioresource Technology*, 96(14), 1613–1623.
- Hu, C. & Kitts, D. D. (2000). Studies on the antioxidant activity of Echinacea root extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1466-1472.
- Hu, X., Ma, W., Zhang, D., Tian, Z., Yang, Y., Huang, Y., & Hong, Y. (2025). Application of natural antioxidants as feed additives in aquaculture: A review. *Biology*, 14(1), 87.
- Jahazi, M. A., Hoseinifar, S. H., Jafari, V., Hajimoradloo, A. & Van Doan, H. (2020). Dietary supplementation of polyphenols positively affects the innate immune response, oxidative status, and growth performance of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture*, 517, 734709.
- Junthip, R., Amornlerdpison, D., & Chimsook, T. (2013). Phytochemical screening, antioxidant activity and total phenolic content of *Spirogyra* spp. In *Advanced Materials Research* (Vol. 699, pp. 693-697). Trans Tech Publications Ltd.
- Kaushik, S. J., & Seiliez, I. (2010). Protein and amino acid nutrition and metabolism in fish: current knowledge and future needs. *Aquaculture Research*, 41(3), 322–332.
- Kongkachuichai, R., Charoensiri, R., Yakoh, K., Kringkasemsee, A., & Insung, P. (2010). Nutritional composition of traditional Thai foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(4), 287–297.
- Kraugerud, O. F., Jorgensen, H. Y., & Svihus, B. (2011). Physical properties of extruded fish feed with inclusion of different plant (legumes, oilseeds or cereals) meals. *Animal Feed Science Technology*, 163(2), 244-254.
- Lahaye, M., & Robic, A. (2007). Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8(6), 1765–1774.

- López-López, S., Nolasco, H., Valdez-Holguín, J. E., & Villarreal-Cavazos, D. (2009). Partial replacement of fish meal by seaweed meal in diets for juvenile Nile tilapia. *Journal of Applied Phycology*, 21(6), 617–622.
- Lovell, R.T. (1981). *Laboratory manual for fish feed analysis and fish nutrition studies*. United States of America: Auburn university.
- Mabrouk, M. M., El-Magd, M. A., El-Baz, A. M., & Omar, H. M. (2024). *Arthrospira platensis* nanoparticles dietary supplementation improves growth performance and antioxidant status of Nile tilapia. *Scientific Reports*, 14, 5567.
- Nalin, S., Wan, L. K. & Jin, J. Y. (2005). Radical scavenging potential of hydrophilic phlorotannins of *Hizikia fusiformis*. *Algae*, 20(1), 69-75.
- Olsen, R. E., & Hasan, M. R. (2012). A review of aquaculture feed preparation and feeding practices. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, No. 540.
- Ortiz, J., Romero, N., Robert, P., Araya, J., López-Hernández, J., Bozzo, C., Navarrete, E., Osorio, A., & Rios, A. (2006). Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea antarctica*. *Food Chemistry*, 99(1), 98–104.
- Peerapornpisal, Y. (2015). *Freshwater algae in Thailand*. (3th ed.). Chiang Mai: Chotana print.
- Peerapornpisal, Y., Kanjanapothi, D., Taesotikul, T., & Amornlerdpison, D. (2009). Potential of some freshwater algae in Northern Thailand as nutraceutical. *Phycologia*, 48(4) Suppl, 104-112. (in Thai)
- Peerapornpisal, Y., Panyoyai, T. & Amornlerdpison, D. (2012). Antioxidant and anti-inflammatory activities of *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kutzing. *KKU Science Journal*, 40(1), 228-235. (in Thai)
- Rahman, M., Karim, M. A., Hossain, M. M., Sultana, N., & Azim, M. E. (2024). Effects of dietary *Spirulina platensis* supplementation on growth, antioxidant activity, and immune responses in Pacific white shrimp. *Aquaculture Reports*, 32, 101234.
- Rajauria, G., & Abu-Ghannam, N. (2013). Isolation and partial characterization of bioactive fucoxanthin from *Himanthalia elongata* brown seaweed: A TLC-based approach. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2013, 802573.
- Saleh, E., El-Sayed, A. F. M., Abd El-Gawad, E. A., & Abou-Taleb, A. E. (2023). Effect of incorporation of *Spirulina platensis* into fish diets on growth performance of Nile tilapia. *Aquaculture Reports*, 30, 101102.

- Sharma, R., K., Gupta, P., N., & Yadav, R. (2024). The effects of dietary *Spirulina platensis* on oxidative stress and immune gene expression in rainbow trout. *Fish & Shellfish Immunology*, 152, 108657.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. & Nakamura, T. (1992). Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(6), 945-948.
- Sun, L., Zhang, J., Lu, X., Zhang, & Zhang, Y. (2011). Evaluation to the antioxidant activity of total flavonoids extract from persimmon (*Diospyros kaki* L.) leaves. *Food and Chemical Toxicology*, 49, 2689-2696.
- Tacon, A. G. J. (1996). Nutritional studies in crustaceans and the problems of applying research findings to practical farming systems. *Aquaculture Nutrition*, 2(3), 165–174.
- Tipnee, S., Ramaraj, R., & Unpaprom, Y. (2015). Nutritional evaluation of edible freshwater green macroalga *Spirogyra varians*. *Emergent Life Sciences Research*, 1(2), 1-7.
- Wong, K. H., & Cheung, P. C. K. (2001). Nutritional evaluation of some subtropical red and green seaweeds Part I—proximate composition, mineral contents and protein amino acid profiles. *Food Chemistry*, 71(4), 475–482.
- Wong, S. P., Leong, L. P. & Koh, J. H. W. (2006). Antioxidant activities of aqueous extracts of selected plants. *Food Chemistry*, 99, 775-783.
- Wongsawad, P. & Peerapornpisal, Y. (2015). Morphological and molecular profiling of *Spirogyra* from northeastern and northern Thailand using inter simple sequence repeat (ISSR) markers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22, 382–389.
- Yahyavi, M., Hosseini, S. A., Ghasemi, M., Shakouri, M., & Zare, P. (2020). The effect of natural additives on pellet quality and physical properties of extruded feed. *Aquaculture Reports*, 17, 100354.
- Yosboonruang, A., Duangjai, A., Amornlerdpison, D., & Viyoach, J. (2020). Screening for biological activities of *Spirogyra neglecta* water extract. *Walailak Journal of Science and Technology*, 17(4), 359-368.