วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj

การศึกษาเบื้องต้นผลของการใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อสมรรถนะการผลิต คุณภาพซาก และสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อ

Preliminary study effects of replacement soybean meal with algal in ration on performance, carcass quality and histomorphology of small intestine in broiler chickens

พัสกร พุทธฉายา[1], กัมพล ไทยโส[2], นริศรา สวยรูป[1], อุดมลักษณ์ สมพงษ์[3], บัณฑิต ยวงสร้อย[2], บัณฑิตย์ เต็งเจริญกุล[4] และ สาวิตรี วงศ์ตั้งถิ่นฐาน[1]*

Padsakorn Pootthachaya[1], Kampon Thaiso[2], Naritsara Suayroop[1], Udomluk Sompong[3], Bundit Yuangsoi[2], Bundit Tengjaroenkul[4] and Sawitree Wongtangtintharn[1]*

[1] *สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002*
[1] *Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, 40002*
[2] *สาขาวิชาการประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002*
[2] *Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, 40002*
[3] *คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 50290*
[3] *Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University, 50290*
[4] *ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002*
[4] *Department of Veterinary Public Health, Faculty of Veterinary Medicine, Khon Kaen University, 40002*

บทคัดย่อ: การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นในการใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อสมรรถนะการผลิต คุณภาพซาก และสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อระยะขุน โดยเลือกใช้สาหร่าย 3 สายพันธุ์ ได้แก่ สาหร่าย *Caulerpa lentilifera*, *Ulva rigida* และ *Spirulina platensis* ทำการวิเคราะห์และประเมินคุณค่าทางโภชนะและการย่อยได้ (*In vitro*) ก่อนเลือกนำไปใช้ศึกษาทดลองในไก่เนื้อสายพันธุ์ Ross 308 เพศผู้อายุ 1 วัน จำนวน 40 ตัว วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) แบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 10 ซ้ำ (ทำการเก็บข้อมูลแบบรายตัว) โดยกลุ่มการทดลองประกอบด้วย กลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ใช้สาหร่าย *S. platentis* 15% (S15%), *C. lentilifera* 15% (C15%) และ *S. platentis* ร่วมกับ *C. lentilifera* 15% (SC15%) ทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหาร โดยที่ช่วงอายุ 1-28 วัน (Pre-experimental period) ไก่เนื้อทุกกลุ่มการทดลองได้รับอาหารสูตรพื้นฐาน (Basal diet) และที่ช่วงอายุ 29-42 วัน (Experimental period) ไก่เนื้อในแต่ละกลุ่มได้รับอาหารตามกลุ่มการทดลอง โดยผลการทดลอง พบว่า ที่ช่วงอายุ 29-42 วัน กลุ่มที่ใช้สาหร่าย S15% และ SC15% มีอัตราการเจริญเติบโตเทียบเท่ากับกลุ่มควบคุม ขณะที่กลุ่มที่ใช้สาหร่ายมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำตัวเพิ่มขึ้น ($P<0.01$) ซึ่งแปรผันตามต้นทุนค่าอาหารที่สูงขึ้น ($P<0.01$) ในส่วนของคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อกลุ่มที่ใช้สาหร่ายมีค่าไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม ($P>0.05$%) ยกเว้นเปอร์เซ็นต์ตับที่เพิ่มขึ้นในกลุ่ม S15% และในส่วนของสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก พบว่า กลุ่มที่ใช้สาหร่าย S15% มีความสูงของวิลไลและอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปท์ในลำไส้เล็กส่วนเจจูนัมและไอเลียมมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.01$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้สาหร่าย *S. platensis* ทดแทนกากถั่วเหลืองที่ระดับ 15% ในสูตรอาหารไก่เนื้อระยะขุนสามารถส่งเสริมการพัฒนาของลักษณะสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการผลิต คุณภาพซาก และคุณภาพเนื้อ

คำสำคัญ: สาหร่าย; ประสิทธิภาพการผลิต; คุณภาพซาก; สัณฐานวิทยาของลำไส้; ไก่เนื้อ

* Corresponding author: sawiwo@kku.ac.th

Received: date; August 24, 2023 Accepted: date; September 13, 2023 Published: date; December 12, 2023

ABSTRACT: This study aimed to investigate the preliminary efficacy of using algae as a substitute for soybean meal in ration on the performance, carcass quality, and histomorphology of the small intestine in broilers during finisher phase. Three species of algae were used: *Caulerpa lentillifera*, *Ulva rigida*, and *Spirulina platensis*. The nutritional value and *in vitro* digestibility were analyzed before conducting the experiment with Ross 308 broiler chickens, male, 1 day old, with a total of 40 birds. The experiment was designed using a completely randomized design with 4 experimental groups, 10 replications (Individual data collection). The experimental diets were as follows: control group and groups using 15% of *S. platensis* (S15%), 15% of *C. lentillifera* (C15%), and a combination of 15% of *S. platensis* with *C. lentillifera* (SC15%) as substitutes for soybean meal in the diet. The results showed that during the overall experiment, the body weight gain of the S15% and SC15% groups were comparable to those of the control group. Meanwhile, feed cost per gain was increased in the algae group ($P<0.01$), which varied with the higher feed cost ($P<0.01$). In terms of carcass and meat quality, the algae groups showed no significant differences compared to the control group ($P>0.05$), except for an increased liver percentage in the S15% group. The histomorphology of the small intestine found that the algae group of S15% had significantly greater villi height and villi height to crypt depth ratio in the jejunum and ileum than the control group ($P<0.01$). The results of this study suggest that using *S. platensis* as a substitute for soybean meal at 15% in the diet of broilers during the finisher phase can promote the development of histomorphology characteristics of the small intestine without adversely affecting performance, carcass quality, and meat quality.

Keywords: algal; performance; carcass quality; intestinal histomorphology; broiler

บทนำ

การผลิตสัตว์ปีกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตสัตว์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก (Chowdhury and Morey, 2019) โดยระหว่างปี 2563-2565 การผลิตสัตว์ปีกทั่วโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 1.72 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปี 2566 จากการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของภาคการผลิตสัตว์ ส่งผลต่อความต้องการผลผลิตทางการเกษตรสำหรับการผลิตอาหารสัตว์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกากถั่วเหลืองที่เป็นแหล่งโปรตีนหลักที่ใช้ในอาหารสัตว์ปีกรวมทั้งสัตว์เศรษฐกิจชนิดอื่นๆ ซึ่งมีแนวโน้มของการผลิตที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต (Pootthachaya et al., 2023) จากสถานการณ์ในปัจจุบันจึงมีความพยายามในการหาวัตถุดิบแหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่ที่มีคุณภาพเพื่อนำมาใช้เสริมหรือทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารสัตว์ปีก นอกจากนี้ จากมาตรการยกเลิกการใช้ยาปฏิชีวนะในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ปีกที่มักใช้เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโต ป้องกันโรค และลดอัตราการตาย ส่งผลให้ไก่เนื้อมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อโรค เกิดภาวะการอักเสบของลำไส้ และส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการผลิต (สุภัตรา และคณะ, 2564) การใช้สารเสริม (Feed additive) หรือสารกระตุ้นจากธรรมชาติ (Natural promoters) เช่น พรีไบโอติก โพรไบโอติก และใยอาหาร (Dietary fiber) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มุ่งเน้นเพื่อการพัฒนาและส่งเสริมสุขภาพของระบบทางเดินทางอาหาร (Andrew et al., 2020) โดยเฉพาะลำไส้เล็กที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการย่อยและดูดซึมโภชนะต่างๆ ซึ่งจะส่งผลดีต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะและสมรรถนะการเจริญเติบโตของสัตว์ ประกอบกับแนวโน้มการผลิตอาหารสัตว์สมัยใหม่ที่นอกเหนือจากการพิจารณาเฉพาะคุณค่าทางโภชนะ (Nutrition value) ความสมดุลของโภชนาการ (Nutritional balance) และการกำหนดความต้องการโภชนะที่เพียงพอและตรงกับความต้องการในอาหารสัตว์แล้ว ปัจจุบันยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงหน้าที่หรืออาหารสัตว์ฟังก์ชั่น (Functional feed) (มนัสนันท์ และคณะ, 2564) ที่ไม่เพียงแต่ให้คุณค่าทางโภชนะแต่ยังช่วยส่งเสริมสุขภาพของสัตว์ ทั้งนี้จากผลการวิจัย พบว่า สาหร่าย (Algal) เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกจากพืชที่มีคุณค่าทางโภชนะสูง ทั้งยังประกอบด้วยสารพฤกษเคมี (Phytochemical) หลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลาย อาทิเช่น กระตุ้นภูมิคุ้มกัน ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ และต้านเชื้อจุลชีพ เป็นต้น (Prabakaran et al., 2018)

ปัจจุบันสาหร่ายหลายสายพันธุ์ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น อาหาร เภสัชกรรม เครื่องสำอาง รวมถึงอาหารสัตว์ เนื่องจาก คุณค่าทางโภชนะจากสารปฐมภูมิ (Primary metabolite) ที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะโปรตีนที่สูงถึง 20-65% ของวัตถุแห้ง ความสมดุลของกรดอะมิโนที่จำเป็น กรดไขมันที่จำเป็นหลายชนิด และอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุ (Pootthachaya et al., 2023) นอกจากนี้ ยังมีสารทุติยภูมิ (Secondary metabolite) ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ อาทิเช่น โพลีแซ็กคาไรด์ ไกลโคไซด์ ฟลาโวนอยด์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิโปรตีน เป็นต้น (Prabakaran et al., 2018) โดยสารดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็น

สารพรีไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมจากธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนยาปฏิชีวนะ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมรรถนะการเจริญเติบโตและส่งเสริมสุขภาพสัตว์ ผ่านการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ปรับสมดุลของจุลินทรีย์ กระตุ้นการเจริญและพัฒนาของเซลล์เยื่อบุผิวในลำไส้ (Ayalew et al., 2022) ตัวอย่างเช่น สาหร่าย *Spirulina platensis* (สาหร่ายเกลียวทอง) ที่จัดอยู่ในกลุ่มของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 60% ทั้งยังประกอบด้วยสารเบต้าแคโรทีนและไฟโคไซยานิน เป็นต้น (Martí-Quijal et al., 2023) จึงมักถูกนำมาใช้ทดแทนกากถั่วเหลือง (10-30%) เพื่อเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารสัตว์ปีกที่สามารถช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ พัฒนาสัณฐานวิทยาของเซลล์ในลำไส้เล็ก โดยไม่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะการผลิตและคุณภาพซากของไก่เนื้อ (Neumann et al., 2018; Omar et al., 2022; El-Shall et al., 2023) นอกจากนี้ ยังมีสาหร่ายในกลุ่มสีเขียว เช่น สาหร่าย *Ulva rigida* (สาหร่ายผักกาดทะเล) ที่มีโปรตีน 25-30% (Canedo-Castro et al., 2019) และสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* (สาหร่ายพวงองุ่น) ที่มีโปรตีน 12-24% (Guo et al., 2015) และเป็นแหล่งของใยอาหารที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุหลายชนิด โดยถูกนำมาใช้เป็นอาหารเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนในสัตว์น้ำเท่านั้น (Mahasu et al., 2016; Putri et al., 2017) นอกจากนี้ ยังประกอบไปด้วยโพลีแซ็กคาไรด์ ฟีนอลิก และแคโรทีนอยด์ที่มีคุณสมบัติทางโภชนะเภสัช (Nagappan and Vairappan, 2014; Chen et al., 2019; Pappou et al., 2022) ในการกระตุ้นการเจริญเติบโต เพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และเพิ่มกลไกการป้องกันของระบบทางเดินอาหาร ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการผลิตสัตว์ปีก (Liu et al., 2020)

ทั้งนี้ ข้อจำกัดของการใช้สาหร่ายในอาหารสัตว์ปีก คือ ลดการกินได้เนื่องจากมีปริมาณเยื่อใยค่อนข้างสูงและย่อยได้ยาก โดยเฉพาะไก่ช่วงที่อายุน้อย (Velten et al., 2018) อีกทั้งปัจจุบันสาหร่ายยังมีราคาค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม ยังมีส่วนของสาหร่ายที่ตกเกรดที่ไม่สามารถขายได้ ซึ่งมีสัดส่วนมากถึง 70-80% โดยเฉพาะสาหร่าย *C. lentillifera* และ *U. rigida* ซึ่งน่าจะนำมาใช้ทดแทนแหล่งโปรตีนเดิมในอาหารสัตว์ปีกได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวของสาหร่ายทั้งยังมีข้อมูลการศึกษาอย่างจำกัด ดังนั้น การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของการใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อสมรรถนะการผลิต คุณภาพซาก คุณภาพเนื้อ และจุลสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อระยะขุน

วิธีการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างสาหร่าย

การทดลองนี้ใช้ตัวอย่างสาหร่ายสด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ สาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lentillifera*) จากสาขาวิชาการประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาหร่ายผักกาดทะเล (*Ulva rigida*) จาก ต.แหลมผักเบี้ย อ.บ้านแหลม จ.เพชรบุรี และสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina platensis*) จากคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยนำสาหร่ายมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณค่าทางโภชนะ (Proximate analysis) ตามวิธีการของ AOAC (1998) วิเคราะห์การละลายได้ของโปรตีน (Protein solubility) และความสามารถในการย่อยได้ในหลอดทดลอง (*In vitro* digestibility) ตามคำอธิบายของ พัสกร และคณะ (2564) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน **Table 1** และ **Table 2** ตามลำดับ

Table 1 Nutritional value of algae expressed in percentage of dry weight (average ± SD, n = 3)

Chemical composition	*Caulerpa lentillifera*	*Ulva rigida*	*Spirulina platensis*	P-value	SEM
Dry matter (%)	99.84 ± 0.07 [a]	90.08 ± 0.37[c]	95.53 ± 0.24[b]	<0.01	0.18
Ash (%)	12.62 ± 0.59[a]	9.51 ± 0.14[b]	9.64 ± 0.05[b]	<0.01	0.25
Crude protein (%)	24.16 ± 0.18[c]	34.81 ± 0.96[b]	44.44 ± 2.48[a]	<0.01	1.09
Ether extract (%)	1.53 ± 0.37[a]	1.00 ± 0.03[b]	0.86 ± 0.01[b]	<0.01	0.15
Crude fiber (%)	15.07 ± 1.89[a]	4.50 ± 0.57[c]	12.24 ± 0.18[b]	<0.01	0.81
Nitrogen-free extract (%)	46.63 ± 1.46[b]	50.18 ± 0.46[a]	32.82 ± 2.26[c]	<0.01	1.12
Calcium (%)	2.73 ± 0.42[a]	0.93 ± 0.17[b]	0.26 ± 0.08[c]	<0.01	0.19
Phosphorus (%)	0.24 ± 0.01[a]	0.08 ± 0.01[b]	0.01 ± 0.01[c]	<0.01	0.01
Gross energy (kcal/kg)	3788.23 ± 179.65[b]	3686.38 ± 137.49[b]	4441.33 ± 25.07[a]	<0.01	94.77
Salt (%)	2.40 ± 0.10[a]	0.26 ± 0.01[c]	2.03 ± 0.15[b]	<0.01	0.07

SEM, standard error of means.

[a-c] Means in the same row with different superscripts differ (P<0.05).

Table 2 Protein solubility (PS), dilute pepsin digestibility (DPD) and two-phase gastric/pancreatic digestibility (GPD) of whole algal (average ± SD, n = 5)

Chemical composition	*Caulerpa lentillifera*	*Ulva rigida*	*Spirulina platensis*	P-value	SEM
Protein solubility (%)	23.43 ± 0.15[bc]	25.03 ± 2.10[b]	52.35 ± 4.55[a]	<0.01	1.62
DPD (%)	37.00 ± 0.91[b]	10.16 ± 0.63[c]	66.80 ± 0.76[a]	<0.01	0.43
$GPD_{Protein}$ (%)	26.55 ± 0.86[b]	17.20 ± 0.41[c]	48.73 ± 0.39[a]	<0.01	0.33
GPD_{Energy} (%)	96.25 ± 0.13[b]	99.40 ± 0.29[a]	50.94 ± 0.95[c]	<0.01	0.10
Digestible protein (%)	6.41 ± 0.21[b]	5.40 ± 0.13[c]	20.70 ± 0.16[a]	<0.01	0.32
Digestible energy (kcal/kg)	3649.57 ± 0.53[a]	3651.95 ± 0.42[a]	2261.87 ± 0.23[b]	<0.01	55.26

SEM, standard error of means.

[a-c] Means in the same row with different superscripts differ (P<0.05).

จากการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนะ พบว่า สาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์มีองค์ประกอบทางโภชนะทุกประเภทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.01) โดยเฉพาะสาหร่าย *S. platensis* ที่มีปริมาณโปรตีน (44.44%) ที่สูงกว่าสาหร่าย *U. rigida* และ *C. lentillifera* (34.81 และ 24.16% ตามลำดับ; P<0.01) รวมถึงมีค่าการละลายได้ของโปรตีนสูงที่สุด (52.35%; P<0.01) ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในด้านประสิทธิภาพการย่อยได้ พบว่า สาหร่าย *U. rigida* มีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของพลังงาน (GPD_{Energy}) และพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (99.40% และ 3651.95 kcal/kg) สูงที่สุด (P<0.01) ขณะที่สาหร่าย *S. platensis* และ *C. lentillifera* มีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ (DPD และ $GPD_{Protein}$) ของโปรตีน (49-67% และ 27-37% ตามลำดับ) และโปรตีนที่ใช้ประโยชน์ได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่าย *U. rigida* (P<0.01) จากองค์ประกอบทางโภชนะและสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโปรตีนในสาหร่าย *S. platensis* และ *C. lentillifera* มีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารสัตว์ปีกได้ ดังนั้น สาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์จึงเป็นตัวเลือกในการนำมาใช้ศึกษาทดลองเพื่อทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารไก่เนื้อระยะขุน (Finisher phase) ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต คุณภาพซาก คุณภาพเนื้อ และสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารไก่เนื้อระยะขุน

การทดลองนี้เป็นไปตามมาตรฐานการใช้สัตว์ทดลองที่ได้การรับรองโดยคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (IACUC-KKU-102/63) สถานที่ทำการทดลอง หมวดสัตว์ปีก สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

การทดลองครั้งนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design: CRD) โดยใช้ไก่เนื้อสายพันธุ์ Ross 308 เพศผู้ อายุ 1 วัน จำนวน 40 ตัว แบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 10 ซ้ำ ทำการเก็บข้อมูลแบบรายตัว โดยที่ช่วงอายุ 1-28 วัน (Pre-experimental period) ไก่เนื้อทุกกลุ่มการทดลองได้รับอาหารสูตรพื้นฐาน (Basal diet) และที่ช่วงอายุ 29-42 วัน (Experimental period) ไก่เนื้อในแต่ละกลุ่มได้รับอาหารตามกลุ่มการทดลอง (Treatment diets; **Table 3**) โดยไก่เนื้อได้รับอาหารและน้ำอย่างเต็มที่ (*Ad libitum*) รวมถึงความต้องการโภชนะที่เพียงพอต่อความต้องการตามคำแนะนำของ NRC (1994) และเลี้ยงภายใต้สภาพโรงเรือนแบบเปิด ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มการทดลองดังนี้

กลุ่มที่ 1: อาหารสูตรพื้นฐาน (Control)

กลุ่มที่ 2: อาหารสูตรพื้นฐานที่ทดแทนกากถั่วเหลืองด้วยสาหร่าย *S. platensis* 15% (S15%)

กลุ่มที่ 3: อาหารสูตรพื้นฐานที่ทดแทนกากถั่วเหลืองด้วยสาหร่าย *C. lentillifera* 15% (C15%)

กลุ่มที่ 4: อาหารสูตรพื้นฐานที่ทดแทนกากถั่วเหลืองด้วยสาหร่าย *S. platensis* ร่วมกับ *C. lentillifera* 15% (SC15%)

โดยช่วงระยะก่อนการทดลอง 3 วัน ไก่เนื้อในแต่ละกลุ่มได้รับอาหารสูตรพื้นฐานร่วมกับอาหารตามกลุ่มทดลองในอัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75 เพื่อทำการปรับสัตว์ทดลอง จากนั้นชั่งน้ำหนักไก่เนื้อเริ่มต้นและให้อาหารตามกลุ่มทดลองในวันที่ 29 บันทึกน้ำหนักตัว (Body weight; BW) และปริมาณอาหารที่กิน (Feed intake; FI) ของไก่เนื้อทุกๆ สัปดาห์ในช่วงระยะการทดลอง (วันที่ 29-42) เพื่อนำไปคำนวณอัตราการเจริญเติบโต (Body weight gain; BWG) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว (Feed conversion ratio; FCR) รวมถึงบันทึกอัตราการตาย (Survival rate; SR) เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ ได้แก่ ต้นทุนค่าอาหาร (Feed cost) ประสิทธิภาพการผลิต (Productive index; PI) ต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว (Feed cost per gain; FCG) และมูลค่าจากการขายต่อตัว (Salable bird return; SBR) ดังสมการ

PI = {[BWG (kg) x SR (%)] / [Age (days) x FCR]} x 100

FCG = {[FCR x Feed cost (baht/kg)] / Survival rate (%)} x 100

SBR = Price of live chicken (45 Baht/kg) x BW (kg)

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่อายุ 42 วัน สุ่มไก่จำนวน 6 ตัวต่อกลุ่มทดลอง อดอาหารเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยแบ่งไก่เนื้อออกเป็น 2 ชุดเพื่อนำไปศึกษาคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อจำนวน 4 ตัวต่อกลุ่มทดลอง ทำการชั่งน้ำหนักไก่เนื้อมีชีวิต จากนั้นทำให้สลบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และทำการฆ่าด้วยวิธีเชือดคอ ลวกน้ำร้อน และถอนขนเพื่อนำไปตัดแต่งซาก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักซากและบันทึกน้ำหนักชิ้นส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนอก ส่วนสะโพก ส่วนน่อง ส่วนปีก และอวัยวะภายใน เพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ซาก (Dressing percentage) เนื้อส่วนที่กินได้ (Edible meat percentage) และเครื่องใน (Giblets percentage) ตามวิธีการของ สัญชัย (2553) ดังนี้

Dressing percentage (%) = {Carcass weight / Live weight} x 100

Edible meat percentage = {Part of each meat weight / Carcass weight} x 100

Giblets percentage = {Part of each giblet weight / Live weight} x 100

จากนั้นเก็บตัวอย่างเนื้ออกจำนวน 3 ตัวอย่างต่อกลุ่มทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อ ได้แก่ ค่าสี (Color profile: *L** - Lightness, *a** - Redness และ *b** - Yellowness) วิเคราะด้วยเครื่อง Colorimeter (Model WR-18, Shenzhen Graigar Technology Co., Ltd., Baoan District, China) และองค์ประกอบของเนื้อสัมผัส (Texture profile: Cooking loss, Shear force, Hardness, Springiness, Cohesiveness และ Chewiness) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture analyzer (Model TA.HDplusC, Stable Micro Systems, Goldalming, UK)

ขณะที่ไก่เนื้ออีก 2 ตัวต่อกลุ่มทดลองนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก โดยทำให้ไก่เนื้อสลบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฆ่าให้ตายอย่างสงบด้วยวิธีดึงคอ (Cervical dislocation) จากนั้นทำการเปิดช่องท้องและเก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ดูโอดินัม เจจูนัม และไอเลียม โดยเก็บเนื้อเยื่อบริเวณส่วนกลางของลำไส้เล็กแต่ละส่วนประมาณ 1 ซม. เก็บไว้ในฟอร์มาลีนเข้มข้น 10% ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างลำไส้จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นเนื้อเยื่อโดยกระบวนการดึงน้ำออกจากเซลล์ด้วยเอทานอลที่ระดับต่างๆ และนำไปฝังลงบล็อกพาราฟินเพื่อนำไปตัด ตรึงบนแผ่นสไลด์ และย้อมสีด้วย Hematoxylin และ Eosin จากนั้นนำตัวอย่างสไลด์ลำไส้มาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40x เพื่อวัดความสูงของวิลไล (Villi height) ความกว้างของวิลไล (Villi width) และความลึกของคริปท์ (Crypt depth) ด้วยโปรแกรม Axio vision (Carl Zeiss, Co., Ltd., Seoul, Korea) ตามคำอธิบายของ Oryza et al. (2021) โดยทำการวัดความสูง-ความกว้างของวิลไล และความลึกของคริปท์จำนวน 2 สไลด์ต่อตัว (3 ตำแหน่งต่อสไลด์) และนำค่าความสูงของวิลไลและความลึกของคริปท์มาคำนวณเป็นค่าสัดส่วน และคำนวณพื้นที่ผิวของวิลไล (Villus surface area; VSA) ดังสมการ

$$VSA = (2\pi) \times (\text{Villus width}/2) \times (\text{Villus height})$$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ศึกษามาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of variances) ของข้อมูล และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มการทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (Steel and Torrie, 1980) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม Statistical analysis system (SAS, 2004)

Table 3 Compositions and nutrient profiles of basal and experimental diets (as-fed basis)

Item	Pre-experimental period (Days 1-28)	Experimental period (Days 29-42)			
	Basal diet	Control	S15%	C15%	SC15%
Ingredients (kg)					
Corn	47.80	60.25	60.25	58.35	59.70
Soybean meal (CP 45%)	28.55	18.00	15.30	15.30	15.30
Spirulina platensis (CP 44%)	-	0.00	2.70	0.00	1.35
Caulerpa lentillifera (CP 24%)	-	0.00	0.00	2.70	1.35
Rice bran oil	2.00	2.10	2.10	2.20	1.93
Full-fat soybean (CP 36%)	17.05	15.00	15.00	17.00	15.92
Choline chloride	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Limestone	1.60	1.60	1.70	1.50	1.50
Dicalcium phosphate (P 21%)	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
Premix[a]	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
Salt	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30
DL-methionine	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
L-lysine	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Feed cost (baht/kg)	20.69	19.32	30.78	43.35	37.05
Calculated nutrient values (%)					
Metabolizable energy (kcal/kg)[b]	3001.00	3100.00	3108.00	3109.00	3100.00
Crude protein	22.51	18.01	18.00	18.00	18.00
Available phosphorus	0.74	0.70	0.68	0.70	0.69
Calcium	1.24	1.20	1.23	1.23	1.19
Analyzed nutrient value (%)					
Gross energy (kcal/kg)	4144.07	4012.91	4045.93	4003.36	4052.59
Crude protein	22.27	18.97	18.64	18.36	18.50
Total phosphorus	0.82	0.77	0.67	0.75	0.65
Calcium	1.07	1.15	1.04	1.26	1.23

[a] Provided per kilogram of diet: 4.80 MIU of vitamin A, 2.00 MIU of vitamin D3, 30,000 IU of vitamin E, 1.20 g of vitamin K3, 1.20 g of vitamin B1, 3.20 g of vitamin B2, 2.00 g of vitamin B6, 0.0064 g of vitamin B12, 24.00 g of niacin, 0.80 g of folic acid, 0.08 g of biotin, and 6.00 g of pantothenic acid. 40.00 g of Zn, 48.00 g of Mn, 16.00 g of Fe, 6.40 g of Cu, 0.50 g of I, 0.04 g of Co, and 0.12 g of Se. 0.20 g of antioxidant, 0.88 g of anticaking, and 1.00 kg of carrier.

[b] Total metabolizable energy in ration was calculated from the metabolizable energy of each feed ingredient (kcal/kg), based on the nutrient requirement of the broiler that followed NRC (1994).

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อสมรรถนะการผลิตของไก่เนื้อ พบว่า ที่ช่วงอายุ 29-35 วัน การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในกลุ่ม S15% และ SC15% ส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ดีขึ้น ($P<0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม C15% นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการเจริญเติบโตตลอดช่วงการทดลอง พบว่า การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในกลุ่ม S15% และ SC15% มีอัตราการเจริญเติบโตเทียบเท่ากับกลุ่มควบคุม ขณะที่ปริมาณอาหารที่กินทุกกลุ่มที่ใช้สาหร่ายมีค่าต่ำกว่ากลุ่มควบคุม ($P<0.01$) นอกจากนี้ ต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัวในกลุ่มที่ใช้สาหร่ายทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ($P<0.01$) โดยแปรผันตามต้นทุนค่าอาหารที่ใช้สาหร่ายซึ่งมีราคามากกว่าอาหารกลุ่มควบคุม ($P<0.01$) ถึง 1.59-2.24 เท่า ดังแสดงใน **Table 4**

จากผลการใช้สาหร่าย *S. platensis* ทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารเพียงชนิดเดียวหรือร่วมกับสาหร่าย *C. lentillifera* ที่ระดับ 15% มีแนวโน้มช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของไก่เนื้อเทียบเท่ากับกับการใช้กากถั่วเหลือง ทั้งนี้เนื่องจาก สาหร่าย *S. platensis* ที่มีปริมาณโปรตีน (44%) เทียบเท่ากากถั่วเหลือง และมีความสมดุลของกรดอะมิโน เช่น Lysine, Valine, Leucine, Threonine, Isoleucine และ Methionine ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการสร้างกล้ามเนื้อ (Pootthachaya et al., 2023) มากไปกว่านั้น สาหร่าย *S. platensis* ยังมีสารไฟโคไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุสีน้ำเงินที่เป็นองค์ประกอบหลักของไฟโคบิลิโปรตีนที่ผลิตได้จากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีประสิทธิภาพสูงในการดักจับอนุมูลอิสระ (Radical scavenging) ทั้งยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โปรไบโอติกในกลุ่มที่ผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) และช่วยกระตุ้นการผลิตกรดไขมันสายสั้น ซึ่งมีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ให้หลั่ง Interleukin-18 (IL-18), Mucin (MUC2), Antimicrobial peptides และเพิ่มการแสดงออกของ Tight junction รวมทั้งกระตุ้นการทำงานของเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน เช่น T-cell, B-cell และ Neutrophils (Alwaleed et al., 2021; Slizewska et al., 2021) เพื่อป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อโรคและลดการอักเสบที่เซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ ส่งผลให้สุขภาพของลำไส้ดีขึ้น และพัฒนาการเจริญเติบโตของเซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ เช่น การเพิ่มขึ้นของความสูงของวิลไลและจำนวนเซลล์ที่สร้างเมือก (Goblet cell) ทำให้เกิดกระบวนการย่อยและการดูดซึมโภชนะที่มีประสิทธิภาพ (Bonos et al., 2016) ส่งผลให้ไก่เนื้อสามารถนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตและพัฒนาโครงสร้างร่างกายได้อย่างเต็มที่

นอกจากนี้ ยังมีสารเบต้าแคโรทีน (Carotenoids) และสารฟลาโวนอยด์ (Phenolic compounds) ที่มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ พบได้ทั้งในสาหร่าย *S. platensis* และ *C. lentillifera* (Chen et al., 2019; El-Hady et al., 2022) โดยสารเบต้าแคโรทีนสามารถยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ขาดอิเล็กตรอน โดยการเปลี่ยน Singlet oxygen ($^1O_2$) ให้อยู่ในรูปของ Triplet oxygen ($^3O_2$) ขณะที่สารฟลาโวนอยด์สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Lipoxygenase โดยการเข้าจับกับไอออนของเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์ และยังสามารถจับกับโลหะหนัก (Fe^{2+} และ Cu^{2+}) ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อสร้างอนุมูลอิสระ (อนงนาฏ, 2561) โดยให้ผลสอดคล้องกับ Park et al. (2018) ที่รายงานว่า การเสริมสาหร่าย *S. platensis* ที่ระดับ 0.25-1.00% ในอาหารไก่เนื้อ ช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ Glutathione peroxidase, Superoxide dismutase และ Catalase ในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและลดปริมาณอนุมูลอิสระเพื่อไม่ให้เข้าไปทำลายเซลล์ และยังสอดคล้องกับ El-Hady et al. (2022) รายงานว่า การใช้สาหร่าย *S. platensis* ทดแทนกากถั่วเหลืองที่ระดับ 10-20% ในสูตรอาหารไก่เนื้อส่งผลดีต่ออัตราการเจริญเติบโตและสุขภาพทางเดินอาหาร รวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก (Khan et al., 2020) อย่างไรก็ตาม การใช้สาหร่ายในสูตรอาหารส่งผลให้ปริมาณการกินได้ลดลง เนื่องจากผนังเซลล์ของสาหร่ายที่มีเยื่อใยเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ซึ่งย่อยได้ยากโดยเฉพาะสาหร่าย *C. lentillifera* จึงส่งผลข้างเคียงต่อปริมาณการกินได้ การย่อยได้ และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะบางส่วน (Jha and Mishra, 2021)

Table 4 Effect of algae replacement of soybean meal in diet on performance of broilers

Performance[1]	Control	S15%	C15%	SC15%	P-value	SEM
Starter weight (g/b)	1286.71	1288.14	1307.29	1324.43	0.67	910.80
Days 29-35						
BW (g/b)	1932.14	1898.86	1830.14	1917.57	0.19	37.27
BWG (g/b)	645.43^{a}	610.71^{a}	522.86^{b}	593.14^{a}	<0.01	21.93
FI (g/b)	684.6^{a}	661.7^{d}	673.1^{b}	667.5^{c}	<0.01	0.02
FCR	1.07^{b}	1.09^{b}	1.30^{a}	1.13^{b}	<0.01	0.05
SR (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	N/A	N/A
PI	175.02^{a}	162.07^{a}	117.41^{b}	151.24^{a}	<0.01	10.88
FCG (baht/kg)	20.64^{d}	33.58^{c}	56.45^{a}	41.88^{b}	<0.01	1.64
SBR (baht/kg)	86.95	85.45	82.36	86.29	0.19	1.68
Days 36-42						
BW (g/b)	2657.57	2530.57	2452.14	2589.29	0.09	60.24
BWG (g/b)	725.43	631.71	622.00	671.71	0.29	44.15
FI (g/b)	860.7^{a}	795.8^{b}	788.9^{c}	772.0^{d}	<0.01	0.01
FCR	1.21	1.27	1.27	1.22	0.91	0.08
SR (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	N/A	N/A
PI	148.28	120.67	122.06	141.36	0.56	17.79
FCG (baht/kg)	23.33^{c}	39.20^{b}	54.97^{a}	45.36^{b}	<0.01	2.94
SBR (baht/kg)	119.59	113.88	110.35	116.52	0.88	2.71
Days 29-42 (Overall)						
Final weight (g/b)	2657.57	2530.57	2452.14	2589.29	0.09	60.24
BWG (g/b)	1370.86^{a}	1242.43^{ab}	1144.86^{b}	1264.86^{ab}	0.03	52.45
FI (g/b)	1545^{a}	1458^{b}	1456^{c}	1445^{d}	<0.01	0.03
FCR	1.14	1.18	1.28	1.16	0.18	0.05
SR (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	N/A	N/A
PI	291.86	253.93	218.56	264.00	0.10	21.54
FCG (baht/kg)	21.95^{d}	36.38^{c}	55.35^{a}	43.06^{b}	<0.01	1.77
SBR (baht/kg)	119.59	113.88	110.35	116.52	0.09	2.71
Feed cost (baht/kg)	19.32^{d}	30.78^{c}	43.35^{a}	37.05^{b}	<0.01	0.02

[1] BW = Body weight; BWG = Body weight gain; FI = Feed intake; FCR = Feed conversion ratio; SR = Survival rate; PI = Productive index; FCG = Feed cost per gain; SBR = Salable bird return.

SEM, standard error of means.

N/A, Not applicable.

$^{a-d}$ Means in the same row with different superscripts differ (P<0.05).

การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ พบว่า การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารทั้ง 3 กลุ่ม มีเปอร์เซ็นต์ซาก เนื้ออก ปีก สะโพก น่อง และอวัยวะภายในไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (P>0.05) อย่างไรก็ตาม การใช้สาหร่ายในกลุ่ม S15% ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ตับมีค่ามากกว่ากลุ่มอื่นๆ (P<0.05) ดังแสดงใน **Table 5** ขณะที่ผลการใช้สาหร่ายในสูตรอาหารต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ พบว่า การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารทั้ง 3 กลุ่ม มีคุณภาพเนื้อทั้งค่าสีและองค์ประกอบของเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (P>0.05) ดังแสดงใน **Table 6**

โดยจากผลการทดลอง การใช้สาหร่าย *S. platensis* และ *C. lentillifera* ทดแทนกากถั่วเหลืองไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ ทั้งนี้เนื่องจาก สาหร่ายมีปริมาณโปรตีน (24-44%) ใกล้เคียงกับกากถั่วเหลือง และมีกรดอะมิโน Leucine, Isoleucine และ Valine ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างโปรตีนและกล้ามเนื้อ (Pootthachaya et al., 2023) ซึ่งให้ผลเทียบเท่ากับการใช้กากถั่วเหลือง (Control) นอกจากนี้ จากองค์ประกอบของสาหร่ายที่มีสารไฟโคไซยานินและเบต้าแคโรทีน ที่เป็นรงควัตถุที่มีสีเหลือง-ส้ม สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษา สอดคล้องกับ Altmann et al. (2018) และ Pestana et al. (2020) ที่รายงานว่า การใช้สาหร่าย *S. platensis* ในอาหารมีแนวโน้มที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ โดยมีสีของเนื้ออก (*a** - redness และ *b** - yellowness) ที่เข้มขึ้นจากการสะสมของสารเบต้าแคโรทีนภายในเนื้อซึ่งแสดงถึงลักษณะทางกายภาพที่ดี ไม่มีลักษณะผิดปกติคล้ำ แข็งและแห้ง (Dark firm dry; DFD) ทั้งนี้สีของเนื้อเป็นหนึ่งในดัชนีชี้วัดคุณภาพของเนื้อเช่นเดียวกับองค์ประกอบของเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะค่าการสูญเสียน้ำระหว่างการเก็บรักษาและในระหว่างการปรุงสุก ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการอุ้มน้ำที่จะส่งผลต่อความชุ่มช่ำและความนุ่มเหนียวของเนื้อ (Kumar and Sibi, 2020) โดยตัวชี้วัดดังกล่าวถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการตัดสินใจซื้อเนื้อไก่ของผู้บริโภคอย่างมาก (Pathare et al., 2013) จากคุณสมบัติของสารไฟโคไซยานินและเบต้าแคโรทีนยังสอดคล้องกับ Altmann et al. (2020) ที่รายงานว่า สารต้านอนุมูลอิสระในสาหร่ายสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กากถั่วเหลือง โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดสารประกอบคีโตนและแอลดีไฮด์ ส่งผลให้เกิดกลิ่นและรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในเนื้อ (สัญชัย, 2555) อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองกลุ่มที่ใช้สาหร่าย *S. platensis* 15% ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักตับเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนเมแทบอลิซึมที่เพิ่มขึ้นจากการกระตุ้นการทำงานของไฟโคไซยานินส่งผลให้ตับมีขนาดใหญ่ขึ้น (Liu et al., 2022) แต่ทั้งนี้ไม่พบวิการหรือลักษณะผิดปกติที่เกิดขึ้นในตับ สอดคล้องกับ Pestana et al. (2020) ที่รายงานว่า การใช้สาหร่าย *S. platensis* 15% ในสูตรอาหารไก่เนื้อไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานที่ผิดปกติของตับและไต

Table 5 Effect of algae replacement of soybean meal in diet on carcass quality of broilers

Carcass quality	Control	S15%	C15%	SC15%	P-value	SEM
Dressing percentage (%)	74.27	74.32	73.38	74.42	0.86	1.10
External organ (%)						
Breast inner fillet	5.51	5.29	5.48	5.63	0.57	0.20
Breast fillet	28.59	28.14	26.87	28.53	0.61	1.16
Wing	10.23	10.06	10.47	10.41	0.57	0.25
Thigh	18.45	18.50	19.01	17.88	0.52	0.60
Drumstick	13.98	14.00	14.35	13.67	0.70	0.46
Internal organ (%)						
Liver	1.70^{b}	2.23^{a}	1.72^{b}	1.84^{b}	0.02	0.13
Heart	0.40	0.41	0.41	0.41	0.94	0.02
Spleen	0.28	0.21	0.18	0.30	0.57	0.08
Gizzard	1.11	1.10	1.05	1.07	0.90	0.07
Abdominal fat	1.35	1.08	1.14	1.11	0.27	0.12

SEM, standard error of means.

[a-b] Means in the same row with different superscripts differ (P<0.05).

Table 6 Effect of algae replacement of soybean meal in diet on meat quality of broilers

Meat quality	Control	S15%	C15%	SC15%	P-value	SEM
Color of meat						
*L** - value	39.88	42.58	42.37	38.43	0.49	2.63
*a** - value	-1.50	-1.79	-1.55	-1.25	0.08	0.15
*b** - value	0.69	-0.02	0.13	2.89	0.33	1.42
Texture profile analysis						
Drip loss (%)	2.62	2.31	2.87	2.41	0.75	0.47
Cooking loss (%)	13.01	11.46	11.69	11.17	0.43	0.98
Shear force (N)	33.78	34.15	30.95	33.36	0.92	4.34
Hardness (N)	9.93	10.33	10.09	10.54	0.98	1.29
Springiness	0.58	0.58	0.57	0.58	0.89	0.01
Cohesiveness	0.60	0.62	0.61	0.61	0.60	0.01
Chewiness (N)	3.47	3.66	3.55	3.91	0.82	0.43

SEM, standard error of means.

การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารต่อลักษณะสัณฐานวิทยาในลำไส้เล็กของไก่เนื้อ โดยที่ลำไส้เล็กส่วนดูโอดินัม พบว่า การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในกลุ่ม C15% ความลึกของคริปท์มีค่าต่ำสุด (P=0.02) และอัตราส่วนของความสูงวิลไลต่อความลึกของคริปท์เพิ่มขึ้น (P<0.05) ขณะที่ลำไส้เล็กส่วนเจจูนัม พบว่า การใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในกลุ่ม S15% มีความสูง

วิลไลและพื้นที่ผิวของวิลไลมากที่สุด (P<0.01) กลุ่ม C15% มีความกว้างของวิลไลมากที่สุด (P=0.01) และกลุ่ม SC15% ความลึกของคริปท์มีค่าต่ำสุดและอัตราส่วนของความสูงวิลไลต่อความลึกของคริปท์มากที่สุด (P<0.01) และลำไส้เล็กส่วนไอเลียม พบว่า การใช้สาหร่ายทั้งทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารทั้ง 3 กลุ่ม มีความสูงของวิลไลและพื้นที่ผิวของวิลไลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (P=0.01; **Table 7** และ **Figure 1**)

ทั้งนี้ลำไส้เล็กมีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยและการดูดซึมสารอาหาร ดังนั้นการพัฒนาและการเจริญของเซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ (Epithelium cell) ที่ดีทั้งในส่วน Enterocytes, Goblet cells, Paneth cell และ Stem cells จะช่วยให้การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะและสมรรถนะการเจริญเติบโตของสัตว์ดีขึ้น (Kong et al., 2018) โดยจากผลของการเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กจากการใช้สาหร่ายทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารให้ผลในทิศทางเดียวกับข้อมูลสมรรถนะการผลิตที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับกลุ่มควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก สารไฟโคไซยานินและเบต้าแคโรทีนที่ทำหน้าที่ในการต่อต้านสารอนุมูลอิสระ ช่วยส่งเสริมการเจริญและการแบ่งเซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ (Shanmugapriya et al., 2015; Khan et al., 2020) สอดคล้องกับ Omar et al. (2022) ที่รายงานว่า สารสกัดไฟโคไซยานินและเบต้าแคโรทีนจากสาหร่าย *S. platensis* ช่วยปรับปรุงอัตราการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ทั้งยังช่วยส่งเสริมการพัฒนาของเซลล์เยื่อบุผิวในลำไส้โดยการเพิ่มความสูงของวิลไล อัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปท์ และจำนวนของเซลล์ที่สร้างเมือก ขณะที่อิทธิพลของสาหร่าย *C. lentillifera* ต่อลักษณะสัณฐานทางวิทยาของลำไส้เล็กยังไม่มีการศึกษาในไก่เนื้อ ทั้งนี้จากการศึกษาของ du Preez et al. (2020) ที่ทดลองใช้สาหร่าย *C. lentillifera* ในอาหารต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาในหนูแรท พบว่า เยื่อใยที่ไม่ละลายได้ในน้ำ (Insoluble fiber) จะกระตุ้นการผลิตกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acids: SCFAs) ให้เพิ่มขึ้น ซึ่ง SCFAs จะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติกและเซลล์เยื่อบุผิวลำไส้ (O'Sullivan et al., 2010) อีกทั้งกระตุ้นเซลล์ที่สร้างเมือกให้เพิ่มการหลั่งมิวซิน (Mucin) ส่งผลให้เกิดการป้องกันและการพัฒนาของเซลล์เยื่อบุผิวโดยทางอ้อม (Jiang et al., 2022)

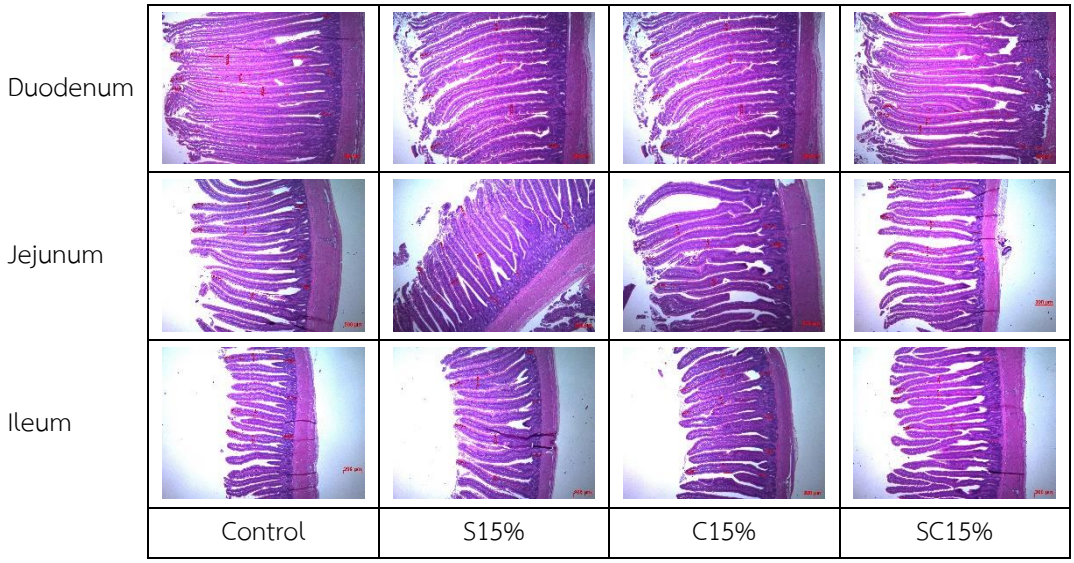

Figure 1 Representative photomicrograph of small intestine sections of broiler at 40× magnification.

Table 7 Effect of algae replacement of soybean meal in diet on histomorphology in small intestine of broilers

Histomorphology	Control	S15%	C15%	SC15%	P-value	SEM
Duodenum						
Villi height (um)	1445.76	1305.46	1327.79	1398.07	0.71	109.52
Crypt depth (um)	186.23^{b}	196.54^{b}	177.07^{b}	268.85^{a}	0.02	21.42
Villi width (um)	99.62	132.97	129.10	116.09	0.06	9.47
Villi height/Crypt depth ratio	7.74^{a}	6.88^{ab}	7.28^{a}	5.30^{b}	0.05	0.64
Villi surface area (mm^2)	452.79	535.02	533.84	508.71	0.30	37.96
Jejunum						
Villi height (um)	1029.75^{b}	1291.86^{a}	875.53^{c}	976.22^{b}	<0.01	35.85
Crypt depth (um)	126.50^{b}	197.66^{a}	174.25^{a}	97.64^{b}	<0.01	11.08
Villi width (um)	82.04^{b}	114.99^{ab}	136.01^{a}	86.44^{b}	0.01	12.14
Villi height/Crypt depth ratio	8.27^{b}	6.65^{c}	5.12^{d}	9.90^{a}	<0.01	0.49
Villi surface area (mm^2)	265.86^{c}	465.26^{a}	370.13^{b}	264.73^{c}	<0.01	33.06
Ileum						
Villi height (um)	658.16^{b}	859.38^{a}	828.01^{a}	869.84^{a}	0.01	47.51
Crypt depth (um)	119.10	124.34	134.49	130.33	0.84	14.76
Villi width (um)	84.98	87.73	94.60	85.70	0.13	3.35
Villi height/Crypt depth ratio	5.54	7.05	6.50	7.32	0.36	0.83
Villi surface area (mm^2)	175.27^{b}	236.68^{a}	246.70^{a}	232.35^{a}	0.01	13.83

SEM, standard error of means.

$^{a-d}$ Means in the same row with different superscripts differ (P<0.05).

จากผลการศึกษาเบื้องต้น สาหร่าย *S. platensis* มีคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญทั้งสารปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต คุณภาพซาก คุณภาพเนื้อ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อ โดยให้ผลเทียบเท่ากับการใช้กากถั่วเหลืองที่เป็นแหล่งโปรตีนหลักในสูตรอาหาร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโอกาสของการศึกษาและการใช้สาหร่ายเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารสัตว์ปีก (Neumann et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ต้นทุนค่าอาหารจากการใช้สาหร่าย (150-500 บาท/กก.) เพื่อเป็นวัตถุดิบหรือสารเสริมในอาหารสัตว์ยังถือเป็นความท้าทายของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในปัจจุบันเมื่อเทียบกับราคากากถั่วเหลือง (20-23 บาท/กก.) หรือปลาป่น (47-55 บาท/กก.) (สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย, 2566) ทั้งนี้จากรายงานของ Saadaoui et al. (2021) คาดการณ์ว่า มูลค่าของตลาดอาหารสัตว์และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีส่วนผสมจากสาหร่ายทั่วโลกจะสูงถึง 40,700 ล้านบาทภายในปี 2567 โดยมีอัตราการขยายตัวต่อปี (Compound average growth rate; CAGR) ที่ 7.39% และคาดว่าจะยังคงสูงถึง 171,050 ล้านบาทในปี 2570 ที่ CAGR 8.80% โดยเฉพาะเอเชียแปซิฟิกที่เป็นภูมิภาคสำคัญสำหรับตลาดอาหารสัตว์ปีกและอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้สาหร่ายเป็นองค์ประกอบ เช่น ชีวการแพทย์และการผลิตเชื้อเพลิง เป็นต้น จากแนวโน้มความต้องการและการขยายตัวของตลาดสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องมีการปรับปรุงกระบวนการเพาะเลี้ยงและการเก็บเกี่ยวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต ซึ่งจะส่งผลให้ราคาของสาหร่ายลดลงและสามารถแข่งขันใน อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ได้ นอกจากนี้ จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยเฉพาะการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่นำเอาชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กมาเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจาก ภายในเซลล์ของสาหร่ายมีการสะสมโปรตีนถึงร้อยละ 15-84 ไขมันร้อยละ 1-63 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 7-69 และไม่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นแหล่ง

วัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ (Thepsuthammarat et al., 2023) โดยภายหลังจากกระบวนการผลิตดังกล่าว ชีวมวลจากสาหร่ายขนาดเล็กยังคงเหลือคุณค่าทางโภชนะ เช่น โปรตีนหรือโพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งสามารถนำมาใช้หรือสกัดเพื่อใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบหรือสารเสริมในอาหารสัตว์ได้ ทั้งนี้ ในปัจจุบันมีสาหร่ายมากกว่า 40,000 สายพันธุ์ ที่มีคุณค่าทางโภชนะสูง (กรดอะมิโนที่จำเป็นและกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน) รวมทั้งสารทุติยภูมิอีกหลายชนิด (รงควัตถุ ฟีนอลิก และโพลีแซ็กคาไรด์) ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่นอกเหนือจากสาหร่าย *Spirulina* sp. เช่น *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Coelastrella* sp. เป็นต้น (Lv et al., 2022; Wang et al., 2022) ซึ่งมีศักยภาพสำหรับการเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกและสารเติมแต่งในอาหารสัตว์ (Saadaoui et al., 2021) เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากสัตว์สำหรับการเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (Functional food) ต่อไปในอนาคต

สรุป

การใช้สาหร่าย *Spirulina platensis* เพื่อทดแทนกากถั่วเหลืองที่ระดับ 15% ในสูตรอาหารของไก่เนื้อ สามารถส่งเสริมการพัฒนาของเซลล์เยื่อบุผิวในลำไส้เล็ก โดยการเพิ่มความสูงของวิลไลและอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปท์ในลำไส้เล็กส่วนเจจูนัมและไอเลียม ทั้งยังไม่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต คุณภาพซาก และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ ทั้งนี้จากองค์ประกอบในสาหร่าย *Caulerpa lentillifera* ควรมีการศึกษาถึงอิทธิพลของสารทุติยภูมิต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม ภูมิคุ้มกัน และความหลากหลายของจุลินทรีย์ ซึ่งน่าจะมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาของเซลล์ในระบบทางเดินอาหารและการเจริญเติบโตของสัตว์

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขที่สัญญา N41A640198 ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมในการทดลองในครั้งนี้ สาขาวิชาการประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนตัวอย่างสาหร่ายเพื่อใช้ในการทดลอง และหมวดสัตว์ปีก สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง และขอขอบคุณกลุ่มวิจัยสารพิษ จุลินทรีย์ และวัตถุเจือปนอาหารในปศุสัตว์และสัตว์น้ำเพื่อความปลอดภัยของอาหาร (Program on Toxic Substances, Microorganisms and Feed Additives in Livestock and Aquatic Animals for Food Safety; Grant No. KKU-RP64-10-005) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

พัสกร พุทธฉายา, ปฐมพงศ์ หล้าคำ, ชานนท์ ทองดี, ศิริศักดิ์ ตาลป้อง, เพ็ญศรี ปลั่งกลาง, อลิศรา เรืองแสง และสาวิตรี วงศ์ตั้งถิ่นฐาน. 2564. การเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนะและค่าการย่อยได้ของสาหร่ายขนาดเล็กระหว่างสายพันธุ์ *Coelastrella* sp. (KKUP1) กับ *Spirulina* sp. แก่นเกษตร. 48 (ฉบับพิเศษ 2): 141-148.

มนัสนันท์ นพรัตน์ไมตรี, วีรชัย ชุมแสงโชติสกุล, มาริษา นาวา, อณัญญา ปานทอง และวรางคณา กิจพิพิธ. 2564. ผลของอาหารสัตว์ฟังก์ชั่นจากพรีไบโอติกส์และซินไบโอติกส์ที่เสริมด้วย เศษหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งเหลือทิ้งต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ของโภชนะ กรดไขมันที่ระเหยง่าย จุลินทรีย์ในไส้ตัน และมิญชวิทยาของลำไส้เล็กของไก่ไข่. แก่นเกษตร. 48 (1): 241-257.

สัญชัย จตุรสิทธา. 2553. เทคโนโลยีเนื้อสัตว์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ และสัตว์น้ำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

สัญชัย จตุรสิทธา. 2555. เทคโนโลยีเนื้อสัตว์. พิมพ์ครั้งที่ 4. โรงพิมพ์มิ่งเมือง, เชียงใหม่.

สุภัตรา โอกระโทก, เมริษา ศิริโสภาพงษ์, เพลิน เมินกระโทก และสุทิศา เข็มผะกา. 2564. ผลของใยอาหารดัดแปลงจากกากมันสำปะหลังต่อลักษณะทางเดินอาหารและลักษณะสัณฐานวิทยาของลำไส้ในไก่เนื้อ. แก่นเกษตร. 49 (ฉบับพิเศษ 2): 159-163.

สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย. 2566. ราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์. แหล่งข้อมูล: https://www.thaifeedmill.com. ค้นเมื่อ 12 กันยายน 2566.

อนงนาฎ ไพนุพงศ์. 2561. อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระกับสุขภาพ. วารสารวิชาการซายน์เทค มรภ.ภูเก็ต. 1(2): 20-27.

Altmann, B., C. Neumann, S. Velten, F. Liebert, and D. Mörlein. 2018. Meat quality derived from high inclusion of a micro-alga or insect meal as an alternative protein source in poultry diets: A pilot study. Foods. 7: 34.

Altmann, B.A., R. Wigger, M. Ciulu, and D. Mörlein. 2020. The effect of insect or microalga alternative protein feeds on broiler meat quality. Journal of the Science of Food and Agriculture. 100: 4292-4302.

Alwaleed, E.A., M. El-Sheekh, M.M. Abdel-Daim, and H. Saber. 2021. Effects of *Spirulina platensis* and *Amphora coffeaeformis* as dietary supplements on blood biochemical parameters, intestinal microbial population, and productive performance in broiler chickens. Environmental Science and Pollution Research. 28: 1801-1811.

Andrew-Selaledi, L., Z. Mohammed Hassan, T.G. Manyelo, and M. Mabelebele. 2020. The Current status of the alternative use to antibiotics in poultry production: An african perspective. Antibiotics. 9: 594.

AOAC. 1998. Official Method of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

Ayalew, H., H. Zhang, J. Wang, S. Wu, K. Qiu, G. Qi, A. Tekeste, T. Wassie, and D. Chanie. 2022. Potential feed additives as antibiotic alternatives in broiler production. Frontiers in Veterinary Science. 9: 916473.

Bonos, E., E. Kasapidou, A. Kargopoulos, A. Karampampas, E. Christaki, P. Florou-Paneri, and I. Nikolakakis. 2016. *Spirulina* as a functional ingredient in broiler chicken diets. South African Journal of Animal Science. 46(1).

Canedo-Castro, B., A. Pinon-Gimate, S. Carrillo, and D. Ramos. 2019. Prebiotic effect of *Ulva rigida* meal on the intestinal integrity and serum cholesterol and triglyceride content in broilers. Journal of Applied Phycology. 31: 3265-3273.

Chen, X., Y. Sun, H. Liu, S. Liu, Y. Qin, and P. Li. 2019. Advances in cultivation, wastewater treatment application, bioactive components of *Caulerpa lentillifera* and their biotechnological applications. PeerJ. 7: e6118.

Chowdhury, E.U., and A. Morey. 2019. Intelligent packaging for poultry industry. Journal of Applied Poultry Research. 28(4): 791-800.

du Preez, R., M.E. Majzoub, T. Thomas, S.K. Panchal, and L. Brown. 2020. *Caulerpa lentillifera* (Sea Grapes) improves cardiovascular and metabolic health of rats with diet-induced metabolic syndrome. Metabolites. 10: 500.

El-Hady, A.M.A., O.A. Elghalid, A.S. Elnaggar, E.A. El-khalek. 2022. Growth performance and physiological status evaluation of *Spirulina platensis* algae supplementation in broiler chicken diet. Livestock Science. 263: 105009.

El-Shall, N.A., S. Jiang, M.R. Farag, M. Azzam, A.A. Al-Abdullatif, R. Alhotan, K. Dhama, F.U. Hassan, and M. Alagawany. 2023. Potential of *Spirulina platensis* as a feed supplement for poultry to enhance growth performance and immune modulation. Frontiers in Immunology. 14: 1072787.

Guo, H., J. Yao, Z. Sun, and D. Duan. 2015. Effects of salinity and nutrients on the growth and chlorophyll fluorescence of *Caulerpa lentillifera*. Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 33: 410-418.

Jha, R., and P. Mishra. 2021. Dietary fiber in poultry nutrition and their effects on nutrient utilization, performance, gut health, and on the environment: A review. Journal of Animal Science and Biotechnology. 12: 51.

Jiang, W., J. Wu, S. Zhu, L. Xin, C. Yu, and Z. Shen. 2022. The role of short chain fatty acids in irritable bowel syndrome. Journal of Neurogastroenterology and Motility. 28(4): 540-548.

Khan, S., M. Mobashar, F.K. Mahsood, S. Javaid, A.A. Abdel-Wareth, H. Ammanullah, and A. Mahmood. 2020. *Spirulina* inclusion levels in a broiler ration: Evaluation of growth performance, gut integrity, and immunity. Tropical Animal Health and Production. 52: 3233-3240.

Kong, S., Y.H. Zhang, and W. Zhang. 2018. Regulation of intestinal epithelial cells properties and functions by amino acids. BioMed Research International. 2018: 2819154.

Kumar, R.S.P., and G. Sibi. 2020. *Spirulina* as poultry feed supplement to enhance nutritional value of chicken meat and eggs: A review. International Journal of Microbiological Research. 11(2): 67-71.

Liu, R., S. Qin, and W. Li. 2022. Phycocyanin: Anti-inflammatory effect and mechanism. Biomedicine and Pharmacotherapy. 153: 113362.

Liu, W.C., Y. Guo, Z.H. Zhao, R. Jha, and B. Balasubramanian. 2020. Algae-derived polysaccharides promote growth performance by improving antioxidant capacity and intestinal barrier function in broiler chickens. Frontiers in Veterinary Science. 7: 601336.

Lv, K., Q. Yuan, H. Li, T. Li, H. Ma, C. Gao, S. Zhang, Y. Liu, and L. Zhao. 2022. *Chlorella pyrenoidosa* polysaccharides as a prebiotic to modulate gut microbiota: Physicochemical properties and fermentation characteristics *in vitro*. Foods. 11(5): 725.

Mahasu, N.H., D. Jusadi, M. Setiawati, and D.I.N.A.A. Giri. 2016. Potential use of *Ulva lactuca* as feed ingredient for tilapia. Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis. 8(1): 259-267.

Nagappan, T. and C.S. Vairappan. 2014. Nutritional and bioactive properties of three edible species of green algae, genus *Caulerpa* (Caulerpaceae). Journal of Applied Phycology. 26: 1019-1027.

Neumann, C., S. Velten, and F. Liebert. 2018. The graded inclusion of algae (*Spirulina platensis*) or insect (*Hermetia illucens*) meal as a soybean meal substitute in meat type chicken diets impacts on growth, nutrient deposition and dietary protein quality depending on the extent of amino acid Supple. Open Journal of Animal Science. 8: 163-183.

O'Sullivan, L., B. Murphy, P. McLoughlin, P. Duggan, P.G. Lawlor, H. Hughes, and G.E. Gardiner. 2010. Prebiotics from marine macroalgae for human and animal health applications. Marine Drugs. 8: 2038-2064.

Omar, A.E., H.S. Al-Khalaifah, A. Osman, A. Gouda, S.I. Shalaby, E.M. Roushdy, S.A. Abdo, S.A. Ali, A.M. Hassan, and S.A. Amer. 2022. Modulating the growth, antioxidant activity, and immunoexpression of proinflammatory cytokines and apoptotic proteins in broiler chickens by adding dietary *Spirulina platensis* phycocyanin. Antioxidants. 11: 991.

Oryza, S.M., S. Wongtangtintharn, B. Tengjaroenkul, A. Cherdthong, S. Tanpong, P. Pootthachaya, W. Boonkum, and N. Pintaphrom. 2021. Investigation of citric acid by-products from rice produced by microbial fermentation on growth performance and villi histology of Thai broiler chicken (KKU 1). Veterinary Science. 8: 284.

Pappou, S., M.M. Dardavila, M.G. Savvidou, V. Louli, K. Magoulas, and E. Voutsas. 2022. Extraction of bioactive compounds from *Ulva lactuca*. Applied Sciences. 12: 2117.

Park, J., S. Lee, and I. Kim. 2018. Effect of dietary *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis* on the growth performance, antioxidant enzyme activity, nutrient digestibility, cecal microflora, excreta noxious gas emission, and breast meat quality of broiler chickens. Poultry Science. 97: 2451-2459.

Pathare, P.B., U.L. Oparaand, and F.A. Al-Said. 2013. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. Food and Bioprocess Technology. 6: 36-60.

Pestana, J.M., B. Puerta, H. Santos, M.S. Madeira, C.M. Alfaia, P.A. Lopes, R.M.A. Pinto, J.P.C. Lemos, C.M.G.A. Fontes, M.M. Lordelo, and J.A.M. Prates. 2020. Impact of dietary incorporation of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) and exogenous enzymes on broiler performance, carcass traits, and meat quality. Poultry Science. 99(5): 2519-2532.

Pootthachaya, P., W. Puangsap, P. Bunchalee, P. Plangklang, A. Reungsang, B. Yuangsoi, A. Cherdthong, B. Tengjaroenkul, and S. Wongtangtintharn. 2023. Investigation of nutritional profile, protein solubility and *in vitro* digestibility of various algae species as an alternative protein source for poultry feed. Algal research. 72: 103147.

Prabakaran, G., M. Moovendhan, A. Arumugam, A. Matharasi, R. Dineshkumar, and P. Sampathkumar. 2018. Quantitative analysis of phytochemical profile in marine microalgae *Chlorella vulgaris*. International Journal of Pharmacy and Biological Sciences. 8(2): 562-565.

Putri, N.T., D. Jusadi, M. Setiawati, and M.T.D. Sunarno. 2017. Potential use of green algae *Caulerpa lentillifera* as feed ingredient in the diet of nile tilapia *Oreochromis niloticus*. Journal Aquaculture Indonesia. 16(2): 195-203.

Saadaoui, I., R. Rasheed, A. Aguilar, M. Cherif, H.A. Jabri, S. Sayadi, and S.R. Manning. 2021. Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production. Journal of Animal Science and Biotechnology. 12: 76.

SAS Institute. 2004. User's Guide: Version 9.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Shanmugapriya, B., S.S. Babu, T. Hariharan, S. Sivaneswaran, and M.B. Anusha. 2015. Dietary administration of *Spirulina platensis* as probiotics on health and histopathology in broiler chicks. International Journal of Recent Scientific Research. 6: 2650-2653.

Slizewska, K., P. Markowiak-Kopec, and W. Slizewska. 2021. The Role of probiotics in cancer prevention. Cancers. 13: 20.

Steel, R.G.D., and J.H. Torrie. 1980. Principles and Procedures of Statistics, 1st ed., McGraw- Hill, New York.

Thepsuthammarat, K., A. Reungsang, and P. Plangklang. 2023. Microalga *Coelastrella* sp. cultivation on unhydrolyzed molasses-based medium towards the optimization of conditions for growth and biomass production under mixotrophic cultivation. Molecules. 28: 3603.

Velten, S., C. Neumann, M. Bleyer, E. Gruber-Dujardin, M. Hanuszewska, B. Przybylska-Gornowicz, and F. Liebert. 2018. Effects of 50 percent substitution of soybean meal by alternative proteins from *Hermetia illucens* or *Spirulina platensis* in meat-type chicken diets with graded amino acid supply. Open Journal of Animal Science. 8: 119-136.

Wang, M., J. Zhou, J. Tavares, C.A. Pinto, J.A. Saraiva, M.A. Prieto, H. Cao, J. Xiao, J. Simal-Gandara, and F.J. Barba. 2022. Applications of algae to obtain healthier meat products: A critical review on nutrients, acceptability and quality, Critical Reviews in Food Science and Nutrition.