ผลของสูตรอาหารต่อปริมาณโปรตีนและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ (*Wolffia globosa* (L.) Wimm)

นางสาว ระพีพรรณ พุ่มอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผลของสูตรอาหารต่อปริมาณโปรตีนและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ (*Wolffia globosa* (L.) Wimm)

นางสาวระพีพรรณ พุ่มอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ผลของสูตรอาหารต่อปริมาณโปรตีนและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ (*Wolffia globosa* (L.) Wimm)

โดย นางสาว ระพีพรรณ พุ่มอินทร์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

_____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

_____

(อาจารย์ ดร.วิญญู ภักดี)

กรรมการ

_____

(อาจารย์ ดร.สุนิสา อึ้งวิวัฒน์กุล)

กรรมการ

_____

(อาจารย์ ดร.จักราวุธ ไม้ทิพย์)

ชื่อ : ระพีพรรณ พุ่มอินทร์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : ผลของสูตรอาหารต่อปริมาณโปรตีนและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ (*Wolffia globosa* (L.) Wimm)
สาขาวิชา : กระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.สุนิสา อึ้งวิวัฒน์กุล
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสูตรอาหาร 4 สูตร ได้แก่ สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 (0.05–0.15 กรัมต่อลิตร) สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ (EC 500-700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) สูตรอาหารน้ำหมักมูลไส้เดือน (ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร) และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (ความเข้มข้นร้อยละ 15-35 โดยปริมาตร) ร่วมกับการพรางแสง 2 ระดับ (ไม่พรางแสงและพรางแสงร้อยละ 50) ที่มีผลต่อการเจริญ ปริมาณโปรตีน และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำผลการศึกษาพบว่า การเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารทั้ง 4 สูตรร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ผลผลิตไข่น้ำสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบไม่มีการพรางแสง การเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ EC 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ABC700) ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณน้ำหนักแห้ง โปรตีน และแคโรทีนอยด์สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 58.85±1.09 กรัมต่อตารางเมตร 36.31±0.72 กรัมต่อ 100 กรัม และ 2,137.33 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพาะเลี้ยงไข่น้ำแบบไม่พรางแสงมีผลต่อปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระโดยสูตรอาหาร ABC700 ร่วมกับการไม่พรางแสง มีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 157.91±8.53 mg GAE/g และ 198.37±9.87 mg QE/g ตามลำดับ และยังพบว่ามีฤทธิ์ในการต้านอนุมูล DPPH และ ABTS ได้ดีที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.05±0.15 และ 3.62±0.12 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จากผลการศึกษาในครั้งนี้จะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงไข่น้ำเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ : ไข่น้ำ (Wolffia globosa), การพรางแสง, โปรตีน, ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

_____

Name : RAPEPAN PHUM-IN

Thesis Title : Effects of culture media on protein content and antioxidant activity of Wolffia (*Wolffia globosa* (L.) Wimm)

Major Field : Chemical Industrial Process and Environment
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Thesis Advisor : SUNISA BOONMA

Academic Year : 2024

Abstract

The aims of this research were to study the effects of 4 culture media formulas (NPK 16-16-16 (0.05–0.15 g/L), hydroponic fertilizer (EC 500-700 µS/cm), liquid vermicompost (10-30% v/v) and composting leachate (15-35% v/v)) combined with 2 light filter levels (no filter and 50% of light intensity) on growth, protein content and antioxidant activity of Wolffia (*Wolffia globosa* (L.) Wimm). The result found that the productivity of Wolffia cultured with all culture media formulas combined with 50% light intensity was higher than that of no filter. Hydroponics fertilizer (EC 700 µS/cm, ABC700) with 50% of light intensity gave the highest dry weight, protein and carotenoid contents 58.85±1.09 g/m^2, 36.31±0.72 g/100 g, and 2,137.33 mg/100 g, respectively. In addition, it was found that cultivation of Wolffia with no filter had an effect on the phytochemical content and antioxidant activity. The ABC700 formula with no light filter gave the highest total phenolic and flavonoid content were 157.91±8.53 mg GAE/g and 198.37±9.87 mg QE/g, respectively. This condition also showed the highest DPPH and ABTS scavenging effect with IC_{50} of 3.05±0.15 and 3.62±0.12 mg/mL, respectively. The results obtained from this research can be applied to commercial cultivation of Wolffia in the future.

Keyword : Wolffia globosa, Light filter, Protein, Antioxidant activity

Advisor

_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี โดยได้รับความกรุณาและความเมตตาจาก อาจารย์ ดร.สุนิสา อึ้งวิวัฒน์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจแก้ข้อบกพร่องต่าง ๆ แนะแนวทางการทำงานและให้ความเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ ความเมตตากรุณาถ่ายทอดความรู้แก่ศิษย์เป็นอย่างดี ทั้งยังปลูกฝังให้ผู้ศึกษามีความอดทน มีวินัย หมั่นค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม และสนับสนุนด้านอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิญญ ภักดี ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.จักราวุธ ไม้ทิพย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้ความรู้ คำแนะนำ และสนับสนุนสารเคมีและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อุดมศักดิ์ บุญมีรติ ที่อนุเคราะห์น้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate) จากศูนย์การเรียนรู้ด้านการจัดการขยะและของเสียแบบผสมผสานภายใน มจพ.วิทยาเขตระยอง (Integrated Solid Waste Management Learning Center, KMUTNB, Rayong Campus) จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราพร ชนะกุล คุณวรณิกา พรมศาสตร์ คุณกิตติยา ศิริโภคารัตนา และคุณวรารักษ์ จุลลา นักวิทยาศาสตร์ ที่สนับสนุนสารเคมี เครื่องแก้ว และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ รวมถึงการให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ อาจารย์นภพล รัตนสุนทร บ้านสวนหนูดี ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างไข่น้ำสดสำหรับเป็นหัวเชื้อในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณสวนสุภัทราแลนด์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และคุณพรทิพย์ อ่ำแจ่ม รองผู้จัดการสวนสุภัทราแลนด์ที่คอยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ชวนฝัน และพี่ออโต้ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการปฏิบัติการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการจัดทำเอกสาร และขอขอบคุณเพื่อนไทเกอร์ น้องซีดี น้องพลอย น้องไปร์ส น้องภาคินที่ให้การช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ที่สนับสนุนเงินทุนการศึกษา ให้คำปรึกษา

และคอยให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำอวยพร ให้กำลังใจและเป็นกำลังใจสำคัญเสมอมา ขอขอบคุณ น้องเฌอเอม น้องเฌอลินน์ พี่เฟิร์น ฝน เอ็นซีที และเอ็กโซ ที่เป็นกำลังใจสำคัญ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ระพีพรรณ พุ่มอินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ช

บรรณานุกรม 2

ประวัติผู้เขียน 4

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาภาวะโลกร้อน ทำให้สภาพอากาศแปรปรวน พืชผลทางการเกษตรเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ เกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบและส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ ส่งผลต่อค่าใช้จ่าย ราคาสินค้าต่าง ๆ มีราคาสูงขึ้น รวมทั้งแหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีราคาสูง อาทิเช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วลิสง และปลาป่น นอกจากนี้วัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิดต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อเกษตรกรรายย่อยที่ทำการปศุสัตว์ เนื่องจากราคาเนื้อสัตว์นั้นสูงตามไปด้วย ทำให้ประชาชนบางส่วนหลีกเลี่ยงที่จะบริโภคเนื้อสัตว์เหล่านี้ แต่เนื้อสัตว์และวัตถุดิบอาหารสัตว์ดังกล่าว เป็นอาหารที่มีโปรตีนสูง ซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย เนื่องจากโปรตีนมีบทบาทต่อการเจริญเติบโต ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ให้พลังงาน ช่วยเสริมสร้างกล้ามเนื้อ และเป็นส่วนประกอบของการสร้างสารภูมิคุ้มกัน (ศุภลักษณ์, 2552) ดังนั้นหากร่างกายขาดสารอาหารประเภทโปรตีนจะทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเป็นอย่างยิ่ง จึงได้มีการหาแหล่งโปรตีนทางเลือกอื่น ๆ ได้แก่ ถั่วเหลือง สาหร่ายสไปรูลิน่า ไข่น้ำ ซึ่งมีรายงานว่า ไข่น้ำ หรือ ผำ เป็นพืชน้ำที่มีโปรตีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง จากการทดสอบพบว่า ความสามารถในการดูดซึมกรดอะมิโนหรือค่าดีไอเอเอสได้ถึง 0.75 นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว มีค่าเท่ากับร้อยละ 70.85 ของกรดไขมันทั้งหมด และมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ในปริมาณที่สูงกว่าพืชน้ำชนิดอื่น ๆ และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในปริมาณสูงเช่นกัน สามารถบริโภคได้ทั้งคนและสัตว์ (Hu et al., 2022)

ไข่น้ำ (*Wolffia* sp.) หรือผำ จัดอยู่ในอาณาจักรพืช วงศ์ *Araceae* (เดิม *Lemnaceae*) สกุล *Wolffia* เป็นพืชมีดอกขนาดเล็ก มีสีเขียว อาศัยลอยอยู่บนผิวน้ำ มีลักษณะเป็นแผ่น เรียกทัลลัส (วนิดา, 2563) รูปร่างทรงรี ค่อนข้างกลมมีขนาดความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร ไม่มีรากและใบ บริเวณลำต้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ชนิดพาเรงคิมา ซึ่งช่องอากาศจะแทรกอยู่ระหว่างเซลล์ทำให้เห็นเป็นฟองน้ำ และช่วยให้มีการลอยตัวอยู่ในน้ำได้ สามารถเจริญเติบโตตามแหล่งน้ำจืดบริเวณที่เป็นแหล่งน้ำนิ่ง (อาณัติ และคณะ, 2553) จึงเหมาะที่จะใช้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ และเสริมในอาหารสัตว์

ประเทศไทย พบไข่น้ำได้ในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งประชากรในพื้นที่นิยมนำไข่น้ำมาประกอบอาหาร จะมีรสมัน นอกจากนี้ยังมีแคลเซียม เบต้าแคโรทีน และมีโปรตีน โดยปริมาณโปรตีนคล้ายคลึงกับถั่วเหลือง ซึ่งสูงกว่าไข่และเนื้อสัตว์ แต่ปริมาณโปรตีนจะไม่สม่ำเสมอขึ้นกับแหล่งที่อยู่ (พิชญาดา, 2556) โดยจะแปรผันไปตามปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ แหล่งน้ำ แสง อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง (pH) และความเข้มข้นของธาตุอาหาร (อารักษ์, 2560) ไข่น้ำมีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว หากเจริญเติบโตในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม และสามารถนำมาเพาะเลี้ยงไว้ในพื้นที่ขนาดเล็กได้ ประชากรในพื้นที่จึงนิยมเก็บไข่น้ำบริเวณแหล่งน้ำนิ่งตามธรรมชาติ เพื่อนำมาสร้างรายได้ แต่ยังไม่เป็นที่นิยมในการบริโภคมากนัก โดยผู้บริโภคบางส่วนยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับสุขอนามัย และความสะอาด เนื่องจากไม่ทราบแหล่งน้ำที่มาในการเพาะเลี้ยงและปัจจัยแวดล้อมในการเจริญเติบโตของไข่น้ำ จึงมีการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในเชิงพาณิชย์เพื่อเพิ่มรายได้ของประชากรในพื้นที่และแก้ปัญหาในเรื่องสุขอนามัย โดยสามารถทราบชนิดแหล่งน้ำที่เพาะเลี้ยงได้ชัดเจน เพื่อให้ผู้บริโภคคลายความกังวล แต่เกษตรกรส่วนใหญ่ประสบปัญหาในการเพาะเลี้ยง ไข่น้ำเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากการใช้สูตรอาหาร และสภาวะแวดล้อมในการเพาะเลี้ยงที่ยังไม่เหมาะสม ส่งผลให้ผลผลิตมีปริมาณน้อย และไม่เพียงพอต่อความต้องการ อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงไข่น้ำควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเพาะเลี้ยงหลายประการ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสูตรอาหารและระดับการพรางแสงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ รวมทั้งศึกษาสารพฤกษเคมีและสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำเชิงพานิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของสูตรอาหารร่วมกับระดับการพรางแสงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำเพื่อให้ได้ผลผลิตและโปรตีนปริมาณสูง

1.2.2 ศึกษาสารปริมาณฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ (EC 500-800 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 (0.05–0.15 กรัมต่อลิตร) สูตรอาหารน้ำหมักมูลไส้เดือน (ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร) และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย

(ความเข้มข้นร้อยละ 15-35 โดยปริมาตร) และมีการพรางแสง 2 ระดับ (ไม่พรางแสงและพรางแสงร้อยละ 50)

1.3.2 วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน และรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ของไข่ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารต่าง ๆ

1.3.3 วิเคราะห์สารพฤกษเคมี และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารที่เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบความเข้มข้นที่เหมาะสมของสูตรอาหารแต่ละสูตร และระดับการพรางแสงที่เหมาะสมให้ผลผลิตและโปรตีนปริมาณสูง

1.4.2 ทราบปริมาณสารพฤกษเคมี ได้แก่ สารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ

1.4.3 ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงเชิงพานิชย์ เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าของไข่น้ำต่อไปในอนาคต

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปและการจำแนกไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

ไข่น้ำ (*Wolffia* sp.) หรือไข่ผำ จัดอยู่ในอาณาจักรพืช วงศ์ *Araceae* (เดิม *Lemnaceae*) สกุล *Wolffia* เป็นพืชที่มีขนาดเล็กที่สุดในโลก เม็ดกลมสีเขียว ไม่มีราก ไม่มีใบ เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 – 1.5 มิลลิเมตร เจริญเติบโตตามแหล่งน้ำจืดและลอยตัวอยู่ในน้ำนิ่ง (อาณัติ และคณะ, 2553) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียก ทัลลัส (Thallus) (วนิดา, 2563) หรือ ฟรอนด์ (Frond) มีรูปร่างคล้ายไข่ พองตัวทั้งด้านบนและด้านล่าง (ภาพที่ 2-1) ซึ่งทัลลัสทำหน้าที่เป็นลำต้นและใบ อาจจะอยู่ติดกันเป็นคู่หรือเดี่ยวขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำที่เจริญเติบโต ไม่มีเนื้อเยื่อท่อลำเลียง องค์ประกอบส่วนใหญ่ของไข่น้ำเป็นเนื้อเยื่อชนิดพาเรนไคมา เป็นเซลล์ที่มีชีวิต และผนังเซลล์เป็นเซลล์ปฐมภูมิ ลักษณะของดอกจะเป็นดอกเดี่ยวแยกเพศ เป็นช่ออยู่ภายในทัลลัส มีดอกเพศผู้แยกกับดอกเพศเมีย ไม่มีกลีบเลี้ยง แต่จะมีอับเกสร 2 ช่อง ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สามารถสืบพันธุ์ได้ 2 แบบ ได้แก่ การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยจะผสมเกสรตัวเมียและตัวผู้ภายในดอก ซึ่งจะมีแมลงและละอองน้ำคอยช่วยในการกระจายเกสร และการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ จะมีการแตกหน่อแบ่งทัลลัสใหม่ออกมาทางด้านข้าง (ภาพที่ 2-2) (ภาชณุมาศ, 2562) ในแง่อนุกรมวิธานเมื่อยึดตามฐานข้อมูลของ NCBI taxonomy สามารถจัดจำแนกหมวดหมู่ของไข่น้ำ (*Wolffia* spp.) ได้ดังนี้ (กิตติมา, 2534)

Kingdom Plantae

Subkingdom Viridiplantae

Division Tracheophyta

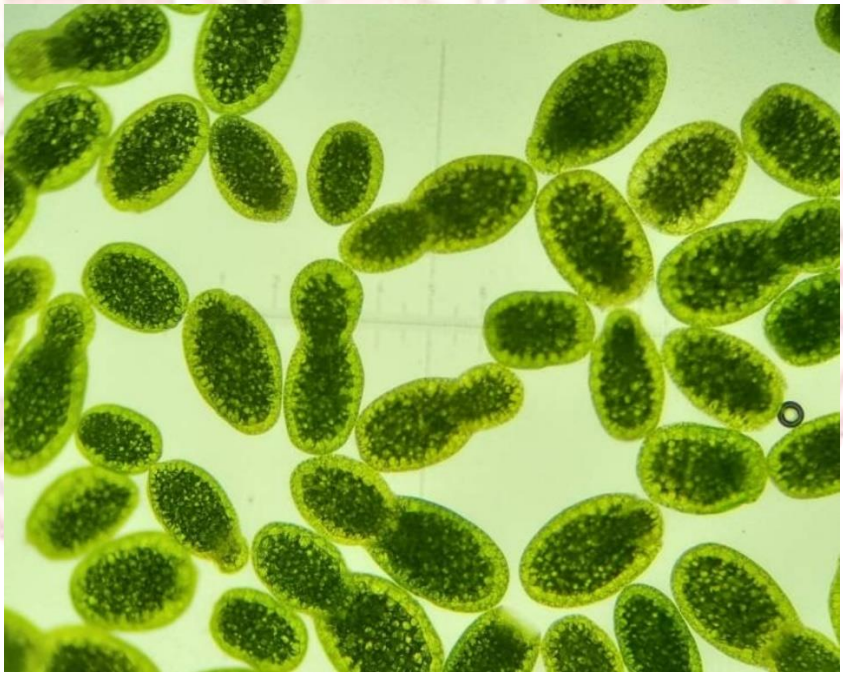
Class Magnoliophytina

Order Alimatales

Family Araceae

Genus *Wolffia*

ภาพที่ 2-1 ไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)



ภาพที่ 2-2 การแตกหน่อของไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

2.1.2 การจำแนกไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

ไข่น้ำกระจายอยู่ในประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป ทวีปแอฟริกากลาง ทางใต้ในเกาะมาดากัสการ์ ทวีปเอเชีย โดยเฉพาะบริเวณเขตศูนย์สูตรใต้ และตะวันออกเฉียงใต้ นอกจากนี้ยังพบในประเทศบราซิล ประเทศอินโดนีเซีย และประเทศออสเตรเลีย (เบญจภรณ์, 2542) โดยปัจจุบันมีรายงานการค้นพบไข่น้ำอยู่ 11 ชนิด ซึ่งจะมีความแตกต่างกันตามองค์ประกอบทางเคมี แหล่งที่ค้นพบ และการเจริญเติบโต ดังตารางที่ 2-1 โดยแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกันเล็กน้อย (ภาพที่ 2-3) ซึ่งในประเทศไทยพบไข่น้ำอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ *Wolffia arrhiza* (L.) Wimm และ *Wolffia globosa* (L.) Wimm (ภาชณุมาศ, 2562) ซึ่งสามารถจำแนกได้จากลักษณะภายนอก ดังนี้ *Wolffia arrhiza* จะมีขนาดใหญ่ สีเขียวเข้มและลำต้นทึบแสง แต่ *Wolffia globosa* จะมีขนาดเล็กกว่า และลำต้นมีลักษณะโปร่งแสง เมื่อนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบว่า ลักษณะลำต้นคล้ายรูปทรงกระบอก (อารักษ์, 2560)

ตารางที่ 2-1 ชนิดของไข่น้ำ แหล่งกำเนิดที่พบ และระยะเวลาการแบ่งเซลล์ (Doubling time)

สกุล (Genus)	**ชนิด (species)**	**แหล่งที่มา (ประเทศ)**	**Doubling time (วัน)**
Wolffia	*angusta*	มาเลเซีย	1.3 ± 0.2
Wolffia	*arrhiza*	เคนยา	1.6 ± 0.1
		บราซิล	2.3 ± 0.0
		เยอรมนี	1.8 ± 0.0
Wolffia	*australiana*	นิวซีแลนด์	1.4 ± 0.0
Wolffia	*borealis*	อเมริกา	1.6 ± 0.0
Wolffia	*brasiliensis*	อาร์เจนตินา	1.4 ± 0.1
Wolffia	*columbiana*	อเมริกา	2.3 ± 0.1
Wolffia	*cylindracea*	ซิมบับเว	2.2 ± 0.1
Wolffia	*elongata*	โคลอมเบีย	1.6 ± 0.0
Wolffia	*globosa*	ไทย	2.0 ± 0.0
		ไทย	2.2 ± 0.1
		ไทย	1.8 ± 0.2
		อินเดีย	1.2 ± 0.0
Wolffia	*microscopica*	อินเดีย	1.0 ± 0.0
Wolffia	*Neglecta*	ปากีสถาน	1.2 ± 0.1

ที่มา: Appenroth *et al.* (2018)

ภาพที่ 2-3 *Wolffia* sp. ทั้ง 11 ชนิด

ที่มา : Yang et al., 2021

2.2 คุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำ

ไข่น้ำเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีรายงานพบว่า มีโปรตีน ไขมัน เส้นใย แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินบี 12 (กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2544; Szamrej and Czerpak, 2004) ดังตารางที่ 2-2 โดยมีโปรตีนสูงประมาณ 19.36 – 45 กรัมต่อ 100 กรัม และปริมาณโปรตีนจะผันแปรตามสารอาหารในแหล่งน้ำที่เจริญเติบโต (ศิริภาวี และคณะ, 2544) ซึ่งมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยร่างกายไม่สามารถสร้างเองได้ ดังตารางที่ 2-3 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของไข่น้ำแห้งกับพืชอาหารชนิดอื่นจะเห็นว่าไข่น้ำให้ปริมาณโปรตีนสูงมากกว่าพืชชนิดอื่นมากกว่าเกือบสองเท่า แสดงดังตารางที่ 2-4 วิลาสินี, (2555) รายงานว่า ฟอสฟอรัสที่พบในไข่น้ำจะช่วยในการดูดซึมแคลเซียมเข้าสู่ร่างกาย และไม่พบการสะสมของแคลเซียมออกซาเลต ซึ่งเป็นสาเหตุการทำให้เกิดนิ่วในกระเพาะปัสสาวะ นอกจากนี้ยังพบว่าไข่น้ำแห้งมีปริมาณสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น เบต้า-แคโรทีน แคโรทีนอยด์ ที่สามารถป้องกัน อนุมูลอิสระออกซิเจนทั้งภายในและภายนอกเซลล์ (บุหลัน, 2556) สารประกอบฟีนอลิกมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระหรือเข้าไปหยุดการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ และต้านการแพ้ มีคุณสมบัติในการช่วยสลายลิ่มเลือด (โอภา และคณะ, 2550 ; อารักษ์, 2560) และมีสารต้านอนุมูลอิสระค่อนข้างสูง (Nutrition division, 2001; Bunea et al., 2008) อีกทั้งยังพบสารประกอบฟลาโวนอยด์ที่เป็นส่วนสำคัญในการช่วยยับยั้ง

แอลฟากลูโคซิเดส (กัญญารัตน์, 2563) มีรายงานการวิจัยถึงฤทธิ์ทางเภสัชของไข่น้ำ พบว่า ช่วยรักษาอาการท้องผูก มีฤทธิ์ต้านการติดเชื้อ ช่วยปรับสภาวะร่างกายให้เป็นด่างในผู้ที่มีสภาวะเครียดหรือกระเพาะอาหารมีความเป็นกรดสูง และช่วยรักษาสภาวะซีดในคนที่เป็นโรคโลหิตจาง (พิพัฒน์พงษ์และคณะ, 2554) และมีการศึกษาพบว่า โปรตีนไฮโดรไลเสต (Protein hydrolysates) ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของไข่น้ำมีศักยภาพเป็นเปปไทด์ในการต้านเซลล์มะเร็งรังไข่ของมนุษย์โดยไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติ (Siriwat et al., 2023)

ตารางที่ 2-2 คุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำ 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ
พลังงาน (กิโลแคลอรี่/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	8.00
โปรตีน (ร้อยละ)	6.80-45.00
ไขมัน (ร้อยละ)	1.80-9.20
เส้นใย (ร้อยละ)	5.70-16.20
แคลเซียม (มิลลิกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	59.00
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	25.00
เหล็ก (มิลลิกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	6.60
วิตามินเอ (IU/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	5,346.00
วิตามินบี (มิลลิกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)	0.03

ที่มา: กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2544)

ตารางที่ 2-3 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของไข่น้ำแห้ง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อ 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ
Protein (g/100 g)	18.0
Isoleucine	524
Leucine	1222
Lysine	1094
Methionine	176
Cystine	339
Total S-cont. amino acids	515
Phenylalanine	728
Tyrosine	1095
Total Aromatic amino acids	1823
Threonine	636
Tryptophan	1272
Valine	774
Arginine	1045
Histidine	335
Alanine	1386
Aspartic acid	1576
Glutamic acid	1723
Glycine	756
Proline	820
Serine	710
Total essential amino acids	7860
Total amino acids	16211
Chemical Score : A/E	60
Chemical Score : A/T	73
Chemical Score : Limited amino acid	Ileu

ที่มา: กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2544)

ตารางที่ 2-4 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของไข่น้ำอบแห้งจากการวิเคราะห์กับอาหารชนิดอื่น ๆ

พืช	ร้อยละปริมาณโปรตีน
ข้าวเจ้า	6.4
ถั่วขาว	22.3
ถั่วเขียว	23.4
ถั่วแดง	22.4
ถั่วดำ	23.8
ถั่วลิสง	29.7
ถั่วเหลือง	34.0
ไข่น้ำอบแห้ง	48.2

ที่มา : กระทรวงสาธารณสุข (2550) ; Ruekaewma et al., (2015)

2.3 ประโยชน์ของไข่น้ำ

ประเทศไทยมักพบไข่น้ำในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ดังนี้

2.3.1 อาหารสำหรับมนุษย์

คุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำที่มีประสิทธิภาพสูงการเหมาะสมต่อการนำไปเป็นอาหารของมนุษย์ ซึ่งประชาชนในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือนิยมนำมาประกอบอาหาร (สุขุมและสุทิน, 2551) ได้ทั้งอาหารคาว เครื่องจิ้ม และอาหารหวาน ยกตัวอย่างเช่น แกงอ่อม แกงคั่วหมูสามชั้น ส่วนผสมในข้าวเกรียบและเครื่องจิ้มมันฝรั่งทอด มัลฟิล พายแอปเปิ้ล ไอศกรีม และแซนวิช (ชุตินุชและมาโนช, 2542) และในปัจจุบันไข่น้ำเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในภูมิภาคอื่น ๆ โดยประชาชนทั่วไปได้มีการบริโภคไข่น้ำเพื่อเป็นอาหารทางเลือกเพื่อสุขภาพเพิ่มสูงขึ้น

ก.

ข.

ค.

ง.

ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างอาหารที่มีไข่น้ำเป็นส่วนประกอบ (ก.) แกงไข่ผำ (ข.) แกงคั่วหมูสามชั้นไข่ผำ (ค.) ยำไข่ผำ (ง.) คุ้กกี้ไข่ผำ

ที่มา : https://www.esandaily.com

2.3.2 อาหารสำหรับสัตว์

นอกจากนี้ด้วยคุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำ สามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ปีกและสัตว์น้ำได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ไก่ เป็ด ปลาตะเพียน ปลานิล และปลาทอง ซึ่งมีรายงานพบว่าการเพิ่มไข่น้ำในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงไก่ไข่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับอาหารสูตรทั่วไป พบว่า ไก่ไข่ที่กินอาหารเสริมไข่น้ำร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีสีของไข่แดงที่สีเข้มกว่าไก่ไข่ที่กินอาหารสูตรทั่วไป (Haustein et al, 1990) และใช้ไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนแทนกากถั่วเหลืองสำหรับสูตรอาหารปลานิล พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกับสูตรอาหารที่ใช้กากถั่วเหลือง จึงสามารถนำไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนในอาหารปลานิลแทนกากถั่วเหลืองได้ (Chareontesprasit and Jiwyam, 2001)

2.3.3 ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย

ไข่น้ำเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นทางเลือกที่จะนำไปศึกษาวิจัยในการใช้บำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีรายงานว่า น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการบำบัด 20 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี และของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 96.45±0.02 และ 90.30±0.10 ตามลำดับ (บุญทิวา, 2556) และมีรายงานว่าใช้ไข่น้ำ 0.8 กิโลกรัม เพาะเลี้ยงในบ่อบำบัดน้ำทิ้งปลาหมอไทย เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่า ค่าบีโอดี แอมโมเนีย ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ มีค่าลดลงจนมีความเหมาะสมต่อการนำน้ำกลับไปเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืดได้ (สุกัญญา, 2565) นอกจากนี้มีรายงานพบว่า สามารถใช้ไข่น้ำในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในพื้นที่น้ำจืด โดยช่วยลดปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท และแคดเมียม ให้มีปริมาณอยู่ตามมาตรฐานที่กำหนด (เสาวนิตย์, 2549)

2.4 การเพาะเลี้ยงและปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ

2.4.1 การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ

ไข่น้ำมีคุณค่าทางโภชนาการสูงมาก สามารถเป็นได้ทั้งอาหารมนุษย์ และอาหารสัตว์ แต่ผู้บริโภคบางส่วนยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับสุขอนามัย และความสะอาด เนื่องจากไม่ทราบแหล่งน้ำที่มาในการเพาะเลี้ยงและปัจจัยแวดล้อมในการเจริญเติบโตของไข่น้ำ จึงยังไม่เป็นที่นิยมในการรับประทาน และไข่น้ำที่เจริญเติบโตในธรรมชาติไม่มีผลผลิตเพียงพอสำหรับนำไปเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำได้ จึงมีการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในเชิงพาณิชย์เพื่อเพิ่มรายได้ของประชากรในพื้นที่ เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ และแก้ปัญหาในเรื่องสุขอนามัย โดยสามารถทราบชนิดแหล่งน้ำที่เพาะเลี้ยงได้ชัดเจน เพื่อให้ผู้บริโภคคลายความกังวล โดยไข่น้ำสามารถเพาะเลี้ยงได้ในพื้นที่ขนาดเล็ก ช่วยประหยัดพื้นที่ สามารถเพาะเลี้ยงได้ทั่วไปในครัวเรือน (วรรณณี, 2562) ซึ่งในปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในครัวเรือน เพื่อบริโภคและเป็นอาหารสัตว์ ได้แก่

2.4.1.1 การเพาะเลี้ยงในบ่อดิน ซึ่งเป็นการเลี้ยงทั่วไปโดยให้สภาวะคล้ายกับไข่น้ำที่พบในธรรมชาติ ไม่สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมภายนอกได้ ต้นทุนต่ำ แต่ได้ผลผลิตน้อย

2.4.1.2 การเพาะเลี้ยงในบ่อปูพลาสติก สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อม สุขอนามัย และความสะอาดได้ ลงทุนต่ำ และสะดวกต่อการล้างทำความสะอาด แต่ต้องหมั่นดูแลผ้าปูพลาสติกไม่ให้ชำรุด

2.4.1.3 การเพาะเลี้ยงในบ่อซีเมนต์ สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อม สุขอนามัยและความสะอาดแต่จะมีการลงทุนสูง และล้างทำความสะอาดค่อนข้างยาก

2.4.1.4 การเพาะเลี้ยงในภาชนะพลาสติก สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อม สุขอนามัยและความสะอาดได้ นอกจากนี้ยังมีความสะดวกต่อการล้างทำความสะอาด

ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (ก.) การเพาะเลี้ยงในบ่อดิน (ข.) การเพาะเลี้ยงในบ่อปูพลาสติก (ค.) การเพาะเลี้ยงในบ่อซีเมนต์ (ง.) การเพาะเลี้ยงในกระบะพลาสติก
ที่มา : https://www.technologychaoban.com

โดยไข่น้ำสามารถเพาะเลี้ยงได้ด้วยสูตรอาหารเคมี และสูตรอาหารชีวภาพ ซึ่งมีธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตตามที่ไข่น้ำต้องการ

สำหรับสูตรอาหารเคมี มีรายงานพบว่า มีการใช้สูตรอาหาร NPK 15-15-15 ร่วมกับสูตรอาหาร Hoagland's E-medium (อาณัติ และคณะ, 2553) สูตรอาหาร NPK 16-16-16 และสูตรอาหารไฮโดรโปรนิกส์ (นัฏฐา และคณะ, 2560) นอกจากนี้ยังมีรายงานเกี่ยวกับการใช้มูลสัตว์ เช่น มูลแพะ มูลไก่ มูลโค และมูลสุกร มาเพาะเลี้ยงไข่น้ำในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในระดับห้องปฏิบัติการและการเพาะเลี้ยงเชิงพานิชย์ (ศิริภาวี และคณะ, 2545 ; นัฏฐา และคณะ, 2560)

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

วิธีการเพาะเลี้ยงไข่น้ำให้มีการเจริญเติบโตที่ดีนั้น สามารถทำการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่มีอิทธิพลส่งผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำได้ ไม่ว่าจะเป็น แสง อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง น้ำ ธาตุอาหาร โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.2.1 แสง มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะพืชที่ต้องอาศัยแสงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เพื่อสร้างอาหาร จากการศึกษาพบว่า ปริมาณความเข้มแสงในช่วง 4,000-15,000 ลักซ์ (Landolt, 1986) เป็นช่วงความเข้มแสงที่ทำให้ไข่น้ำเจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็ว ทำให้สามารถได้ผลผลิตตามที่ต้องการ หากความเข้มแสงต่ำกว่า หรือสูงกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของพืช (อารักษ์, 2560)

2.4.2.2 อุณหภูมิ มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช มีการศึกษาพบว่า ไข่น้ำจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 32-33 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปี (Landolt, 1986)

2.4.2.3 ความเป็นกรดด่าง (pH) ของอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ ส่งผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมในพืช จากการศึกษาพบว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ คือ 5.5-7.0 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไข่น้ำเจริญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโต (อารักษ์, 2560)

2.4.2.4 น้ำ ไข่น้ำจะเจริญเติบโตในแหล่งน้ำจืด บริเวณที่เป็นแหล่งน้ำนิ่ง (นิศาชล, 2548) ซึ่งแหล่งน้ำจืดตามธรรมชาติทั่วไป เมื่อทำการตรวจวัดแล้วมักพบความกระด้างปะปนอยู่ โดยแหล่งน้ำที่ไข่น้ำสามารถเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตจำนวนมากคือ แหล่งน้ำที่มีความกระด้างชนิดน้ำอ่อนไปจนถึงความกระด้างชนิดปานกลาง ในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความกระด้างของแหล่งน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงเป็นสำคัญ

2.4.2.5 ธาตุอาหาร การเพาะเลี้ยงไข่น้ำจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงสารอาหารที่พืชต้องการ เพื่อให้ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโต โดยธาตุอาหารที่ทำให้ไข่น้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อปริมาณธาตุอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ไข่น้ำจะเปลี่ยนรูปร่างเพื่อเข้าสู่ระยะพัก และจมลงก้นบ่อ (สุรีย์พร, 2553)

2.5 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ เป็นอะตอมหรือโมเลกุล ที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในออบิทัลวงนอกสุด ซึ่งไม่มีความเสถียร เนื่องจากในออบิทัลจะต้องมีอิเล็กตรอนครบสองตัว จึงพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนเดี่ยวตัวอื่น ทำให้อนุมูลอิสระมีคุณสมบัติเฉพาะ มีความไวสูง สามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ ได้อย่างรวดเร็ว (โอภา และคณะ, 2550) โดยจะพบอนุมูลอิสระได้ทั้งในสิ่งแวดล้อม และในสิ่งมีชีวิต ซึ่งในกระบวนการเมแทบอลิซึม จะมีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากโมเลกุลออกซิเจน ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนมีอิเล็กตรอนไม่สมดุล ส่งผลให้กลายเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยจะดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลอื่นมาแทนที่ เพื่อให้ตัวเองสมดุล ซึ่งปฏิกิริยานี้ จะเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังสมการที่ (1) และ (2) (บุหรัน, 2556)

$$R^{\bullet} + O_2 \longrightarrow ROO^{\bullet} \quad (1)$$

$$ROO^{\bullet} + RH \longrightarrow ROOH + R^{\bullet} \quad (2)$$

อนุมูลอิสระสามารถทำลายสารชีวโมเลกุลได้ทุกประเภท เช่น ลิพิด เอ็นไซม์ โปรตีน หากไม่มีการยับยั้งเกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่เพื่อสร้างอนุมูลอิสระได้ เช่น ลิพิดเปอร์ออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระภายในเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้อนุมูลอิสระสามารถเกิดได้จากสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การติดเชื้อแบคทีเรีย เมื่อร่างกายได้รับเชื้อแบคทีเรีย ระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายจะสร้างอนุมูลอิสระมาเพื่อทำลายเชื้อแบคทีเรีย แต่หากระบบภูมิคุ้มกันไม่สามารถควบคุมได้ อนุมูลอิสระจะส่งผลกระทบให้เกิดโรคออโต้อิมมูน การได้รับมลภาวะ เช่น ควันบุหรี่ ควันท่อไอเสียรถยนต์ การประกอบอาหาร เช่น การย่างเนื้อสัตว์ที่มีไขมันสูง การใช้น้ำมันทอดอาหารด้วยอุณหภูมิสูง ดังนั้นอนุมูลอิสระจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคและส่งผลให้เกิดความร้ายแรงต่อโรคดังกล่าวได้อย่างรวดเร็ว เป็นอันตรายต่อร่างกาย โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวข้องกับความบกพร่องของเซลล์ประสาท สภาวะขาดเลือดของสมองและหัวใจ กระบวนการอักเสบของร่างกาย เกิดความผิดปกติของปอด สร้างความเสียหายต่อเซลล์ ทำให้เกิดริ้วรอย และพัฒนาก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคชรา โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ อัลไซเมอร์ พากินสัน โรคภูมิแพ้ และโรคเกี่ยวกับสายตา (โอภา และคณะ, 2550 ; บุหรัน, 2556)

2.6 สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นสารที่ทำหน้าที่ยับยั้ง ทำลาย กำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกาย เป็นกลไกในป้องป้องกันความเสียหายของเซลล์ (ภาชนุมาศ, 2562) ลดผลกระทบที่เกิดจากอนุมูลอิสระ สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้โดยตรง ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อกำจัดอนุมูลอิสระให้หมดไปหรือหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ไม่ให้สามารถดำเนินต่อไปได้ ซึ่งระบบร่างกายของสิ่งมีชีวิตจะมีระบบป้องกันการทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อจากอนุมูลอิสระหลายชนิด แต่ละชนิดจะทำหน้าที่แตกต่างกันไป โดยมีกลไกการทำงานเพื่อต้านอนุมูลอิสระได้หลายรูปแบบ เช่น การดักจับอนุมูลอิสระ การยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ขาดอิเล็กตรอน การจับกับโลหะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน การหยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ การเสริมฤทธิ์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ ตัวอย่างการดักจับอนุมูลอิสระ ดังสมการที่ (3) และ (4) (บุหรัน, 2556)

$$R^{\bullet} + AH \longrightarrow RH + A^{\bullet} \quad (1)$$

$$RO^{\bullet} + AH \longrightarrow ROH + A^{\bullet} \quad (2)$$

โดย $R^{\bullet}$ คือ อนุมูลอิสระ

$RO^{\bullet}$ คือ อนุมูลอิสระ

AH คือ สารต้านอนุมูลอิสระ

ซึ่งแหล่งกำเนิดของสารต้านอนุมูลอิสระมี 2 ประเภท ดังนี้

2.6.1 สารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากธรรมชาติ (โอภา และคณะ, 2550 ; บุหรัน, 2556)

สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติสามารถพบได้ทั้งในพืชและสัตว์ เป็นได้ทั้งเอนไซม์ วิตามิน และสารอื่น ๆ เช่น

2.6.1.1 วิตามินซี มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี จึงต้านอนูมูลอิสระในเซลล์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในไซโพลาสซึม

2.6.1.2 วิตามินอี ละลายได้ในไขมัน ทำงานร่วมกับสารต้านออกซิเดชันตัวอื่น ๆ และช่วยปรับให้ร่างกายนำวิตามินเอมาใช้ เพื่อป้องกันสารพิษที่ตกค้างจากโลหะ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เมมเบรน

2.6.1.3 กลูต้าไธโอน เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ไซโตพลาสซึมและเมมเบรน ทำลายพิษโดยตรง

2.6.1.4 เอนไซม์กลูตาไธโอนเปอร์ออกซิเดส เอนไซม์กลูตาไธโอนรีดักเทส เอนไซม์กลูตาไธโอนทรานเฟอเรส ที่ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นออกซิเจนและน้ำ

2.6.1.5 แคโรทีนอยด์ และ ยูบิควิโนน ช่วยป้องกันอนุมูลอิสระทั้งภายในเซลล์และภายนอกเซลล์

2.6.2 สารต้านอนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์

สารต้านอนุมูลอิสระจากการสังเคราะห์ นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันซึ่งเป็นสาเหตุให้อาหารมีสี กลิ่น และรสชาติเปลี่ยนไปจากเดิม (โอภา และคณะ, 2550 ; บุหรัน, 2556) เช่น

2.6.2.1 บีเอชเอ เป็นวัตถุกันหืนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอาหารประเภทที่มีส่วนผสมของไขมันและน้ำมันเป็นส่วนประกอบ มีกลิ่นฉุน ไม่ละลายน้ำ ละลายในแอลกอฮอร์

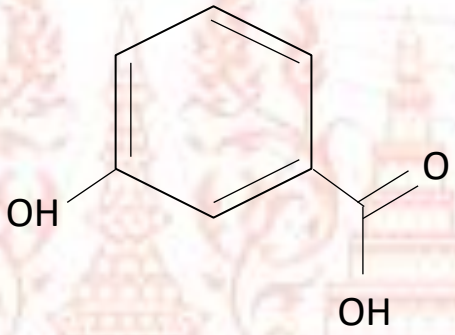
2.6.2.2 บีเอชที วัตถุกันหืน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารประเภทไขมันสัตว์ ผลิตภัณฑ์จากนม ผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์จากขนมอบ โดยจะมีประสิทธิภาพดีกว่าบีเอชเอเล็กน้อย เป็นกลิ่นฟีนอล ไม่ละลายน้ำ ละลายในแอลกอฮอร์

2.6.2.3 กรดแกลลิค เป็นสารประกอบอินทรีย์ พบมากในองุ่น ใบชา และพืชอื่น ๆ นิยมใช้กับอุตสาหกรรมทางยา เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยยับยั้งเชื้อรา เชื้อไวรัส และช่วยต้านอนุมูลอิสระ

2.6.2.4 อีดีทีเอ นิยมใช้กำจัดไอออนของโลหะต่าง ๆ ในทางการแพทย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารคีเลท สามารถจับกับธาตุโลหะที่มีประจุได้

2.7 สารประกอบฟีนอลิก

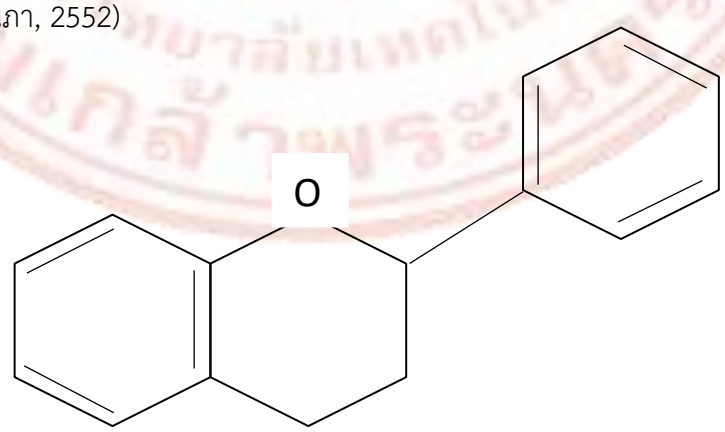
สารประกอบฟีนอลิก พบได้ทั่วไปในพืช เช่น ผัก ผลไม้ ชา ช็อกโกแลต และไวน์แดง เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลเปอร์ออกซิล ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ และเป็นสารคีเลท ช่วยดักจับไอออนของโลหะหนัก โดยเป็นสารอิเล็กตรอนและเป็นตัวให้ไฮโดรเจนอะตอมกับอนุมูลอิสระ จึงสามารถกำจัดอนุมูลที่มีออกซิเจนที่อยู่ในรูปแอคทีฟได้นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ไวรัส การแพ้ การอักเสบ และสลายลิ่มเลือด (Rice-Evans et al., 1996 ; โอภา และคณะ, 2550)



ภาพที่ 2-6 สารประกอบฟีนอลิก

2.8 สารประกอบฟลาโวนอยด์

สารกลุ่มฟลาโวนอยด์มีสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยจะทำการหน่วงหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้อนุมูลอิสระเกิดความเสถียร ปฏิกิริยาลูกโซ่จึงหยุดลง มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลรวมอยู่ในโมเลกุล สามารถละลายน้ำได้ (ศิรินภา, 2552)



ภาพที่ 2-7 สารประกอบฟลาโวนอยด์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงและปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ เพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตที่เพียงพอต่อความต้องการ เนื่องจากไข่น้ำมีโปรตีนสูง เหมาะที่จะเป็นอาหารมนุษย์ เพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับผู้รับประทานมังสวิรัติ และเกษตรกรที่ต้องการนำไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์

อาณัติ และคณะ (2553) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ (*Wolffia globosa* (L.) Wimm.) และหาระดับที่เหมาะสมของการใช้ไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนโปรตีนจากกากถั่วเหลืองในอาหารสัตว์ปีก ผลการทดลองพบว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงเชิงการค้า มีโปรตีน 29.61 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และมีกรดอะมิโนส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับกากถั่วเหลือง ซึ่งไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงในช่วงฤดูหนาวมีระดับแร่ธาตุต่ำกว่า ($P<0.05$) ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ คือ ความเข้มข้นของปุ๋ย ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และความเข้มแสง โดยความเข้มข้นของปุ๋ย N-P-K สูตร 15-15-15 เท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 และความเข้มแสงเท่ากับ 8,000-15,000 ลักซ์ เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำ และทำการศึกษาการใช้ไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนโปรตีนจากกากถั่วเหลืองในอาหารสัตว์ปีก พบว่า โปรตีนจากไข่น้ำสามารถใช้ทดแทนโปรตีนจากกากถั่วเหลืองได้ร้อยละ 75, ต่ำกว่าร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ในอาหารไก่ไข่ ไก่กระทง และนกกระทา ตามลำดับ

อมลณัฐ และคณะ (2555) ศึกษาการพัฒนาการผลิตไข่น้ำ โดยใช้มูลสัตว์ในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ แบ่งชุดการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ดิน (ชุดควบคุม) 2) มูลโคแห้ง 3 กรัมต่อลิตร ผสมกับดิน 5 กรัมต่อลิตร 3) มูลค้างคาวแห้ง 0.15 กรัมต่อลิตร ผสมกับดิน 5 กรัมต่อลิตร 4) มูลค้างคาวแห้ง 0.30 กรัมต่อลิตร ผสมกับดิน 5 กรัมต่อลิตร ทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 7 วัน พบว่า การเพาะเลี้ยงด้วยมูลโคแห้ง 3 กรัมต่อลิตร ผสมกับดิน 5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำหนักแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 3.50±0.81 กรัม และการเพาะเลี้ยงด้วยมูลค้างคาวแห้ง 0.15 กรัมต่อลิตร ผสมกับดิน 5 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 20.86±0.32 กรัมต่อ 100 กรัม

Ruekaewma, et al. (2015) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*Wolffia globosa*) ให้ได้ผลผลิตในปริมาณสูง เพื่อเป็นอาหารของมนุษย์ โดยแบ่งทำการเพาะเลี้ยงทั้งหมด 5 ระบบ ได้แก่ 1) การเติมอากาศแบบคงที่ 2) การเติมอากาศในแนวตั้งด้านบนของบ่อ 3) การเติมอากาศกวนพื้นผิวน้ำในแนวนอน 4) การฉีดพ่นละอองน้ำด้านบน 5) การเลี้ยงแบบแบ่งชั้นแล้วมีการพ่นละอองน้ำด้านบน ทำการเพาะเลี้ยงทั้งหมด 28 วัน และได้ทำการวิเคราะห์ทุก ๆ 7 วัน พบว่า การเติมอากาศกวนพื้นผิวน้ำในแนวนอนให้น้ำหนักแห้งเท่ากับ 42.94±2.17 กรัมต่อตารางเมตร แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กับการเลี้ยงในระบบอื่น ๆ มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยเท่ากับร้อยละ 48.2, 9.6 และ 14.5 ตามลำดับ

นัฏฐา และคณะ (2560) ศึกษาอิทธิพลของการเพาะเลี้ยงไข่น้ำจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมเพื่อผลผลิตที่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ อาหารเพาะเลี้ยง คือ ปุ๋ยมูลแพะ ความเข้มข้น 2 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ปุ๋ยเคมี ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปุ๋ยไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 0.5 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนตอเมตร ร่วมกับการพรางแสง 3 ระดับ คือ ไม่พรางแสง พรางแสงร้อยละ 50 หนึ่งชั้น และพรางแสงร้อยละ 50 สองชั้น มีการปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH เท่ากับ 5-6) และควบคุมความลึกของระดับน้ำ 200 มิลลิเมตร เพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 20 วัน พบว่า อาหารที่เพาะเลี้ยงและการพรางแสงมีผลต่อผลผลิตของไข่น้ำ ช่วยเพิ่มปริมาณองค์ประกอบทางเคมี และรงควัตุ ซึ่งอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ไม่ได้รับการพรางแสงตลอดการเพาะเลี้ยงให้ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และคลอโรฟิลล์ดีที่สุด โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์เท่ากับ 1,236.49, 38.80 กรัมต่อตารางเมตร และ 41.64 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ และอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ได้รับการพรางแสงร้อยละ 50 สองชั้น มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 40.46

นิตยา และคณะ (2564) ศึกษาการเจริญเติบโตของไข่น้ำ (*Wolffia globosa*) โดยทำการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยปุ๋ยไฮโดรโปนิกส์ ความเข้มข้น 0.77 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ใช้ปัจจัยควบคุมแสงเปรียบเทียบกับระบบโรงเรือนกลางแจ้งกึ่งปิด อุณหภูมิน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง (pH เท่ากับ 5.70) ค่าการนำไฟฟ้า โดยทำการตรวจวัดทุกวัน วันละ 2 ครั้ง เป็นเวลาทั้งหมด 30 วัน และจะทำการเก็บเกี่ยวเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักของไข่น้ำที่เจริญเติบโตในทุก 5 วัน จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Fisher test ที่ระดับนัยสำคัญ ($p = 0.05$) พบว่า ระบบควบคุมแสงมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบโรงเรือนกลางแจ้งกึ่งปิด โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเท่ากับ 174.66 ± 13.53 และ 7.82 ± 1.48 กรัม ตามลำดับ

บทที่ 3
สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

3.1.1 สารเคมี

1) Acetone ยี่ห้อ LOBA CHEMIE

2) Hydrochloric acid (HCl) ยี่ห้อ LOBA CHEMIE

3) Sodium hydroxide (NaOH) ยี่ห้อ คิวเร็ค เคมิคอล

4) Potassium sulfate (K_2SO_4) ยี่ห้อ คิวเร็ค เคมิคอล

5) Copper sulfate ($CuSO_4$) ยี่ห้อ คิวเร็ค เคมิคอล

6) Selenium (Se)

7) Sulfuric acid (H_2SO_4)

8) Boric acid (H_3BO_3) ยี่ห้อ LOBA CHEMIE

9) Sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

10) Methyl red

11) Bromocresol green

12) 95% Ethanol

13) DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) บริษัท Thermo Fisher Scientific

14) ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenthiazoline-6-sulphonic acid)) ยี่ห้อ Sigma-aldreich

15) Gallic acid

16) Folin & ciocalteu's phenol ยี่ห้อ LOBA CHEMIE

17) Sodium bicarbonate ($NaHCO_3$)

18) Quercetin

19) Sodium nitrite ($NaNO_2$)

20) Aluminum chloride ($AlCl_3$)

21) Potassium persulfate ($K_2S_2O_8$)

3.1.2 ตัวอย่างไข่น้ำ

หัวเชื้อไข่น้ำได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มบ้านสวนหนูดี จังหวัดนครนายก ประเทศไทย

3.1.3 อาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*Wolffia* sp.)

1) ปุ๋ยเคมี NPK สูตร 16-16-16 ทางการค้า

2) ปุ๋ยไฮโดรโปนิกส์ ได้รับอนุเคราะห์จากสวนสุภัทราแลนด์ จ.ระยอง

3) น้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ได้จากการหมักมูลไส้เดือนด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:10 และให้ออกซิเจนเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นนำน้ำหมักมากรองผ่านผ้าขาวบางอีกครั้ง แล้วทำการต้มให้เดือด 30 นาที (ดัดแปลงจาก ศิริพร และคณะ 2553)

4) น้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate) ได้รับอนุเคราะห์จากศูนย์การเรียนรู้ด้านการจัดการขยะและของเสียแบบผสมผสานภายใน มจพ.วิทยาเขตระยอง (Integrated Solid Waste Management Learning Center, KMUTNB, Rayong Campus)

3.1.4 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) ถังน้ำพลาสติก

2) อ่างน้ำพลาสติก

3) เครื่องแก้ว (บริษัท Schott Duran, Germany)

4) เครื่องแก้ว (บริษัท Borosil, India)

5) เครื่องแก้ว (บริษัท Pyrex, USA)

6) เครื่องชั่งสารทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น MS3002TS/00 (บริษัท Mettler, USA)

7) เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo, รุ่น MS204TS/00 (บริษัท Mettler, USA)

8) เครื่องปั่นเวี่ยงตกตะกอน 6,000 รอบต่อนาที ยี่ห้อ BOECO รุ่น C-28A (บริษัท Boeco, Germany)

9) เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Ohaus รุ่น ST20 (บริษัท Ohaus, Thailand)

10) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter) : ยี่ห้อ Yieryl รุ่น TPH01601

11) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง Genesys 30 ยี่ห้อ Thermohero fisher scientific

รุ่น SPN-1-840-277300

12) ตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส : ยี่ห้อ Panasonic รุ่น MODEL SF-PC697

13) ตู้ดูดความชื้น Desiccator

14) ตู้เย็นควบคุมอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส : ยี่ห้อ Panasonic รุ่น SBC-P2DSA

15) ตู้อบความร้อน ขนาด 240 ลิตร : ยี่ห้อ BINDER

16) ชุดเครื่อง Ultrasonic Processor พร้อมอุปกรณ์สำหรับสารปริมาตรน้อย รุ่น SON-1 VCX130PB (บริษัท SONICS&MATERIALS,INC.)

17) เครื่องย่อยไนโตรเจน รุ่น KT-L 8s-BS

18) เครื่องกลั่นไนโตรเจน ยี่ห้อ Gerhardt

19) หม้อต้ม

20) Hotplate Stirrer ยี่ห้อ IKA Germany

21) Cuvette : ยี่ห้อ Starna

22) ช้อนตักสาร

23) ตะแกรงวางหลอด

24) ตู้ดูดควัน

25) หลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง ขนาด 50 มิลลิลิตร (บริษัท Extragene, Taiwan)

26) หลอดหยด

27) เครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลท ยี่ห้อ METERTECH รุ่น M956+

28) เครื่องให้ออกซิเจน

29) เครื่องระเหยแห้งแบบสูญญากาศ (Rotary Evaporator) ยี่ห้อ HEIDOLPH ประเทศ Germany รุ่น HEI-VAP VALUE (560-01300-00)

30) เครื่อง Multiparameter photometer รุ่น HI 83300

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างและการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ

3.2.1.1 การเตรียมตัวอย่างไข่น้ำ

ตัวอย่างไข่น้ำได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มเพาะเลี้ยงไข่น้ำ จังหวัดนครนายก นำมาเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเคมี NPK สูตร 16-16-16 ที่ระดับความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 14 วัน เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในการเพาะเลี้ยงต่อไป

3.2.1.2 การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ

1) เตรียมอาหารเพาะเลี้ยงไข่น้ำทั้งหมด 4 สูตร โดยแบ่งย่อยเป็นชุดละ 16 ชุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์ทางเคมีของสูตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงไข่น้ำแต่ละชนิด ได้แก่ ไนเตรทแอมโนเนีย และฟอสเฟส (ภาคผนวก ก) และใช้น้ำเปล่าเป็นชุดควบคุม จากนั้นวางการทดลองแบบสุ่ม (Complete randomized design ; CRD) โดยทำชุดการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ ดังต่อไปนี้

ชุดการทดลอง 1-4 สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ที่ระดับความเข้มข้น 0 (NPK0), 0.05 (NPK0.05), 0.10 (NPK0.10) และ 0.15 (NPK0.15) กรัมต่อลิตร

ชุดการทดลอง 5-8 สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้าในของเหลว (EC) 0 (ABC0), 500 (ABC500), 600 (ABC600) และ 700 (ABC700) ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

ชุดการทดลอง 9-12 สูตรอาหารน้ำหมักมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 0 (M0), 10 (M10), 20 (M20), 30 (M30) โดยปริมาตร

ชุดการทดลอง 13-16 สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 0 (C0), 15 (C15), 25 (C25), 35 (C35) โดยปริมาตร

2) เพาะเลี้ยงในกระบะพลาสติกขนาด 15 ลิตร และมีอาหารปริมาตร 12 ลิตร โดยใช้ไข่น้ำสดปริมาณเริ่มต้น 10 กรัม (ภาพที่ 3-1) และมีการให้แสง 2 ระดับ คือ ไม่มีการพรางแสง และมีการพรางแสงร้อยละ 50 1 ชั้น เพาะเลี้ยงในโรงเรือนระบบปิด เป็นเวลา 21 วัน (ภาพที่ 3-2)

3) วัดความเข้มแสง และเติมน้ำให้ได้ปริมาตรเท่าเดิมทุก ๆ 3 วัน ควบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.5-8.0 และวัดการเจริญโดยการหาน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งในวันแรกและวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง

4) เมื่อครบ 21 วัน ทำการเก็บเกี่ยว โดยกรองผ่านผ้าขาวบาง ล้างด้วยน้ำสะอาดหลาย ๆ ครั้ง นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งหาน้ำหนักแห้งคำนวณในหน่วย กรัมต่อตารางเมตร แล้วนำมาไข่น้ำแห้งบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำมาเก็บในตู้ดูดความชื้น เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในกระบะพลาสติก

ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในงานวิจัยนี้

3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเคลดาลห์ (Kjeldahl method (AOAC, 1990))

3.2.2.1 การย่อยตัวอย่างชีวมวลไข่น้ำ

นำตัวอย่างไข่น้ำบดละเอียดชั่งประมาณ 0.5 กรัม ใส่ในหลอดแก้วเจลดาลห์ แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อทำการย่อย ใส่วัสดุกันเดือนพลุ่งพล่าน 3-4 ชิ้น จากนั้นนำไปย่อยตัวอย่างที่ความร้อน 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จนได้สารละลายสีเขียวใส (ภาพที่ 3-3) (ภาคผนวก ค)

3.2.2.2 การกลั่นตัวอย่างชีวมวลไข่น้ำ

นำสารละลายตัวอย่างที่ทำการย่อยแล้วมากลั่น โดยต่อหลอดแก้วเจลดาลห์ขวดเดิมที่บรรจุสารละลายที่ทำการย่อยแล้วเข้ากับเครื่องกลั่น ให้ปลายสายเครื่องกลั่นจุ่มอยู่ในหลอดแก้วเจลดาลห์ เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยปริมาตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วรองรับสารละลายที่กลั่นแล้วด้วยขวดลูกชมพู่ที่บรรจุสารละลายกรดบอริก ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 3 หยด สารละลายกรดบอริกจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู ทำการกลั่นเป็นเวลา 5 นาที จะได้สารละลายสีเขียวแกมน้ำเงิน (ภาคผนวก ค)

3.2.2.3 การไทเทรตสารตัวอย่าง

นำสารละลายที่ได้มาทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอลิกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จนสารละลายถึงจุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสีชมพู จากนั้นบันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อคำนวณหาร้อยละปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ตามสมการที่ (1) (ภาคผนวก ค)

ภาพที่ 3-3 การย่อยตัวอย่างชีวมวลไข่น้ำ

3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ (ดัดแปลงจาก Kundu et al., 2016)

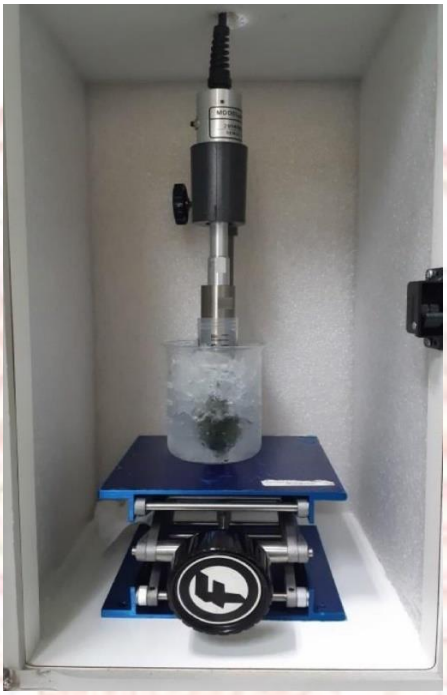
นำไข่น้ำที่บดละเอียด 0.2 กรัม ไปสกัดรงควัตถุคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ ด้วยสารละลายอะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร เสร็จแล้ว จึงนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470, 645 และ 663 นาโนเมตร จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ (ภาคผนวก ง)

3.2.4 การวิเคราะห์สารปริมาณพฤกษเคมีและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ

3.2.4.1 การเตรียมสารสกัดไข่น้ำ (ดัดแปลงจาก Corona – Jimenez et al., 2016)

ชั่งไข่น้ำบดละเอียดประมาณ 0.5 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวก์ เติมเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค โดยใช้ค่าแอมพลิจูดร้อยละ 80 เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำส่วนใสไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยสารแบบสูญญากาศ

จากนั้นชั่งน้ำหนักของสารสกัด บันทึกผล แล้วเติมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 3-4 การสกัดตัวอย่างชีวมวลไข่น้ำด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

3.2.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content, TPC) (ดัดแปลงจาก Thuphairo et al., 2019)

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดยใช้ Gallic acid ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางที่ความเข้มข้น 0, 5, 25, 50, 100, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารตัวอย่างปริมาตร 25 ไมโครลิตร ใส่ในไมโครเพลท แล้วเติมสารละลาย Folin & ciocalteu's phenol reagent เข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติม $NaHCO_3$ ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 125 ไมโครลิตร ทำการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน และสารอ้างอิงด้วยวิธีเดียวกัน บ่มไว้ในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนด จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร เพื่อทำการคำนวณผล โดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน Gallic acid และรายงานผลในหน่วย mg gallic acid equivalent (GAE) / กรัมสารสกัด (mg GAE/g extract) (ภาคผนวก จ)

3.2.4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total flavonoide content, TFC) (ดัดแปลงจาก Maduwanthi & Marapana et al., 2019)

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดยใช้ Quercetin ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางที่ความเข้มข้น 0, 5, 25, 50, 100, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารตัวอย่างปริมาตร 70 ไมโครลิตร ใส่ในไมโครเพลท แล้วเติมสารละลาย $NaNO_2$ ความเข้มข้น 5 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 70 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที และเติม $AlCl_3$ ความเข้มข้น 2 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที แล้วเติม NaOH เข้มข้น 1 M ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ทำการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน และสารอ้างอิงด้วยวิธีเดียวกัน เมื่อครบกำหนด จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร เพื่อทำการคำนวณผล โดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน Quercetin และรายงานในหน่วย mg quercetin equivalent (QE) / กรัมสารสกัด (mg QE/g extract) (ภาคผนวก จ)

3.2.4.4 การวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging (ดัดแปลงจาก Yahom et al., 2020)

เตรียมเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร ผสมกับสารละลาย DPPH radical ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ (ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนนำมาใช้งาน) เจือจางสารละลายตัวอย่าง 5 ความเข้มข้น ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลต แล้วเติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 180 ไมโครลิตร บ่มทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที เมื่อครบกำหนด จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร เพื่อทำการคำนวณหาการยับยั้งที่ร้อยละ 50 (IC_{50}) (ภาคผนวก จ)

3.2.4.5 การวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS assay (ดัดแปลงจาก Saeio et al., 2011)

เตรียมสารละลาย ABTS เข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ ผสมกันในอัตราส่วน 2:3 แล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำมาเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:20 จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยเจือจางสารละลายตัวอย่างทั้งหมด 5 ความเข้มข้น แล้วนำสารตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลต เติมสารละลาย ABTS ปริมาตร 180 ไมโครลิตร และตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 5 นาที เมื่อครบกำหนด จึงนำไป วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร เพื่อทำการคำนวณการยับยั้งที่ร้อยละ 50 (IC_{50}) (ภาคผนวก จ)

3.2.5 การวิเคราะห์ทางค่าสถิติ

ทดสอบค่าความแตกต่างของการเจริญเติบโตของไข่น้ำ การหาปริมาณโปรตีน การหาปริมาณรงควัตถุ และการวิเคราะห์สารปริมาณพฤกษเคมีและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระจากการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารต่าง ๆ ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และไม่พรางแสง ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Paired-Samples t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) version 17.0

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*Wolffia globosa*)

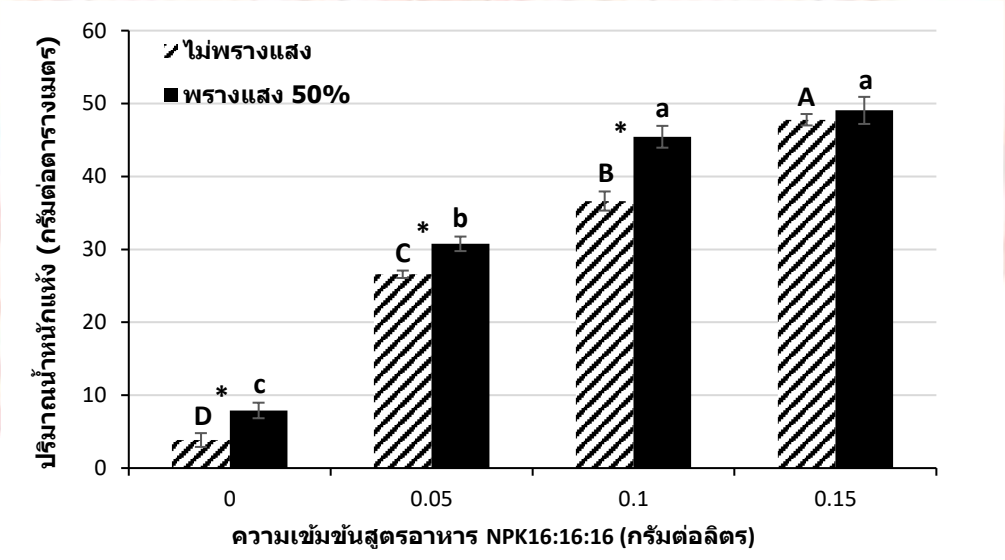
การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*W. globosa*) ด้วยสูตรอาหาร 4 สูตร ได้แก่ สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate) ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของแต่ละสูตรอาหารแสดงดังตารางที่ 4-1 โดยเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสง 2 ระดับ คือ ไม่พรางแสง มีความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วง 23,000-59,000 ลักซ์ และพรางแสงร้อยละ 50 มีความเข้มแสงเฉลี่ย ในช่วง 10,000-26,000 ลักซ์ ทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 21 วัน โดยมีรายละเอียดของผลการวิจัย ดังนี้

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของสูตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงไข่น้ำแต่ละชนิด

สูตรอาหาร	พารามิเตอร์				
	pH	EC (µS/cm)	Nitrate-N (NO_3^--N) (mg/l)	Ammonia-N (NH_3 -N) (mg/l)	Orthophosphate (PO_4^{3-}- P) (mg/l)
NPK0.05	7.12±0.00	185±2.65	<5	9.17±0.12	8.93±1.59
NPK0.10	7.03±0.00	243±0.00	<5	13.76±0.15	15.27±5.33
NPK0.15	6.99±0.00	306.33±12.74	<5	18.76±0.06	22.70±2.46
ABC500	7.16±0.08	530.67±13.61	35.67±3.51	8.43±0.32	25.00±0.00
ABC600	7.11±0.08	660.00±10.15	36.00±9.64	8.57±0.40	25.00±0.00
ABC700	7.03±0.07	765.33±18.71	45.00±7.94	9.03±0.25	25.00±0.00
M10	7.88±0.09	440.67±20.60	<5	12.73±2.29	9.10±1.68
M20	7.82±0.05	757.00±0.00	<5	17.30±0.66	12.87±1.82
M30	7.85±0.04	812.00±0.00	<5	21.33±0.15	21.70±1.25
C15	7.87±0.02	718±94.00	5.67±0.58	5.20±0.17	10.13±0.75
C25	7.79±0.06	1112±7.00	11.00±3.00	4.53±0.29	17.13±1.62
C35	7.91±0.03	1502±96.97	20.67±1.53	4.70±0.30	25.33±0.58

4.1.1 ปริมาณไข่น้ำแห้งที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16

จากการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้นทั้ง 4 ระดับ เป็นระยะเวลา 21 วัน จากนั้นทำการเก็บเกี่ยวและนำไปหาน้ำหนักแห้ง พบว่า การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ให้ผลผลิตสูงที่สุด ซึ่งการเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และเพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 49.06 ± 1.86 และ 47.78 ± 0.78 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ถัดมาคือสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงเท่ากับ 45.44 ± 1.50 และ 30.76 ± 0.99 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ผลผลิตที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 36.63 ± 1.3 และ 26.58 ± 0.5 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-1

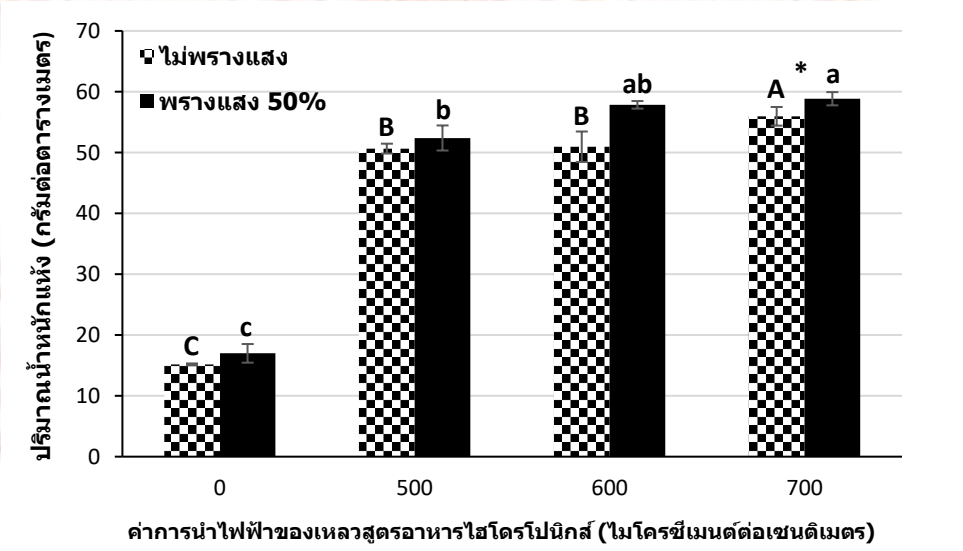


รูปที่ 4-1 น้ำหนักแห้งไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.1.2 ปริมาณไข่น้ำแห้งที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์

จากการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นทั้ง 4 ระดับ เป็นระยะเวลา 21 วันพบว่า การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ให้ผลผลิตสูงที่สุด ซึ่งการเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และไม่พรางแสง ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 58.85 ± 1.09 และ 55.96 ± 1.54 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) ถัดมาคือสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงเท่ากับ 57.84 ± 0.62 และ 52.40 ± 2.06 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ผลผลิตที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 50.96 ± 2.50 และ 50.64 ± 0.81 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-2

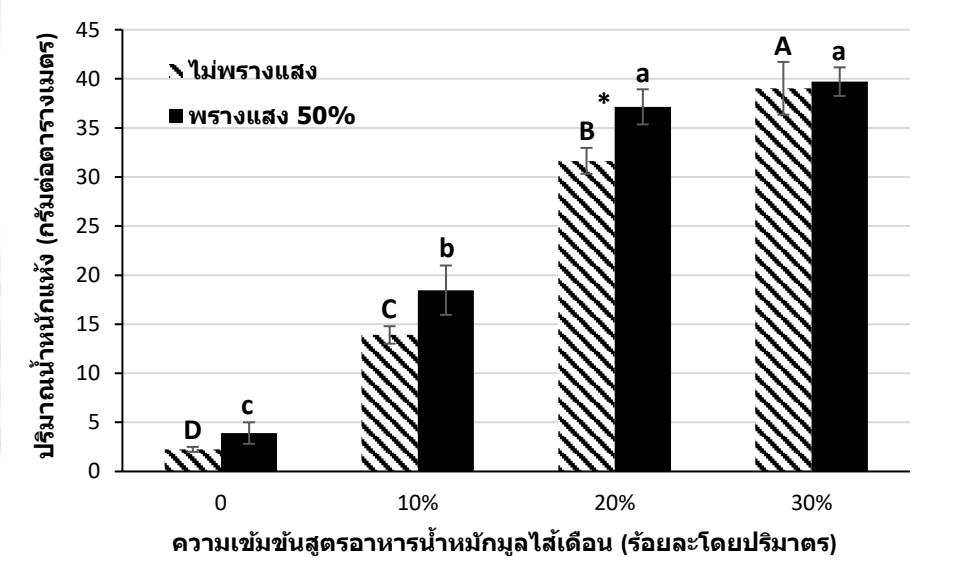


รูปที่ 4-2 น้ำหนักแห้งไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.1.3 ปริมาณไข่น้ำแห้งที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

จากการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ความเข้มข้นทั้ง 4 ระดับ เป็นระยะเวลา 21 วัน พบว่า การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ให้ผลผลิตสูงที่สุด ซึ่งการเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และการเพาะเลี้ยงไม่พรางแสง ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 39.71 ± 1.46 และ 39.03 ± 2.69 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ถัดมาคือสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่การเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และการเพาะเลี้ยงไม่พรางแสง ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 37.14 ± 1.79 และ 31.64 ± 1.32 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ผลผลิตเท่ากับ 18.47 ± 2.52 กรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่ผลผลิตที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 13.91 ± 0.89 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-3

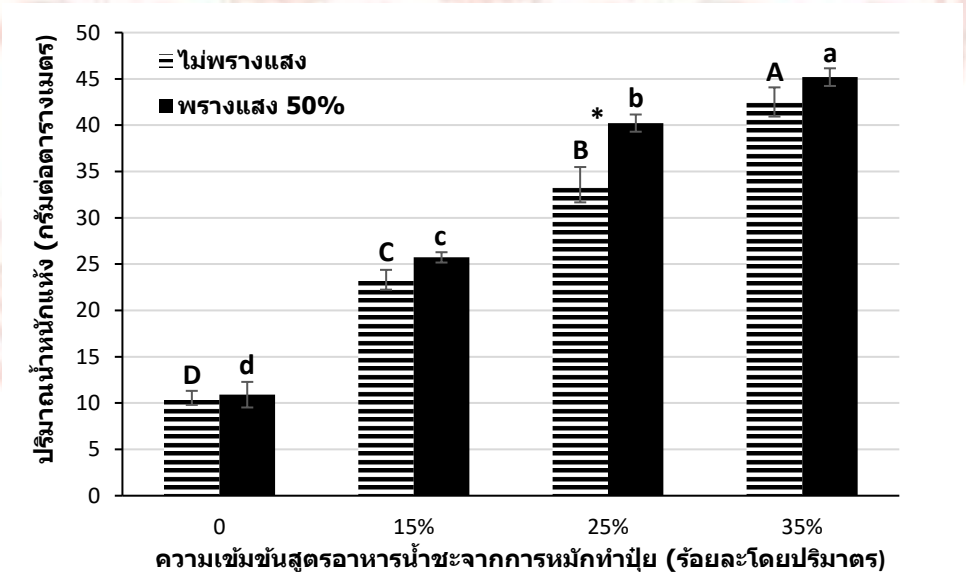


รูปที่ 4-3 น้ำหนักแห้งไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.1.4 ปริมาณไข่น้ำแห้งที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate)

จากการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นทั้ง 4 ระดับ เป็นระยะเวลา 21 วัน พบว่า การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร ให้ผลผลิตสูงที่สุด ซึ่งการเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และการเพาะเลี้ยงไม่พรางแสง ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 45.19 ± 0.95 และ 42.51 ± 1.58 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ถัดมาคือสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร ที่การเพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 และการเพาะเลี้ยงไม่พรางแสง ให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 40.23 ± 0.93 และ 33.58 ± 1.91 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ผลผลิตเท่ากับ 25.73 ± 0.56 กรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่ผลผลิตที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งเท่ากับ 23.23 ± 1.07 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-4

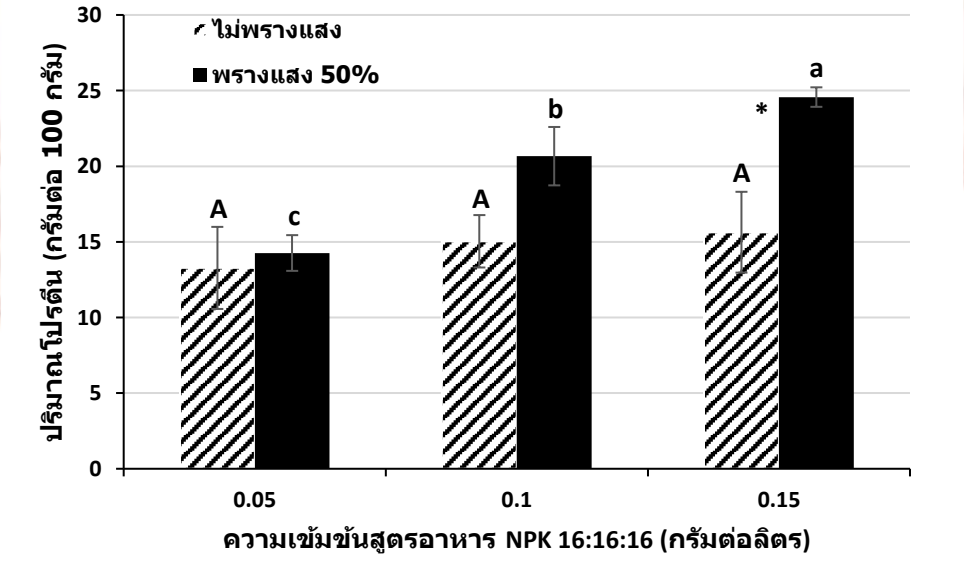


รูปที่ 4-4 น้ำหนักแห้งไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย
หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

4.2.1 ปริมาณโปรตีนไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาลห์พบว่าการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนดีที่สุด ซึ่งสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสง 50% ให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 24.57 ± 0.64 และ 20.66 ± 1.93 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 15.64 ± 2.67 และ 15.04 ± 1.73 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ถัดมาคือ สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 14.26 ± 1.18 กรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 13.28 ± 2.71 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-5

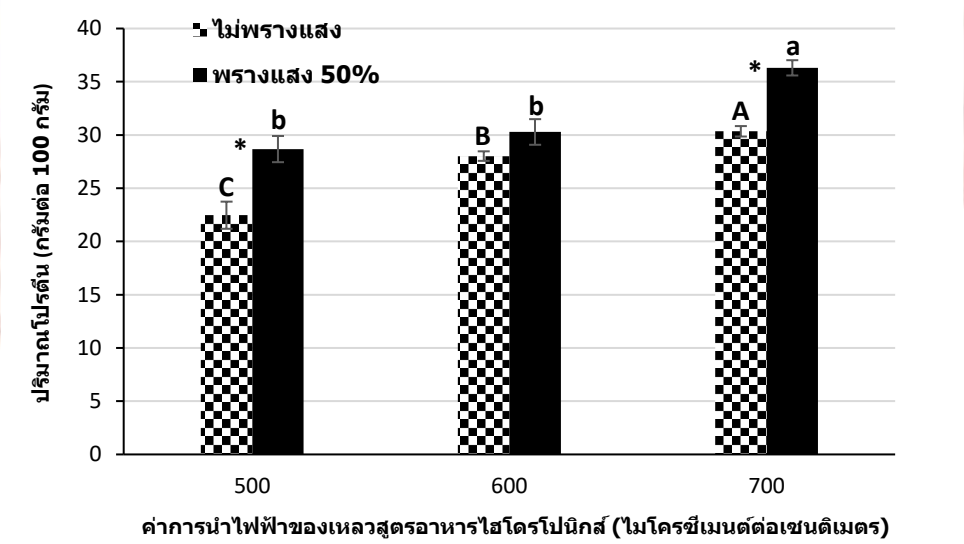


รูปที่ 4-5 โปรตีนไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2.2 ปริมาณโปรตีนไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาลห์พบว่าการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนดีที่สุด ซึ่งสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 36.31 ± 0.72 และ 28.68 ± 1.23 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 30.35 ± 0.49 และ 22.47 ± 1.28 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 30.28 ± 1.20 กรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 28.02 ± 0.45 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-6

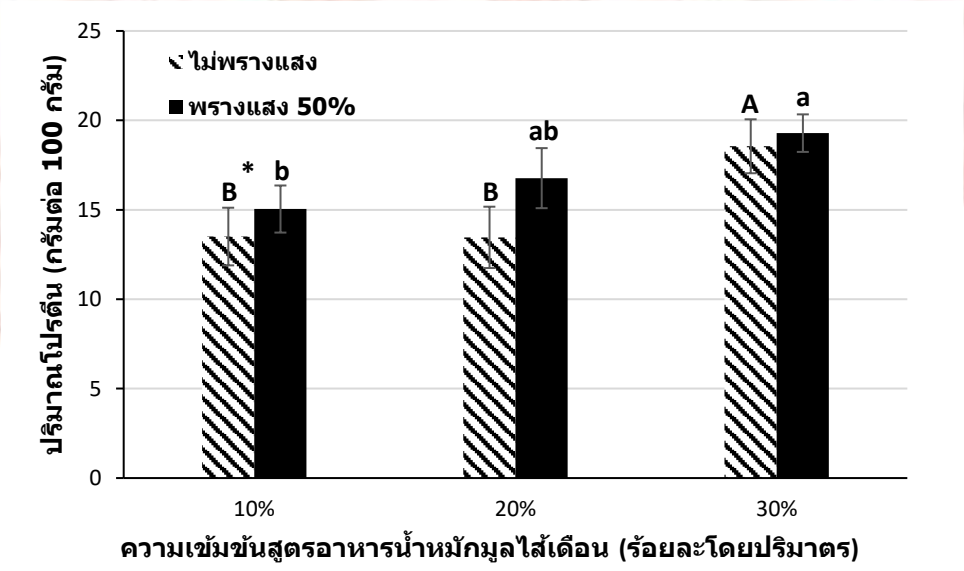


รูปที่ 4-6 โปรตีนไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2.3 ปริมาณโปรตีนไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาลห์พบว่าการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนดีที่สุด ซึ่งสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 19.29 ± 1.05 และ 16.77 ± 1.68 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 18.55 ± 1.51 และ 13.46 ± 1.71 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ถัดมาคือสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงเท่ากับ 15.04 ± 1.32 กรัมต่อ 100 กรัม และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 13.50 ± 1.61 กรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-7

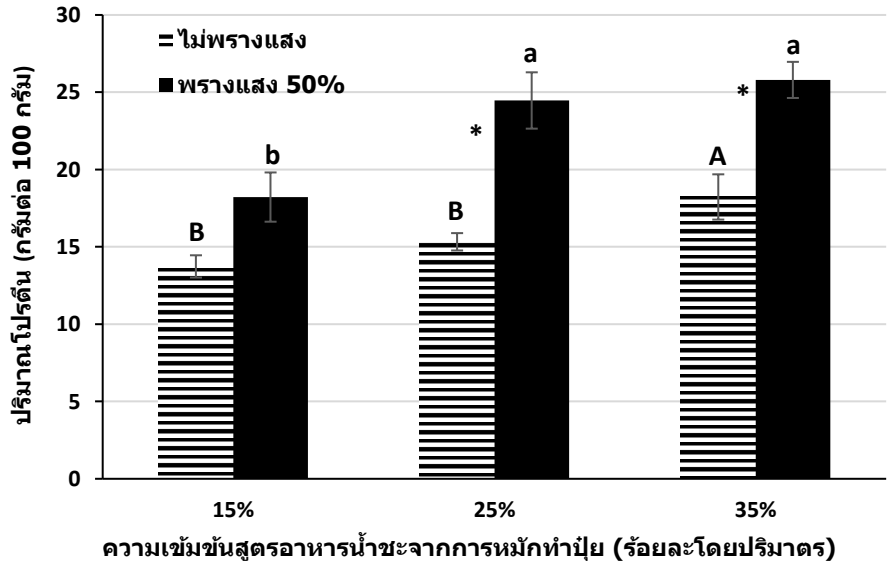


รูปที่ 4-7 โปรตีนไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.2.4 ปริมาณโปรตีนไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate)

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีเจลดาลห์พบว่าการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนดีที่สุด ซึ่งสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 25.80 ± 1.17 และ 24.47 ± 1.82 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณโปรตีนของไข่น้ำที่มีการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสง ให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 18.23 ± 1.46 และ 15.33 ± 0.56 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 18.22 ± 1.59 กรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงโดยไม่พรางแสงให้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 13.73 ± 0.72 กรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 โปรตีนไข่น้ำ (*W. globosa*) ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำ

4.3.1 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16

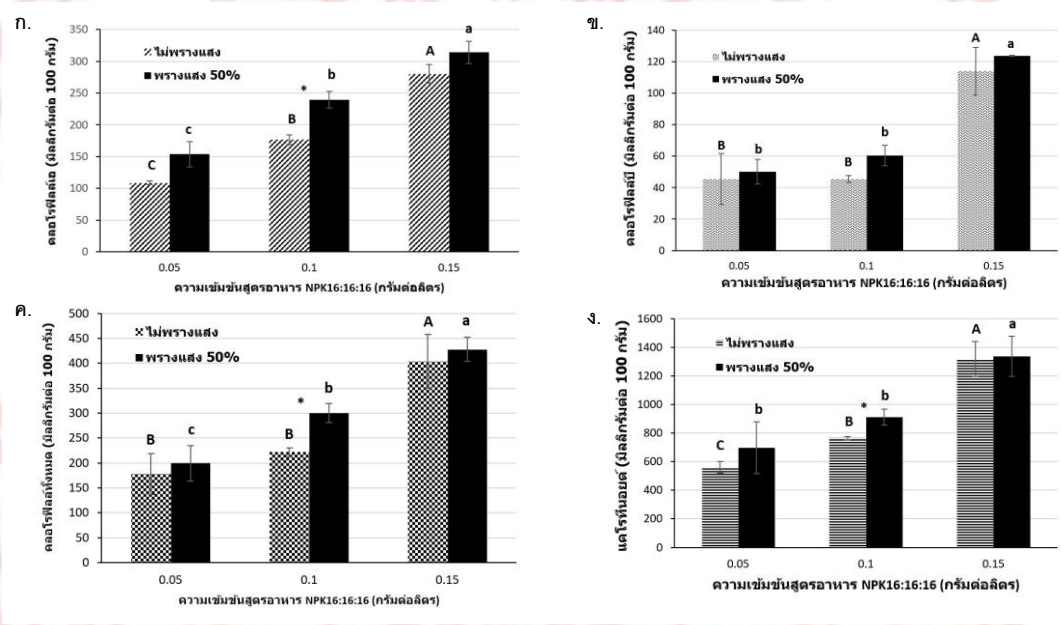
เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาสกัดรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ด้วยอะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร พบว่า การเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่มีการพรางแสง

โดยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 313.98 ± 17.67, 239.68 ± 12.84 และ 153.74 ± 20.16 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 280.25 ± 14.78, 176.49 ± 7.46 และ 108.60 ± 2.92 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 123.78 ± 0.28, 60.39 ± 6.52 และ 50.18 ± 7.86 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 113.91 ± 15.12, 45.44 ± 2.19 และ 45.45 ± 16.11 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 427.78 ± 24.24, 300.01 ± 19.30 และ 199.14 ± 35.61 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 403.93 ± 53.99, 221.88 ± 8.80 และ 117.91 ± 41.05 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สำหรับสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,336.23 ± 139.94, 921.67 ± 56.36 และ 697.92 ± 182.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร, สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.10 กรัมต่อลิตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.05 กรัมต่อลิตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,318.08 ± 122.92, 765.38 ± 10.99 และ 559.66 ± 41.38 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 (ก.) คลอโรฟิลล์เอ (ข.) คลอโรฟิลล์บี (ค.) คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (ง.) แคโรทีนอยด์

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.3.2 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาสกัดรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ด้วยอะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร พบว่าการเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่มีการพรางแสง

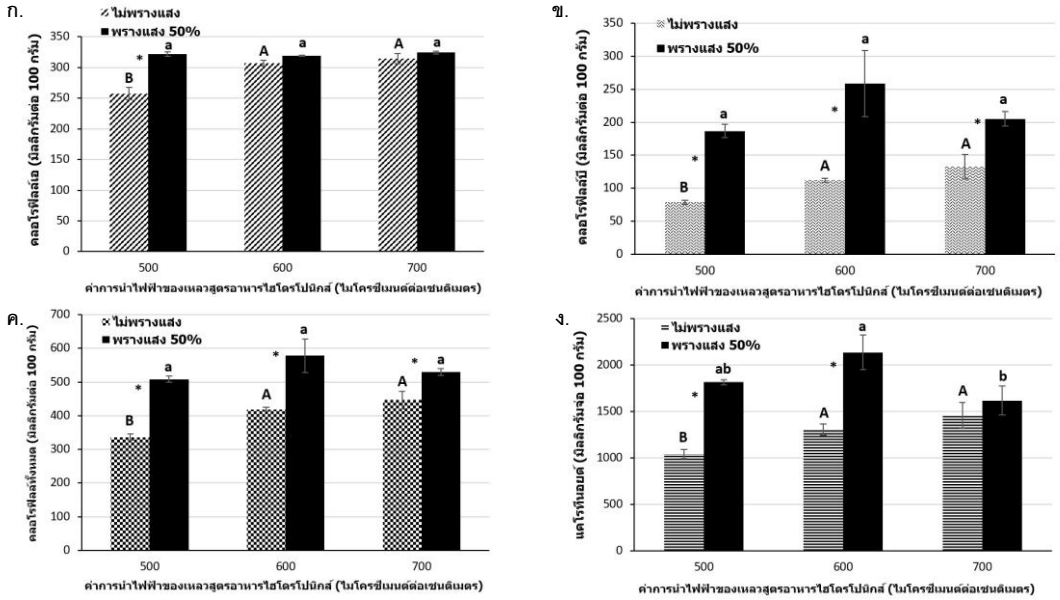
โดยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 324.14 ± 2.18, 318.95 ± 0.62 และ 321.34 ± 3.67 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 314.21 ± 8.11, 306.90 ± 4.57 และ 257.45 ± 10.27 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 205.33 ± 10.74, 259.00 ± 50.12 และ 186.73 ± 10.23 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 132.68 ± 18.48, 112.22 ± 3.35 และ 78.67 ± 2.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 529.32 ± 10.29, 577.79 ± 50.15 และ 507.93 ± 9.37 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 446.78 ± 26.05, 419.02 ± 6.06 และ 336.05 ± 9.45 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สำหรับสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,619.41 ± 154.10, 2,137.33 ± 185.63 และ 1,817.59 ± 27.52

มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 600 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ที่ค่าการนำไฟฟ้า 500 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,461.90 ± 140.54, 1,307.70 ± 61.86 และ 1,044.04 ± 46.78 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ (ก.) คลอโรฟิลล์เอ (ข.) คลอโรฟิลล์บี (ค.) คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (ง.) แคโรทีนอยด์

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.3.3 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาสกัดรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ด้วยอะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร พบว่าการเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่มีการพรางแสง

โดยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 284.73 ± 20.50, 277.80 ± 5.76 และ 182.95 ± 20.40 มิลลิกรัมต่อ 100

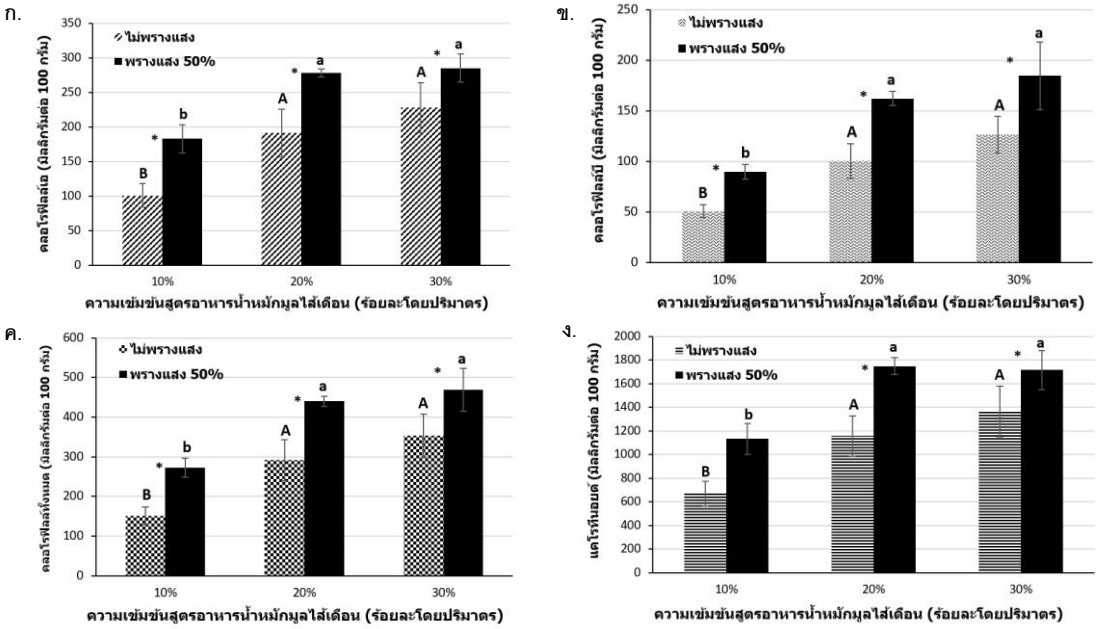
กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 227.62 ± 36.36, 191.14 ± 34.65 และ 100.88 ± 17.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 184.48 ± 33.41, 161.92 ± 6.87 และ 89.49 ± 7.40 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 126.42 ± 18.17, 100.11 ± 16.92 และ 50.44 ± 6.33 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 469.07 ± 53.70, 439.60 ± 12.43 และ 272.37 ± 23.92 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 353.95 ± 54.00, 291.17 ± 51.52 และ 151.28 ± 22.77 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สำหรับสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,715.61 ± 165.47, 1,749.58 ± 71.10 และ 1,133.45 ± 129.75 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน

ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,364.09 ± 215.39, 1,157.99 ± 170.22 และ 669.32 ± 104.19 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน (ก.) คลอโรฟิลล์เอ (ข.) คลอโรฟิลล์บี (ค.) คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (ง.) แคโรทีนอยด์
หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.3.4 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (Composting leachate)

เมื่อนำผลผลิตชีวมวลไข่น้ำแห้งมาสกัดรงควัตถุ ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์ด้วยอะซิโตน ความเข้มข้นร้อยละ 80 โดยปริมาตร พบว่าการเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยที่ความเข้มข้นเท่ากันร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลลล์ทั้งหมดและแคโรทีนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงที่ไม่มีการพรางแสง

โดยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจาก

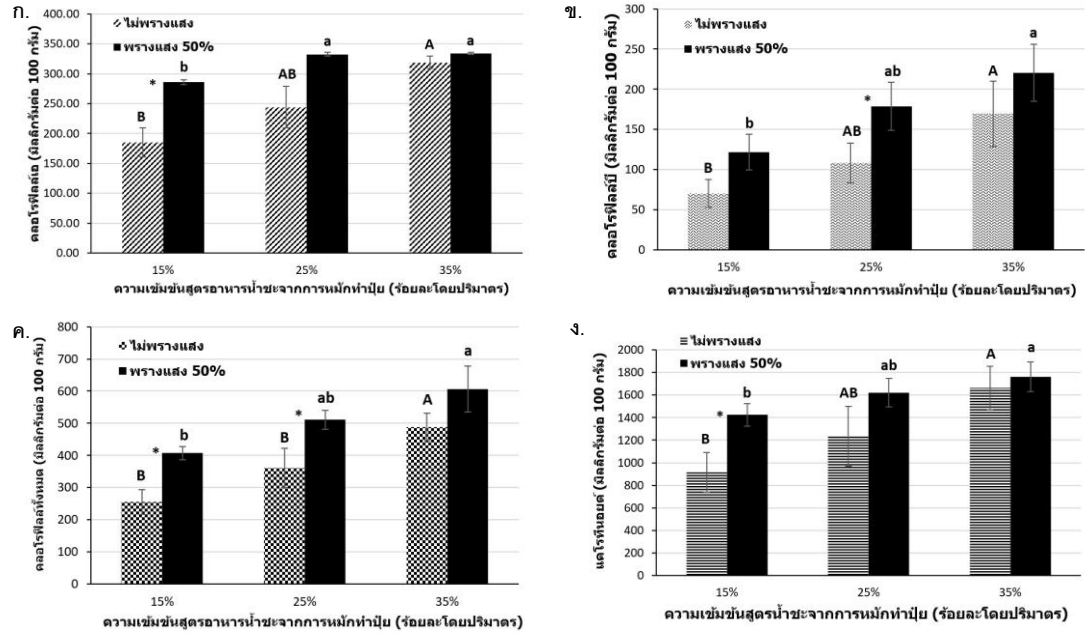
การหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 333.98 ± 1.86, 332.25 ± 3.19 และ 285.68 ± 4.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอเท่ากับ 318.86 ± 10.19, 244.07 ± 34.54 และ 185.00 ± 24.08 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 220.40 ± 35.59, 178.97 ± 29.88 และ 121.63 ± 22.20 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเท่ากับ 169.69 ± 40.63, 108.36 ± 24.59 และ 70.44 ± 17.28 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 606.42 ± 72.07, 511.08 ± 29.58 และ 407.21 ± 20.82 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเท่ากับ 488.43 ± 42.11, 361.49 ± 60.62 และ 255.37 ± 37.89 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ

สำหรับสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,763.22 ± 132.49, 1,621.25 ± 127.23 และ 1,424.42 ± 98.77 มิลลิกรัมต่อ

100 กรัม ตามลำดับ ถัดมาสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร, สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงให้ปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1,663.42 ± 192.98, 1,235.73 ± 266.13 และ 915.59 ± 174.58 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12 ปริมาณรงควัตถุของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย (ก.) คลอโรฟิลล์เอ (ข.) คลอโรฟิลล์บี (ค.) คลอโรฟิลล์ทั้งหมด (ง.) แคโรทีนอยด์
หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ

เนื่องจากสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร ให้ปริมาณน้ำหนักแห้ง และโปรตีนสูงที่สุด จึงได้นำมาศึกษาปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ

4.4.1 ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารชนิดต่าง ๆ

เมื่อนำสารสกัดไข่น้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด พบว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 157.91 ± 2.38 และ 125.81 ± 9.40 mg GAE/g ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกมากกว่าการเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสูตรอาหารหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสงเท่ากับ 126.75 ± 2.38 และ 119.45 ± 8.84 mg GAE/g ตามลำดับ แต่ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการไม่พรางแสง ให้ปริมาณฟีนอลิกเท่ากับ 124.15 ± 8.35 และ 112.51 ± 3.46 mg GAE/g ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกมากกว่าไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 เท่ากับ 121.21 ± 2.89 และ 105.58 ± 50.67 mg GAE/g ตามลำดับ

เมื่อนำสารสกัดไข่น้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด พบว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณฟลาโวนอยด์เท่ากับ 198.37 ± 9.87, 187.98 ± 22.36 และ 153.96 ± 14.75 mg QE/g ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณฟลาโวนอยด์มากกว่าพบว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร และสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการไม่พรางแสงเท่ากับ 159.54 ± 60.40, 144.20 ± 9.20 และ 107.97 ± 31.48 mg QE/g ตามลำดับ แต่ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือน ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ร่วมกับการไม่พรางแสง ให้ปริมาณฟลา

โวนอยด์มากกว่าการเพาะเลี้ยงร่วมกับกับพรางแสงร้อยละ 50 เท่ากับ 117.36 ± 24.42 และ 1052.78 ± 41.71 mg QE/g ตามลำดับ แสดงตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารต่าง ๆ

ตัวอย่าง		TPC (mg GAE/g)	TFC (mg QE/g)
NPK0.15	ไม่พรางแสง	105.58±50.67^{A}	153.96±14.75^{B}
	พรางแสง 50%	112.51±3.46^{b}	107.97±31.48^{a}
ABC700	ไม่พรางแสง	157.91±8.53^{A*}	198.37±9.87^{A}
	พรางแสง 50%	126.75±2.38^{a*}	159.54±60.40^{a}
M30	ไม่พรางแสง	119.45±8.84^{A*}	117.36±24.42^{B}
	พรางแสง 50%	125.81±9.40^{ab*}	105.78±41.71^{a}
C35	ไม่พรางแสง	124.15±8.35^{A}	144.20±9.20^{B}
	พรางแสง 50%	121.21±2.89^{ab}	187.98±22.36^{a}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(p<0.05)

4.4.2 ปริมาณฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ในไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารชนิดต่าง ๆ

เมื่อนำสารสกัดไข่น้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่าไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร ร่วมกับการไม่พรางแสง ให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี

DPPH โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.05 ± 0.15, 3.03 ± 0.33 และ 3.70 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดีกว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสง 50% ที่ให้ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 5.35 ± 0.23, 4.21 ± 0.25 และ 3.86 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ แต่ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 มีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดีกว่าไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสง ซึ่งให้ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.34 ± 0.45 และ 3.72 ± 0.24 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

เมื่อนำสารสกัดไข่น้ำมาวิเคราะห์หาปริมาณฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS พบว่าไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สูตรอาหารน้ำหมักชีวภาพมูลไส้เดือนความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตร ร่วมกับการไม่พรางแสง ให้ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.62 ± 0.12, 3.93 ± 0.07 และ 4.29 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดีกว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ที่ให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 5.37 ± 0.21, 4.11 ± 0.11 และ 4.40 ± 0.20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ แต่ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 ความเข้มข้น 0.15 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการพรางแสงร้อละ 50 มีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ดีกว่าไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสง ซึ่งให้ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 4.16 ± 0.18 และ 4.40 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารต่าง ๆ

ตัวอย่าง		DPPH IC_{50} (mg/ml)	ABTS IC_{50} (mg/ml)
NPK0.15	ไม่พรางแสง	3.72 ± 0.24^{A}	4.40 ± 0.15^{A}
	พรางแสง 50%	3.34 ± 0.45^{c}	4.16 ± 0.18^{b}
ABC700	ไม่พรางแสง	$3.05\pm0.15^{B*}$	$3.62\pm0.12^{C*}$

	พรางแสง 50%	5.35±0.23^{a*}	5.37±0.21^{a*}
M30	ไม่พรางแสง	3.03±0.33^{B*}	3.93±0.07^{B*}
	พรางแสง 50%	4.21±0.25^{b*}	4.11±0.11^{b*}
C35	ไม่พรางแสง	3.70±0.08^{A*}	4.29±0.18^{A}
	พรางแสง 50%	3.86±0.05^{b*}	4.40±0.20^{b}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ * และ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(p<0.05)

บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากผลการเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*Wolffia globosa*) ตลอดระยะเวลา 21 วัน พบว่า การเพาะเลี้ยงด้วยอาหารทั้ง 4 สูตร ได้แก่ สูตรอาหารเคมี NPK 16-16-16 สูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ สูตรอาหารน้ำหมักมูลไส้เดือน และสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ย ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ซึ่งมีความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วง 10,000-26,000 ลักซ์ ให้ผลผลิตไข่น้ำ โดยมีน้ำหนักแห้งและโปรตีนสูงกว่า การเพาะเลี้ยงร่วมกับการไม่พรางแสง ซึ่งมีความเข้มแสงเฉลี่ย ในช่วง 23,000-59,000 ลักซ์ โดยสูตรอาหารไฮโดรโปรนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ABC700) ให้ปริมาณน้ำหนักแห้งและโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับ 58.85 กรัมต่อตารางเมตร และ 36.31 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อารักษ์ (2560) ที่พบว่า การเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ผลการเจริญและปริมาณโปรตีนสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบไม่พรางแสง จากการศึกษาของ Chantiratikul et al. (2010) พบว่า ค่าความเข้มแสงในช่วง 8,000-16,000 ลักซ์ เหมาะสมต่อการการเจริญเติบโตของไข่น้ำ ทำให้ได้ผลผลิตและโปรตีนในปริมาณสูง เนื่องจากแสงเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เมื่อน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าสู่เนื้อเยื่อพืช คลอโรฟิลล์จะดูดซับแสง ผ่านกระบวนการเปลี่ยนพลังงานเคมีให้กลายเป็นคาร์โบไฮเดรตสะสมไว้ ส่งผลให้พืชเจริญเติบโต และมีผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น (Petchthai and Thongket, 2017) แต่หากความเข้มแสงมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ (Chantiratikul et al., 2010) และการเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปรนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ABC700) ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณรงควัตถุสูงที่สุด ได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์เท่ากับ 324.14, 205.33, 529.32 และ 1619.41 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม เนื่องจากเมื่อพืชได้รับแสงและเจริญเติบโตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้มีอัตราการสังเคราะห์แสงต่ำลง โดยแสงจะเข้าไปกระตุ้นคลอโรฟิลล์มากเกินไป ทำให้ออกซิเจนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อาจถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอนุมูลอิสระ เกิดการออกซิเดชันกับเซลล์ต่าง ๆ ทำให้คลอโรฟิลล์ลดลง (นิศาชล, 2548 ; นัฏฐา, 2017)

นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงไข่น้ำด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปรนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ABC700) ให้ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 157.91 mg GAE/g และ 198.37 mg QE/g ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าไข่น้ำที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ จากการศึกษาของ กัญญารัตน์ (2561) และ กัญญารัตน์ (2563) พบว่า สารสกัดไข่น้ำที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติให้ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เท่ากับ 49.68 mg GAE/g และ 27.25 mg QE/g ตามลำดับ โดยสารประกอบฟีนอลิกมีประสิทธิภาพในการจำกัดอนุมูลอิสระหรือเข้าไปหยุดการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ต้านภูมิแพ้ และมีคุณสมบัติในการช่วยสลายลิ่มเลือด (โอภา และคณะ, 2550 ; อารักษ์, 2560) และสารประกอบฟลาโวนอยด์มีส่วนสำคัญในการช่วยยับยั้งแอลฟากลูโคซเดส (กัญญารัตน์, 2563) และไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปรนิกส์ ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ABC700) มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ดีที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 3.05 และ 3.62 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

จากการศึกษาทั้งหมดจะเห็นว่า ไข่น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า 700 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 ให้ปริมาณน้ำหนักแห้ง โปรตีน รงควัตถุ
ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด เนื่องจากสูตรอาหารไฮโดรโปนิกส์มีธาตุอาหารเหมาะสมตามที่พืชต้องการ ผลผลิตไข่น้ำที่ได้จะไม่มีกลิ่นคาวและไม่มีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์หรือสารปนเปื้อนอื่น จึงเหมาะกับการนำไปเพาะเลี้ยงต่อไปในเชิงพาณิชย์เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ และยังพบว่าสูตรอาหารน้ำชะจากการหมักทำปุ๋ยร่วมกับการพรางแสงร้อยละ 50 สามารถนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงไข่น้ำในเชิงพาณิชย์เพื่อนำไปเป็นโปรตีนเสริมในอาหารสัตว์ได้เนื่องจากช่วยลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยง

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 ควรศึกษาปัจจัยในการเพาะเลี้ยงเพิ่มเติม อาทิเช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความลึกของระดับน้ำ และการให้อากาศ

5.5.2 ควรศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำเพิ่มเติมได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใย ชนิดของกรดอะมิโนและวิตามิน เพื่อแสดงถึงคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บรรณานุกรม

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ระพีพรรณ พุ่มอินทร์
ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลของสูตรอาหารต่อปริมาณโปรตีนและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของไข่น้ำ (Wolffia globosa (L.) Wimm))
สาขาวิชา	กระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
ประวัติ	เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2543 จังหวัดกรุงเทพมหานคร