

HydroFloat: ระบบเพาะปลูกรูปแบบใหม่ร่วมกับฐานเพาะปลูกแบบลอยน้ำ  
เพื่อเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแหนเป็ด (*Lemna aequinoctialis*)  
สำหรับเป็นทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

HydroFloat: An Innovative Cultivation System Using Floating Cultivation Substrate to  
Enhance the Growth Rate and Nutrient Content of Duckweed  
(*Lemna aequinoctialis*) as a Potential Alternative for the Animal Feed Industry

ไกรวิชญ์ บุญเจริญ<sup>1</sup>, พศวีร์ แต้มพวง<sup>1</sup>, ชัชชนน เฉลยวิจิตร<sup>1</sup>

วิภา อาสิงสมานันท์<sup>1\*</sup>, อรินทิพย์ ธรรมชัยปิเนต<sup>2, 4</sup> และ วีรศิลป์ สอนจรรยา<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup>โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย พิษณุโลก ตำบลมะขามสูง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

<sup>2</sup>ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>3</sup>ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>4</sup>ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำและดิน (DHbRC) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

\*E-mail: wipa.arsing@gmail.com

## บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและพัฒนากระบวนการเลี้ยงเพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของแหนเป็ด (*Lemna aequinoctialis*) สำหรับเป็นทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ มีการดำเนินการแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย (1) การศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ความเข้มข้นสารละลาย Hoagland 50%, pH 6.0, อุณหภูมิ 25 °C, ความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  และระยะเวลาได้รับแสง 16 ชั่วโมง (2) การพัฒนาฐานเพาะปลูก พบว่าโครงสร้างฐานเพาะปลูกแบบตะแกรงรูทึบเหลี่ยม ความยาวด้านละ 0.6 cm ระยะห่างระหว่างด้าน 0.2 cm เหมาะสมที่สุดในการลดความหนาแน่นและส่งเสริมการขยายพันธุ์ และสารเคลือบไฮโดรโฟบิก PDMS-ไม่โครสเฟียร์ซิลิกา อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำ 35:15 (v/v) ซิลิกามีอนุภาคที่  $1.90 \pm 0.16 \mu\text{m}$  และอัตราส่วน PDMS ต่อน้ำ 3.5:125 (v/v) มีค่ามุมสัมผัสน้ำเท่ากับ  $104 \pm 1^\circ$  สามารถลดการเกาะตัวของน้ำบนฐานเพาะปลูกได้สูงสุด ส่งผลให้มี RGR โปรตีน และไขมัน สูงกว่าแบบไม่เคลือบ 5.61%, 11.27% และ 10.61% ตามลำดับ และคาร์โบไฮเดรต ต่ำกว่าแบบไม่เคลือบ 4.79% (3) การพัฒนาระบบเพาะปลูก พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้น มี Doubling Time  $1.47 \pm 0.01$  วัน และ RGR  $0.471 \pm 0.003 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$  (สูงกว่าแบบดั้งเดิม 87.65%) นอกจากนี้ แหนเป็ดที่เลี้ยงยังมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงถึง  $0.464 \pm 0.014$  และ  $0.073 \pm 0.003 \text{ g/g DW}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นจากแบบดั้งเดิม 62.81% และ 92.11% ตามลำดับ ขณะที่คาร์โบไฮเดรตลดลงเหลือ  $0.179 \pm 0.010 \text{ g/g DW}$  ซึ่งลดลงจากเดิม 38.49% ระบบเพาะปลูกนี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตวัตถุดิบโปรตีนอาหารสัตว์ทดแทนคุณภาพสูงเพื่อการปศุสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** *Lemna aequinoctialis*, สารเคลือบไฮโดรโฟบิก, ระบบเพาะปลูก, อาหารสัตว์, เทคโนโลยีการเกษตร

## 1. บทนำ

ปัจจุบันฟาร์มไก่เนื้อประสบปัญหาการสูญเสียสูงถึง 12-25.2% เนื่องจากระบบภูมิคุ้มกันยังไม่แข็งแรง ต้องได้รับอาหารโปรตีนสูง เช่น กากถั่วเหลืองและข้าวโพด (Hoseini et al., 2024; Jainonthee et al., 2025) แต่

ในหลายพื้นที่ ไก่ไม่ได้รับอาหารที่เพียงพอ ทำให้การเพาะเลี้ยงมีความเสี่ยง อาหารโปรตีนสูงจึงมีความจำเป็นต่อการเพิ่มอัตราการรอดและเติบโตของไก่เนื้อ อย่างไรก็ตามประเทศไทยต้องนำเข้าวัตถุดิบดังกล่าวถึง 99% และ 25% ตามลำดับ (Taiyawong et al., 2025; Econ

Digest, 2025) ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำจากการศึกษาพบว่า แหนเป็ด (*Lemna aequinoctialis*) มีศักยภาพสูง โดยมีโปรตีน 32-37% ของน้ำหนักแห้งและย่อยง่าย แต่การเพาะเลี้ยงแบบดั้งเดิมมักพบปัญหาการปนเปื้อนและใบซ้อนทับกัน ทำให้ผลผลิตลดลง (Katsara et al., 2024; Kuznetsova et al., 2019) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยงโดยประยุกต์ใช้ สารเคลือบไฮโดรโฟบิก ร่วมกับระบบไฮโดรโปนิคส์บนฐานเพาะปลูกรูปแบบตะแกรงรูกเหล็กเพื่อลดการซ้อนทับของใบ และ IoT เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอย่างยั่งยืน

## 2. วิธีการดำเนินงาน

กระบวนการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแหนเป็ด (2) การพัฒนารูปร่างเพาะปลูกแหนเป็ดแบบลอยน้ำ และ (3) การพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของระบบเพาะปลูกแหนเป็ด โดยแหนเป็ด (*L. aequinoctialis*) ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อม (DHbRC) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

### การเตรียมสารละลาย Hoagland

เตรียมสารละลายจุลธาตุ (Micronutrient stock solution) โดยละลาย  $H_3BO_3$  2.86 g,  $MnCl_2$  1.81 g,  $ZnSO_4$  0.22 g,  $CuSO_4$  0.08 g และ  $H_2MoO_4$  0.024 g ในน้ำกลั่นจนครบปริมาตร 1,000 mL

เตรียมสารละลาย Hoagland ผสม  $KH_2PO_4$  (1 M) 1 mL,  $KNO_3$  (1 M) 5 mL,  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (1 M) 5 mL และ  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  (1 M) 2 mL และ Fe-EDDHA (50 mg/mL) 1 mL และสารละลายจุลธาตุ 1 mL ในน้ำกลั่น ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5.5 ด้วย HCl และ KOH ความเข้มข้น 0.1 M แล้วนึ่งฆ่าเชื้อด้วย Autoclave ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 นาที

## การหาน้ำหนักแห้ง

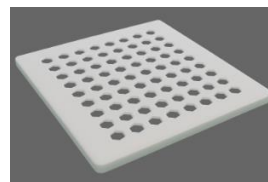
สุ่มตัวอย่างแห้งแบบเปิด ที่มีขนาดและสภาพใกล้เคียงกัน ล้างทำความสะอาด ชั่งน้ำหนักสด 0.25 g และ 1 g น้ำหนักละ 5 ตัวอย่าง 0.25 g อบด้วย Hot air oven ที่อุณหภูมิ 65°C นาน 96 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนชั่งน้ำหนักแห้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของแต่ละน้ำหนักสด

### 2.1 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแหนเป็ด

เตรียมสารละลาย Hoagland โดยผสมธาตุอาหารหลักและจุลธาตุ ศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแหนเป็ด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย Hoagland (0%, 25%, 50%, 75%, 100% (v/v)) ค่า pH (5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0) อุณหภูมิ (10, 15, 20, 25, 30 °C) ความเข้มแสง (100, 150, 200, 250, 300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) และ ระยะเวลาที่ได้รับแสง (4, 8, 12, 16, 20 ชั่วโมงต่อวัน) เพาะปลูกแหนเป็ดน้ำหนักสด 0.25 g ในสารละลาย Hoagland 250 mL เป็นระยะเวลา 7 วัน หาน้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณ RGR และวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน

### 2.2 การพัฒนารูปร่างเพาะปลูกแหนเป็ดแบบลอยน้ำ

พัฒนารูปร่างเพาะปลูกอะคริลิกเจาะรูเหล็กเหล็ด้วยเลเซอร์ เปรียบเทียบปัจจัยความยาวด้านของรูเหล็กเหล็ (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 cm) และระยะห่างระหว่างด้าน (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 cm) เพาะปลูกแหนเป็ดน้ำหนักสด 0.25 g ในสารละลาย Hoagland 250 mL เป็นระยะเวลา 7 วัน หาน้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณ RGR และวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน

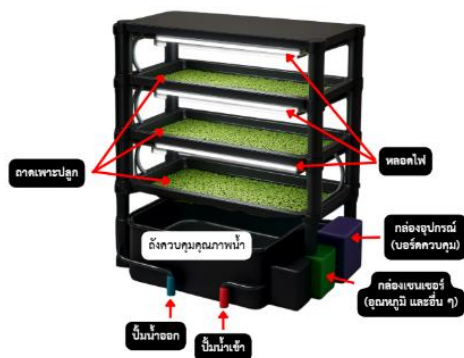


รูปที่ 1 แบบจำลองฐานเพาะปลูกแบบลอยน้ำรูปแบบตะแกรงรูกเหล็ก

ทำการศึกษาสารเคลือบไฮโดรโฟบิก PDMS-ไมโครสเฟียร์ซิลิกา โดยการสังเคราะห์ไมโครสเฟียร์ซิลิกาโดยใช้เอทานอลและน้ำในอัตราส่วน (25:25, 30:20, 35:15, 40:10, 45:5 (v/v)) ส่องวัดขนาดของอนุภาคโดย

ใช้กล้องจุลทรรศน์ นำไมโครสเฟียร์ซิลิกาที่ดีที่สุดเดิม PDMS อัตราส่วน PDMS:น้ำ (2.5:125, 3:125, 3.5:125, 4:125, 4.5:125 (v/v)) เคลือบบนแผ่นอะคริลิก วิเคราะห์ มุมสัมผัสของน้ำ และเปรียบเทียบการเพาะปลูกแบบใช้ ฐานเพาะปลูกที่เคลือบ-ไม่เคลือบสารไฮโดรโฟบิก PDMS- ไมโครสเฟียร์ซิลิกา เพาะปลูกแทนเปิดน้ำหนักสด 1 g ใน สารละลาย Hoagland 2 L เป็นระยะเวลา 7 วัน หา น้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณ RGR และวิเคราะห์ปริมาณ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน

### 2.3 การพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของระบบ เพาะปลูกแทนเปิด



รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องเพาะปลูกแทนเปิด

สร้างเครื่องเพาะปลูกโดยใช้ถาดเพาะปลูกขนาด 30×40×7 cm กำหนดระยะความสูงระหว่างชั้น 20 cm เชื่อมต่อส่งน้ำและปั๊มน้ำ ติดตั้งหลอดไฟและเซนเซอร์ ควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมอัตโนมัติแล้วเชื่อมต่อเข้ากับ Arduino UNO ใช้ Google Apps Script เพาะปลูกแทน เปิดน้ำหนักสด 1 g ในสารละลาย Hoagland 2 L เป็น ระยะเวลา 7 วัน โดยใช้ระบบเพาะปลูกที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับฐานเพาะปลูก เปรียบเทียบกับการเพาะปลูกแบบ ดั้งเดิม หาน้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณ RGR และวิเคราะห์ ปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน

### 2.4 การวิเคราะห์ผล

#### 1) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ต่อวัน

$$\frac{\ln(\text{น้ำหนักแห้งหลังเพาะปลูก (g)}) - \ln(\text{น้ำหนักแห้งก่อนเพาะปลูก (g)})}{\text{จำนวนวันที่ใช้ปลูก (วัน)}}$$

#### 2) การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (BCA Assay)

สร้างกราฟมาตรฐานจาก Bovine serum albumin 2,000 µg/mL เจือจางเป็น 25, 250, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 µg/mL นำแทนเปิดบดละเอียด

น้ำหนักแห้ง 0.10 g สกัดเมล็ดด้วยอะซิโตน 80% (v/v) 1.5 mL centrifuge 12,000 rpm 5 นาที ที่ส่วนใส สี เขียว พักตะกอนให้แห้งใน Fume Hood แล้วสกัดโปรตีน ด้วย NaOH (0.1 M) 1.0 mL ให้ความร้อน 90°C 60 นาที นำไป centrifuge 12,000 rpm 10 นาที เจือจางส่วนใส ให้อยู่ในช่วงกราฟมาตรฐาน วัดปริมาณโปรตีนด้วยวิธี BCA (Reagent A:B = 50:1 (v/v)) โดยผสมสารละลาย BCA 200 µL กับตัวอย่าง 25 µL บ่มที่ 37°C 30 นาที วัด ค่าดูดกลืนแสงที่ 562 nm ทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง

### 3) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Phenol-sulfuric acid method)

สร้างกราฟมาตรฐานจากกลูโคส 1,000 µg/mL เจือจางเป็น 20, 40, 60, 80 และ 100 µg/mL นำแทน เปิดบดละเอียด น้ำหนักแห้ง 0.10 g ย่อยด้วย HCl (2.5 N) 5.0 mL ที่ 100°C 3 ชั่วโมง ปรับให้เป็นกลางด้วย Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> centrifuge 10,000 rpm 10 นาที และเจือจาง ส่วนใสให้อยู่ในช่วงกราฟมาตรฐาน เติมน้ำตัวอย่าง 1.0 mL ผสม Phenol 5% (w/v) (1.0 mL) และ Sulfuric acid 98% (v/v) (5.0 mL) บ่มที่ 37°C 30 นาที วัดค่าดูดกลืน แสงที่ 490 nm ทำซ้ำ 5 ครั้ง

### 4) การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Folch method)

นำแทนเปิดบดละเอียด น้ำหนักแห้ง 0.25 g สกัดด้วย Chloroform:Methanol (2:1, v/v) 10 mL ใช้ Homogenizer 10,000 rpm 2 นาที เติมน้ำ Chloroform 2 mL และน้ำกลั่น 2 mL centrifuge 3,000 rpm 10 นาที ตูดชั้น chloroform (ชั้นล่าง) พักให้แห้งใน Fume Hood นำไปชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

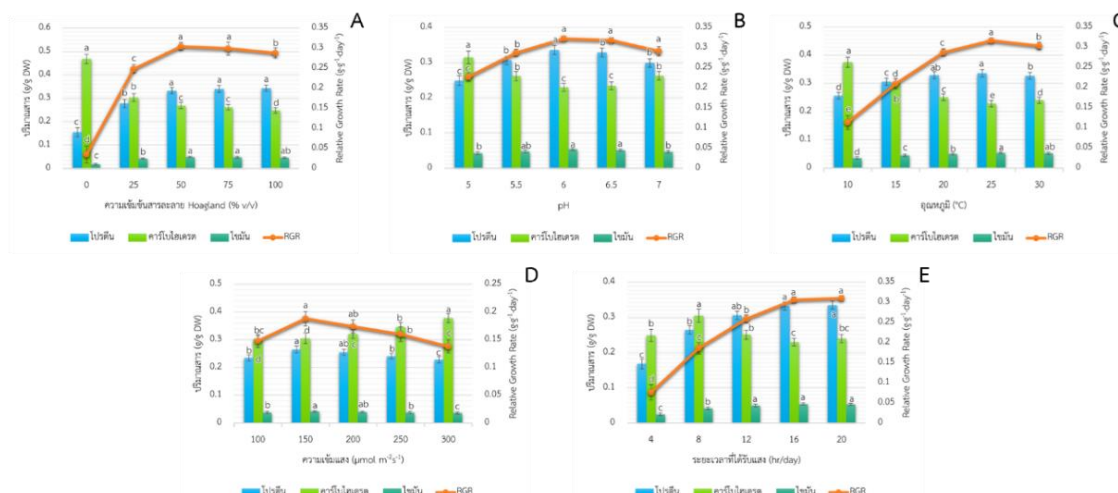
### 5) การวิเคราะห์มุมสัมผัสด้วยวิธี Image analysis

ถ่ายภาพของหยดน้ำในระนาบเดียวกับพื้นผิว ใช้ โปรแกรม ImageJ ใน Plugin: Contact Angle อับโหลด ภาพของหยดน้ำ กำหนดจุดเส้นขอบรูปหยดน้ำ

### 3. ผลและอภิปรายผล

#### การศึกษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแทนเปิด

พบว่า การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเป็นปัจจัย สำคัญที่ส่งผลให้แทนเปิดมีอัตราการเจริญเติบโตและ ปริมาณสารอาหารสูงสุด



รูปที่ 3 ผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแห่นเปิด ได้แก่ (A) ความเข้มข้นสารละลาย Hoagland (B) pH (C) อุณหภูมิ (D) ความเข้มแสง และ (E) ระยะเวลาที่ได้รับแสง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

จากรูปที่ 3(A) พบว่าสารละลาย Hoagland 50% ให้ RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากธาตุอาหารสมดุลส่งเสริมการสังเคราะห์แสงและการสร้างกรดอะมิโน ต่างจากความเข้มข้นสูงที่เกิดความเครียดออกซิเดติก และ 0% มีคาร์โบไฮเดรตสูงสุดจากการสะสมคาร์บอนส่วนเกินเป็นแป้งเมื่อขาดไนโตรเจน (Akyüz & Ersus, 2024)

จากรูปที่ 3(B) พบว่า pH 6.0 มี RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอาจเป็นจุดสมดุลกระตุ้น Plasma Membrane  $H^+$ -ATPase ให้ดูดซึมไอออนเต็มที่ ต่างจาก pH อื่นซึ่งยับยั้งเอนไซม์ขนส่งสาร และพบคาร์โบไฮเดรตสูงสุดจากภาวะเครียด (Jones et al., 2023)

จากรูปที่ 3(C) พบว่าอุณหภูมิ 25 °C มี RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอาจเป็นจุดที่เอนไซม์ทำงานเต็มประสิทธิภาพในกระบวนการสังเคราะห์แสงและดูดซึมไนโตรเจนไปสังเคราะห์โปรตีนได้เต็มที่ ต่างจาก 10 °C ที่พบคาร์โบไฮเดรตสูงสุด (Sender & Grzywna, 2025)

จากรูปที่ 3(D) พบว่าความเข้มแสง 150  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  มี RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจเป็นจุดอิ่มตัวของแสงที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงและการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่ 300  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  มีคาร์โบไฮเดรตสูงสุด เกิดสภาวะ

คาร์บอนล้นระบบ เปลี่ยนน้ำตาลส่วนเกินเป็นแป้ง (Strzałek & Kufel, 2021)

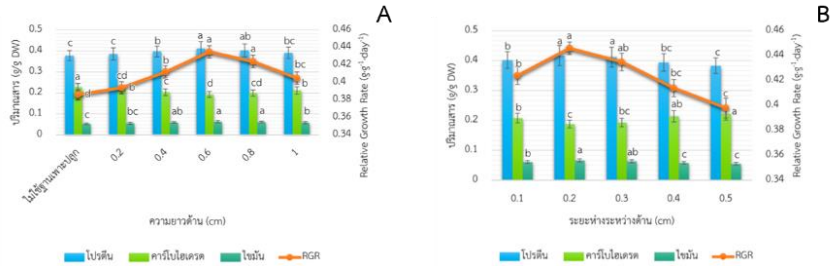
และจากรูปที่ 3(E) พบว่าระยะเวลาได้รับแสง 16 ชั่วโมง มี RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ จากคลอโรพลาสต์ผลิตพลังงานเพียงพอต่อวัฏจักรคัลวิน พร้อมกระตุ้นเอนไซม์ Nitrate Reductase และ Glutamine Synthetase ทำให้เปลี่ยนไนเตรตเป็นกรดอะมิโนได้เต็มที่ ขณะที่ 4 ชั่วโมงพืชเติบโตต่ำ สะสมคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าโปรตีน (Petersen et al., 2022)

จากปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมทั้งหมด พบ RGR  $0.386 \pm 0.006 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$  มีปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เท่ากับ  $0.378 \pm 0.024$ ,  $0.228 \pm 0.017$  และ  $0.054 \pm 0.004 \text{ g/g DW}$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ในการเมแทบอลิซึมของแห่นเปิด

#### การพัฒนาฐานเพาะปลูกแห่นเปิดแบบลอยน้ำ

พบว่าความยาวด้านและระยะห่างระหว่างรูก เหลี่ยมส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแห่นเปิด และการพัฒนาสารเคลือบไฮโดรโฟบิก พบว่าสัดส่วนเอทานอลต่อน้ำส่งผลต่อขนาดอนุภาคไมโครสเฟียร์ซิลิกา ขณะที่ปริมาณ PDMS ส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสน้ำ เมื่อนำมาเคลือบฐานเพาะปลูก พบว่าส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแห่นเปิดอย่างมีนัยสำคัญ





รูปที่ 4 ผลของลักษณะฐานเพาะปลูกที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณสารอาหารของแทนเบ็ด ได้แก่ (A) ความยาวด้านรากเหลี่ยม (B) ระยะห่างระหว่างด้าน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

จากรูปที่ 4(A) ความยาวด้านรากเหลี่ยม 0.6 cm ให้ RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ลดการทับกันของใบแทน ทำให้รับแสงเต็มประสิทธิภาพ ขณะที่ความยาวด้าน 0.2 cm ใบทับซ้อนกันและยับยั้งการขยายพันธุ์ พีซีจึงสะสมคาร์บอนส่วนเกินในรูปคาร์โบไฮเดรต (Salzen et al., 2025)

และจากรูปที่ 4(B) ระยะห่างระหว่างด้าน 0.2 cm ให้ RGR โปรตีน และไขมันสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ จากสัดส่วนพื้นที่ผิวหน้าที่เหมาะสม เพิ่มพื้นที่สัมผัสสำหรับการดูดซึมธาตุอาหารและรับแสง ขณะที่ระยะห่าง 0.5 cm จำกัดพื้นที่การขยายพันธุ์ ความต้องการคาร์บอนเพื่อสร้างเซลล์ลดลง เกิดการสะสมคาร์บอนส่วนเกินในรูปคาร์โบไฮเดรต (Walsh et al., 2021)

โดยฐานเพาะปลูกความยาวด้านรากเหลี่ยมและระยะห่างระหว่างด้านดังกล่าว มี RGR  $0.446 \pm 0.005$   $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$  โปรตีน  $0.417 \pm 0.034$  คาร์โบไฮเดรต  $0.188 \pm 0.013$  และไขมัน  $0.066 \pm 0.005$   $\text{g/g DW}$  เมื่อเทียบกับไม่ใช้ฐานเพาะปลูก พบว่า RGR โปรตีน และไขมันเพิ่มขึ้น 15.5%, 10.3%, 22.2% ตามลำดับ ขณะที่คาร์โบไฮเดรตลดลง 17.5%

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำที่มีผลต่อขนาดของไมโครสเฟียร์ซิลิกา

| อัตราส่วนเอทานอล<br>ต่อน้ำ (v/v) | ขนาดอนุภาคไมโคร-<br>สเฟียร์ซิลิกา ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 25:25                            | $2.58 \pm 0.39^b$                                   |
| 30:20                            | $2.48 \pm 0.60^b$                                   |
| 35:15                            | $1.90 \pm 0.16^a$                                   |
| 40:10                            | $1.86 \pm 0.47^a$                                   |
| 45:5                             | $1.79 \pm 0.26^a$                                   |

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

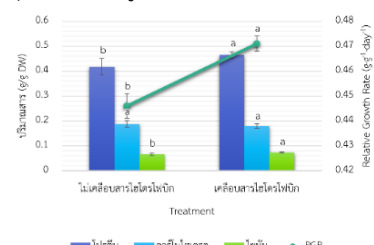
จากตารางที่ 1 อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำ 35:15 (v/v) ดีที่สุด มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $1.90 \pm 0.16$   $\mu\text{m}$  เนื่องจากเอทานอลลดการชนกันของโมเลกุล TEOS ทำให้เกิดการไฮโดรไลซิส การกระจายตัวของอนุภาค และกระตุ้นการเกิดนิวเคลียสใหม่ (Ingole et al., 2026)

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วน PDMS ต่อน้ำที่มีผลต่อมุมสัมผัส

| อัตราส่วน PDM<br>ต่อน้ำ (v/v) | มุมสัมผัส (องศา) |
|-------------------------------|------------------|
| 2.5:125                       | $94 \pm 2^b$     |
| 3:125                         | $96 \pm 1^b$     |
| 3.5:125                       | $104 \pm 1^a$    |
| 4:125                         | $107 \pm 2^a$    |
| 4.5:125                       | $108 \pm 2^a$    |

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

จากตารางที่ 2 อัตราส่วน PDMS ต่อน้ำ 3.5:125 (v/v) ดีที่สุด มีมุมสัมผัส  $104 \pm 1^\circ$  จาก PDMS ลดพลังงานผิวของวัสดุและส่งเสริมความชุ่มชื้นบนพื้นผิวซิลิกาอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แรงยึดติดระหว่างผิววัสดุกับหยดน้ำลดลง มุมสัมผัสสูงขึ้น (Ingole et al., 2026)



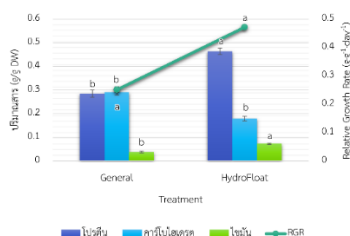
รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบฐานเพาะปลูกเคลือบสารไฮโดรโฟบิก

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

จากรูปที่ 5 พบว่า ฐานเพาะปลูกเคลือบสารไฮโดรโฟบิก PDMS-ไมโครสเฟียร์ซิลิกา ส่งผลให้มี RGR โปรตีน และไขมัน สูงกว่าแบบไม่เคลือบ 5.61%, 11.27%

และ 10.61% ตามลำดับ โดยพื้นผิวไฮโดรโฟบิกลดการเกาะติดกันระหว่างแผ่นเปิดกับฐานเพาะปลูก ส่งเสริมการสังเคราะห์แสงและการดูดซึมน้ำไนโตรเจนไปสร้างโปรตีนและไขมันมากขึ้น แต่คาร์โบไฮเดรตต่ำกว่า 4.79% โดยคาร์บอนจากการสังเคราะห์แสงนำไปสร้างโปรตีนและไขมันเพื่อเติบโตและแบ่งเซลล์แทน (Chua et al., 2023)

**การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพระบบเพาะปลูกแผ่นเปิด**



**รูปที่ 6** กราฟเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารระหว่างการเพาะปลูกแผ่นเปิดแบบดั้งเดิมกับระบบเพาะปลูกที่พัฒนาขึ้น

**หมายเหตุ:** ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

จากรูปที่ 6 พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีการเจริญเติบโตมากกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างชัดเจน โดยมีค่า Doubling Time  $1.47 \pm 0.01$  วัน และ RGR  $0.471 \pm 0.003 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$  สูงกว่าเดิม 87.6% มีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงถึง  $0.464 \pm 0.014$  และ  $0.073 \pm 0.003 \text{ g/g DW}$  เพิ่มขึ้น 62.8% และ 92.1% ตามลำดับ ขณะที่คาร์โบไฮเดรตลดลงเหลือ  $0.179 \pm 0.010 \text{ g/g DW}$  ลดลง 38.5% เหมาะสำหรับการใช้เป็นอาหารทางเลือกสำหรับปศุสัตว์ โดยเฉพาะไก่เนื้อที่ต้องการโปรตีนและไขมันสูง (Hoseini et al., 2024)

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบเพาะปลูกแผ่นเปิด โดย (1) ปัจจัยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลาย Hoagland 50%, pH 6.0, อุณหภูมิ 25 °C, ความเข้มแสง  $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  และระยะเวลาได้รับแสง 16 ชั่วโมง (2) ฐานเพาะปลูกแบบลอยน้ำรูปแบบตะแกรงรูเหล็กเหลี่ยม ลักษณะที่เหมาะสมที่สุด คือ ความยาวด้าน 0.6 cm ระยะห่างระหว่างด้าน 0.2 cm เคลือบด้วยสารไฮโดรโฟบิก PDMS-ไมโครสเฟียร์ซิลิกา อัตราส่วนเอทานอลต่อน้ำ 35:15

(v/v) และ PDMS ต่อน้ำ 3.5:125 (v/v) โดยฐานเพาะปลูกที่เคลือบสารไฮโดรโฟบิก มี RGR โปรตีน ไขมันสูงกว่าและคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าที่ไม่เคลือบ (3) ระบบที่พัฒนาขึ้นมี RGR สูงกว่าแบบเดิม 87.65% มีปริมาณโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้นจากแบบดั้งเดิม 62.81% และ 92.11% ตามลำดับ อีกทั้งมีคาร์โบไฮเดรตลดลง 38.49%

**กิตติกรรมประกาศ**

โครงการวิจัยนี้ได้รับคำปรึกษา ตลอดจนได้รับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่จากห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ โรงเรียนวิทยาศาสตร์ จุฬารณราชวิทยาลัย พิษณุโลก และ คณะวิทยาศาสตร์ คณะเกษตรและศูนย์วิจัยทรัพยากรแห่นเปิดฮอโลไบออนต์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

#### เอกสารอ้างอิง

- Akyüz, A., & Ersus, S. (2024). Optimization of Hoagland solution macro-elements as a culture media, for increasing protein content of duckweeds (*Lemna minor*). Food Chemistry. 453:139647.
- Chua, M. X. et al. (2023). A novel cultivation platform of duckweed (*Lemna minor*) via application of beeswax superhydrophobic coatings. Environmental Research. 224:115544.
- Jones, G. et al. (2023). Lowering pH enables duckweed (*Lemna minor* L.) cultivation for treating swine manure and providing biofuel feedstock. Journal of Cleaner Production. 395:136392.
- Pasos-Panqueva, J. et al. (2024). Unravelling the impact of light, temperature and nutrient dynamics on duckweed growth: A meta-analysis study. Journal of Environmental Management. 366:121721.