สภาวะการเลี้ยงและองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Nostoc commune* TISTR 8870) ที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Culture Conditions and Proximate Chemical Compositions of Microwave-Irradiated Cyanobacteria, *Nostoc commune* TISTR 8870

สมรักษ์ รอดเจริญ [1*] และ การุณ ทองประจุแก้ว [2]
Somrak Rodjaroen [1*] and Karun Thongprajukaew [2]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตชีวมวลของสาหร่าย *Nostoc commune* TISTR 8870 และเพื่อศึกษาศักยภาพในการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายที่ดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยทดลองเลี้ยงสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ในอาหาร 4 สูตร (BG-11 medium, BGA medium, Bold basal medium และ Chu'13 medium) ที่มีความเข้มข้นของ KNO_3 5 ระดับ (0.02, 0.04, 0.08, 1.60 และ 3.20 กรัม/ลิตร) และ K_2HPO_4 5 ระดับ (0.04, 0.08, 0.16, 0.32 และ 0.64 กรัม/ลิตร) เป็นเวลา 21 วัน ผลการศึกษาพบว่าสาหร่ายสามารถผลิตชีวมวล (0.48 ± 0.02 กรัมน้ำหนักแห้ง/ลิตร) ได้สูงสุดเมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร CHU'13 medium ที่เติม KNO_3 ความเข้มข้น 1.60 กรัมต่อลิตร และ K_2HPO_4 ความเข้มข้น 0.08 กรัมต่อลิตร ($p<0.05$) การดัดแปรมวลชีวภาพของสาหร่ายด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าไม่ทำให้ปริมาณของไขมัน เถ้า ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกซ์ และพลังงานรวมเปลี่ยนแปลง แต่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณของโปรตีนและเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลาง แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายได้ กรรมวิธีการดัดแปรนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์

คำสำคัญ: สภาวะที่เหมาะสม, การดัดแปร, คลื่นไมโครเวฟ, *Nostoc commune*, คุณค่าทางโภชนาการ

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 179 หมู่ที่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

[1] Faculty of Sciences and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 179 Moo 3 Maifad, Sikao, Trang 92150, Thailand.

[2] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่ 15 ถนนกาญจนวณิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

[2] Faculty of Science, Prince of Songkla University, 15 Karnjanavanit Road, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Somrak_25@hotmail.co.th

ABSTRACT

The objectives of this study were to optimize the culture conditions, and subsequently improve the nutritive values of the blue-green algae (*Nostoc commune* TISTR 8870) using microwave irradiation. The *N. commune* was cultured in four different media (BG-11 medium, BGA medium, Bold basal medium and Chu'13 medium) containing various KNO_3 concentrations (0.02, 0.04, 0.08, 1.60 and 3.20 g/L) and K_2HPO_4 concentrations (0.04, 0.08, 0.16, 0.32 and 0.64 g /L) for 21 days. The highest algal biomass (0.48 ± 0.02 g dry weight/L) was observed in Chu'13 medium containing 1.60 g/L KNO_3 and 0.08 g/L K_2HPO_4 ($p<0.05$). Pretreatment algal biomass via microwave irradiation increased protein and neutral detergent fiber, while a composition of lipid, fiber, ash, nitrogen free extract and gross energy was the same as untreated biomass. The results indicate that microwave irradiation can be applied for biomass nutritional improvement of *N. commune* TISTR 8870. Therefore, microwave irradiation is a potential technique in pretreatment of algal biomass before using as raw material for food and feed production.

Key words: optimal condition, pretreatment, microwave irradiation, *Nostoc commune*, nutritive value

บทนำ

สาหร่ายจัดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตอาหารของสัตว์น้ำหลายชนิด การผสมสาหร่ายในอาหารสัตว์น้ำช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกัน และช่วยลดอัตราการแลกเนื้อ (feed conversion ratio) (Peñaflorida and Golez, 1996) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสีให้กับสัตว์น้ำอีกด้วย (จงกล และคณะ, 2554) *Nostoc commune* Voucher เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินชนิดหนึ่งสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย มีอัตราการเจริญเติบโตสูง และสามารถผลิตชีวมวลได้ปริมาณมาก *N. commune* จึงเป็นสาหร่ายที่น่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมอาหารสำหรับสัตว์น้ำ สาหร่าย *N. commune* สามารถพบได้ทั่วไป มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบาง มีการเจริญเติบโตเป็นแบบเส้นสาย และมีเมือกห่อหุ้ม มีสีเขียวแกมน้ำเงินจนถึงสีเขียวอมเหลือง ขนาดของสาหร่ายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เจริญเติบโต สาหร่ายชนิดนี้นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร และมีสมบัติทางเภสัชกรรมในการช่วยลดการอักเสบ ลดอาการโรคตาบอดกลางคืน รักษาแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก และช่วยกำจัดอนุมูลอิสระ (Qiu *et al.*, 2002) เป็นต้น การศึกษาในหนูทดลองพบว่าการได้รับอาหารที่มีส่วนผสมของสาหร่ายเป็นเวลานาน ไม่มีผลข้างเคียงต่อสุขภาพ และยังช่วยลดปริมาณโคเลสเตอรอลและการสังเคราะห์ไขมันอื่นๆ (Rasmussen *et al.*, 2009) การศึกษาข้อมูลทางโภชนาการของสาหร่าย *N. commune* ที่พบในธรรมชาติ พบว่ามีปริมาณโปรตีน 20

เปอร์เซ็นต์ โดยมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน มีไขมันต่ำและมีใยอาหารสูงถึง 43 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการพบว่ามีวิตามินเอและกรดอะมิโนจำเป็นเพิ่มขึ้นและมีใยอาหารลดลง 17 เท่า (อาภารัตน์, 2546) ด้วยเหตุที่สาหร่าย *N. commune* มีปริมาณโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงจึงอาจใช้ทดแทนปลาป่นซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนของอาหารสัตว์น้ำได้ แต่เนื่องจาก *N. commune* มีผนังเซลล์แข็งแรงและปริมาณใยอาหารสูง การใช้ *N. commune* อาจเป็นอุปสรรคต่อการย่อยและการดูดซึมของสัตว์น้ำได้ โดยเฉพาะในสัตว์น้ำวัยอ่อนซึ่งมีกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหารในระดับต่ำ อย่างไรก็ตาม การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบที่นำมาผลิตอาหารสัตว์น้ำด้วยกรรมวิธีต่างๆ จะช่วยให้สัตว์สามารถย่อย ดูดซึม และใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีขึ้น (Alajaji and El-Adawy, 2006; Sadeghi and Shawrang, 2007; El-Niely, 2007; Ebrahimi *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2010; Yoon *et al.*, 2010)

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการผลิตชีวมวลสาหร่าย *N. commune* โดยทดลองเพาะเลี้ยงในสูตรอาหาร 4 ชนิด (BG-11 medium, BGA medium, Bold basal medium และ CHU'13 medium) ที่ความเข้มข้นของ KNO_3 5 ระดับ (0.02, 0.04, 0.08, 1.60 และ 3.20 กรัม/ลิตร) และความเข้มข้นของ K_2HPO_4 5 ระดับ (0.04, 0.08, 0.16, 0.32 และ 0.64 กรัม/ลิตร) รวมทั้งเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของ *N. commune* หลังผ่านการดัดแปรโครงสร้างของเซลล์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) ผลจากการศึกษาครั้งนี้คาดว่าสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตชีวมวลของ *N. commune* และทราบถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ *N. commune* ให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำอาหารสัตว์น้ำต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเชื้อสาหร่ายเริ่มต้น

นำหัวเชื้อสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 จากฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) มาเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 medium ในขวดขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเติมอาหารปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเลี้ยงบนเครื่องเขย่าความเร็ว 150 รอบ/นาที โดยให้ความเข้มแสง 60 μmol photon/m^3/s จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ช่วงรับแสงมืด : สว่าง เท่ากับ 12 : 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ (Rodjaroen, 2010) เมื่อได้ความหนาแน่นของเชื้อเพียงพอนำเชื้อไปขยายต่อในขวดขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารปริมาตร 200 มิลลิลิตรแล้วนำไปเลี้ยงที่สภาวะเหมือนเดิมจนได้ปริมาตรของเชื้อเพียงพอสำหรับการทดลองขั้นต่อไป

2. การเลี้ยงและหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและผลิตชีวมวลของสาหร่าย

นำสาหร่ายมาเลี้ยงเพื่อหาสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลิตชีวมวล โดยเลี้ยงสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ในสูตรอาหารต่างกัน 4 สูตร คือ BG-11 medium, BGA medium, Bold basal medium และ Chu'13 medium จากนั้นคัดเลือกสูตรอาหารที่สาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 เจริญเติบโตดีและสะสมแป้งสูงสุด นำไปทดสอบระดับความเข้มข้นของ

ไนโตรเจน (KNO_3) 5 ระดับ คือ 0.02, 0.04, 0.08, 1.60 และ 3.20 กรัมต่อลิตร และระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (K_2HPO_4) 5 ระดับ คือ 0.04, 0.08, 0.16, 0.32 และ 0.64 กรัมต่อลิตร โดยแต่ละระดับมี 3 ซ้ำ เลี้ยงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่เติมอาหารปริมาตร 100 มิลลิลิตรโดยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ OD_{1000} = 0.5 ภายใต้สภาวะเดิมเป็นระยะเวลา 21 วัน (Rodjaroen, 2010)

3. การศึกษาชีวมวลสาหร่าย

ทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายหลังสิ้นสุดการทดลอง นำมากรองด้วยชุดกรองที่มีปั๊มอากาศช่วยใช้กระดาษกรองชนิด Whathman GF/C ขนาดรู 45 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปหาน้ำหนักสาหร่ายแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (AOAC, 2005)

4. การดัดแปรโครงสร้างของสาหร่าย

นำสาหร่ายแห้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการมาดัดแปรโครงสร้าง โดยชั่งตัวอย่างและผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:20 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ในบีกเกอร์ปริมาตร 2 ลิตร หลังจากนั้นนำไปผ่านคลื่นไมโครเวฟ (MW 71B, Samsung, Malaysia) ที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ เป็นเวลา 4 นาที (Thongprajukaew *et al.*, 2013) หลังจากนั้นทำแห้งตัวอย่างเพื่อควบคุมระดับความชื้นโดยใช้ freeze dryer (Delta 2-24 LSC, Germany) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างแห้งไว้ในถุงพอลิเอทิลีนในเดซิเคเตอร์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลาง (neutral detergent fiber: NDF) และเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกรด (acid detergent fiber: ADF) เถ้า และพลังงานรวม ตามวิธีการของ AOAC (2005) สำหรับปริมาณของคาร์โบไฮเดรต (เปอร์เซ็นต์) คำนวณจาก 100 – (โปรตีน + ไขมัน + เถ้า + เส้นใยหยาบ) ส่วนพลังงานรวม (gross energy, GE) คำนวณจาก (โปรตีน × 5.6) + (ไขมัน × 9.44) + (เส้นใยหยาบ × 4.1) + (คาร์โบไฮเดรต × 4.1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีทำ 3 ซ้ำ และคำนวณค่าในรูปของวัตถุแห้ง

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ออกแบบการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของชุดทดลองด้วย Tukey's multiple comparison tests ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (Zar, 1996) ด้วยโปรแกรม SPSS version 12.0 และใช้ *t*-test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟและสาหร่ายชุดควบคุม

ผลการทดลอง

1. สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและผลิตชีวมวลของสาหร่าย

1.1 สูตรอาหาร

การผลิตชีวมวลของ *N. commune* TISTR 8870 อยู่ในช่วง 0.30 ± 0.01 ถึง 0.50 ± 0.02 กรัม น้ำหนักแห้ง/ลิตร โดยสาหร่ายสามารถผลิตชีวมวลได้สูงสุดในอาหารสูตร Chu'13 medium

(0.50 ± 0.02 กรัม น้ำหนักแห้ง/ลิตร) และมีความแตกต่างทางสถิติกับทุกสูตรอาหาร ($p<0.05$) ยกเว้นในสูตร BG-11 medium (ตารางที่ 1)

1.2 ระดับความเข้มข้นของไนโตรเจน

สาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่เลี้ยงในอาหารสูตร Chu' 13 medium สามารถผลิตชีวมวลได้สูงสุดเมื่อเติม KNO_3 ความเข้มข้น 1.60 กรัม/ลิตร (0.76 ± 0.06 กรัม น้ำหนักแห้ง/ลิตร) รองลงมาคือ 0.80 ($p<0.05$), 0.04 ($p<0.05$), 3.20 ($p<0.05$) และ 0.02 ($p<0.05$) กรัมน้ำหนักแห้ง/ลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

1.3 ระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

สาหร่ายผลิตชีวมวลสูงที่สุดในอาหารที่เติม K_2HPO_4 ความเข้มข้น 0.08 กรัม/ลิตร (0.48 ± 0.01 กรัม น้ำหนักแห้ง/ลิตร) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับทุกระดับความเข้มข้น ยกเว้นที่ระดับ 0.16 กรัม/ลิตร (ตารางที่ 3)

2. องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่าย

ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และพลังงานรวมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่ถูกดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ ($p<0.05$, ตารางที่ 4) ขณะที่ปริมาณไขมันมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p<0.05$) การดัดแปรโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถลดปริมาณของเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลางได้ รวมทั้งลดปริมาณของไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกท์ ส่วนปริมาณของเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกรดพบว่ามีค่าน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบโดยวิธีการที่ใช้

ตารางที่ 1 การผลิตชีวมวลของสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่เลี้ยงในอาหารสูตรต่างกัน เป็นระยะเวลา 21 วัน

Media	Biomass production (g dry weight/L; Mean±SE)
BG-11 medium	0.47 ± 0.01^{bc}
BGA medium	0.30 ± 0.01^{a}
Bold basal medium	0.40 ± 0.02^{b}
Chu' 13 medium	0.50 ± 0.02^{c}

หมายเหตุ: ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 2 การผลิตชีวมวลของสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่เลี้ยงในระดับความเข้มข้นของไนโตรเจนต่างกันของอาหารสูตร Chu' 13 medium เป็นระยะเวลา 21 วัน

KNO_3 concentration (g/L)	Biomass production (g dry weight/L; Mean±SE)
0.02	0.40 ± 0.01^{a}
0.04	0.52 ± 0.01^{a}
0.08	0.67 ± 0.01^{b}
1.60	0.76 ± 0.06^{b}
3.20	0.48 ± 0.01^{a}

หมายเหตุ: ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 3 การผลิตชีวมวลของสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่เลี้ยงในระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่างกันของอาหารสูตร Chu'13 medium เป็นระยะเวลา 21 วัน

K_2HPO_4 concentration (g/L)	Biomass production (g dry weight/L Mean±SE)
0.04	0.33 ± 0.01^a
0.08	0.48 ± 0.01^c
0.16	0.46 ± 0.01^c
0.32	0.40 ± 0.01^b
0.64	0.39 ± 0.01^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง; Mean±SE) ของสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ชุดควบคุมและที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Chemical composition	Unmodified	Microwave irradiation	p-value
Crude protein	41.59 ± 0.04^a	42.21 ± 0.16^b	< 0.001
Crude lipid	1.48 ± 0.10^a	1.78 ± 0.16^a	0.594
Crude ash	2.19 ± 0.02^a	2.41 ± 0.08^b	0.044
ADF	nd	nd	nd
NDF	22.36 ± 0.58^a	15.80 ± 0.06^b	0.004
NFE	54.35 ± 0.21^a	53.22 ± 0.04^b	< 0.001
GE (kcal/g)	471.93 ± 0.65^a	473.02 ± 0.17^b	< 0.001

หมายเหตุ: ADF, acid detergent fiber; NDF, neutral detergent fiber; NFE, nitrogen free extract; GE, gross energy; nd, not detected.
ตัวอักษรต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

วิจารณ์ผลการทดลอง

สาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 สามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร Chu'13 medium และอาหาร BG-11 medium โดยให้มวลชีวภาพสูงสุดเมื่อเพาะเลี้ยงใน Chu'13 medium ซึ่งต่างจากสาหร่าย *N. muscorum* TISTR 8871 ที่ผลิตชีวมวลได้สูงสุดเมื่อเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11medium (สมรักษ์ และคณะ, 2554) เช่นเดียวกันกับสาหร่าย *H. welwitschii* TISTR 8237 ที่ทดลองเพาะเลี้ยงในอาหาร 5 สูตร(CHU'13 medium, Bold medium, BGA medium และ BG-11 medium) ซึ่งพบว่า *H. welwitschii* TISTR 8237 ที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 medium มีชีวมวล (0.45 ± 0.04 กรัม น้ำหนักแห้ง/ลิตร) และสะสมแป้งได้สูงสุด (23.39 ± 1.23 เปอร์เซ็นต์) (สมรักษ์ และคณะ, 2557) จะเห็นได้ว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร Chu'13 medium และ BG-11 medium (สุพรรษา และคณะ, 2554) สำหรับระดับความเข้มข้นของไนโตรเจน พบว่า

เมื่อเพิ่มหรือลดความเข้มข้นจะทำให้สาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ผลิตชีวมวลต่ำลง ในขณะที่สาหร่าย *Phormedium* sp. เจริญเติบโตและผลิตชีวมวลได้สูงที่ระดับไนโตรเจน 6.00 กรัม/ลิตร ในอาหาร BG-11 medium (เลอศักดิ์ และคณะ, 2557)

ระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสูตรอาหารมีผลต่อการผลิตชีวมวลของสาหร่าย ($p<0.05$) โดย *N. commune* TISTR 8870 มีการผลิตชีวมวลสูงที่สุดในอาหารที่มีความเข้มข้นของ K_2HPO_4 เท่ากับ 0.08 กรัม/ลิตร แต่เมื่อเพิ่มหรือลดความเข้มข้นจะทำให้การผลิตชีวมวลต่ำลง การศึกษาในสาหร่าย *N. muscorum* TISTR 8871 พบว่าการผลิตชีวมวลและการสะสมแป้งสูงสุดที่ระดับไนโตรเจน 0.04 กรัม/ลิตร ในอาหาร BG-11 medium (สมรักษ์ และคณะ, 2554) เช่นเดียวกันกับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *H. welwitschii* TISTR 8237 ที่มีค่าชีวมวลและการสะสมแป้งสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของไนโตรเจน 0.04 กรัม/ลิตร ในอาหาร BG-11 medium (สมรักษ์ และคณะ, 2557) ในขณะที่สาหร่าย *Phormedium* sp. เจริญเติบโตและการผลิตชีวมวลสูงที่ระดับฟอสฟอรัส 0.16 กรัม/ลิตร ในอาหาร BG-11 medium (เลอศักดิ์ และคณะ, 2557)

การดัดแปรสามารถปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของวัตถุดิบอาหารได้หลายชนิด การเพิ่มปริมาณของโปรตีน ในครั้งนี้สอดคล้องกับการใช้คลื่นไมโครเวฟในระยะเวลา 10 นาที เพื่อดัดแปรโครงสร้างรำละเอียด (Sansuwan *et al.*, 2014) กระบวนการดังกล่าวสามารถดัดแปรโปรตีนและสารประกอบอื่นที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในระดับโมเลกุล โดยการสร้างพันธะโควาเลนต์หรือรวมกลุ่มกันเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Sadeghi and Shawrang, 2007) ทำให้เมื่อตรวจสอบปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเคลดาห์ลแล้วมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การสลายพันธะระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนในสายพอลิเปปไทด์ก็พบว่าสามารถทำให้อะตอมของไนโตรเจนถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (Molins, 2001; Fernandes *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม การดัดแปรโครงสร้างพบว่าไม่ได้เพิ่มปริมาณโปรตีนในวัตถุดิบบางชนิด (Ramezanzadeh *et al.*, 2000; Khatoon and Prakash, 2006)

การเปลี่ยนแปลงของไขมันทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณมักเกิดขึ้นในตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว การลดลงของลิพิดเนื่องจากการฉายรังสีเกิดเนื่องมาจากอนุมูลอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Thakur and Singh, 1994) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไขมันและรูปแบบของกรดไขมันได้ (Brewer, 2009) อย่างไรก็ตาม การดัดแปรโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการศึกษาครั้งนี้พบว่าไม่ส่งผลต่อปริมาณของไขมัน ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปร (Stewart *et al.*, 2003; Malheiro *et al.*, 2009) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเถ้า Chumwaengwapee *et al.* (2013) เสนอว่าอาจเกิดขึ้นจากคีเลชันของแร่ธาตุที่ถูกกระตุ้นด้วยไมโครเวฟหรือลำแสงอิเล็กตรอน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับระดับความเข้มของแหล่งพลังงานที่ใช้ด้วย (Fernandes *et al.*, 2015)

การตรวจพบเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลาง (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) และไม่พบเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำ

ละลายที่เป็นกรด (เซลลูโลส และลิกนิน) แสดงให้เห็นว่าผนังเซลล์ของสาหร่ายชนิดนี้ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสเป็นหลัก การดัดแปรด้วยรังสีทั้งที่แตกตัวเป็นไอออน (รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน) และไม่แตกตัวเป็นไอออน (คลื่นไมโครเวฟ) พบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นใยที่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลางได้ (Rehman, 2007; Taghinejad-Roudbaneh *et al.*, 2010) การดัดแปรด้วยวิธีนี้เหล่านี้สามารถทำลายผนังเซลล์ได้ จากการวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรด ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกท์ (Thongprajukaew *et al.*, 2013) สำหรับพลังงานรวมซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ได้

สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับเลี้ยงสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 เพื่อผลิตชีวมวลคือการเลี้ยงในอาหารสูตร Chu'13 medium ที่มี KNO_3 ความเข้มข้น 1.60 กรัม/ลิตร และ K_2HPO_4 ความเข้มข้น 0.08 กรัม/ลิตร การดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี การดัดแปรวิธีนี้ใช้เวลาสั้นเนื่องจากมีอัตราการเพิ่มความร้อนเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดัดแปรโดยใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ คลื่นไมโครเวฟยังได้รับการยอมรับและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์ ดังนั้น การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้คลื่นไมโครเวฟ เช่น ระยะเวลา ความร้อน อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อน้ำ ขนาดภาชนะ ฯลฯ จึงมีความจำเป็นต่อการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870

เอกสารอ้างอิง

จงกล พรหมยะ, ขจรเกียรติ ศรีนวลสม และศิริเพ็ญ ตรัยไชยาพร. 2554. ผลของสาหร่ายสไปรูลิน่าต่อการเติบโต ดัชนีการเจริญพันธุ์ สารสีแคโรทีนอยด์และการกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกันในการเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ฟ, น. 61. *ใน* **รายงานการประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติครั้งที่ 5.** มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

เลอศักดิ์ ธนบัตร, ธรรมวุธ วรวงศ์เวทย์, มาโนช ขำเจริญ และ สมรักษ์ รอดเจริญ. 2557. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Phormedium* sp. ในระดับห้องปฏิบัติการ, น. 31. *ใน* **รายงานการสัมนาวิชาการวิทยาศาสตร์การประมง ระดับปริญญาตรี ครั้งที่ 9.** มหาวิทยาลัยวลัยลักษ์, นครศรีธรรมราช.

สมรักษ์ รอดเจริญ, นิรันดร์ จันทวงศ์, อาภารัตน์ มหาขันธ์ และ คาซูฮิสะ มิยาโมโตะ. 2554. การผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลสาหร่าย *Nostoc muscorum* TISTR 8871 โดยวิธี three-step microbial hydrogen-producing system, น. 129. *ใน* **รายงานการประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติครั้งที่ 5.** มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

สมรักษ์ รอดเจริญ, อดิศักดิ์ เกลี้ยงตะพงศ์, ชุตินุช สุจริต และ อเนก สาวะอินทร์. 2557. การผลิตชีวมวลและการสะสมแป้งของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Hapalosiphon welwitschii* TISTR 8237, น. 595-600. *ใน* รายงานการ

ประชุมวิชาการการพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สุพรรษา ขันธโสภา, อรรถพล มะตนเด, ศุภชัย ฤกษ์เกษม, กันย์ กังวานสายชล และ อาภารัตน์ มหาขันธ์. 2554. การวิจัยและพัฒนาการการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนของสาหร่ายขนาดเล็กในคลังเก็บสาหร่าย วว, น. 131. *ใน* **รายงานการประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 5.** มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

อาภารัตน์ มหาขันธ์. 2546. **การเพาะเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืด.** ศูนย์จุลินทรีย์สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปทุมธานี.

Alajaji, S.A. and El-Adawy, T.A. 2006. Nutritional composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by microwave cooking and other traditional cooking methods. **Journal of Food Composition Analysis** 19: 806–812.

AOAC. 2005. **Official Methods of Analysis of AOAC International (18thed).** Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Brewer, M.S. 2009. Irradiation effects on meat flavor: A review. **Meat Science** 81: 1–14.

Chumwaengwapee, S., Soontornchai, S. and Thongprajukeaw, K. 2013. Improving chemical composition, physicochemical properties, and *in vitro* carbohydrate digestibility of fish coconut meal. **ScienceAsia** 39: 636–642.

Chung, H.J., Lee, S.Y., Kim, J.H., Lee, J.W., Byun, M.W. and Lim, S.T. 2010. Pasting characteristics and *in vitro* digestibility of γ-irradiated RS_4 waxy maize starches. **Journal of Cereal Science** 52: 53–58.

Ebrahimi, S.R., Nikkhah, A., Sadeghi, A.A. and Raisali, G. 2009. Chemical composition, secondary compounds, ruminal degradation and *in vitro* crude protein digestibility of gamma irradiated canola seed. **Animal Feed Science and Technology** 151: 184–193.

El-Niely, H.F.G. 2007. Effect of radiation processing on antinutrients, *in vitro* protein digestibility and protein efficiency ratio bioassay of legume seeds. **Radiation Physics and Chemistry** 76: 1050–1057.

Fernandes, A., Barreira, J.C.M., Antonio, A.L., Rafalski, A., Oliveira, M.B.P.P., Martins, A. and Ferreira, I.C.F.R. 2015. How does electron beam irradiation dose affect the chemical and antioxidant profiles of wild dried *Amanita* mushrooms?. **Food Chemistry** 182: 309–315.

Khatoon, N. and Prakash, J. 2006. Nutrient retention in microwave cooked germinated legumes. **Food Chemistry** 97: 115–121.

Malheiro, R., Oliveira, I., Vilas-Boas, M., Falcao, S., Bento, A. and Pereira, J.A. 2009. Effect of microwave heating with different exposure times on physical and chemical parameters of olive oil. **Food and Chemical Toxicology** 47: 92–97.

Molins, R. 2001. **Food irradiation: Principles and applications.** John Wiley and Sons, New York.

Peñaflorida, V.D and Golez, V.D. 1996. Use of seaweed meals from *Kappaphycus aluarezii* and *Gracilaria heteroclada* as binders in diets for juvenile shrimp *Penaeus monodon*. **Aquaculture** 143: 393–401.

Qiu, B., Liu, J., Liu, Z. and Liu, S. 2002. Distribution and ecology of the edible cyanobacterium Ge-Xian-Mi (*Nostoc*) in rice fields of Hefeng Country in China. **Journal of Applied Phycology** 14: 423–429.

Ramezanzadeh, F.M., Rao, R.M., Prinyawiwatkul, W., Marshall, W.E. and Windhauser, M. 2000. Effects of microwave heat, packaging, and storage temperature on fatty acid and proximate compositions in rice bran. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 48: 464–467.

Rasmussen, H.E., Blobaum, K.R., Jesch, E.D., Ku, C.S., Park, Y.K., Lu, F., Carr, T.P. and Lee, J.Y. 2009. Hypocholesterolemic effect of *Nostoc commune* var. *sphaeroides* Kutzing, an edible blue-green alga. **European Journal of Nutrition** 48: 387–394.

Rehman, Z.U. 2007. Domestic processing effects on available carbohydrate content and starch digestibility of black grams (*Vigna mungo*) and chick peas (*Cicer arietium*). **Food Chemistry** 100: 764–767.

Rodjaroen, S. 2010. Photobiological Hydrogen Production from Native Green Algal Strains and Cyanobacterial Strains of Thailand. Ph.D. Thesis, Kasetsart University.

Sadeghi, A.A. and Shawrang, P. 2007. Effects of microwave irradiation on ruminal protein degradation and intestinal digestibility of cotton seed meal. **Livestock Science** 106: 176–181.

Sansuwan, S., Thongprajukaew, K., Kovitvadhi, S., Somsueb, P. and Kovitvadhi, U. 2014. Improvement of carbohydrate quality in rice bran using microwave irradiation for Nile tilapia feed production. **Asian Fisheries Science** 27: 104–116.

Stewart, O.J., Raghavan, G.S.V., Orsat, V. and Golden, K.D. 2003. The effect of drying on unsaturated fatty acids and trypsin inhibitor activity in soybean. **Process Biochemistry** 39: 483–489.

Taghinejad-Roudbaneh, M., Ebrahimi, S.R., Azizi, S. and Shawrang, P. 2010. Effects of electron beam irradiation on chemical composition, antinutritional factors, ruminal degradation and *in vitro* protein digestibility of canola meal. **Radiation Physics and Chemistry** 79: 1264–1269.

Thakur, B.R. and Singh, R.K. 1994. Food irradiation–Chemistry and applications. **Food Reviews International** 10: 437–473.

Thongprajukaew, K., Yawang, P., Dudae, L., Bilanglod, H., Dumrongrittamatt, T., Tantikitti, C. and Kovitvadhi, U. 2013. Physical modification of palm kernel

meal improved available carbohydrate, physicochemical properties and *in vitro* digestibility in economic freshwater fish. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 93: 3832–3840.

Yoon, H-S., Yoo, J-Y., Kim, J-H., Lee, J-W., Byun, M-H., Baik, B.K. and Lim, S.T. 2010. *In vitro* digestibility of gamma-irradiated corn starches. **Carbohydrate Polymers** 81: 961–963.

Zar, J.H. 1996. **Biostatistical analysis (3rd ed).** Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.