



กำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดในห้องปฏิบัติการ

Primary Productivity of Two Phytoplankton Cell Sizes in Laboratory

เจริญลักษณ์ สุชาติพงษ์, สุนิดา ปานเพชร, สุภาพร บุญญเจตน์พงษ์ และ ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ์

Charoenluk Suchatpong, Sunida Panpet, Sutaporn Bunyajetpong and Thaithaworn Lirdwitayaprasit

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Received : 3 February 2021

Revised : 8 March 2021

Accepted : 23 March 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดในห้องปฏิบัติการ โดยแพลงก์ตอนพืชที่เลือกศึกษาเป็นแพลงก์ตอนพืชที่พบบริเวณปากแม่น้ำ ป่าชายเลน และทะเลชายฝั่ง ในอ่าวไทย คือ *Chattonella subsalsa* (ขนาดกว้าง 23.18 ± 3.32 และยาว 30.35 ± 3.38 ไมโครเมตร) และ *Isochrysis* sp. (ขนาด 4.33 ± 0.77 ไมโครเมตร) เพื่อเป็นตัวแทนของไมโครแพลงก์ตอน และนาโนแพลงก์ตอน ตามลำดับ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ภาวะเลี้ยงเดี่ยว ในอาหารสูตร T1 และภาวะเลี้ยงรวม ในอาหารสูตร T1 ความเข้มข้น 100% 50% และ 1% ผลการศึกษาพบว่า (1) จำนวนเซลล์ ขนาดเซลล์ กำลังการผลิตขั้นต้น ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และช่วงชีวิต แปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร (2) ภาวะเลี้ยงรวม ที่ความเข้มข้น 100% T1 นาโนแพลงก์ตอนพืชมีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด สูงขึ้น 47.27% เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว เนื่องจากมีการปรับลดจำนวนเซลล์ 42.58% และลดขนาดเซลล์ 3% แต่เพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอถึง 1291% นอกจากนี้ นาโนแพลงก์ตอนพืชยังมีการปรับระยะเวลาที่ค่าประสิทธิภาพกำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอ (PP/Chl *a*) สูง ให้ยาวขึ้นคือ ในช่วง 5 วันแรก จากเดิมที่มีค่าสูงเฉพาะวันที่ 3 ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว และปรับปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (Chl *a* /cell) ให้สูงขึ้นใน 2 ช่วงเวลา คือ ในช่วง 3 วันแรก และช่วงที่ความหนาแน่นเซลล์สูง ส่งผลให้นาโนแพลงก์ตอนพืชสามารถปรับตัวให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ ทั้งในบริเวณที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% และ 50% T1) และต่ำ (1% T1) และ (3) ในขณะที่ไมโครแพลงก์ตอนพืชสามารถดำรงชีวิตได้ดีในบริเวณที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% และ 50% T1) แต่ต้องปรับตัวอย่างมาก เมื่อสารอาหารมีปริมาณต่ำ (1% T1) โดยปรับปริมาณ Chl *a*/cell ให้สูงขึ้นตลอดช่วงเวลาการดำรงชีวิต เพราะค่า PP/Chl *a* อยู่ในระดับต่ำกว่านาโนแพลงก์ตอนพืชมาก จึงส่งผลต่อการดำรงชีวิต และกำลังการผลิตขั้นต้นที่ต่ำ

คำสำคัญ : กำลังการผลิตขั้นต้น ; แพลงก์ตอนพืช ; *Chattonella* ; *Isochrysis*



Abstract

This research aimed to study the primary productivity of two phytoplankton cell sizes in laboratory. The chosen phytoplankton for this study were found at river mouths, mangroves and seashores of the Gulf of Thailand. They were the phytoplankton *Chattonella subsalsa* (23.18 x 30.3 μm) and *Isochrysis* sp. (4.33 μm), represented as microplankton and nanoplankton, respectively. The experiment was divided into two parts; pure and mixed phytoplankton cultures were grown in the T1 medium and the 100%, 50% and 1% T1 medium, respectively. The results showed that cell number, cell size, primary productivity, chlorophyll *a* content and lifetime had direct variation to nutrient concentration. Comparing mixed cultures to pure culture, at 100% T1 the primary productivity of nanophytoplankton was increased 47.27% since the nanophytoplankton had decreased cell number (42.58%) and cell size (3%) but increased chlorophyll *a* content (1291%). Furthermore, they adapted themselves by extending the period of high PP/Chl *a* value from one day (day 3; pure culture) to the first five days (day 1-5; mixed culture) and increasing the Chl *a*/cell value in two periods, the first three day and the day that gave high cell density. Therefore, the nanophytoplankton were able to live in both area of high and low nutrient while the microphytoplankton lived well in the high-nutrient area and had difficulty to live in the low-nutrient area (1% T1). They adapted themselves by increasing the Chl *a*/cell value throughout their lifetime because their PP/Chl *a* value was low, comparing to it of nanophytoplankton, even though their primary productivity was low.

Keywords : primary productivity ; phytoplankton ; *Chattonella* ; *Isochrysis*



บทนำ

กำลังการผลิตขั้นต้น (primary productivity) ของแพลงก์ตอนพืช หรือกำลังการผลิตของแพลงก์ตอนพืช (phytoplankton productivity) คือ อัตราการสังเคราะห์สารอินทรีย์จากสารอนินทรีย์ของแพลงก์ตอนพืช หรือปริมาณคาร์บอนที่ตรึง (fixed) โดยแพลงก์ตอนพืช ต่อตารางเมตรหรือลูกบาศก์เมตร ต่อเวลา ซึ่งนิยามค่าศัพท์ผลผลิตขั้นต้น (primary production) อาจมีการใช้ต่างกันไปบ้าง (Cullen, 2001; Williams, 1993) Millero (2006) พบว่า สารอินทรีย์ในทะเลส่วนใหญ่มาจากแพลงก์ตอนพืชถึง 84.4% และสาหร่ายขนาดใหญ่ (macroalgae) 6.2% มีเพียงส่วนน้อยที่มาจากแหล่งน้ำบนบกและไต้ดิน 3.95% และบรรยากาศ 5.45% แสดงให้เห็นว่า แพลงก์ตอนพืชเป็นผู้ผลิตขั้นต้นที่สำคัญในทะเล ก่อนจะถ่ายทอดพลังงานต่อไปยังผู้บริโภคในลำดับถัดไป ในห่วงโซ่อาหาร และสายใยอาหาร อีกทั้งยังเป็นตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ และประเมินศักยภาพการผลิตทรัพยากรสัตว์น้ำ (Lursinsap *et al.*, 1986) นอกจากนี้ ในช่วง 30 ปี ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มสนใจศึกษากลุ่มผลผลิตขั้นต้นของแบคทีเรียในทะเล และเป็นที่ยอมรับว่า ประมาณ 50% ของผลผลิตขั้นต้นในทะเลและแหล่งน้ำจืด เกิดจากแบคทีเรีย (bacterioplankton) ซึ่งเป็นฟิโคแพลงก์ตอน ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร (Ducklow & Carlson, 1992)

การศึกษา กำลังการผลิตขั้นต้นของกลุ่มแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดบริเวณอ่าวไทยตอนใน ด้วยวิธีคาร์บอน-13 (^{13}C) (Jaroensuk, 2018) พบว่า กำลังการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยของไมโครแพลงก์ตอนพืช (20-200 ไมโครเมตร) มีค่าสูง ในบริเวณที่มีสารอาหารสูง ส่วนกำลังการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยของฟิโคแพลงก์ตอนพืช (0.2-2 ไมโครเมตร) อยู่ในระดับเดียวกัน ทั้งในบริเวณที่มีสารอาหารสูง กลาง และต่ำ นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า บริเวณทะเลเปิด ซึ่งสารอาหารมีปริมาณต่ำ เมื่อปริมาณคลอโรฟิลล์แอลดน้อยลง ในระดับที่น้อยกว่า 0.1-1 ไมโครกรัมต่อลิตร อัตราส่วนคาร์บอนของแบคทีเรียต่อคาร์บอนของแพลงก์ตอนพืช มีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า แบคทีเรียซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแพลงก์ตอนพืช จะมีปริมาณมากขึ้น (Cho & Azam, 1990) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขนาดเซลล์ ปริมาณสารอาหาร และกำลังการผลิตขั้นต้น ต่างมีความสัมพันธ์กัน แต่การศึกษาเปรียบเทียบกำลังการผลิตขั้นต้นของกลุ่มแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดในประเทศไทย มีการศึกษาน้อย (Jaroensuk, 2018; Phromthong, 1999) ส่วนใหญ่เป็นการศึกษา กำลังการผลิตขั้นต้นรวม ในธรรมชาติ (Boonkwan, 2013; Musikasung *et al.*, 1999; Lursinsap *et al.*, 1986) เพื่อให้เข้าใจบทบาทและความสำคัญของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดในห่วงโซ่อาหาร งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและทำความเข้าใจกับความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในแพลงก์ตอนพืชที่มีขนาดเซลล์ต่างกัน และปริมาณสารอาหารที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นตัวแปรต้น ส่วนตัวแปรตาม ได้แก่ กำลังการผลิตขั้นต้น ความหนาแน่นและปริมาตรเซลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ปริมาณคาร์โบไฮเดรต และช่วงชีวิต โดยเลือกศึกษาในแพลงก์ตอนพืช ที่พบบริเวณปากแม่น้ำ ป่าชายเลน และทะเลชายฝั่ง ในอ่าวไทย คือ *Chattonella subsalsa* และ *Isochrysis sp.* เพื่อเป็นตัวแทนของไมโครแพลงก์ตอน และนาโนแพลงก์ตอน ตามลำดับ



วิธีดำเนินการวิจัย

การเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืช

การทดลองนี้ เลือกใช้ไมโครแพลงก์ตอนพืชชนิด *C. subsalsa* และนาโนแพลงก์ตอนพืชชนิด *Isochrysis* sp. ที่ทำการเพาะเลี้ยงแบบสายพันธุ์บริสุทธิ์ (aseptic clonal culture) และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการแพลงก์ตอนพืช ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเพาะเลี้ยง ในอาหารสูตร T1 (Ogata *et al.*, 1987) ด้วยน้ำทะเล ที่มีความเค็ม 28 พีเอสยู ในขวดแก้วฝาเกลียว (Duran bottle) ขนาด 2 ลิตร ซึ่งบรรจุอาหาร 1.5 ลิตร และนำไปเลี้ยงในตู้เพาะเลี้ยง ที่ควบคุมปัจจัยความเข้มแสง 54 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที ภายใต้หลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงสีขาว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และระยะเวลาได้รับแสงต่อระยะเวลาไม่ได้รับแสง คือ 12:12 ชั่วโมง (Panpet, 2019) สำหรับ (ก) ภาวะเลี้ยงเดี่ยว เพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิด ที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น 500 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ชนิดละ 10 ขวด เก็บตัวอย่างหนึ่งขวดต่อชนิด เพื่อวิเคราะห์ทุกๆ 2 วัน และ (ข) ภาวะเลี้ยงรวม เพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดร่วมกัน ที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น ชนิดละ 500 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในอาหารสูตร T1 ที่ความเข้มข้น 100% 50% และ 1% ความเข้มข้นละ 10 ขวด เก็บตัวอย่างหนึ่งขวดต่อความเข้มข้น เพื่อวิเคราะห์ทุกๆ 2 วัน โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ตามวิธีการในหัวข้อถัดไป

สำหรับ (ข) ภาวะเลี้ยงรวม ซึ่งทำการวิเคราะห์กำลังการผลิตขั้นต้น และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ แยกตามขนาดเซลล์ ได้นำแพลงก์ตอนพืชที่เพาะเลี้ยงร่วมกัน มาผ่านตาข่าย (plankton net) ขนาด 20 ไมโครเมตร เพื่อแยกไมโครแพลงก์ตอนพืช ออกจากนาโนแพลงก์ตอนพืช โดยนาโนแพลงก์ตอนพืชจะผ่านตาข่ายพร้อมอาหาร ส่วนไมโครแพลงก์ตอนพืชที่ติดอยู่บนตาข่าย ได้นำกลับไปใส่ในอาหารที่มีการกรองผ่านกระดาษกรอง GF/F จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์กำลังการผลิตขั้นต้น และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ แยกตามขนาดเซลล์ ตามวิธีการในหัวข้อถัดไป

การนับจำนวนเซลล์แพลงก์ตอนพืช

สุ่มนับตัวอย่างไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ที่เจือจาง 10 เท่า ด้วยสไลด์เซดจ์วิก (Sedgewick-Rafter counting chamber) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 10 เท่า และคำนวณจำนวนแพลงก์ตอนพืชในหน่วยเซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามสมการที่ (1) ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. ซึ่งมีขนาดเล็ก ทำการนับตัวอย่างที่เจือจาง 10 เท่า เช่นกัน แต่ทำการนับจำนวนเซลล์ด้วยสไลด์ฮีมาไซโตมิเตอร์ (Haemocytometer counting chamber) จะได้จำนวนแพลงก์ตอน N1 และ N2 เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย N และคำนวณจำนวนแพลงก์ตอนพืชในหน่วยเซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามสมการที่ (2)

$$\text{จำนวนแพลงก์ตอนพืช (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)} = N \times D \quad (1)$$

$$\text{จำนวนแพลงก์ตอนพืช (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)} = [(N/9) \times 10^4] \times D \quad (2)$$

เมื่อ N = จำนวนแพลงก์ตอนเฉลี่ยที่นับได้ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

D = จำนวนเท่าที่เจือจาง



การวิเคราะห์กำลังการผลิตขั้นต้น

นำแพลงก์ตอนพืชที่เพาะเลี้ยง ใสลงในขวดบีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD) ขนาด 100 มิลลิลิตร ซึ่งทราบปริมาตรแน่นอน โดยไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในขวด แต่ลดชุดการทดลองประกอบด้วย ขวดเริ่มต้น ขวดสว่าง และขวดมืด อย่างละ 3 ขวด จากนั้นทำการตรึงออกซิเจนละลายในขวดเริ่มต้นทันที โดยการเติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) ตามด้วยสารละลายอัลคาไลด์ไฮโดรไซด์ ($NaOH + KI$) สำหรับขวดสว่างและขวดมืด ให้นำไปบ่มในภาชนะบ่ม ซึ่งมีความเข้มแสงโดยรวม 33.75 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที ภายใต้หลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงสีขาว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการตรึงออกซิเจนละลายเช่นเดียวกับขวดเริ่มต้น โดยจะเกิดตะกอนสีน้ำตาลของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ ($Mn(OH)_3$) เมื่อพร้อมทำการวิเคราะห์ จึงเติมกรดเข้มข้นลงในน้ำตัวอย่าง เพื่อละลายตะกอน และทำการไตเตรทหาปริมาณออกซิเจนละลายตามวิธีไอโอดิเมตริกไตเตรชัน (iodometric titration) ของวินด์เลอร์ (Winkler method) (Strickland & Parsons, 1972) โดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (Metrohm 776 Dosimat titrator) ในการไตเตรท จากนั้นคำนวณหาปริมาณออกซิเจนละลายในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำมาคำนวณค่ากำลังการผลิตขั้นต้นในหน่วยมิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามสมการที่ (3) (Wetzel & Likens, 2000)

$$\text{กำลังการผลิตขั้นต้น (มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)} = [(LB - DB) \times 375] / (PQ \times t) \quad (3)$$

เมื่อ	LB	= ปริมาณออกซิเจนละลายของขวดสว่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	DB	= ปริมาณออกซิเจนละลายของขวดมืด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	375	= อัตราส่วนโดยโมลของคาร์บอนต่อออกซิเจน และปรับหน่วยจากลิตร เป็นลูกบาศก์เมตร ($12 \text{ mg C} / 32 \text{ mg O}_2 \times 1,000$)
	PQ	= โมเลกุลของออกซิเจนที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์แสง ต่อโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซึ่มไปใช้ โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 1.2
	t	= ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง (ชั่วโมง)

การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ

กรองแพลงก์ตอนพืชปริมาณ 1-50 มิลลิลิตร ผ่านกระดาษกรอง GF/F โดยปริมาตรที่กรองขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเซลล์ และตัดกระดาษกรองดังกล่าวเป็น 4 ส่วน ใสในหลอดพลาสติกฝาเกลียว (Falcon tube) ที่ทึบแสง ขนาด 15 มิลลิลิตร แล้วเติมอะซิโตนที่ความเข้มข้น 90% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปสกัดด้วยคลื่นความถี่สูง ในอ่างโซนิเคเตอร์ (sonicator) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14-15 ชั่วโมง ก่อนทำการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารสกัดไปวัดความเข้มแสงด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (PerkinElmer LS 55 Luminescence spectrometer) เพื่อหาผลต่างของความเข้มแสงก่อนและหลังหยดกรดไฮโดรคลอริก 1.2 โมลาร์ จำนวน 2-3 หยด เทียบกับกราฟมาตรฐานคลอโรฟิลล์เอ ซึ่งสร้างกราฟระหว่าง



ความเข้มข้นและผลต่างของความเข้มแสงก่อนและหลังหยดกรดของคลอโรฟิลล์เอ และคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์เอในหน่วยไมโครกรัมต่อลิตร โดยวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ปรับเปลี่ยนจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน (Strickland & Parsons, 1972) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

ปีเปตต์แพลงก์ตอนพืชปริมาณ 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง แล้วเติมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้น 80% wt/wt ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer) จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที ก่อนนำตัวอย่างใส่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Analytik Jena Specord 200 Plus) เทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Nielsen, 2010)

การวิเคราะห์ปริมาณสารอาหาร

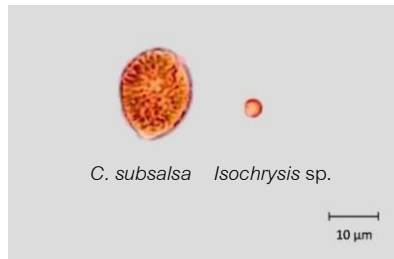
กรองน้ำที่เลี้ยงแพลงก์ตอนพืช ด้วยกระดาษกรอง GF/F เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหาร 4 ชนิด คือ ฟอสเฟต (PO_4^{3-} ; Dissolved Inorganic Phosphorus: DIP) แอมโมเนีย (NH_3) ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) เพื่อคำนวณหา DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen = $NH_3 + NO_2^- + NO_3^-$) โดยใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐาน (Hansen & Koroleff, 1999) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารอาหารในน้ำทะเล แต่ลดปริมาณน้ำตัวอย่าง และลดสัดส่วนรีเอเจนต์ให้สัมพันธ์กับปริมาณน้ำตัวอย่างที่ลดลง สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต แอมโมเนีย และไนไตรท์ ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร และวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Analytik Jena Specord 200 Plus) โดยใช้คิวเวทท์ (cuvette) ที่มีความกว้าง 1 เซนติเมตร

ผลการวิจัย

แพลงก์ตอนพืชต่างขนาด ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

แพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. จัดเป็นแพลงก์ตอนพืชในกลุ่มไดโนแฟลกเจลเลต เซลล์มีลักษณะรูปหยดน้ำ และมีสีน้ำตาลแกมเหลือง โดยแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* มีความกว้างเฉลี่ย 23.18 ± 3.32 ไมโครเมตร และความยาวเฉลี่ย 30.35 ± 3.38 ไมโครเมตร ส่วนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. มีขนาดเฉลี่ย 4.33 ± 0.77 ไมโครเมตร (ภาพที่ 1) จัดอยู่ในกลุ่มไมโครแพลงก์ตอน และนาโนแพลงก์ตอน ตามลำดับ (Wongrat, 1996) ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกแพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดดังกล่าว เพื่อเป็นตัวแทนของเซลล์ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ไมโครแพลงก์ตอนพืช *Chattonella subsalsa* และนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis sp.*
(กำลังขยาย 40 เท่า)

การเติบโต

แพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดเพาะเลี้ยงที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น 500 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในอาหารสูตร T1 ความเค็ม 28 พีเอสยู เป็นเวลา 19 วัน โดยทำการนับจำนวนเซลล์ทุกๆ 2 วัน (ภาพที่ 2 ก) พบว่า ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* มีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็วในช่วงสัปดาห์แรก และความหนาแน่นเซลล์สูงสุด 0.76×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในวันที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Pholpunthin, 1998) ที่มีการศึกษาความเค็มที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และพบว่า แพลงก์ตอนพืชชนิดนี้ มีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 9 วัน แรกของการทดลอง เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตรเดียวกัน (T1) ที่ระดับความเค็มใกล้เคียงกัน (25 พีเอสยู) ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis sp.* พบว่า มีความแตกต่างจากไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* โดยมีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างช้าๆ ในช่วงสัปดาห์แรก จากนั้นมีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็วในวันที่ 9 และความหนาแน่นเซลล์สูงสุด 188.33×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในวันที่ 11 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Alkhamis & Qin, 2013) ที่มีการศึกษาการเติบโตของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis sp.* ในแบบต่างๆ และพบว่า แพลงก์ตอนพืชชนิดนี้ มีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างช้าๆ ในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลอง โดยเลี้ยงในอาหารสูตรต่างกัน (f/2) ที่ระดับความเค็มต่างกัน (35 พีเอสยู)

กำลังการผลิตขั้นต้น

กำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis sp.* (ภาพที่ 2 ข) มีความสอดคล้องกับการเติบโต (ภาพที่ 2 ก) โดยมีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด ในวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด คือ วันที่ 9 และ 11 ของการทดลองตามลำดับ ในวันแรกของการทดลอง กำลังการผลิตขั้นต้นของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* (46.65 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) มีค่าสูงกว่ากำลังการผลิตขั้นต้นของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis sp.* (0.48 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดเพาะเลี้ยงที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นเท่ากัน แต่ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า จึงมีปริมาณรงควัตถุในเซลล์มากกว่า ส่งผลให้มีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงกว่า จากนั้นกำลังการผลิตขั้นต้นของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จนมีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด 451.88 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในวันที่ 9 ของการทดลอง ในขณะที่กำลังการผลิตขั้นต้นของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis sp.* เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก และเพิ่มอย่างต่อเนื่อง จนมีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด 333.56 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในวันที่ 11 ของการทดลอง



ช่วงวันที่ 9-13 กำลังการผลิตขั้นต้นของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่อนข้างคงที่ในวันที่ 13-19 เมื่อพิจารณาความหนาแน่นเซลล์ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* (ภาพที่ 2 ก) หลังวันที่ 9 พบว่า ลดลงช้าๆ ในขณะที่กำลังการผลิตขั้นต้น (ภาพที่ 2 ข) ลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากอายุเซลล์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพกำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอ (PP/Chl *a*) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลตามภาพที่ 4 ก ที่แสดงให้เห็นว่า ค่า PP/Chl *a* ของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ลดลง ในช่วงวันที่ 9-13 และเมื่อพิจารณากำลังการผลิตขั้นต้นของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ซึ่งค่อนข้างคงที่ ในวันที่ 13-19 พบว่า มีความสอดคล้องกับค่า PP/Chl *a* (ภาพที่ 4 ก) เช่นกัน โดยมีค่าต่ำ และค่าอยู่ในระดับเดียวกัน (0.71-0.73 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อมิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อชั่วโมง) ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. ในช่วงวันที่ 11-19 พบว่า กำลังการผลิตขั้นต้น (ภาพที่ 2 ข) ลดลงอย่างช้าๆ สอดคล้องกับความหนาแน่นเซลล์ (ภาพที่ 2 ก) ที่ค่อยๆ ลดลง เนื่องจากในช่วงวันที่ 11-19 ค่า PP/Chl *a* (ภาพที่ 4 ก) มีค่าไม่ต่างกันมาก (2.63-3.46 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อมิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อชั่วโมง) กำลังการผลิตขั้นต้นจึงสอดคล้องกับความหนาแน่นเซลล์ที่ค่อยๆ ลดลง

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. (ภาพที่ 2 ค) มีความสอดคล้องกับการเติบโต (ภาพที่ 2 ก) และกำลังการผลิตขั้นต้น (ภาพที่ 2 ข) โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด ในวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด และกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด คือ วันที่ 9 และ 11 ของการทดลอง ตามลำดับ ในวันแรกของการทดลอง ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* (11.10 ไมโครกรัมต่อลิตร) มีค่าสูงกว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. (0.10 ไมโครกรัมต่อลิตร) เนื่องจากขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า จึงมีปริมาณรงควัตถุในเซลล์มากกว่า จากนั้น ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จนมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด 200.75 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 9 ของการทดลอง ในขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก และเพิ่มอย่างต่อเนื่อง จนมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด 99.55 ไมโครกรัมต่อลิตร ในวันที่ 11 ของการทดลอง จากนั้นปริมาณคลอโรฟิลล์เอของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. (ภาพที่ 2 ค) ในช่วงวันที่ 9-19 และในช่วงวันที่ 11-19 ตามลำดับ มีค่าลดลงช้าๆ อย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับความหนาแน่นเซลล์แพลงก์ตอนพืช (ภาพที่ 2 ก) ที่ค่อยๆ ลดลง

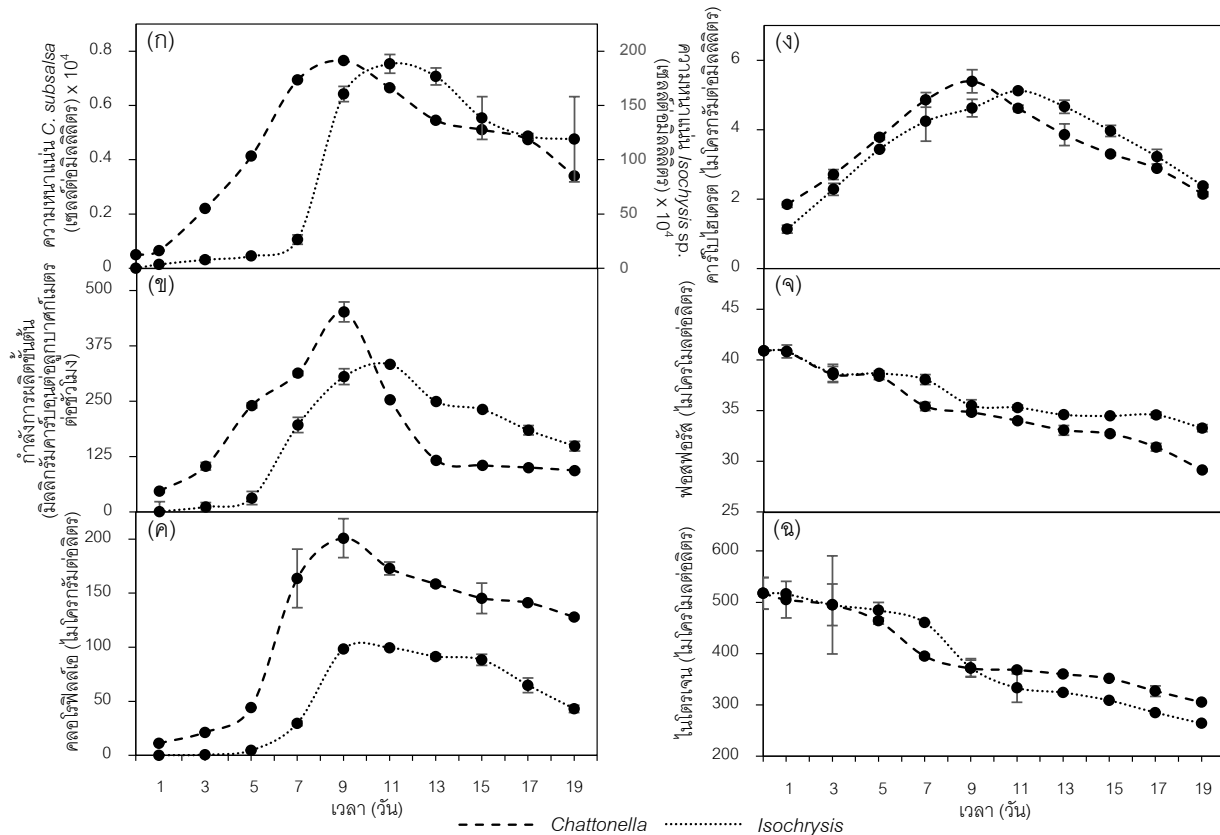
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. (ภาพที่ 2 ง) มีความสอดคล้องกับการเติบโต (ภาพที่ 2 ก) กำลังการผลิตขั้นต้น (ภาพที่ 2 ข) และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (ภาพที่ 2 ค) โดยมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุด ในวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด และปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด คือ วันที่ 9 และ 11 ของการทดลอง ตามลำดับ ในวันแรกของการทดลอง ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* (1.84 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) มีค่าสูงกว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. (1.14 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เนื่องจากขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า จึงมีปริมาณอินทรีย์สารในเซลล์มากกว่า จากนั้นปริมาณคาร์โบไฮเดรตของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุด 5.39 และ 5.12 ไมโครกรัม

ต่อมิลลิลิตร ในวันที่ 9 และ 11 ของการทดลอง ตามลำดับ และเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในช่วงวันที่ 9-19 และ 11-19 ตามลำดับ สอดคล้องกับความหนาแน่นเซลล์แพลงก์ตอนพืช (ภาพที่ 2 ก) ที่ค่อยๆ ลดลง

ปริมาณสารอาหาร

ปริมาณสารอาหารอนินทรีย์ละลายน้ำ 4 ชนิด ที่ทำการวิเคราะห์ คือ ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แอมโมเนีย (NH_3) ไนโตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) โดยในอาหารสูตร T1 มีปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ละลายน้ำ (DIP; ภาพที่ 2 จ) และไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำ (DIN; ภาพที่ 2 ฉ) เริ่มต้นอยู่ที่ 40.89 และ 517.65 ไมโครโมลต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วน DIN:DIP เท่ากับ 12.66 จากภาพที่ 2 จ พบว่า ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ใช้ DIP ในปริมาณที่มากกว่านาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. โดยปริมาณ DIP ที่เหลือในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่า 29.11 และ 33.26 ไมโครโมลต่อลิตร หรือใช้ไป 11.78 และ 7.63 ไมโครโมลต่อลิตร ตามลำดับ และจากภาพที่ 2 ฉ พบว่า ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ใช้ DIN ในปริมาณที่น้อยกว่านาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. โดยปริมาณ DIN ที่เหลือในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่า 304.92 และ 263.78 ไมโครโมลต่อลิตร หรือใช้ไป 212.73 และ 253.87 ไมโครโมลต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้น อัตราส่วน DIN:DIP ของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. ที่ใช้สารอาหารในการเติบโต 19 วัน อยู่ที่ 18.06 และ 33.26 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 (ก) การเติบโต (ข) กำลังการผลิตขั้นต้น (ค) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (ง) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตละลาย และ (จ-ฉ) ปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำ ของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด (เลี้ยงเดี่ยว; 100% T1)



แพลงก์ตอนพืชต่างขนาด ในภาวะเลี้ยงรวม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

แพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. ในภาวะเลี้ยงรวม ซึ่งเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร T1 ที่ความเข้มข้น 100% 50% และ 1% มีลักษณะรูปร่างและสีของเซลล์ ไม่ต่างจากภาวะเลี้ยงเดี่ยว แต่มีขนาดเซลล์ต่างกัน โดยภาวะเลี้ยงเดี่ยว มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่าภาวะเลี้ยงรวม (100% T1) และภาวะเลี้ยงรวม ขนาดเซลล์แปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร (100% 50% และ 1% T1) ดังแสดงในตารางที่ 1 และเอกสารเพิ่มเติม ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ 1 ขนาดและปริมาตรเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด ณ วันที่มีความหนาแน่นเซลล์สูงสุด

แพลงก์ตอนพืช	ภาวะเลี้ยงเดี่ยว		ภาวะเลี้ยงรวม					
	100% T1		100% T1		50% T1		1% T1	
	ขนาด	ปริมาตร	ขนาด	ปริมาตร	ขนาด	ปริมาตร	ขนาด	ปริมาตร
<i>Chattonella</i>	23.18 ± 3.32 (ก)	552.20	22.94 ± 3.20 (ก)	514.41	21.11 ± 2.21 (ก)	441.31	20.52 ± 1.86 (ก)	404.97
<i>subsalsa</i>	30.35 ± 3.38 (ข)		28.57 ± 4.18 (ข)		26.63 ± 3.36 (ข)		25.15 ± 3.34 (ข)	
<i>Isochrysis</i> sp.	4.33 ± 0.77	42.47	4.20 ± 0.51	38.71	4.06 ± 0.43	34.91	3.99 ± 0.35	33.11

หมายเหตุ: (ก) และ (ข) คือ ความกว้างและความยาวเฉลี่ยของเซลล์; ขนาดและปริมาตร ในหน่วยไมโครเมตรและลูกบาศก์ไมโครเมตร ตามลำดับ

การเติบโต

แพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดเพาะเลี้ยงร่วมกัน ที่ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้น ชนิดละ 500 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในอาหารสูตร T1 (ความเข้มข้น 100% 50% และ 1%) ความเค็ม 28 พีเอสยู เป็นเวลา 19 วัน โดยทำการนับจำนวนเซลล์ทุกๆ 2 วัน (ภาพที่ 3 ก) พบว่า ความหนาแน่นเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิด แปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร และเมื่อความเข้มข้นของสารอาหารลดต่ำลง ช่วงชีวิต (lifetime) ก็สั้นลง นอกจากนี้ ยังพบว่า เมื่อสารอาหารมีปริมาณสูง (100% T1) ความหนาแน่นเซลล์สูงสุดของไมโครแพลงก์ตอนพืช สูงขึ้น 56.93% และนาโนแพลงก์ตอนพืช ลดลง 42.58% เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว และวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุดจะช้าออกไป เป็นวันที่ 11 และ 17 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า นาโนแพลงก์ตอนพืช ในภาวะเลี้ยงรวม ที่สารอาหารมีปริมาณสูง มีการเติบโตที่ไม่ดีนัก ซึ่งตรงกันข้ามกับไมโครแพลงก์ตอนพืช

ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* มีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็วในช่วงแรก เช่นเดียวกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว และความหนาแน่นเซลล์สูงสุด 1.20 0.91 และ 0.07 ($\times 10^4$) เซลล์ต่อมิลลิลิตร (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 11 11 และ 3 ของการทดลอง ตามลำดับ ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. ซึ่งเดิมมีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างช้าๆ ในช่วงสัปดาห์แรก (ภาวะเลี้ยงเดี่ยว) ระยะเวลากลับสั้นลงเหลือเพียง 3 วันแรก หลังจากนั้นมีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็ว โดยมี ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด 108.15 30.00 และ 10.099 ($\times 10^4$) เซลล์ต่อมิลลิลิตร (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 17 15 และ 7 ของการทดลอง ตามลำดับ

กำลังการผลิตขั้นต้น

กำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. (ภาพที่ 3 ข) มีความสอดคล้องกับการเติบโต (ภาพที่ 3 ก) โดยมีกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด ในวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด (100% 50% และ 1% T1) คือ วันที่ 11

11 3 และ 17 15 7 ของการทดลอง ตามลำดับ และแปรผันตามความหนาแน่นเซลล์ นอกจากนี้ ยังพบว่า (1) เมื่อสารอาหารมีปริมาณสูง (100% T1) กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุดของแพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิด สูงขึ้น 10.72% และ 47.27% เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว และวันที่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุดจะช้าออกไป เป็นวันที่ 11 และ 17 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับความหนาแน่นเซลล์ จะเห็นว่า แม้นาโนแพลงก์ตอนพืช จะมีความหนาแน่นเซลล์สูงสุด ลดลง 42.58% แต่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด สูงขึ้นถึง 47.27% ในขณะที่ไมโครแพลงก์ตอนพืช มีความหนาแน่นเซลล์สูงสุด สูงขึ้น 56.93% แต่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด สูงขึ้นเพียง 10.72% เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว ซึ่งกรณีดังกล่าว ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่าประสิทธิภาพกำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอ (PP/Chl *a*) เนื่องจาก เมื่ออยู่ในภาวะเลี้ยงรวม ณ วันที่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด ค่า PP/Chl *a* ของทั้งแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. ลดลง 56% และ 82% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว แต่สามารถอธิบายได้ด้วยปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (ภาพที่ 5 ข) ของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. ณ วันที่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด ซึ่งเพิ่มขึ้น 61% และ 1291% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว กล่าวโดยสรุป คือ ในภาวะเลี้ยงรวม ที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% T1) ซึ่งอาจไม่เหมาะกับการเติบโตของนาโนแพลงก์ตอนพืช นาโนแพลงก์ตอนพืชจึงปรับตัว โดยการลดจำนวนเซลล์ แต่เพิ่มรงควัตถุภายในเซลล์แทน ในขณะที่สารอาหารปริมาณสูงเหมาะกับการเติบโตของไมโครแพลงก์ตอนพืช เพราะมีพื้นผิวเซลล์ที่มากกว่า ดูดสารอาหารได้ดีกว่า จึงไม่ต้องปรับตัวมากนัก กำลังการผลิตขั้นต้นจึงสูงขึ้นไม่มาก เมื่อเทียบกับนาโนแพลงก์ตอนพืช แต่เนื่องจากอยู่ในภาวะเลี้ยงรวม ซึ่งอาจเกิดการแข่งขัน ความหนาแน่นเซลล์ และปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อเซลล์จึงเพิ่มขึ้น และ (2) เมื่อพิจารณากำลังการผลิตขั้นต้นของนาโนแพลงก์ตอนพืช (ภาพที่ 3 ข) ในช่วง 3 วันแรก ของการทดลอง พบว่า กำลังการผลิตขั้นต้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่ความหนาแน่นเซลล์ (ภาพที่ 3 ก) และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (ภาพที่ 3 ค) ในช่วงเวลาดังกล่าว ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากนาโนแพลงก์ตอนพืช ในภาวะเลี้ยงรวม มีค่า PP/Chl *a* สูง (ภาพที่ 4 ข-ง) ในช่วง 5 วันแรก จึงส่งผลให้กำลังการผลิตขั้นต้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

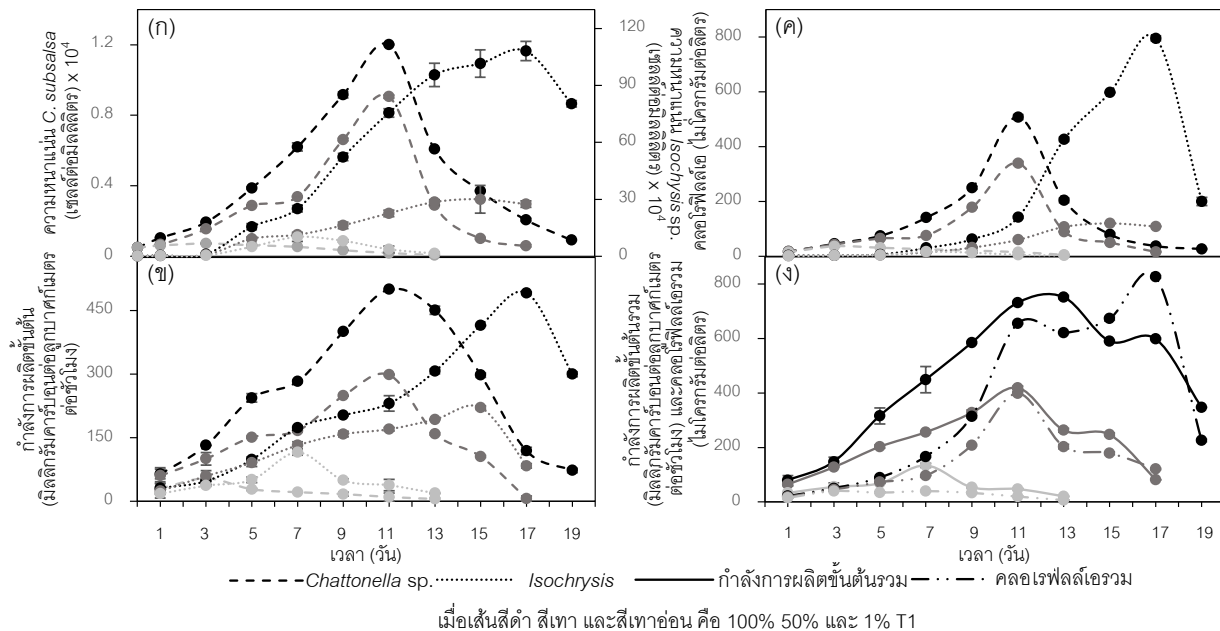
ไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* มีกำลังการผลิตขั้นต้นเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เช่นเดียวกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว และกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด 500.32 298.40 และ 53.91 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 11 11 และ 3 ของการทดลอง ตามลำดับ ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. มีกำลังการผลิตขั้นต้นเพิ่มอย่างช้าๆ ในช่วงแรก เช่นเดียวกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว แต่มีค่าสูงกว่า แม้จำนวนเซลล์จะน้อยกว่าภาวะเลี้ยงเดี่ยว เนื่องจากในภาวะเลี้ยงรวม ในช่วง 5 วันแรก นาโนแพลงก์ตอนพืชมีค่า PP/Chl *a* (ภาพที่ 4 ข-ง) และปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (ภาพที่ 5 ข) สูง เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว ที่มีค่า PP/Chl *a* สูงเฉพาะวันที่ 3 (ภาพที่ 4 ก) และปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (ภาพที่ 5 ข) ต่ำ และกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด 491.23 221.19 และ 115.68 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 17 15 และ 7 ของการทดลอง ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลังการผลิตขั้นต้นรวม (ภาพที่ 3 ง) ซึ่งแปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร พบว่า กำลังการผลิตขั้นต้นรวมสูงสุด 752.18 419.67 และ 134.37 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 13 11 และ 7 ของการทดลอง ตามลำดับ โดยเป็นกำลังการผลิตขั้นต้นของไมโครแพลงก์ตอนพืช 60% 64% และ 15% หรือนาโนแพลงก์ตอนพืช 40% 36% และ 85% ตามลำดับ ซึ่งที่ความเข้มข้น 100% และ 50% T1 ผู้ผลิตขั้นต้นหลัก คือ ไมโคร

แพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และที่ความเข้มข้น 1% T1 ผู้ผลิตขั้นต้นหลัก คือ นาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังการผลิตขั้นต้นรวม มีแนวโน้มเหมือนผลรวมของกำลังการผลิตขั้นต้นแยกตามขนาด แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ในทั้ง 3 ความเข้มข้น (100% 50% และ 1% T1)

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* และ *Isochrysis* sp. (ภาพที่ 3 ค) มีความสอดคล้องกับการเติบโต (ภาพที่ 3 ก) และกำลังการผลิตขั้นต้น (ภาพที่ 3 ข) โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด ในวันที่ความหนาแน่นเซลล์สูงสุด และกำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด (100% 50% และ 1% T1) คือ วันที่ 11 11 3 และ 17 15 7 ของการทดลอง ตามลำดับ ในวันแรกของการทดลอง ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* (14.06-18.79 ไมโครกรัมต่อลิตร) มีค่าสูงกว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. (0.97-2.86 ไมโครกรัมต่อลิตร) เนื่องจากขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า จึงมีปริมาณรงควัตถุในเซลล์มากกว่า จากนั้นปริมาณคลอโรฟิลล์เอของไมโครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จนมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด 507.72 339.02 และ 36.36 ไมโครกรัมต่อลิตร (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 11 11 และ 3 ของการทดลอง ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก และเพิ่มอย่างต่อเนื่อง จนมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด 794.90 120.31 และ 16.30 ไมโครกรัมต่อลิตร (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 17 15 และ 7 ของการทดลอง ตามลำดับ หลังจากวันที่ปริมาณคลอโรฟิลล์เอสูงสุด แพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (ภาพที่ 3 ค) ลดลงอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับความหนาแน่นเซลล์แพลงก์ตอนพืช (ภาพที่ 3 ก) ที่ลดลง

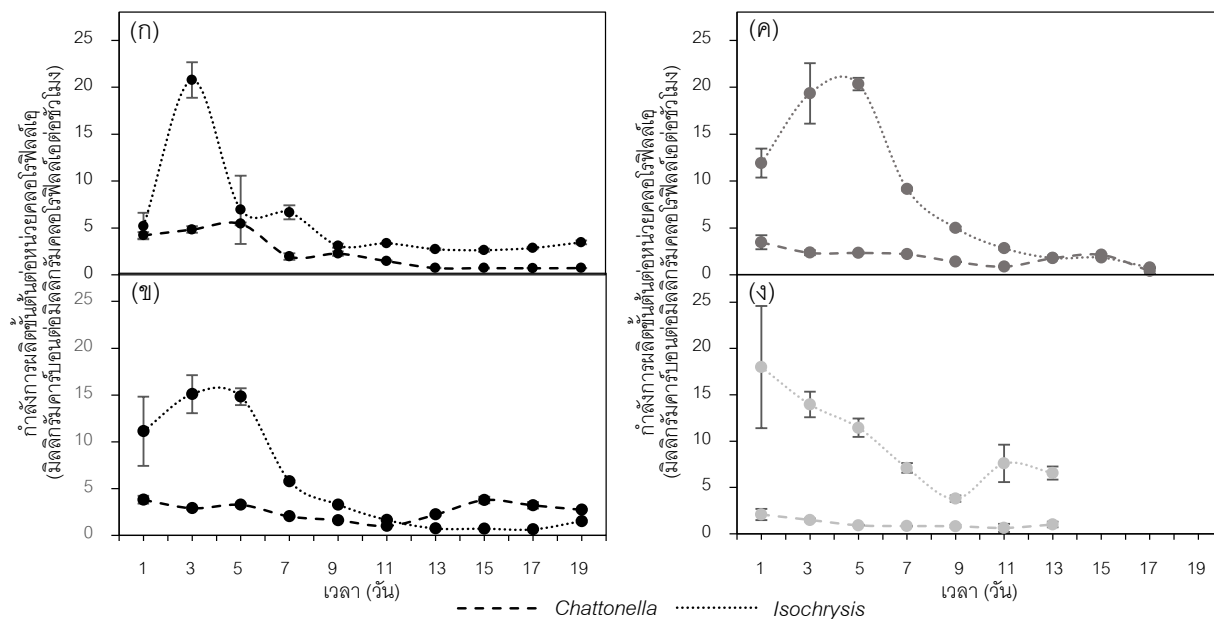


ภาพที่ 3 (ก) การเติบโต (ข) กำลังการผลิตขั้นต้น (ค) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และ (ง) กำลังการผลิตขั้นต้นรวม และปริมาณคลอโรฟิลล์เอรวม ของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด (เลี้ยงรวม; 100% 50% และ 1% T1)

เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์เอรวม (ภาพที่ 3 ง) ซึ่งแปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์เอรวมสูงสุด 832.06 399.27 และ 39.03 ไมโครกรัมต่อลิตร (100% 50% และ 1% T1) ในวันที่ 17 11 และ 3 ของการทดลอง ตามลำดับ โดยเป็นปริมาณคลอโรฟิลล์เอของไมโครแพลงก์ตอนพืช 4% 85% และ 93% หรือนาโนแพลงก์ตอนพืช 96% 15% และ 7% ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ไมโครแพลงก์ตอนพืชปรับตัว โดยการเพิ่มสัดส่วนคลอโรฟิลล์เอ เมื่อสารอาหารมีปริมาณลดน้อยลง ตรงกันข้ามกับนาโนแพลงก์ตอนพืช ที่เพิ่มสัดส่วนคลอโรฟิลล์เอ เมื่อสารอาหารมีปริมาณเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า แพลงก์ตอนพืชทั้งสองชนิดปรับตัว เมื่ออยู่ในภาวะที่ความเข้มข้นของสารอาหารไม่เหมาะสมกับขนาดเซลล์ โดยการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอ แต่ปริมาณคลอโรฟิลล์เอที่เพิ่ม อาจไม่สอดคล้องกับกำลังการผลิตขั้นต้น เนื่องจากต้องพิจารณาค่าประสิทธิภาพกำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอ (PP/Chl a) ร่วมด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์เอรวมมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณคลอโรฟิลล์เอแยกตามขนาด ในทั้ง 3 ความเข้มข้น (100% 50% และ 1% T1) และมีความสอดคล้องกับกำลังการผลิตขั้นต้นรวม

ปริมาณสารอาหาร

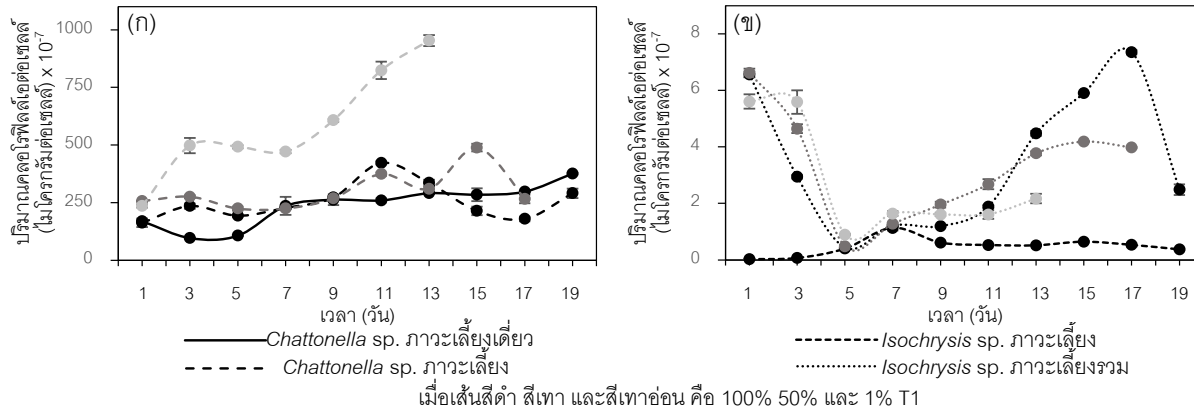
อาหารสูตร T1 ที่ความเข้มข้น 100% 50% และ 1% มีปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ละลายน้ำ (DIP) และไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ (DIN) เริ่มต้นอยู่ที่ 49.85 24.79 0.47 และ 484.74 283.22 69.52 ไมโครโมลต่อลิตร ตามลำดับ



เมื่อเส้นสีดำ สีเทา และสีเทาอ่อน คือ 100% 50% และ 1% T1

ภาพที่ 4 กำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด

ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว (100% T1; ก) และเลี้ยงรวม (100% 50% และ 1% T1; ข-ง)



ภาพที่ 5 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด

ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว (100% T1) และเลี้ยงรวม (100% 50% และ 1% T1)

วิจารณ์ผลการวิจัย

ตามภาพที่ 2 ก และ 2 ค (เลี้ยงเดี่ยว; 100% T1) ซึ่งแสดงการเติบโต และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ของแพลงก์ตอนพืช ทั้งสองชนิด พบว่า มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งศึกษาการเติบโต และปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ของแพลงก์ตอนพืช ต่างขนาดในห้องปฏิบัติการ โดยแพลงก์ตอนพืชขนาดใหญ่จะมีอัตราการเติบโตที่น้อยกว่าแพลงก์ตอนพืชขนาดเล็ก แต่มี ปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ที่มากกว่าแพลงก์ตอนพืชขนาดเล็ก เนื่องจาก มีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่า (Zhang *et al.*, 2012) ส่งผลให้ใช้สารอาหารในการเติบโตต่อเซลล์ ที่มากกว่าแพลงก์ตอนพืชขนาดเล็ก (ภาพที่ 2 จ และ 2 ฉ) ส่วนในภาวะเลี้ยงรวม (ภาพที่ 3) งานวิจัยส่วนใหญ่ ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตขั้นต้น และปริมาณสารอาหารที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ทำการทดลองในภาคสนาม มากกว่าในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาโครงสร้างประชากรในระบบนิเวศจริง และพบว่า ปริมาณ สารอาหารที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นตัวแปรที่สำคัญ ต่อโครงสร้างประชากร (Borsheim *et al.*, 2005; Ardon *et al.*, 2021) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการศึกษาครั้งนี้ ที่แสดงให้เห็นว่า ขนาดเซลล์ ปริมาณสารอาหาร และกำลังการผลิตขั้นต้น ต่างมีความสัมพันธ์กัน

กำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด ทั้งในภาวะเลี้ยงเดี่ยวและเลี้ยงรวม มีความสอดคล้องกับปัจจัย แวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นเซลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ปริมาณคาร์โบไฮเดรต และปริมาณสารอาหาร ดังแสดงผล การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ในเอกสารเพิ่มเติม เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพกำลังการผลิตขั้นต้นต่อหน่วยคลอโรฟิลล์เอ (PP/Chl *a*) ตามภาพที่ 4 พบว่า ทั้งในภาวะเลี้ยงเดี่ยวและเลี้ยงรวม ค่า PP/Chl *a* สัมพันธ์กับระยะเวลาการเติบโตของเซลล์ โดยค่า PP/Chl *a* สูง ในช่วงเริ่มต้นของการเติบโต ซึ่งเซลล์มีอายุน้อย และไม่ใครแพลงก์ตอนพืช *C. subsalsa* ให้ค่า PP/Chl *a* ในระดับที่ต่ำกว่านานในแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. คือ ในช่วง 0.41-5.44 และ 0.62-20.78 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อมิลลิกรัม คลอโรฟิลล์เอต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาไม่ใครแพลงก์ตอนพืช ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว (ภาพที่ 4 ก) พบว่า มีค่า PP/Chl *a* สูงในช่วงแรก และอีกช่วงที่กำลังการผลิตขั้นต้นสูงสุด (วันที่ 9) ในขณะที่ภาวะเลี้ยงรวม (ภาพที่ 4 ข-ง) ค่า PP/Chl *a* มีระดับที่

ลดลงเล็กน้อย ตามปริมาณสารอาหารที่ลดลง (100% 50% และ 1% T1) หรืออาจกล่าวได้ว่า ในภาวะเลี้ยงรวม ไมโครแพลงก์ตอนพืชไม่ได้ปรับตัว โดยการเพิ่มค่า PP/Chl *a* แต่ปรับตัว โดยการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (ภาพที่ 5 ก) ซึ่งมีแนวโน้มที่สูงขึ้น (100% และ 50% T1) เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว และมีระดับที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อสารอาหารมีความเข้มข้นต่ำ (1% T1) ซึ่งไม่เหมาะกับการเติบโตของเซลล์ขนาดใหญ่

ส่วนนาโนแพลงก์ตอนพืช *Isochrysis* sp. ในภาวะเลี้ยงเดี่ยว ให้ค่า PP/Chl *a* สูงในวันที่ 3 (ภาพที่ 4 ก) และในภาวะเลี้ยงรวม ค่า PP/Chl *a* อยู่ในระดับสูง ในช่วง 5 วันแรก (ภาพที่ 4 ข-ง) สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ (ภาพที่ 5 ข) ในภาวะเลี้ยงรวม พบว่า มีปริมาณที่สูงกว่าภาวะเลี้ยงเดี่ยวมาก โดยมีปริมาณมาก ในช่วง 3 วันแรก และช่วงที่ความหนาแน่นเซลล์สูง หรืออาจกล่าวได้ว่า ในภาวะเลี้ยงรวม นาโนแพลงก์ตอนพืชปรับตัว โดยในช่วงแรก นอกจากค่า PP/Chl *a* จะสูง ในระยะเวลาที่ยาวขึ้นแล้ว ปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ยังสูงด้วย โดยค่า PP/Chl *a* ค่อนข้างคงที่ ไม่แปรผันตามปริมาณสารอาหาร (100% 50% และ 1% T1) ค่าอาจลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับภาวะเลี้ยงเดี่ยว ที่ 100% T1 แต่ก็ปรับสูงขึ้น เมื่อสารอาหารมีปริมาณลดลง (50% และ 1% T1) นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อเซลล์ยังเพิ่มในช่วงที่ความหนาแน่นเซลล์สูง ทำให้กำลังการผลิตขั้นต้นสูง แม้พบว่า ค่า PP/Chl *a* ต่ำ ในช่วงเวลาดังกล่าว

ในภาวะเลี้ยงรวม นาโนแพลงก์ตอนพืชสามารถปรับตัวให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ ทั้งในภาวะที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% และ 50% T1) และต่ำ (1% T1) (ภาพที่ 5 ข) ขณะที่ไมโครแพลงก์ตอนพืชต้องปรับตัวค่อนข้างมาก เมื่อสารอาหารมีปริมาณต่ำ (1% T1) (ภาพที่ 5 ก) จึงส่งผลกระทบต่อารดำรงชีวิต และกำลังการผลิตขั้นต้นที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (1) ที่ทำการศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และกำลังการผลิตขั้นต้นของกลุ่มแพลงก์ตอนพืชต่างขนาด และพบว่า ในบริเวณปากแม่น้ำ ซึ่งสารอาหารมีปริมาณสูง ผู้ผลิตขั้นต้นที่สำคัญ คือ นาโนแพลงก์ตอนพืช และไมโครแพลงก์ตอนพืช (Iriarte & Purdie, 1994) และ (2) ที่ทำการศึกษา กำลังการผลิตขั้นต้นของกลุ่มแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดบริเวณอ่าวไทยตอนใน ด้วยวิธีคาร์บอน-13 (¹³C) โดยศึกษาบริเวณปากแม่น้ำ บริเวณชายฝั่งตะวันตก และบริเวณปากอ่าว ซึ่งสารอาหารมีปริมาณลดลงจากมากไปน้อย ตามลำดับ และพบว่า กำลังการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยของฟิโคแพลงก์ตอนพืช (0.22-2 ไมโครเมตร) อยู่ในระดับเดียวกัน ทั้ง 3 บริเวณ ขณะที่ไมโครแพลงก์ตอนพืช (20-200 ไมโครเมตร) บริเวณปากแม่น้ำ ซึ่งมีกำลังการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยสูงสุด ให้กำลังการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยลดลงอย่างมาก ในบริเวณชายฝั่งตะวันตก และบริเวณปากอ่าว นอกจากนี้ ยังพบว่า ปริมาณ DIP ของอาหารสูตร T1 ที่ความเข้มข้น 1% เทียบเคียงได้กับปริมาณ DIP บริเวณอ่าวไทยตอนใน ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 เป็นระยะทางที่ห่างจากปากแม่น้ำเจ้าพระยาประมาณ 30 กิโลเมตร โดยบริเวณดังกล่าว ฟิโคแพลงก์ตอนพืชเป็นผู้ผลิตขั้นต้นหลัก (Jaroensuk, 2018) ซึ่งสอดคล้องกับภาวะเลี้ยงรวม (1% T1) ที่แพลงก์ตอนพืชขนาดเล็ก *Isochrysis* sp. เป็นผู้ผลิตขั้นต้นหลัก (ภาพที่ 3 ข)

การศึกษากำลังการผลิตขั้นต้นในประเทศไทย มีการใช้วิธีการศึกษาทั้งทางอ้อม ได้แก่ การเทียบอัตราส่วนของรงควัตถุ (Lursinsap *et al.*, 1986) การประเมินจากค่าคลอโรฟิลล์เอ (Phromthong, 1999) และการวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (Boonkwan, 2013) และทางตรง ได้แก่ วิธีคาร์บอน-14 (Musikasung *et al.*, 1999) และวิธีคาร์บอน-13 (Jaroensuk, 2018) โดยวิธีที่มีรายงานการศึกษามากเป็นใหญ่ เป็นการเทียบอัตราส่วนของรงควัตถุ และการประเมินจากค่าคลอโรฟิลล์เอ ซึ่งค่าที่คำนวณได้ อาจต่างจากความเป็นจริง เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดให้ค่า PP/Chl *a* ในระดับที่ต่างกัน และ



แพลงก์ตอนพืชที่มีอายุเซลล์น้อยให้ค่า PP/Chl *a* สูงกว่าแพลงก์ตอนพืชที่มีอายุมาก (ภาพที่ 4) ส่วนงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวัดปริมาณออกซิเจนละลาย เนื่องจาก เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ที่เพียงต้องการศึกษาเปรียบเทียบกำลังการผลิตขั้นต้น และเป็นวิธีที่ต้นทุนไม่สูง ในอนาคตเป็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไปว่า แพลงก์ตอนพืชต่างขนาดชนิดอื่นในอ่าวไทย จะให้ผลการทดลองที่สอดคล้องหรือไม่ และศึกษาผลผลิตขั้นต้นของแบคทีเรียในอ่าวไทย เพื่อเป็นฐานข้อมูล เนื่องจากมีรายงานว่า บริเวณทะเลเปิด เมื่อปริมาณคลอโรฟิลล์แอลดีน้อยลง อัตราส่วนคาร์บอนของแบคทีเรียต่อคาร์บอนของแพลงก์ตอนพืช มีค่าเพิ่มขึ้น (Cho & Azam, 1990)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังการผลิตขั้นต้นของแพลงก์ตอนพืชต่างขนาดในห้องปฏิบัติการ เพื่อตัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้ออก ผลการศึกษาในภาพรวมพบว่า ความหนาแน่นเซลล์ ขนาดเซลล์ กำลังการผลิตขั้นต้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ และช่วงชีวิต แปรผันตามความเข้มข้นของสารอาหาร เมื่อความเข้มข้นสูงที่ ในภาวะเลี้ยงรวม ซึ่งเปรียบกับภาวะที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ นาโนแพลงก์ตอนพืชสามารถปรับตัวให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ ทั้งในบริเวณที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% และ 50% T1) และต่ำ (1% T1) โดยปรับลดจำนวนและขนาดเซลล์ลง ปรับระยะเวลาที่ค่า PP/Chl *a* สูง ให้ยาวขึ้น ในช่วง 5 วันแรก และปรับปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อเซลล์ให้สูงขึ้นใน 2 ช่วงเวลา คือ ช่วง 3 วันแรก และช่วงความหนาแน่นเซลล์สูง ขณะที่ไมโครแพลงก์ตอนพืชสามารถดำรงชีวิตได้ดีในบริเวณที่สารอาหารมีปริมาณสูง (100% และ 50% T1) แต่ต้องปรับตัวค่อนข้างมาก เมื่อสารอาหารมีปริมาณต่ำ (1% T1) โดยปรับปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อเซลล์ให้สูงขึ้นตลอดช่วงเวลาดำรงชีวิต เพราะค่า PP/Chl *a* อยู่ในระดับต่ำกว่านาโนแพลงก์ตอนพืชมาก จึงส่งผลต่อการดำรงชีวิต และกำลังการผลิตขั้นต้นที่ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่/นักวิจัยใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (Grants for Development of New Faculty Staff, Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

Alkhamis, Y. and Qin, J. G. (2013). Cultivation of *Isochrysis galbana* in phototrophic, heterotrophic, and mixotrophic conditions. *BioMed Research International*, 2013(983465), 1-9.

Ardon, M., Zeglin, L. H., Utz, R. M., Cooper, S. D., Dodds, W. K., Bixby, R. J., Burdett, A. S., Shah, J. F., Griffiths, N. A., Harms, T. K., Johnson, S. L., Jones, J. B., Kominoski, J. S., McDowell, W. H., Rosemond, A. D., Trentman, M. T., Horn, D. V. and Ward, A. (2021). Experimental nitrogen and phosphorus enrichment stimulates multiple trophic levels of algal and detrital-based food webs: a global meta-analysis from streams and rivers. *Biological Reviews*, 96, 692-715.



- Boonkwan, S. (2013). Seasonal variations of phytoplankton and primary production in the Inner Gulf of Thailand. In *MSc Thesis*. (pp. 1-96). Chonburi: Burapha University. (in Thai)
- Borsheim, K. Y., Vadstein, O., Mykkestad, S. M., Reinertsen, H., Kirkvold, S. and Olsen, Y. (2005). Photosynthetic algal production, accumulation and release of phytoplankton storage carbohydrates and bacterial production in a gradient in daily nutrient supply. *Journal of Plankton Research*, 27, 743-755.
- Cho, B. C. and Azam, F. (1990). Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Marine Ecology Progress Series*, 63, 253-259.
- Cullen, J. J. (2001). *Primary Production Methods*. Retrieved January 13, 2021, from doi:10.1006/rwos.2001.0203
- Ducklow, H. W. and Carlson, C. A. (1992). Oceanic bacterial production. In Marshall, K. C. (1st Eds.). *Advances in Microbial Ecology*. (pp. 113-181). New York: Plenum Press.
- Hansen, H. P. and Koroleff, F. (1999). Determination of nutrients. In Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhardt M. (3rd Eds.). *Methods of Seawater Analysis*. (pp. 159-228). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Iriarte, A. and Purdie, D. A. (1994). Size distribution of chlorophyll *a* biomass and primary production in a temperate estuary (Southampton Water): the contribution of photosynthetic picoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 115, 283-297.
- Jaroensuk, P. (2018). Primary productivity of size-fractionated phytoplankton in the Inner Gulf of Thailand. In *MSc Thesis*. (pp. 1-92). Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)
- Lursinsap, A., Chaiyakham, K. and Sirimontaporn, P. (1986). Primary production and the potential of fish production in Songkra lake. In *Proceeding Kasetsart University Seminar*. (pp. 156-163). Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)



Millero, F. J. (2006). *Chemical Oceanography*. Boca Raton: CRC Press.

Musikasung, W., Yusoff, M. S. B. and Razak, S. B. A. (1999). Primary production determination in the South China Sea, area I: Gulf of Thailand and east coast of Peninsular Malaysia. In *Proceeding of the First Technical Seminar on Marine Fishery Resources Survey in the South China Sea, Area I: Gulf of Thailand and Peninsular Malaysia, 24-26 November 1997, Bangkok, Thailand*. (pp. 135-146). Samutprakan: Southeast Asian Fisheries Development Center.

Nielsen, S. S. (2010). *Food Analysis Laboratory Manual*. New York: Springer.

Ogata, T., Kodama, M. and Ishimaru, T. (1987). Toxin production in the dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis*. *Toxicon*, 25(9), 923-928.

Panpet, S. (2019). Comparison of primary productivity in two phytoplankton cell sizes. In *BSc Senior Project*. (pp. 1-43). Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)

Pholpunthin, P. (1998). *Cultivation of some Phytoplankton that Caused Red Tide*. Retrieved January 3, 2021, from <https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2553/3914> (in Thai)

Phromthong, I. (1999). Dynamics and diversity of phytoplankton in Tha Chin estuary, Samut Sakhon province. In *MSc Thesis*. (pp. 1-141). Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)

Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Ottawa: The Alger Press Ltd.

Wetzel, R. G. and Likens, G. E. (2000). *Limnological Analyses*. New York: Springer.

Williams, P. J. leB. (1993). On the definition of plankton production terms. *ICES mar. Sci. Symp.*, 197, 9-19.



Wongrat, L. (1996) *Phytoplankton*. Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)

Zhang, Y., Yin, Y., Wang, M. and Liu, X. (2012). Effect of phytoplankton community composition and cell size on absorption properties in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence. *Optics Express*, 20, 11882-11898.