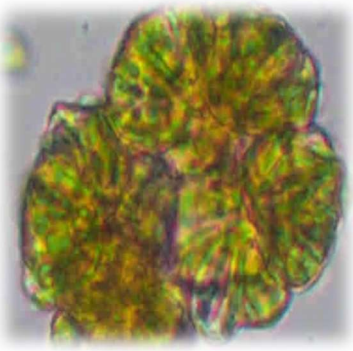
รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้ปุ๋ยเคมี (NPK) และยูเรียในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล

Cultivation of microalgae *Botryococcus braunii* KMITL and *Scenedesmus dimorphus* KMITL as feedstock for biodiesel production by using NPK fertilizer and urea



รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้ปุ๋ยเคมี (NPK) และยูเรียในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล

Cultivation of microalgae *Botryococcus braunii* KMITL and *Scenedesmus dimorphus* KMITL as feedstock for biodiesel production by using NPK fertilizer and urea

รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การใช้ปุ๋ยเคมี (NPK) และยูเรียในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล
แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560
ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 516,500 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560
หัวหน้าโครงการและผู้ร่วมโครงการวิจัย รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การศึกษาการใช้ปุ๋ยเคมี (NPK) และยูเรียในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล พบว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* และ *S. dimorphus* ในปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) สาหร่ายให้ชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 1.96+0.03 และ 1.65 ± 0.02 กรัมต่อลิตร และให้น้ำมันสูงสุด 39.32±0.26 และ 29.79±2.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ที่เพาะเลี้ยงในปุ๋ยยูเรีย 1-200 % พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลสูงสุด 1.52 ± 0.02 กรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในยูเรีย 150 % และมีน้ำมันสูงสุด 47.07±0.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพาะเลี้ยงในยูเรีย 200 % ส่วนสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงในยูเรีย 200 % มีชีวมวลและน้ำมันสูงสุด 1.08 ± 0.03 กรัมต่อลิตร และ 40.80±0.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกันคือ ปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) ร่วมกับเหล็ก, N:P:K ร่วมกับความเค็ม, ยูเรียร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหาร N:P:K ร่วมกับเหล็ก มีผลผลิตชีวมวลที่สูงที่สุดคือ 1.36±0.24 กรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณไขมัน สูงที่สุด 35.66±0.78 เปอร์เซ็นต์ พบในสูตรอาหารยูเรียร่วมกับเหล็ก ส่วนสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงในปุ๋ยยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส มีชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 1.59 ± 0.03 กรัมต่อลิตร และการเพาะเลี้ยงใน NPK ร่วมกับความเค็มให้ปริมาณน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 35.73±0.72 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลของสาหร่ายพบว่า ค่าซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากสาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่านสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM D975 กำหนดไว้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 50.80-69.20 ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายทั้งสองชนิดมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบทางเลือกสำหรับการผลิตไบโอดีเซลต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : ยูเรีย, ปุ๋ยเคมี NPK, โบทริโอคอคคัส บราวนี, ซีนีเดสมัน ไดมอร์ฟัส, ไบโอดีเซล

Research Title: Cultivation of microalgae *Botryococcus braunii* KMITL and *Scenedesmus dimorphus* KMITL as feedstock for biodiesel production by using NPK fertilizer and urea
Researcher: Assoc. Prof. Dr. Suneerat Ruangsomboon
Faculty: Faculty of Agricultural Technology **Department:** Department of Fisheries Science

ABSTRACT

Cultivation of microalgae *Botryococcus braunii* KMITL and *Scenedesmus dimorphus* KMITL as feedstock for biodiesel production by using NPK fertilizer and urea were studied. The result showed that *B. braunii* and *S. dimorphus* cultivated in commercial fertilizer (N:P:K) showed the high biomass 1.96+0.03 and 1.65 ± 0.02 g/l and lipid content 39.32±0.26 and 29.79±2.42 %, respectively.

Cultivation of *B. braunii* in 1-200% urea showed that this alga has the highest biomass of 1.52 ± 0.02 g/l when cultivated in 150% urea, and the highest lipid content of 47.07±0.51% when cultivated in 200% urea. Whereas *S. dimorphus* showed the highest biomass (1.08 ± 0.03 g/l) and lipid content (40.80±0.97 %) when cultivated in 200% urea.

The cultivation of both algae in differences media (NPK+Fe, NPK+salinity, urea+Fe, urea+salinity and urea+phosphorus), the highest biomass of B. braunii (1.36±0.24 g/l) was shown when cultivated in NPK+Fe whereas the highest lipid content (35.66±0.78%) was shown in urea+Fe. S. dimorphus showed the higest biomass of 1.59 ± 0.03 g/l in urea+phosphorus medium, whereas the highest lipid content (35.73±0.72%) was shown in NPK+salinity medium.

Biodiesel properties of this algal oil were studied. The cetane value, 50.80-69.20, of biodiesel from both microalgae were higher than the standard criteria of ASTM D975. Thus the results of this study indicated that both microalgae were suitable for use as the promising feedstock for biodiesel production.

Key words: Urea, NPK fertilizer, *Botryococcus braunii*, *Scenedesmus dimorphus*, biodiesel

กิตติกรรมประกาศ

“การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560”

รศ. ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สมมุติฐานงานวิจัย	2
1.5 คำสำคัญของการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม	4
2.1 การผลิตไบโอดีเซลและคุณสมบัติของไบโอดีเซล (Biodiesel) จากสาหร่าย	4
2.2 ความเหมาะสมของสาหร่ายขนาดเล็กในการนำมาเป็นแหล่งน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซล	6
2.3 บทบาทของไนโตรเจนต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย	7
2.4 บทบาทของฟอสฟอรัสต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย	8
2.5 ยูเรีย	9
2.6 บทบาทของเหล็กต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย	9
2.7 บทบาทของความเค็มต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย	10
2.8 บทบาทร่วมกันของธาตุอาหารต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย	14
3.2 การศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย	15
3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย..... 15
3.5 ศึกษาผลของยูเรียร่วมกับความเค็ม ยูเรียร่วมกับเหล็ก และยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย..... 15
3.6. ศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จาก *B. braunii* KMITL..... 15
3.7. การวิเคราะห์ข้อมูล..... 16
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย 17
4.1 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย..... 17
4.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย..... 26
4.3 ศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม ยูเรียร่วมกับเหล็ก และยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย..... 42
4.4 ศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จาก *B. braunii* KMITL 88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 95
บรรณานุกรม..... 96
ประวัติผู้เขียน..... 102

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การประมาณคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่าย..... 5

2.2 เปรียบเทียบปริมาณผลผลิตน้ำมันระหว่างสาหร่ายขนาดเล็ก กับพืชบางชนิดที่ใช้ผลิต ไบโอดีเซล.. 6

4.1 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 20

4.2 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 21

4.3 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 25

4.4 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 25

4.5 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรปุ๋ยการค้า (ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0) 31

4.6 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 39

4.7 การเจริญเติบโตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 48

4.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 49

4.9 ปริมาณแคโรทีนอยด์ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 50

4.10 ปริมาณโปรตีนในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.) 51

4.11 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.) 52

4.12 ปริมาณไขมันในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 53

4.13 ผลผลิตไขมัน (Lipid yield) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 53

4.14 กำลังการผลิตไขมัน (Lipid Productivity) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 54

4.15 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 54

4.16 น้ำหนักชีวมวล (Biomass) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.17 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 0 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 58
4.18 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 4 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 60
4.19 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 8 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 62
4.20 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 12 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 64
4.21 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 16 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 66
4.22 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 20 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน..... 68
4.23 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตของ *S. dimorphus*..... 74
4.24 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคลอโรฟิลล์ของ *S. dimorphus*..... 74
4.25 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อแคโรทีนอยด์ของ *S. dimorphus*..... 75
4.26 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *S. dimorphus*..... 75
4.27 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *S. dimorphus*..... 76
4.28 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *S. dimorphus*..... 76
4.29 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *S. dimorphus*..... 77
4.30 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.31 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 82
4.32 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 83
4.33 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 87
4.34 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 87
4.35 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* และ *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยสูตรการค้า (NPK) 89
4.36 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรียที่ระดับแตกต่างกัน 90
4.37 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรียที่ระดับแตกต่างกัน..... 91
4.38 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยร่วมกันที่ระดับเหมาะสม 92
4.39 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยปุ๋ยร่วมกันที่ระดับเหมาะสม..... 93
4.40 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* และ *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส..... 94

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

3.1 สาหร่าย *B. braunii* KMITL2 โคโลนีที่เจริญเติบโตเต็มและที่ปล่อยน้ำมันออกนอกโคโลนี..... 13
3.2 ลักษณะเซลล์สาหร่าย ลักษณะเซลล์สาหร่าย *S. dimorphus* KMITL..... 13
3.3 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในห้องปฏิบัติการ..... 14
3.4 ลักษณะเซลล์สาหร่ายแห้งก่อนสกัดน้ำมัน..... 14
4.1 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 17
4.2 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 18
4.3 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 18
4.4 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 19
4.5 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 19
4.6 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 19
4.7 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K..... 20
4.8 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 21
4.9 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 22
4.10 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 22
4.11 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 23
4.12 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 23
4.13 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 23
4.14 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 24
4.15 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 24
4.16 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K..... 26
4.17 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 27
4.18 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 27
4.19 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 28
4.20 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 28
4.21 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 29
4.22 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.23 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 30
4.24 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *B. braunii* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e) 32
4.25 ชีวมวล (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 35
4.26 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 35
4.27 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 36
4.28 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 36
4.29 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 37
4.30 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 37
4.31 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ..... 38
4.32 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus dimorphus* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e) 40
4.33 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน..... 43
4.34 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน..... 44
4.35 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน..... 45
4.36 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน..... 46
4.37 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน..... 47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.38 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตของ *Scenedesmus dimorphus*..... 70
4.39 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคลอโรฟิลล์ของ *Scenedesmus dimorphus*..... 70
4.40 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อแคโรทีนอยด์ของ *Scenedesmus dimorphus*..... 71
4.41 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *Scenedesmus dimorphus*..... 71
4.42 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *Scenedesmus dimorphus*..... 72
4.43 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *Scenedesmus dimorphus*..... 72
4.44 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *Scenedesmus dimorphus*..... 73
4.45 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 79
4.46 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 79
4.47 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 80
4.48 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 80
4.49 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 81
4.50 คาร์โบไฮเดรต (µg/ml) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 81
4.51 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L..... 82
4.52 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 83
4.53 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.54 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 84
4.55 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 85
4.56 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 85
4.57 คาร์โบไฮเดรต (µg/ml) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 85
4.58 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 86
4.59 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L..... 88

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาการเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันเชื้อเพลิงและปริมาณของปิโตเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัดและใกล้จะหมดลงในอนาคต ทำให้มีการหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นมาเพื่อทดแทน โดยเชื้อเพลิงเหลวเป็นเชื้อเพลิงที่มีการนำมาใช้ในปริมาณที่สูงโดยเฉพาะทางด้านทางการคมนาคมขนส่ง ดังนั้นน้ำมันดีเซลจึงเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ได้รับการสนใจมากที่สุดในการหาวัตถุดิบมาทดแทน โดยออกมาในรูปแบบของไบโอดีเซล โดยแหล่งดีเซลยุคแรก (first generation) คือปิโตเลียมซึ่งประสบปัญหาคือปริมาณที่กำลังจะหมดไป แหล่งดีเซลยุคที่สองคือพืชบกและประสบปัญหาคือต้องการพื้นที่เพาะปลูกที่อุดมสมบูรณ์ ใช้ระยะเวลาในเพาะปลูกนาน และพืชบางชนิดเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับอาหารมนุษย์ การนำมาเป็นแหล่งพลังงานจึงกระทบต่อสินค้าอุปโภคบริโภคสำหรับมนุษย์ ในปัจจุบันซึ่งเป็นยุคที่ 3 วัตถุดิบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาเป็นแหล่งไบโอดีเซล คือ สาหร่าย เนื่องจากเพาะเลี้ยงง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และไม่กระทบแหล่งอาหารของมนุษย์

แต่ ณ ปัจจุบันในประเทศไทย ไบโอดีเซลที่ผลิตจากสาหร่ายยังไม่สามารถจำหน่ายในท้องตลาดได้ เนื่องจากมีปัญหาคือราคาสูง เพราะยังคงมีต้นทุนในการผลิตสูง การที่จะทำให้ไบโอดีเซลจากสาหร่ายสามารถนำมาจำหน่ายได้ในทางการค้านั้นต้องหาวิธีในการลดราคาลง ซึ่งการลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้นเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในปัจจุบันจะมีสูตรอาหารที่ประกอบด้วยธาตุอาหารหลายชนิด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง แต่จากการทดลองเบื้องต้นของผู้วิจัยพบว่า สาหร่ายสายพันธุ์ท้องถิ่นของไทยที่ผู้วิจัยคัดแยกได้คือ *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL นั้นสามารถเจริญเติบโตได้ในปุ๋ยเคมีที่มีเพียง NPK หรือแม้มีเพียงยูเรียเป็นธาตุอาหาร โดยยังพบว่าความเค็มและเหล็กยังช่วยกระตุ้นให้สาหร่ายเหล่านี้เพิ่มปริมาณไขมันได้ ซึ่งทำให้ลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงลงได้มากกว่าสิบเท่า แต่การจะใช้ปุ๋ยเหล่านี้เพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อผลิตไบโอดีเซลนั้น จำเป็นต้องพิจารณาปริมาณผลผลิตสาหร่าย ปริมาณไฮโดรคาร์บอน ผลผลิตไขมัน ชนิดกรดไขมัน และคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ประกอบด้วย

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของปุ๋ย NPK และยูเรีย และผลของปุ๋ยทั้งสองร่วมกับความเค็มและเหล็กที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มชีวมวล ปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาหาความเข้มข้นของปุ๋ย NPK และยูเรีย ที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มชีวมวล ปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซล ของสาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL

ศึกษาผลร่วมกันของปุ๋ย NPK ต่อความเค็มและเหล็กที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มชีวมวล ปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซล ของสาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL

ศึกษาผลร่วมกันของปุ๋ยยูเรียต่อความเค็มและเหล็กที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มชีวมวล ปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซล ของสาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทดสอบผันแปรความเข้มข้นของปุ๋ย N:P:K และยูเรีย ที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL ต่อการเพิ่มชีวมวล ปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้ำมัน และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซล ในระดับห้องปฏิบัติการ และนอกห้องปฏิบัติการ เพื่อทราบระดับที่เหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้สาหร่ายนี้เป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซล

1.4 สมมุติฐานงานวิจัย

สาหร่ายต้องการธาตุอาหารในการเจริญเติบโตและจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าแม้เพาะเลี้ยงในอาหารที่มีเพียงปุ๋ยเคมี N:P:K หรือมีเพียงยูเรีย สาหร่าย *B. braunii* KMITL และ *S. dimorphus* KMITL ยังคงเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงได้ และพบว่าความเค็ม และเหล็ก สามารถกระตุ้นให้สาหร่ายผลิตไขมันเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นหากทราบถึงความเข้มข้นของปุ๋ยเคมีหรือยูเรียที่เหมาะสม และผลร่วมกันของธาตุอาหารดังกล่าวต่อความเค็มและเหล็กที่มีผลต่อผลผลิตชีวมวล ไฮโดรคาร์บอน ผลผลิตไขมันและคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จากสาหร่าย จะทำให้สามารถพัฒนาลดต้นทุนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้สาหร่ายเป็นวัตถุดิบได้

1.5 คำสำคัญของการวิจัย

ยูเรีย, ปุ๋ยเคมี NPK, โบทริโอคอคคัส บราวนี, ซีนีเดสมัน ไดมอร์ฟัส, ไบโอดีเซล

Urea, NPK fertilizer, *Botryococcus braunii*, *Scenedesmus dimorphus*, biodiesel

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ด้านวิชาการ

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับนักวิจัยท่านอื่น ๆ ทั้งจากสังกัดรัฐบาลและเอกชนทางด้าน สาหร่ายวิทยา การผลิตน้ำมันจากสาหร่าย การเพาะเลี้ยงสาหร่าย

1.6.2 ด้านนโยบาย

ผลงานวิจัยที่ได้จะเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ ที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม

1.6.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์อุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วย 42 กลุ่มอุตสาหกรรม (ผนวก 4) โดยระบุเพียง 1 กลุ่ม

กลุ่มอุตสาหกรรมด้านพลังงาน ได้ข้อมูลระดับปุ๋ยเคมี NPK และ ยูเรียที่เหมาะสม เพื่อนำไปออกแบบระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบมหมวล

1.6.4 ด้านสังคมและชุมชน

สามารถแก้ปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานและปัญหาภาวะโลกร้อนจากแหล่งพลังงานปิโตเลียม

1.6.5 อื่น ๆ (ระบุ)

สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยในวิชาการระดับชาติ (TCI กลุ่ม 1) และวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ที่อยู่ในฐาน ISI และสามารถผลิตบัณฑิตให้เป็นนักวิจัยที่มีความรู้ด้านการเพาะเลี้ยงสาหร่าย การผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย

1.6.6 ระบุชื่อหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

มหาวิทยาลัยและสถาบันการศึกษาต่างๆ ที่มีนักวิจัยทำการวิจัยด้านพลังงานทางเลือก ภาคเอกชนที่ทำวิจัยด้านการใช้สาหร่ายเป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซล เช่น บางจาก และ ปตท.

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตไบโอดีเซลและคุณสมบัติของไบโอดีเซล (Biodiesel) จากสาหร่าย

Biodiesel เป็นประเภทหนึ่งของ biofuel ซึ่งอยู่ในรูปของเหลว ในระดับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเป็นการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เช่น เอทานอลหรือเมทานอล ในปริมาณที่มากมาทำปฏิกิริยาเคมี ทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Transesterification) โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเกิดการรวมพันธะของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ เปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นไปเป็นเอทิลเอสเทอร์ (FAEs) หรือเมทิลเอสเทอร์ (FAMEs) และมีกลีเซอรีนเป็นผลพลอยได้ ซึ่งเอสเทอร์มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ข้อดีคือค่าซีเทน (cetane ค่าดัชนีการจุดติดไฟ) สูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ติดเครื่องดี การสันดาปสมบูรณ์ เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงไม่มีผลกระทบกับเครื่องยนต์ในระยาว ส่วนกลีเซอรีนที่ได้จากการผลิต ถือเป็นผลพลอยได้ใช้เป็นวัตถุดิบ สำหรับอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น ฯลฯ

สาหร่ายได้รับความสนใจอย่างยิ่งในการนำมาเป็นทางเลือกผลิต biodiesel แทนพืชที่เป็นแหล่งอาหารเช่น ถั่วเหลือง ปาล์ม และคาโนลา เพราะทำให้ไม่กระทบต่อแหล่งอาหารมนุษย์ และเป็นแหล่งพลังงานที่มีความปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดยังมีปริมาณไฮโดรคาร์บอน และน้ำมันที่สูงมาก และสามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จึงช่วยแก้ปัญหาภาวะเรือนกระจกได้ (Antoni et al., 2007; Chisti, 2008; Huang et al., 2010)

แต่สิ่งที่เป็นประเด็นสำคัญในการนำสาหร่ายมาใช้เป็นแหล่งน้ำมันคือ ต้องเลือกสายพันธุ์สาหร่ายให้เหมาะสม คือให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมันได้สูงที่สุดและมีการเจริญเติบโตที่สูงด้วย หลังจากนั้นคือต้องพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงให้ใช้ต้นทุนต่ำ และพัฒนาวิธีการเก็บผลผลิตให้ง่าย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการที่จะนำสาหร่ายมาเป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซลได้สำเร็จ ซึ่งประเด็นเหล่านี้ไม่ใช่สิ่งที่ยุ่งยาก ซับซ้อนจนเกินไป โดยพบว่านักวิทยาศาสตร์สหรัฐอเมริกาได้มีการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายที่สามารถนำมาผลิตเป็น biodiesel ได้ในเชิงพาณิชย์ได้สำเร็จ และเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบ่อกักน้ำเสียโรงงาน เนื่องจากมีฟอสเฟต และไนเตรทปนเปื้อนอยู่ สารทั้งสองชนิดมีผลเสียต่อแม่น้ำ ลำคลอง แต่กลับเป็นปุ๋ยที่ดีสำหรับทำฟาร์มสาหร่าย จึงมีการทำฟาร์มสาหร่ายใกล้กับโรงบำบัดเสีย และพบว่าการใช้น้ำมันจากสาหร่ายเป็นไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้ได้กับรถเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องบินไอพ่นได้ (http://sciinaction)

โดยการผลิต biodiesel จากสาหร่ายขนาดเล็กต้องมีการควบคุมมาตรฐานของน้ำมันที่ได้ให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละทวีป เช่นมาตรฐานในสหรัฐอเมริกา คือ ASTM Biodiesel Standard D6751 สำหรับในยุโรปแยกมาตรฐานที่ใช้สำหรับยานพาหนะ (Standard EN 14214) และใช้สำหรับหุงต้ม (Standard 14213) น้ำมันจากสาหร่ายขนาดเล็กค่อนข้างมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสายยาวสูง ที่มี 4 พันธะคู่หรือมากกว่า ตัวอย่าง กรด eicosapentaenoic (EPA C20: 5n-3; 5 พันธะคู่) และ กรด docosahexaenoic (DHA C22: 6n-3; 6 พันธะคู่) ซึ่งพบได้โดยทั่วไปในน้ำมันจากสาหร่าย กรดไขมัน methyl esters (FAME) ที่มีพันธะคู่ 4 หรือมากกว่า (Chisti, 2007)

และจากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากสาหร่ายจะนิยมศึกษาค่า คือซีเทน Cetane number (CN) ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่สุดโดยบ่งบอกถึงคุณสมบัติการจุดติด การเผาไหม้ของน้ำมัน ค่า CN ที่สูงแสดงว่ามีคุณสมบัติการจุดติดที่ดี จะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยค่าคุณสมบัติของ

น้ำมันไบโอดีเซลที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานที่นิยมทั่วโลก 2 มาตรฐาน คือต้องมีค่า CN ไม่ต่ำกว่า 47 หรือ 51 (ASTM D6751, 2012 and Fuel Standard (Biodiesel) Determination, 2012) โดยได้มีรายงานการศึกษาว่าค่า CN *B. braunii มีค่าอยู่ที่ 55.4* Ashokkumar et al. (2014) *และ 52.67* Nascimento et al. (2013)

ค่าความไม่อิ่มตัว Degree of unsaturation (DU) ซึ่งจะบอกความคงตัว หรือระยะเวลาที่สามารถเก็บน้ำมันนั้นไว้ ว่าได้นานมากน้อย อย่างไร โดยค่า DU ที่ต่ำคือไบโอดีเซลนั้นมีค่าความคงตัวดี เก็บรักษาได้นานกว่าค่า DU ที่สูง โดยค่า DU ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากสาหร่ายที่มีรายงานไว้คือ *Scenedesmus obliquus* และ *Chlorella pyrenoidosa* มีค่า DU อยู่ในช่วง 76.53-132.08 % (Wu and Miao, 2014)

ค่าจุดน้ำมันอุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ Cold filter plugging point (CFPP) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการไหลของน้ำมันไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าค่า CFPP มีค่าสูงจะหมายถึงมีคุณสมบัติการไหลที่ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Wu et al., 2005) เนื่องจากแสดงว่าน้ำมันมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนและอุดตันไส้กรองได้ง่าย (Mittelbach and Remschmidt, 2004)

ค่าสปอนิฟิเคชั่น Saponification value (SV) จะบ่งบอกถึงน้ำหนักโมเลกุลหรือความยาวของสายกรดไขมันที่มีในไบโอดีเซลส่วนค่าไอโอดีน Iodine value (IV) คือค่าที่วัดผลรวมของกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งหมดในไบโอดีเซลซึ่งสัมพันธ์กับค่า oxidative stability หากค่า IV สูงคือจะมีค่า oxidative ที่คงตัวมากกว่าค่า IV ต่ำ (Knothe, 2009) โดยค่า maximum IV value ตามมาตรฐาน European standard กำหนดไว้คือ 120 g I_2 100 g^{-1}

รายการการศึกษาการประมาณคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่ายบางชนิด พบว่ามีค่า CN ทั้งที่สูงกว่ามาตรฐานและต่ำกว่ามาตรฐาน (ตารางที่ 2.1) แต่คุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับภาวะในการเพาะเลี้ยงเช่นกัน (Talebi et al., 2013)

ตารางที่ 2.1 การประมาณคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลจากสาหร่าย

Strain	Biodiesel properties				
	SV	IV	CN	DU	CFPP
Ankistrodesmus sp.	170.60	114.88	52.45	97.59	-0.08
Chlamydomonas reinhardtii	170.56	102.35	55.27	87.02	-2.09
Dunaliella sp. (Persian Gulf)	174.25	150.44	43.77	121.04	-6.88
Dunaliella sp. (Shariati)	175.00	141.47	45.66	114.8	-9.71
D. salina (UTEX)	162.77	108.58	55.40	91.83	-1.24
Scenedesmus sp.	152.99	99.57	59.57	86.86	-6.91
Chlorella emersonii	162.28	114.18	54.24	93.75	3.55
Chlorella protothecoides	163.37	111.75	54.57	91.60	-0.99
Chlorella salina	180.97	117.92	49.93	99.78	2.58
Chlorella vulgaris	194.00	135.26	44.00	116.59	4.60
Amphora sp. (Persian Gulf)	188.30	57.56	62.33	55.00	12.41

ที่มา : Talebi et al. (2013)

2.2 ความเหมาะสมของสาหร่ายขนาดเล็กในการนำมาเป็นแหล่งน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซล

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถทำได้ง่าย ใช้พื้นที่น้อยกว่าพืชทั่วไป โดยเมื่อเทียบต่อพื้นที่ 1 เฮคแตร์ สาหร่ายขนาดเล็กสามารถให้น้ำมันได้มากถึง 58,700-136,900 ลิตร ซึ่งมากกว่าน้ำมันปาล์มที่ให้น้ำมันได้ 5,950 ลิตร (Chisti, 2007) สาหร่ายให้ผลผลิตน้ำมันมากกว่าพืชหลายชนิด (ตารางที่ 2.2) โดยพบว่าหากสาหร่ายขนาดเล็กมีปริมาณน้ำมันในเซลล์ที่ร้อยละ 30 น้ำหนักแห้ง สามารถให้น้ำมันได้ถึง 58,700 ลิตรต่อเฮคแตร์ต่อหนึ่งปี โดยสามารถผลิตไบโอดีเซลได้สูงถึง 51,927 กิโลกรัมต่อเฮคแตร์ต่อปี ซึ่งสูงกว่าพืชอื่นทั้งข้าวโพด ปาล์ม ถั่วเหลือง ฯล

การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นแหล่งของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว biodiesel ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยใช้สาหร่ายขนาดเล็กแทนพืชที่เป็นแหล่งอาหารเช่น ถั่วเหลือง ปาล์ม และคาโนลา เพราะไม่กระทบต่อแหล่งอาหารมนุษย์ และเป็นแหล่งพลังงานที่มีความปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากแหล่งพลังงานในอดีตคือแหล่งพลังงานจากถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม เป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณจำกัด มีความผันแปรของราคาสูง และการเผาไหม้แหล่งพลังงานเหล่านี้ ยังมีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจก (green house gases) เนื่องจากมีการปล่อย CO_2, SO_x และ NO_x ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน (global warming) ซึ่งแหล่งที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuel) เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งได้แก่เชื้อเพลิงประเภท ถ่านหิน (Coal) แก๊สธรรมชาติ (Gases) น้ำมันปิโตเลียม (Natural Oil) หินน้ำมันและทรายน้ำมัน (Oil Shale and Tar Sand) (Kadam, 2002)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบปริมาณผลผลิตน้ำมันระหว่างสาหร่ายขนาดเล็ก กับพืชบางชนิดที่ใช้ผลิต ไบโอดีเซล

ชนิดพืช	ปริมาณน้ำมัน (L oil/ha year)	พื้นที่ที่ต้องการในการปลูก (M^2 year/kg biodiesel)	การผลิตไบโอดีเซล (kg biodiesel/ha year)
ข้าวโพด	172	66	152
ถั่วเหลือง	636	18	562
คาโนลา (Canola)	974	12	862
สบู่ดำ	741	15	656
ละหุ่ง	1307	9	1156
ทานตะวัน	1070	11	946
ปาล์มน้ำมัน	5,366	2	4,747
คาเมไลน่า (Camelina sativa)	915	12	809
สาหร่ายขนาดเล็ก (น้ำมัน 30%)	58,700	0.2	51,927
สาหร่ายขนาดเล็ก (น้ำมัน 50%)	97,800	0.1	86,515
สาหร่ายขนาดเล็ก (น้ำมัน 70%)	136,900	0.1	121,104

ที่มา: Mata et al. (2010)

ข้อดีของสาหร่ายคือสามารถจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงช่วยแก้ปัญหาภาวะเรือนกระจกได้ (Antoni et al., 2007, Chisti, 2007, 2008; Huang et al., 2010; Demirbas, 2011) โดยสาหร่ายขนาดเล็กสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าพืชบก 10 เท่า และมีการเจริญเติบโตเร็วกว่าพืชบก 10-50 เท่า (Chen et al., 2011) ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซลจึงช่วยกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จากสิ่งแวดล้อมได้ด้วย มีรายงานว่าการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Scenedesmus obtusiusculus* เพื่อผลิตน้ำมันนั้น สามารถใช้สาหร่ายชนิดนี้เป็นแหล่งเก็บกักคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Toledo-Cervantes, 2013) และการใช้ *B. braunii* เป็นแหล่งผลิตน้ำมัน ยังช่วยป้องกันปัญหาภาวะโลกร้อนได้ด้วย (Sawayama et al., 1995)

2.3 บทบาทของไนโตรเจนต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย

โดยในวิธีการเพาะเลี้ยงต่าง ๆ ที่พยายามศึกษาเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน พบว่าการขาดไนโตรเจนเป็นวิธีที่ได้ผลในการเพิ่มน้ำมันให้กับสาหร่ายหลายชนิด ปกติแล้วไนโตรเจนมีหน้าที่หลักช่วยในการสังเคราะห์แสง สร้างรงควัตถุ ช่วยในกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ปริมาณไนโตรเจนจะมีผลต่อผลผลิตชีวมวลของสาหร่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ในสภาวะที่มีการขาดไนโตรเจนหรือมีการจำกัดปริมาณไนโตรเจน จะส่งผลต่อการสังเคราะห์แสง และปริมาณรงควัตถุของเซลล์ ในส่วนของอาหารสะสมจะเกิดการสะสมของสารประกอบคาร์บอนในปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างเช่น พวกไขมัน หรือ โพลีแซคคาไรด์ เป็นผลให้เกิดการสะสมไขมันภายในเซลล์เพิ่มขึ้น

ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน สาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดจะเปลี่ยนกลไกการสะสมไขมัน โดยจะสะสมไขมันที่เป็นกลาง (neutral lipids) โดยเฉพาะไตรกลีเซอไรด์ (triacylglycerides, TAGS) ซึ่งเป็นแหล่งของพลังงานสะสมอยู่ในไซโตพลาซึมของสาหร่ายขนาดเล็ก (Hu et al., 2008) เช่นภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน สาหร่าย *Chlorella pyrenoidosa* สามารถสะสมไขมันได้มากถึง 85.6 เปอร์เซ็นต์ (Spoehr and Milner, 1949) แต่ในสภาวะที่มีไนโตรเจนอย่างพอเพียง สาหร่ายสะสมไขมันได้เพียง 4.5 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม การจำกัดปริมาณไนโตรเจนในอาหารแม้ทำให้มีปริมาณไขมันสะสม (lipid content) ในเซลล์สาหร่ายเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ทำให้ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ผลผลิตไขมันทั้งหมด (lipid productivity) ของสาหร่ายภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจนจำกัดมีปริมาณน้อยกว่าภาวะที่มีไนโตรเจนพอเพียง (Ruangsomboon, 2012; Ruangsomboon et al., 2013; Wijffels and Barbosa, 2010; Widjaja et al., 2009)

จากการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorococcum infusionum* โดย Karemore et al. (2013) โดยได้ทำการจำลองแบบวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า 5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายคือ $NaNO_3$, K_2HPO_4, $FeSO_4.7\ H_2O$ และ KOH โดยปริมาณของแร่ธาตุเหล่านี้ส่งผลเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในขณะที่ปริมาณของ $MgSO_4$ ส่งผลในทางตรงข้ามกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยในปัจจัยเหล่านี้ไนโตรเจนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายมากที่สุด 45.77 เปอร์เซ็นต์ และแหล่งไนโตรเจนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ KNO_3 ซึ่งสามารถใช้แทนได้ทั้ง $NaNO_3$ และ KOH การหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณชีวมวลได้มากถึงสองเท่า การสะสมไขมันของสาหร่ายที่เลี้ยงในภาวะปกติสามารถสะสมได้เพียง 12-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ภายใต้การขาดไนโตรเจนจะสะสม 30-35 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามภายใต้การขาดไนโตรเจนเพียงบางช่วงสามารถเพิ่มประมาณไขมันสะสมได้ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาผลของไนโตรเจนต่อปริมาณไขมันในสาหร่าย *Scenedesmus* sp. โดยมีระดับความเข้มข้นของไนโตรเจน (NO_3–N) ที่ 2.5, 5.0, 10.0, 15.0 และ 25.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอาหารสูตร BG-11 ระยะเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 25 ºC ให้แสงสว่าง:มืดในอัตรา 14:10 ชั่วโมง ความเข้มแสง 55–60 μmol photons m^{-2} s^{-1} พบว่าที่ความเข้มข้นไนโตรเจน 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ปริมาณไขมันสูงสุดถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (Xin et al., 2010b)

ในการเลี้ยง *Chlorella vulgaris* ใน $NaNO_3$ ที่ 1.500, 0.750 และ 0.375 กรัมต่อลิตร ผลพบว่าระดับ $NaNO_3$ ที่ 0.375 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้ *C. vulgaris* มีปริมาณไขมันสูงที่สุดคือ 15.31 ± 0.51 เปอร์เซ็นต์ เพราะเมื่อ $NaNO_3$ ลดลง ทำให้สาหร่ายเกิดความเครียดจะทำให้มีปริมาณไขมันสูง ซึ่งเมื่อเทียบกับการทดลองลดความเข้มข้น $NaNO_3$ ในการเลี้ยง *Navicula oculata* ในสภาวะ $NaNO_3$ ที่ 0.300, 0.150 และ 0.075 กรัมต่อลิตร พบว่าระดับ $NaNO_3$ ที่ 0.075 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้ *N. oculata* มีปริมาณไขมันสูงที่สุดคือ 15.86 ± 0.59 เปอร์เซ็นต์ (Converti et al., 2009)

การเลี้ยงสาหร่าย *C. vulgaris* ระหว่างสูตรอาหารปกติและสูตรอาหารขาดไนโตรเจน พบว่าปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นในสภาวะที่ไนโตรเจนลดลงเพราะในสภาวะที่ไนโตรเจนลดลง ทำให้ *C. vulgaris* เกิดความเครียดทำให้เกิดการยับยั้งการแบ่งเซลล์ จึงส่งผลทำให้เกิดการสะสมไขมันเพิ่มขึ้น (Widjaja et al., 2009) การเลี้ยงสาหร่ายน้ำเค็ม *Chlorella* sp. ในสภาวะลดไนโตรเจน (ยูเรีย) ที่ 0.025, 0.050, 0.100, 0.150 และ 0.200 กรัมต่อลิตร ผลพบว่ายูเรียที่ระดับ 0.025 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้ *Chlorella* sp. มีปริมาณไขมันสูงสุดคือ 66.1 เปอร์เซ็นต์ (Hsieh and Wu, 2009)

การทดลองเลี้ยงไซยาโนแบคทีเรีย *Spirulina platensis* สายพันธุ์ LEB-52 โดยใช้ $NaNO_3$ เป็นแหล่งไนโตรเจน ที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน 4 ระดับ ที่ 0.625, 1.250, 1.875 และ 2.500 กรัมต่อลิตร โดยใช้ Zarrouk's medium เป็นอาหารมาตรฐาน โดยเพาะเลี้ยงใน photo-bioreactors ภายในเรือนกระจกภายใต้แสง 12 ชั่วโมง มืด 12 ชั่วโมง 40W fluorescent ให้แสงที่ 31.35 μmolphotons/m^2/s อุณหภูมิที่ 30 ºC และ 35 ºC ผลที่ได้พบว่าที่ความเข้มข้นของ $NaNO_3$ 2.500 กรัมต่อลิตร พบปริมาณไขมันสูงสุดคือ 8.16±0.23 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นของ $NaNO_3$ 1.250 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณไขมันต่ำที่สุดคือ 6.69±0.27 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของ $NaNO_3$ 1.875 กรัมต่อลิตร พบปริมาณไขมันสูงสุดคือ 10.37±0.63 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นของ $NaNO_3$ 0.625 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณไขมันต่ำที่สุดคือ 7.49±1.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ความเข้มข้นของ $NaNO_3$ 1.875 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณไขมันสูงที่สุด (Colla *et al*., 2007)

2.4 บทบาทของฟอสฟอรัสต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต มีบทบาทต่อกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิก รวมทั้งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ช่วยให้ค่ากรด-เบส ค่อนข้างคงที่ ถ้าสาหร่ายขาดฟอสฟอรัสจะมีผลต่อการเจริญเติบโต คือ โปรตีน รงควัตถุชนิดคลอโรฟิลล์-เอ RNA และ DNA จะลดลง แต่แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้รูปร่างเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ผลที่มักเกิดขึ้นในการตอบสนองต่อความเครียดจากสารอาหารของเซลล์สาหร่ายคือ เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารโมเลกุลใหญ่ (macromolecule) ของเซลล์ เมื่อฟอสฟอรัสที่จำนวนจำกัดจะทำให้มีการลดลงของปริมาณโปรตีน และค่อนข้างเพิ่มการสะสมของไขมันและคาร์โบไฮเดรต (Bertilsson et al., 2003) สำหรับฟอสฟอรัสที่มีจำกัดสามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วน โปรตีน, ไขมันและคาร์โบไฮเดรตได้

ซึ่งพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดเมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต สาหร่ายจะสามารถนำฟอสฟอรัสเข้าไปสู่เซลล์มากกว่าปริมาณที่ต้องการเพื่อการเจริญเติบโต โดยนำฟอสฟอรัสเข้าเซลล์ในรูปของ โพลิฟอสเฟต (polyphosphate) (Harold, 1966) โดยมีปัจจัยหลายปัจจัยเช่น แสง ค่าแรงดันออสโมติค ปริมาณธาตุอาหาร ที่ล้วนส่งผลต่อการสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์สาหร่าย เช่น สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Chlorella fusca* สะสมโพลิฟอสเฟตเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสะสมไว้ในเซลล์เป็นปริมาณมากเกินความต้องการในสภาวะการเลี้ยงที่ขาดไนโตรเจน (Kuesel et al., 1989)

การศึกษาบทบาทของฟอสฟอรัสต่อการสะสมไขมันในสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Scenedesmus* sp. LX1, *Chlorella ellipsoidea* YJ1, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Dunaliella primolecta* และ *Haematococcus pluvialis* พบว่าสาหร่าย *Scenedesmus* sp. LX1 สะสมฟอสฟอรัสในเซลล์น้อยที่สุดแต่ให้ปริมาณชีวมวลสูงสุด ถึง 6100 กิโลกรัมสาหร่ายต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส โดยสาหร่ายชนิดนี้สะสมไขมันได้ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณ triacylglycerol ในไขมันมากถึง 58.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณไขมันและปริมาณ triacylglycerol ต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1800 กิโลกรัมของไขมันต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส และ 680 กิโลกรัม triacylglycerol ต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส (Wu et al., 2013)

ในการศึกษาผลของฟอสฟอรัส (PO_4-P) ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมัน โดยเลี้ยงสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ในฟอสฟอรัสที่ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอาหารดัดแปลงสูตร BG-11 ระยะเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 25 °C ให้แสงสว่าง:มืดในอัตรา 14:10 ชั่วโมง ความเข้มแสง 55–60 μmol photons/m^2/s พบว่าที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ปริมาณชีวมวลของสาหร่ายสูงสุดคือ $0.98 \pm 0.12 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นฟอสฟอรัส 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ปริมาณไขมันสูงสุดถึงร้อยละ 53 ต่อน้ำหนักแห้งสาหร่าย แต่ได้ปริมาณชีวมวลของสาหร่ายค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกันกับไนโตรเจนที่ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ $0.26 \pm 0.01 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Xin et al., 2010b)

2.5 ยูเรีย

มีการนำไนโตรเจนมาจากหลายรูปแบบเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เช่นไนโตรเจนรูปแบบ ammonia, nitrate, nitrite และ urea (Becker, 1994) โดยพบรายงานว่าในไนโตรเจนรูปแบบต่าง ๆ นี้ พบว่ายูเรียมีความสำคัญมากในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบมหมวล เพราะมีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับไนโตรเจนรูปแบบอื่น ๆ (Danesi et al., 2002; Matsudo et al., 2009) โดยมีรายงานว่ายูเรียมีประสิทธิภาพสูงในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก *Chlorella* (Hsieh and Wu, 2009), *Nannochloropsis salina* (Campos et al., 2014), *Scenedesmus rubescens* (Lin and Lin, 2011) และ *Scenedesmus bijugatus* (Arumugam et al., 2013)

ความเข้มข้นของแร่ธาตุต่างๆ ในอาหาร ส่งผลต่อปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรทในสาหร่าย โดยส่วนใหญ่แล้ว หากแร่ธาตุต่าง ๆ มีความเข้มข้นลดลงจะทำให้ยับยั้งการแบ่งเซลล์ของสาหร่ายทำให้สาหร่ายขนาดเล็กมีการเจริญเติบโตลดลง หรือส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง เช่นในสาหร่ายขนาดเล็กชนิด *Parachlorella kessleriand* และพบว่าทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรทลดลงประมาณ 10% ส่วนปริมาณไขมันพบว่าเพิ่มขึ้นประมาณ 29% (Fernandes et al., 2013)

2.6 บทบาทของเหล็กต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย

เหล็กมีบทบาทช่วยในการดูดซึมไนโตรเจนของสาหร่าย เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของรงควัตถุช่วยสร้างคลอโรฟิลล์-เอ phycocyanin เกี่ยวข้องกับการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงและ

การหายใจ สาหร่ายจะดูดซึมในรูป Fe^{+2} หรือ Fe^{+3} ถ้าหากขาดจะส่งผลต่อการเจริญเติบโต และรูปร่างเซลล์ โดยเหล็กเป็นธาตุอาหารที่ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจน Liu et al. (2008) ได้ทดลองเพิ่มเหล็กในการเลี้ยง *C. vulgaris* ใน $FeCl_3$ ที่ 0, 1.2×10^{-8}, 1.2×10^{-7},1.2×10^{-6} และ 1.2×10^{-5} mol/L พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงใน Fe^{3+} ที่ 1.2×10^{-5} mol/L มีปริมาณไขมันสูงสุดคือ 56.6 เปอร์เซ็นต์ เพราะ $FeCl_3$ ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจน เมื่อเหล็กลดลงการดูดซึมไนโตรเจนลดลงทำให้ *C. vulgaris* เกิดความเครียดจึงทำให้เกิดสะสมไขมันเพิ่มขึ้น

สาหร่ายแต่ละชนิดมีความต้องการเหล็กที่แตกต่างกัน ในสาหร่ายหลายสายพันธุ์พบว่าระดับเหล็กที่เหมาะสมจะกระตุ้นให้สาหร่ายเจริญเติบโตหรือสะสมไขมันได้มาก จากการศึกษาข้อมูลโดยใช้โมเดลทางสถิติในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* พบว่าเหล็กนั้นไปส่งผลต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ การดูดซับไนโตรเจน อัตราเร็วของการเจริญเติบโต และการสะสมไขมันในสาหร่าย (Concas et al., 2014)

การศึกษาผลของเหล็กต่อการเจริญเติบโตและการสะสมไขมันในสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* KMITL ที่ความเข้มข้น 9, 18, 27, 36, 45 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชีวมวล ไขมันสะสม และผลผลิตไขมันของสาหร่ายเพิ่มขึ้น โดยที่เหล็ก 45 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายมีชีวมวล ผลผลิตไขมัน ไขมันสะสม และผลผลิตไขมัน สูงสุดเท่ากับ 1.75±0.01 กรัมต่อลิตร, 0.43±0.00 กรัมต่อลิตร, 24.7±0.5 เปอร์เซ็นต์, 27.21±0.34 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (Ruangsomboon et al., 2013)

การศึกษาผลของเหล็กต่อการเจริญเติบโตและการสะสมไขมันในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL2 ที่ความเข้มข้น 9, 18, 27, 36, 45 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่ายชนิดนี้มีไขมันสะสมสูงสุด 34.93 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตไขมัน 0.08 กรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในเหล็กที่ความเข้มข้น 27 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในเหล็กทุกระดับความเข้มข้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (Ruangsomboon, 2012)

2.7 บทบาทของความเค็มต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย

Rao *et al*. (2007) ได้ทำการศึกษาผลของความเค็มที่ระดับ 0, 34 และ 85 mM ต่อองค์ประกอบของไขมันในสาหร่าย *Botryococcus braunii* โดยไขมันที่พบในสาหร่าย *B. braunii* คือ Palmitic acid (16:0), Palmitoleic acid (C16:1), Stearic acid (C18:0), Oleic acid (C18:1), Linoleic acid (C18:2), Behenic acid (C22:0), Erucic acid (C22:1) และ Lignoceric acid (C24:0) พบว่า ในกลุ่มควบคุมมีปริมาณ Stearic acid (C18:0) และ Linoleic acid (C18:2) มากที่สุดคือ 28.19% และ 22.12% ตามลำดับ ส่วนที่ระดับความเค็ม 0, 34 และ 85 mM มีปริมาณ Palmitic acid (C16:0) และ Oleic acid (C18:1) มากที่สุด

Hu (2004) กล่าวว่า ความเค็มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณไขมันในสาหร่ายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ปริมาณไขมันสูงสุดคือ 9.95% ซึ่งได้จากที่ระดับความเค็ม 10 ppt ส่วนที่ระดับความเค็มที่มากกว่า 10 ppt ไม่ส่งผลกระทบต่อการสะสมไขมันในไซยาโนแบคทีเรีย เนื่องจากจะใช้พลังงานในการขับ Na^+ ออกจากเซลล์เพื่อรักษาออสโมติคให้เกิดความสมดุล ส่งผลให้การสะสมปริมาณไขมันลดลง

การเพิ่มความเค็มในอาหารเลี้ยงสาหร่ายจาก 0 เป็น 20 mg/L ทำให้ชีวมวลของสาหร่าย *Hapalosiphon* เพิ่มขึ้น 1.6 เท่า และชีวมวลของสาหร่าย *Hapalosiphon* ที่เลี้ยงที่ระดับความเค็ม 15 ppt (0.76 g/L) สูงกว่าที่ระดับความเค็ม 0-10 ppt โดยความเค็มจะไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของสาหร่ายนี้ และในสาหร่าย *Chlorella* น้ำจืดสามารถเจริญเติบโตในน้ำทะเลได้ดีกว่าอาหารสูตรปกติ เนื่องจากน้ำทะเลเป็นแหล่งอาหารธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ ซึ่งมีทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

2.8 บทบาทร่วมกันของธาตุอาหารต่อการสะสมไขมันในสาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ในสภาวะขาดไนโตรเจน แต่มีฟอสฟอรัสมากพอ พบว่ามีผลผลิตชีวมวลไม่ต่างจากชุดที่เลี้ยงโดยมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปกติ โดยได้ผลผลิตไขมันสูงสุดเท่ากับ 58.39 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยฟอสฟอรัสจากอาหารที่เข้าไปในเซลล์สาหร่ายจะมีการสะสมอยู่ในรูปของ polyphosphate โดยอัตราเร็วในการนำฟอสฟอรัสเข้าเซลล์สาหร่ายที่เลี้ยงในภาวะขาดไนโตรเจน จะเร็วมากกว่าการเพาะเลี้ยงในภาวะปกติถึง 3.8 เท่า ซึ่งแสดงว่าในภาวะการขาดไนโตรเจนนั้น ฟอสฟอรัสมีบทบาทมากในการสร้างไขมันสะสมของสาหร่าย (Chu et al., 2013)

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโต การดูดซึมธาตุอาหารและการสะสมไขมันในสาหร่าย *Scenedesmus* sp. LX1 พบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้ในอาหารที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอย่างพอเพียงสาหร่ายชนิดนี้มีการเจริญเติบโตสูงสุดที่ 2.21×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรต่อวัน โดยอัตราส่วนของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่ 5:1-12:1 สาหร่ายจะดูดซึมไนโตรเจนไปใช้ 83-99 เปอร์เซ็นต์ และดูดซึมฟอสฟอรัส 99 เปอร์เซ็นต์ และการเลี้ยงในภาวะที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจำกัด (ไนโตรเจน 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ฟอสฟอรัส 0.1 มิลลิกรัมตจ่อลิตร) สาหร่ายชนิดนี้สะสมไขมันได้สูง 30 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ภาวะการเลี้ยงนี้ไม่สามารถกระตุ้นให้เพิ่มผลผลิตไขมันได้ (Xin et al., 2010b)

การศึกษาผลร่วมกันของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ต่อการผลิตน้ำมันของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* โดยเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่มีไนโตรเจนพอและขาดไนโตรเจน ร่วมกับอาหารที่มีฟอสฟอรัสมากพอ มีปริมาณจำกัด และขาดฟอสฟอรัส พบว่าทั้งในภาวะที่ขาดและภาวะที่มีไนโตรเจนเพียงพอสามารถกระตุ้นผลผลิตน้ำมันได้ ยิ่งกว่านั้นยังพบว่าปริมาณน้ำมันที่ได้จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสให้มากพอเพียง โดยผลผลิต fatty acid methyl ester ได้ 24.2 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายในภาวะขาดไนโตรเจนร่วมกับมีฟอสฟอรัสมากพอ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงในภาวะที่มีทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากพอ ถึงสองเท่า (Chu et al., 2014)

การศึกษาผลร่วมกันของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส ต่อการผลิตน้ำมันของสาหร่าย *Chlorella zofingiensis* โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่มี $NaNO_3$ 1 กรัมต่อลิตร และ K_2HPO_4 0.01 กรัมต่อลิตร สาหร่ายชนิดนี้มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด 2.15 ต่อวัน ปริมาณไขมันในสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในอาหารที่ขาดไนโตรเจนมี 65.1 เปอร์เซ้นต์ ขาดฟอสฟอรัสมี 44.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารที่มีทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสพอเพียง ซึ่งมีไขมันเพียง 33.5 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่า ผลผลิตไขมันของสาหร่ายมีค่าสูงที่สุด 87.1 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน เมื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่ขาดไนโตรเจน และเมื่อนำสาหร่ายชนิดนี้มาเพาะเลี้ยงนอกห้องปฏิบัติการ พบว่าได้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงถึง 0.362 ต่อวัน มีผลผลิตไขมันสูง 26.6 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้แบบ outdoor สามารถผลิตไขมันได้มากถึง 31.1 กิโลกรัมต่อเฮคแตร์ต่อวัน (Feng et al., 2012)

การศึกษาบทบาทร่วมกันของไนโตรเจน (0, 0.22, 0.44 mmol/l) เหล็ก (1.2×10^{-2}, 1.2×10^{-1}, 1.2 mmol/L) และอุณภูมิ (10, 20, 30 องศาเซลเซียส) ต่อสาหร่าย *Nannochloropsis oculata* เพื่อศึกษาแนวทางในการทำเป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาแบบ orthogonal test พบว่าสาหร่ายชนิดนี้ให้น้ำมันสูงสุด 60.44 เปอร์เซ็นต์ มีสัดส่วนไขมันที่เป็นกลาง (neutral lipid) สูงสุด 90.74 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตไขมันสูงสุด 152.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าซีเทนมากที่สุด 64.34 (CN) ซึ่งทุกค่าเกิดภายใต้ภาวะการผสมระหว่างปัจจัยการเลี้ยงที่แตกต่างกัน โดยพบว่าทั้งไนโตรเจน เหล็ก และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ร่วมกันอย่าง

เด่นชัด โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนมีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความเข้มข้นของเหล็ก และสุดท้ายคืออุณหภูมิ โดยสรุปแล้วการใช้ไนโตรเจนที่ 0.44 mmol/L ร่วมกับ เหล็ก $1.2x10^{-1}$ mmol/L ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นปัจจัยที่ดีที่สุดในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้เพื่อผลิตไบโอดีเซล (Wei et al., 2013)

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Neochloris oleoabundans* HK-129 เป็นเวลาสองวัน ในอาหารที่ขาดไนโตรเจน ภายใต้แสง 200 μmol/m^2/s และมีเหล็ก 0.0037 mM สาหร่ายสามารถสร้าง triacylglycerol และคาร์โบไฮเดรทได้สูงที่สุด 51.58 และ 90.70 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ โดยพบว่าทั้งไนโตรเจน แสง และเหล็กเป็นปัจจัยร่วมกันที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต การสร้างคาร์โบไฮเดรท และการสร้างไขมันในสาหร่ายได้ (Sun et al., 2014)

การศึกษาผลกระทบของเหล็ก (ferrous sulfate 100, 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และตะกั่ว (lead nitrate 0, 100, 500, 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ต่อการนำฟอสฟอรัสไปใช้ในพืช พบว่าเมื่อพืชได้รับเหล็กต่อตะกั่วที่อัตราส่วน 1:1 ทำให้พืชสามารถนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้สูงที่สุด (Shunqing et al., 2009)

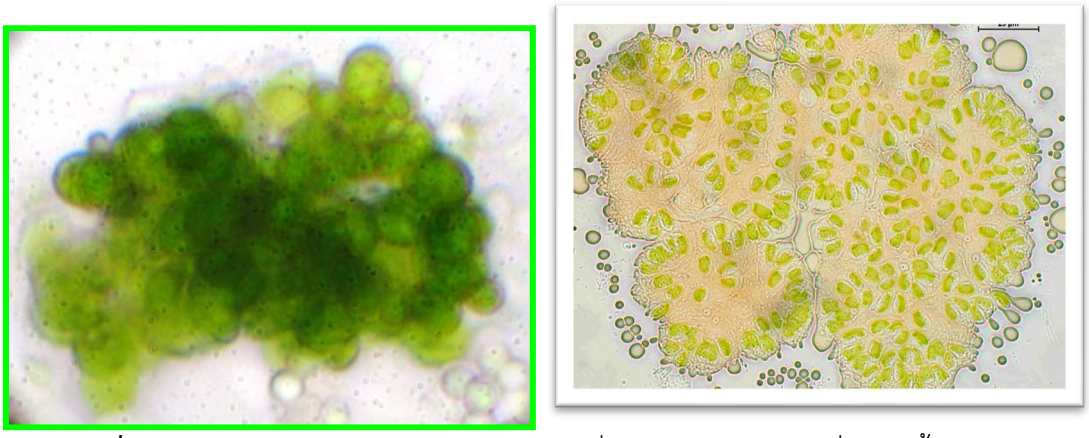
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุอาหารจากสูตรปกติ ไม่ว่ากลุ่มธาตุอาหารหลักเช่นพวกไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกลุ่มธาตุอาหารรองเช่น เหล็ก ฯลฯ เป็นผลให้สาหร่ายได้รับสารอาหารที่มีบทบาทหน้าที่การทำงานในเซลล์ต่างกัน ในปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมแร่ธาตุอาหารในปริมาณที่แตกต่างกัน และส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมไขมันทั้งในทางเพิ่มขึ้นและลดลง อัตราส่วนของธาตุอาหารที่เหมาะสมจะทำให้สาหร่ายนั้นลดการนำเอาพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโต เกิดการสะสมอาหารมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณไขมันสูงขึ้น

ซึ่งจากการทบทวนเอกสารแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าธาตุอาหารต่าง ๆ มีอิทธิพลร่วมกันต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันในสาหร่าย จึงควรศึกษาถึงผลของระดับธาตุอาหารที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางที่จะทำให้สาหร่ายสามารถให้ผลผลิต ไฮโดรคาร์บอน และไขมันสูงสุด เพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซลต่อไป

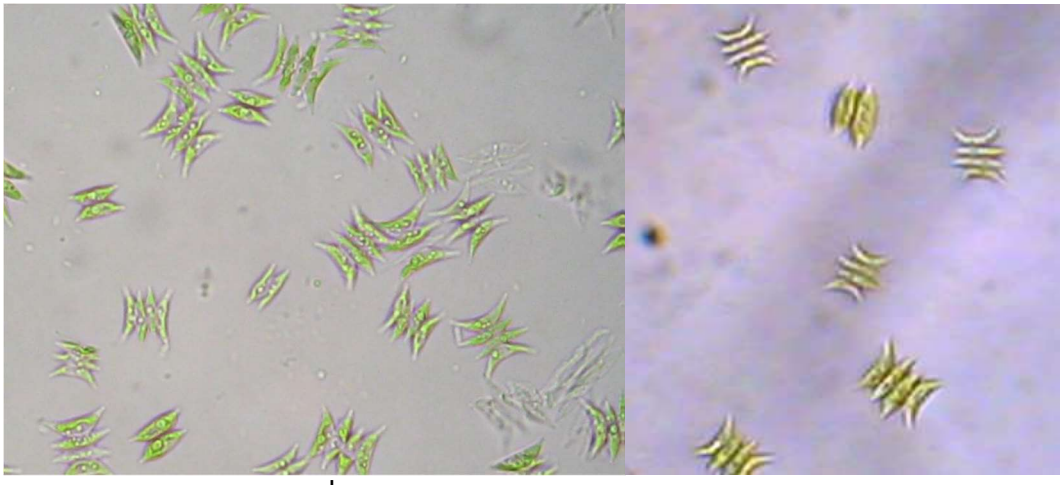
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงหัวเชื้อสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL และ *Scenedesmus dimorphus* KMITL ในอาหารสูตร Chlorella medium ในภาชนะแก้วที่บรรจุอาหารที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 121 °C ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในห้องเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ปลอดเชื้อ มีการควบคุมแสงที่ระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อใช้สาหร่ายเป็นหัวเชื้อในการศึกษาขั้นต่อไป



ภาพที่ 3.1 สาหร่าย *B. braunii* KMITL2 โคโลนีที่เจริญเติบโตเต็มและที่ปล่อยน้ำมันออกนอกโคโลนี



ภาพที่ 3.2 ลักษณะเซลล์สาหร่าย *S. dimorphus* KMITL

ภาพที่ 3.3 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในห้องปฏิบัติการ

ภาพที่ 3.4 ลักษณะเซลล์สาหร่ายแห้งก่อนสกัดน้ำมัน

3.2 การศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยเคมี NPK ที่ปรับให้มีความเข้มข้นแร่ธาตุทั้งสามชนิดให้เท่ากับความเข้มข้นของอาหารสูตร Chlorella medium เนื่องจากเป็นสูตรอาหารที่ทำให้สาหร่ายทั้งสองชนิดนี้ให้ผลผลิตไขมันสูงที่สุด โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน (เนื่องโปรตีนและคาร์โบไฮเดรทมีความสัมพันธ์กับปริมาณไขมัน) วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียที่ปรับให้มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับปริมาณไนโตรเจนของอาหารสูตร Chlorella medium โดยใช้ค่าความเข้มข้นนี้เป็นค่ากลาง จากนั้นปรับความเข้มข้นเป็น 0.1, 0.5, 1.5 และ 2 เท่า ของความเข้มข้นนี้ โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

3.4 การศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็มที่เหมาะสม (ทดสอบขั้นต้นและเลือกความเค็มที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**)** และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็กที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม **(**จากการทดสอบขั้นต้นและเลือกความเข้มข้นเหล็กที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**)** โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

3.5 ศึกษาผลของยูเรียร่วมกับความเค็ม ยูเรียร่วมกับเหล็ก และยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสม (ความเข้มข้นที่สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงที่สุด) ร่วมกับความเค็มที่เหมาะสม (ทดสอบขั้นต้นและเลือกความเค็มที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**),** ปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสมร่วมกับเหล็กที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม และปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสมร่วมกับฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

3.6. ศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จาก *B. braunii* KMITL

นำน้ำมันที่สกัดได้จากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในทุกชุดการทดลอง (รวม 22 ชุดการทดลอง) มาเปลี่ยนรูปเป็นไบโอดีเซลและศึกษาคุณสมบัติ โดยวิเคราะห์ค่าตามมาตรฐานกำหนดคือ Cetane number (CN), Degree of unsaturation (DU), Cold filter plugging point (CFPP), Saponification value (SV) และ Iodine value (IV)

3.7. การวิเคราะห์ข้อมูล

ทุกชุดการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์ ใช้ analysis of variance (ANOVA) และ Tukey-Kramer HSD test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

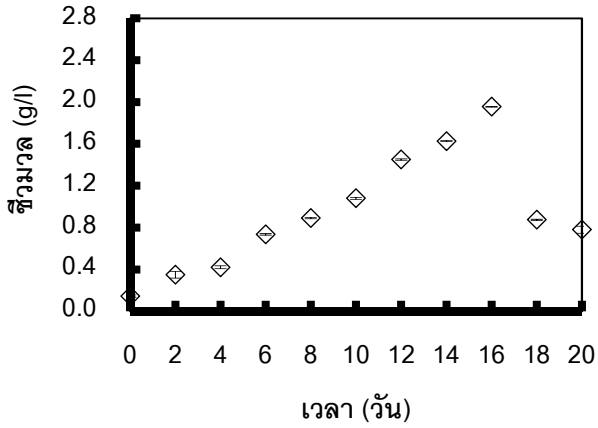
บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยเคมี NPK ที่ปรับให้มีความเข้มข้นแร่ธาตุทั้งสามชนิดให้เท่ากับความเข้มข้นของอาหารสูตร Chlorella medium เนื่องจากเป็นสูตรอาหารที่ทำให้สาหร่ายทั้งสองชนิดนี้ให้ผลผลิตไขมันสูงที่สุด โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน (เนื่องโปรตีนและคาร์โบไฮเดรทมีความสัมพันธ์กับปริมาณไขมัน) วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

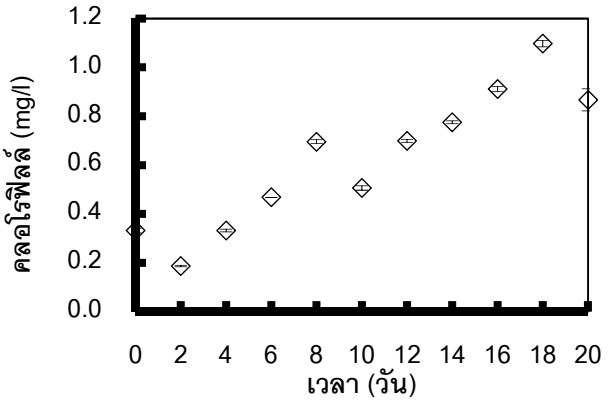
4.1.1 การศึกษาผลของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *botryococcus braunii*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.96 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 16 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.1, ตารางที่ 4.1)



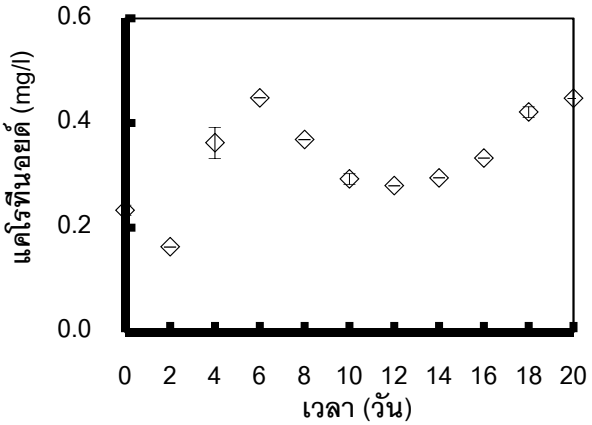
ภาพที่ 4.1 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) พบว่ามีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.10±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.1)



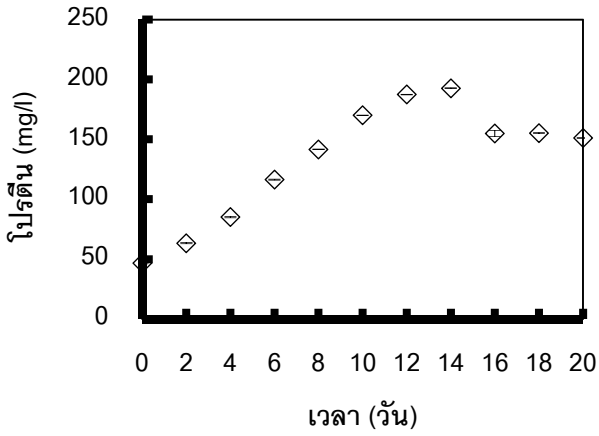
ภาพที่ 4.2 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในวันที่ 6 ของการทดลอง และมีแนวโน้มลดลง มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.45±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 6 และ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลองแต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 18 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.3, ตารางที่ 4.1)

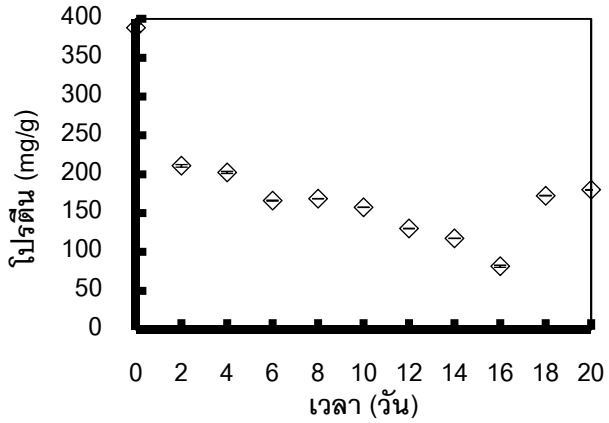


ภาพที่ 4.3 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 192.67±0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 388.71±4.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.4, ภาพที่ 4.5, ตารางที่ 4.1)

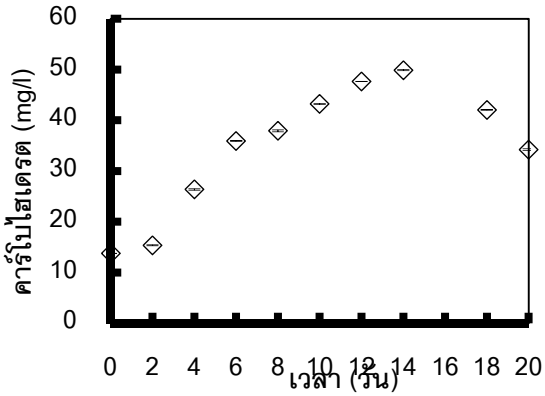


ภาพที่ 4.4 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

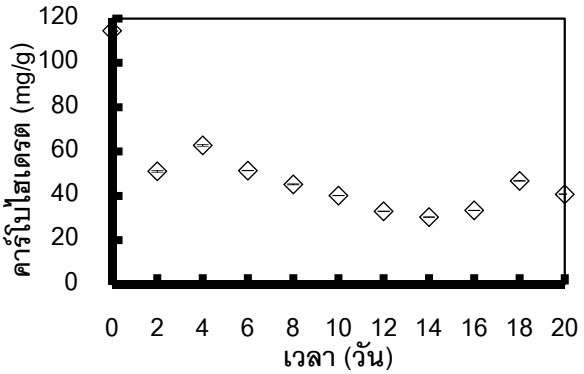


ภาพที่ 4.5 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) สาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 63.52±0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 114.43±0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.6-4.7, ตารางที่ 4.1)



ภาพที่ 4.6 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K



ภาพที่ 4.7 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณไขมัน การสะสมไขมันของ *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) พบว่า ปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 39.32±0.26 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง ผลผลิตน้ำมันค่าสูงสุดเท่ากับ 0.74±0.03 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลองซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 84.68±12.71 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 4 ของการทดลองโดยพบว่าแตกต่างทางสถิติกับวัน 0 ของการทดลอง (ตารางที่ 4.2)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมดดังภาพที่ 8 ซึ่งพบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้น พบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัว ปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกวันของการทดลองเท่ากับ 23.90 – 42.13 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 51.70 - 73.03 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 73.44 – 92.37 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละวันของการทดลอง

ตารางที่ 4.1 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

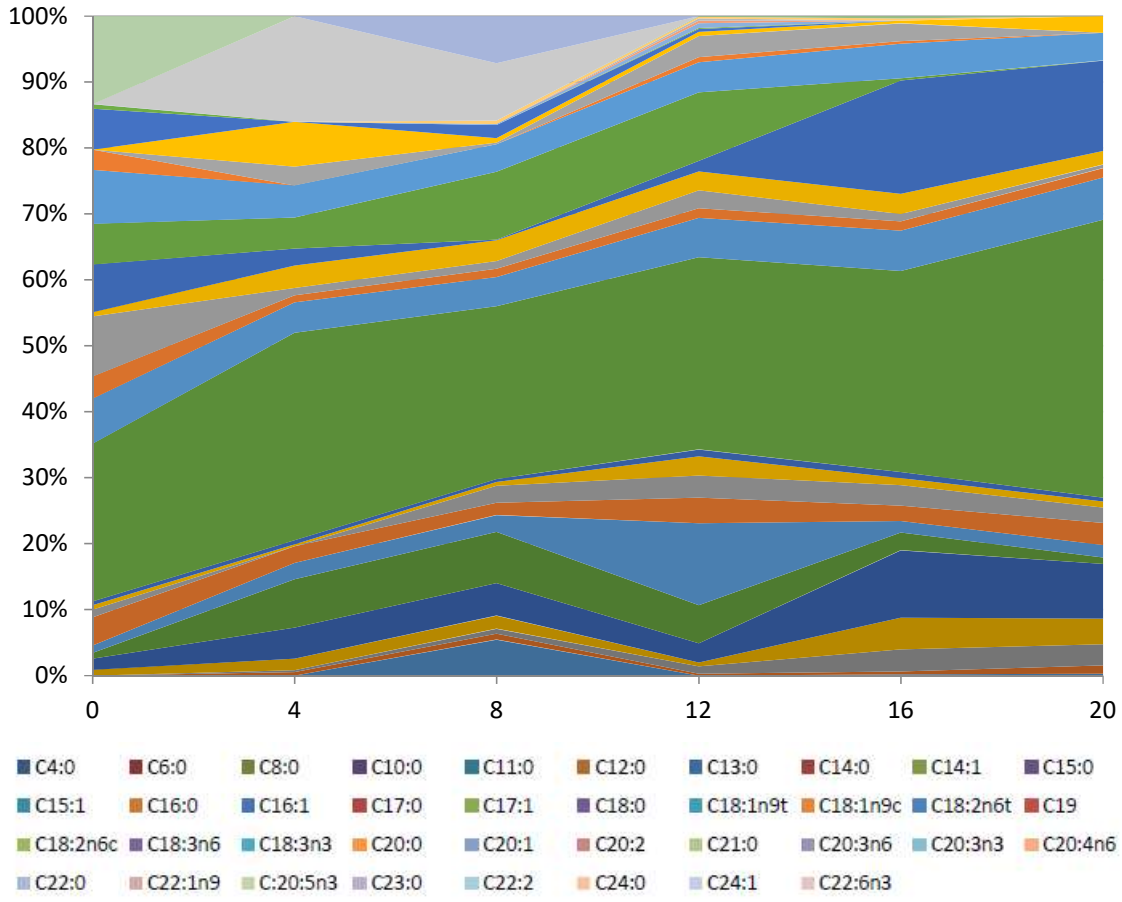
วัน	ชีวมวล (g/l)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)	แคโรทีนอยด์ (mg/l)	โปรตีน (mg/l)	โปรตีน(mg/g)	คาร์โบไฮเดรท (mg/l)	คาร์โบไฮเดรท (mg/g)
0	0.15±0.03^{a}	0.33±0.01^{b}	0.23±0.01^{b}	46.64±0.57^{a}	388.71±4.76^{j}	13.73±0.03^{a}	114.43±0.25^{i}
2	0.35±0.02^{b}	0.19±0.00^{a}	0.16±0.00^{a}	63.25±0.53^{b}	210.85±1.76^{i}	15.32±0.10^{b}	51.07±0.34^{g}
4	0.42±0.01^{c}	0.33±0.01^{b}	0.36±0.03^{e}	85.04±0.57^{c}	202.47±1.36^{h}	26.35±0.14^{c}	62.75±0.33^{h}
6	0.74±0.02^{d}	0.47±0.00^{c}	0.45±0.00^{f}	116.32±0.39^{d}	188.17±0.56^{e}	35.92±0.06^{e}	51.31±0.08^{g}
8	0.89±0.02^{e}	0.70±0.01^{d}	0.37±0.00^{e}	141.66±0.21^{e}	168.64±0.25^{ef}	37.92±0.19^{f}	45.14±0.23^{e}
10	1.08±0.02^{f}	0.51±0.01^{c}	0.29±0.01^{c}	170.03±0.12^{h}	157.43±0.12^{d}	43.24±0.08^{h}	40.04±0.08^{c}
12	1.45±0.01^{g}	0.7±0.01^{d}	0.28±0.00^{c}	187.39±0.21^{i}	130.13±0.14^{c}	47.66±0.03^{i}	33.10±0.02^{b}
14	1.63±0.02^{h}	0.77±0.01^{e}	0.30±0.00^{c}	192.67±0.25^{j}	117.48±0.15^{b}	49.87±0.13^{j}	30.41±0.08^{a}
16	1.96±0.03^{i}	0.91±0.01^{f}	0.33±0.00^{d}	154.93±2.51^{g}	81.54±1.32^{a}	63.52±0.09^{k}	33.43±0.05^{b}
18	0.88±0.02^{e}	1.10±0.01^{g}	0.42±0.01^{f}	155.25±0.37^{g}	172.50±0.41^{f}	42.04±0.06^{g}	46.71±0.06^{f}
20	0.78±0.02^{d}	0.87±0.05^{f}	0.45±0.00^{f}	151.15±0.44^{f}	179.94±0.53^{g}	34.21±0.14^{d}	40.73±0.17^{d}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

ตารางที่ 4.2 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตร N:P:K

วัน	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (1/day)	ชีวมวล (g/l)	ปริมาณน้ำมัน (%)	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)	กำลังผลิตน้ำมัน (mg/l/day)
0	0.00±0.00^{a}	0.15±0.03^{a}	27.72±0.94^{a}	0.04±0.01^{a}	0.00±0.00^{a}
4	0.28±0.04^{d}	0.42±0.01^{b}	30.41±0.67^{b}	0.13±0.00^{b}	84.68±12.71^{b}
8	0.23±0.02^{cd}	0.89±0.02^{d}	33.25±0.49^{c}	0.30±0.01^{c}	77.38±7.12^{b}
12	0.20±0.01^{bc}	1.45±0.01^{e}	36.34±0.77^{d}	0.53±0.01^{d}	70.96±4.99^{b}
16	0.17±0.01^{b}	1.96±0.03^{f}	37.89±0.88^{de}	0.74±0.03^{e}	62.73±4.66^{b}
20	0.17±0.01^{b}	0.78±0.02^{c}	39.32±0.26^{e}	0.31±0.01^{c}	65.03±4.10^{b}

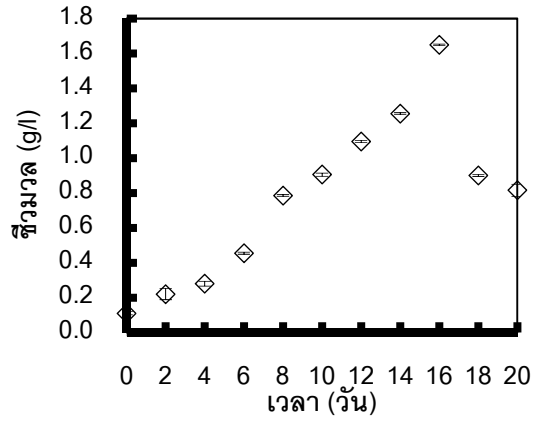
ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$



ภาพที่ 4.8 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

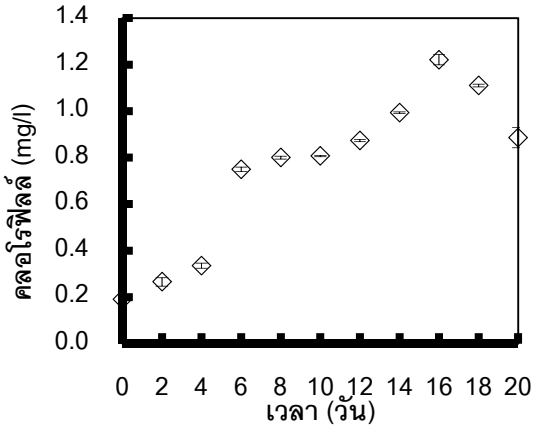
4.1.2 การศึกษาผลของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.65 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 16 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.9, ตารางที่ 4.3)



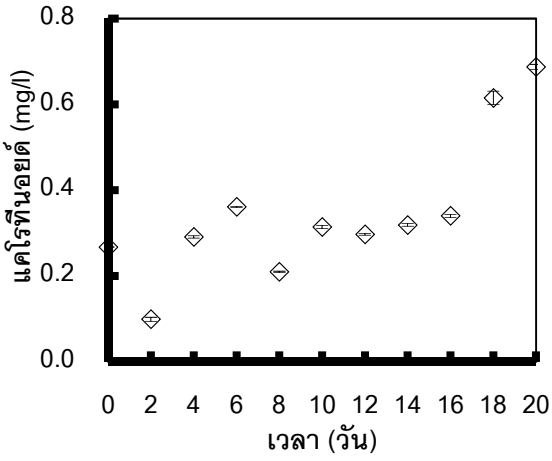
ภาพที่ 4.9 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย*S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ สูงสุดเท่ากับ 1.22±0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.10, ตารางที่ 4.3)



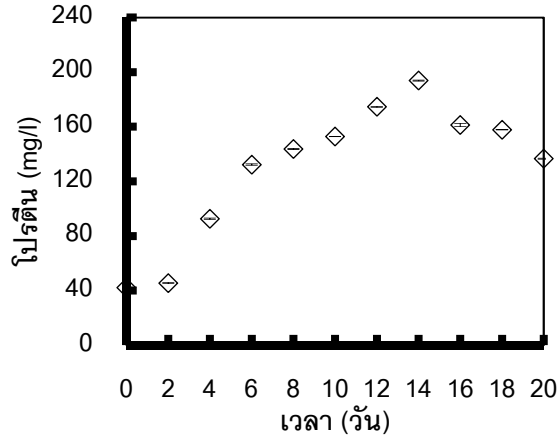
ภาพที่ 4.10 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.69±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.11, ตารางที่ 4.3)

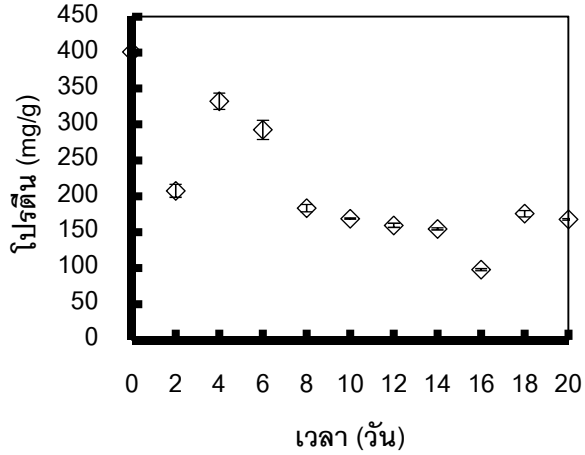


ภาพที่ 4.11 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 193.86±0.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 400.79±48.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.12-4.13, ตารางที่ 4.3)

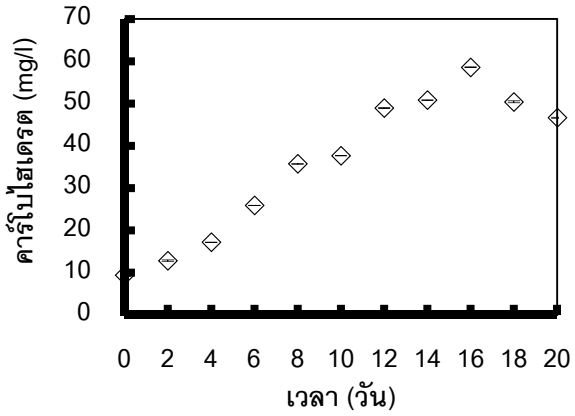


ภาพที่ 4.12 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

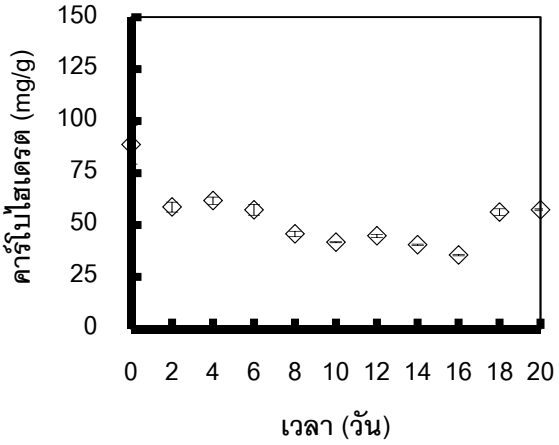


ภาพที่ 4.13 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) สาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 29.79±2.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 88.66±9.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.14-4.15, ตารางที่ 4.3)



ภาพที่ 4.14 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K



ภาพที่ 4.15 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

การสะสมไขมันของ *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) พบว่าปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 29.79±2.42 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 12 และ 16 ของการทดลอง ผลผลิตน้ำมันค่าสูงสุดเท่ากับ 0.31±0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลองซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 64.03±3.32 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 8 ของการทดลองโดยพบว่าไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 4 และ 12 ของการทดลอง (ตารางที่ 4.4)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *S. dimorphus* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมด (ภาพที่ 4.16) ซึ่งพบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้น พบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัว ปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกวันของการทดลองเท่ากับ 24.48 – 40.35 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 50.79 - 68.20 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 74.06 – 93.36 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละวันของการทดลอง

ตารางที่ 4.3 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

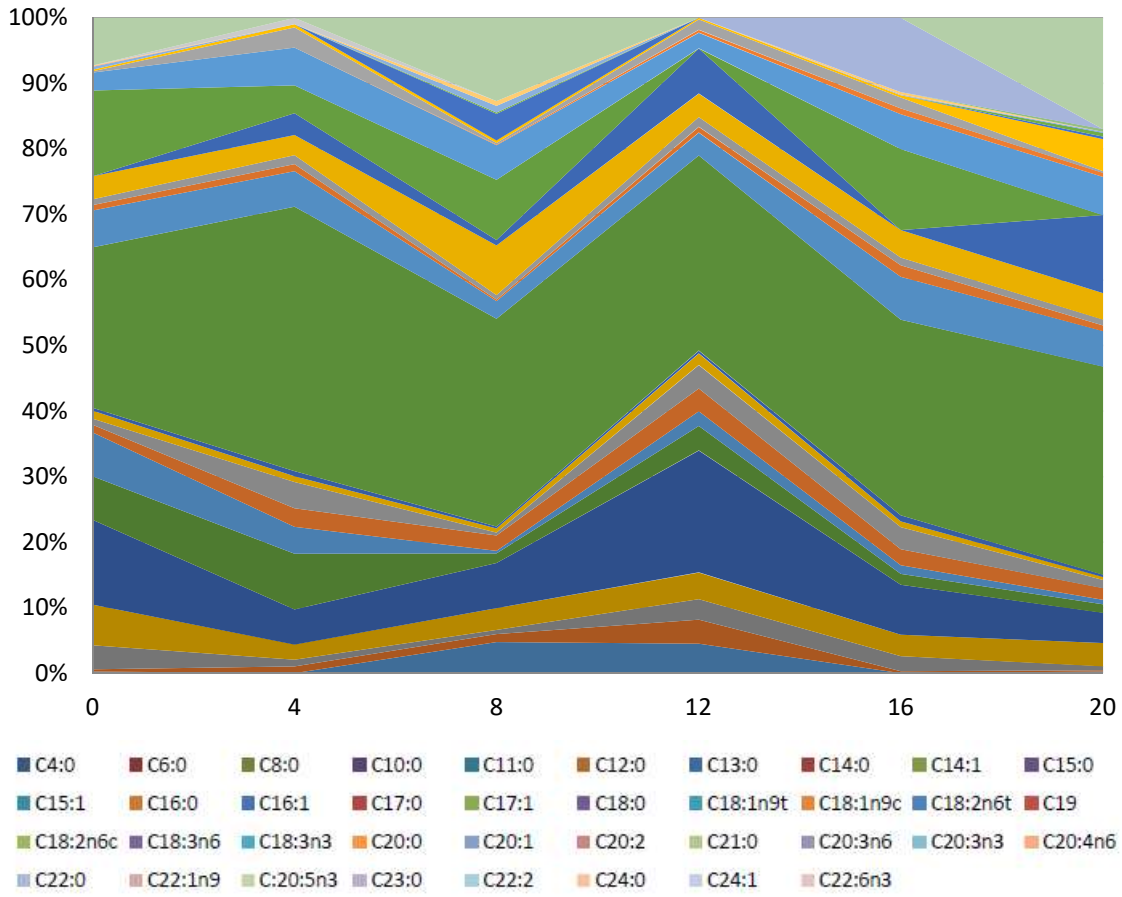
วัน	ชีวมวล (g/l)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)	แคโรทีนอยด์ (mg/l)	โปรตีน (mg/l)	โปรตีน(mg/g)	คาร์โบไฮเดรท (mg/l)	คาร์โบไฮเดรท (mg/g)
0	0.11±0.01^{a}	0.19±0.00^{a}	0.27±0.00^{c}	42.22±0.21^{a}	400.79±48.85^{e}	9.41±0.34^{a}	88.66±9.34^{d}
2	0.22±0.01^{b}	0.27±0.02^{b}	0.10±0.00^{a}	45.46±0.32^{b}	207.63±9.11^{c}	12.85±0.15^{b}	58.66±2.38^{c}
4	0.28±0.01^{c}	0.34±0.01^{c}	0.29±0.00^{d}	92.70±0.48^{c}	332.05±11.34^{d}	17.23±0.05^{c}	61.70±1.74^{c}
6	0.46±0.02^{d}	0.75±0.01^{d}	0.36±0.00^{g}	132.28±0.53^{d}	292.38±13.36^{d}	25.91±0.03^{d}	57.28±2.59^{c}
8	0.79±0.02^{e}	0.8±0.01^{e}	0.21±0.00^{b}	143.60±0.32^{f}	183.33±5.07^{bc}	35.77±0.14^{e}	45.67±1.33^{b}
10	0.91±0.01^{f}	0.81±0.0^{e}	0.31±0.00^{e}	152.77±0.12^{g}	168.82±0.85^{bc}	37.68±0.03^{f}	41.64±0.22^{ab}
12	1.10±0.02^{g}	0.87±0.01^{f}	0.30±0.00^{d}	174.55±0.18^{j}	159.56±2.88^{bc}	48.92±0.09^{h}	44.72±0.77^{ab}
14	1.26±0.01^{h}	0.99±0.00^{g}	0.32±0.00^{e}	193.86±0.37^{k}	154.50±1.38^{b}	50.81±0.09^{i}	40.49±0.37^{ab}
16	1.65±0.02^{i}	1.22±0.02^{i}	0.34±0.00^{f}	161.29±1.09^{i}	97.79±1.40^{a}	58.68±0.06^{j}	35.51±0.40^{a}
18	0.90±0.02^{f}	1.11±0.01^{h}	0.62±0.02^{h}	157.84±0.27^{h}	175.74±4.47^{bc}	50.40±0.22^{i}	56.12±1.59^{c}
20	0.82±0.01^{e}	0.89±0.04^{f}	0.69±0.01^{i}	136.70±0.32^{e}	167.75±1.23^{bc}	46.69±0.10^{g}	57.29±0.41^{c}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

ตารางที่ 4.4 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

วัน	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (1/day)	ชีวมวล (g/l)	ปริมาณน้ำมัน (%)	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)	กำลังผลิตน้ำมัน (mg/l/day)
0	0.00±0.00^{a}	0.11±0.01^{a}	22.37±0.26^{a}	0.02±0.00^{a}	0.00±0.00^{a}
4	0.24±0.02^{cd}	0.28±0.01^{b}	22.61±1.01^{a}	0.06±0.00^{b}	53.46±4.03^{bc}
8	0.25±0.01^{d}	0.79±0.02^{c}	25.80±0.51^{ab}	0.20±0.01^{c}	64.03±3.32^{c}
12	0.21±0.00^{c}	1.10±0.02^{d}	26.60±0.75^{bc}	0.29±0.01^{e}	56.06±1.55^{bc}
16	0.17±0.01^{b}	1.65±0.02^{d}	28.46±1.18^{bc}	0.31±0.01^{e}	48.72±3.86^{b}
20	0.17±0.01^{b}	0.82±0.01^{c}	29.79±2.42^{c}	0.24±0.02^{d}	51.32±6.34^{b}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$



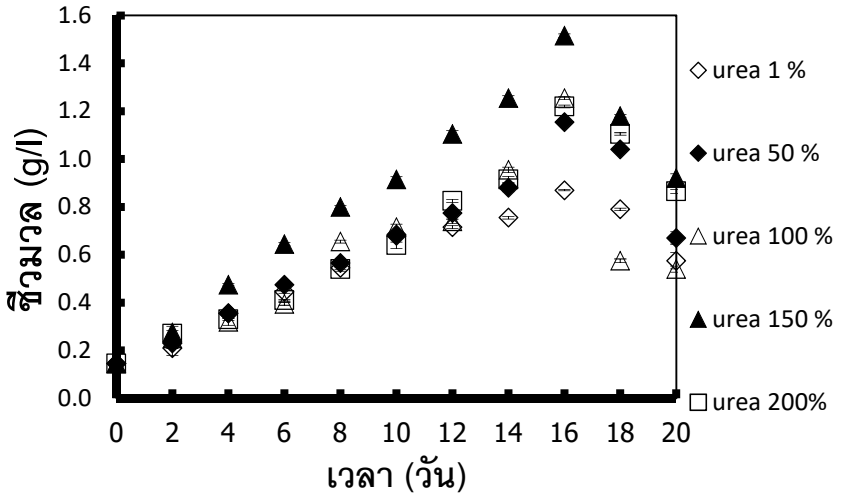
ภาพที่ 4.16 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตร N:P:K

4.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นยูเรียต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียที่ปรับให้มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเท่ากับปริมาณไนโตรเจนของอาหารสูตร Chlorella medium โดยใช้ค่าความเข้มข้นนี้เป็นค่ากลาง จากนั้นปรับความเข้มข้นเป็น 0.1, 0.5, 1.5 และ 2 เท่า ของความเข้มข้นนี้ โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมัน และชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

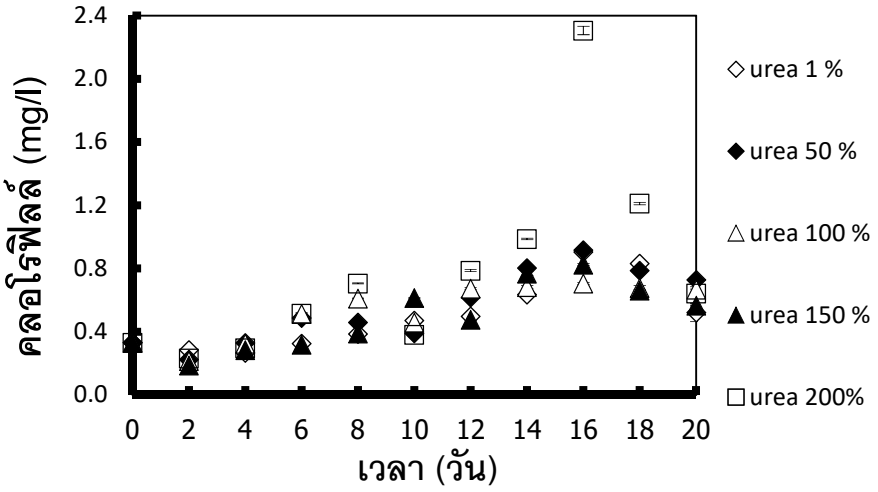
4.2.1 การศึกษาผลของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *botryococcus braunii*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % เท่ากับ 1.52 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 16 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.17)



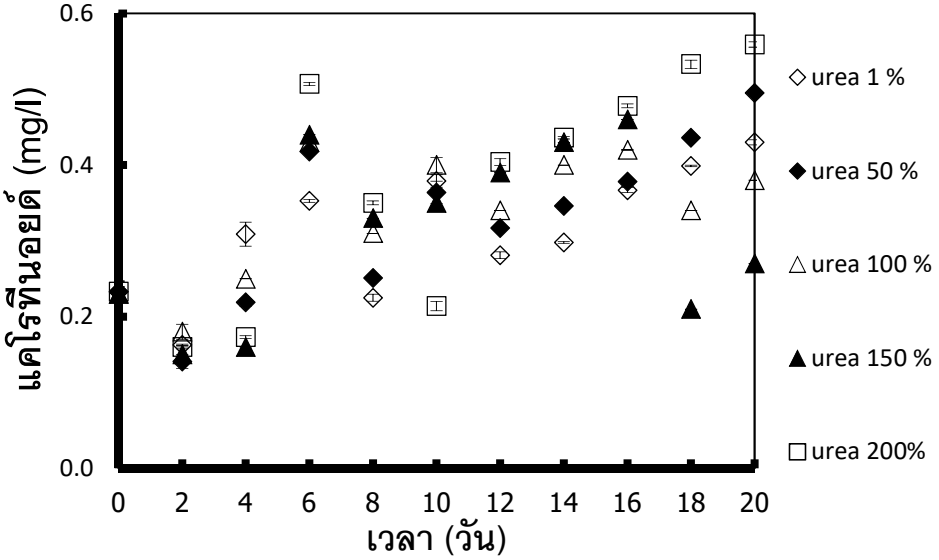
ภาพที่ 4.17 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *B. braunii* ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) เพิ่มมากขึ้น โดยอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงสุดเท่ากับ 2.31±0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.18)



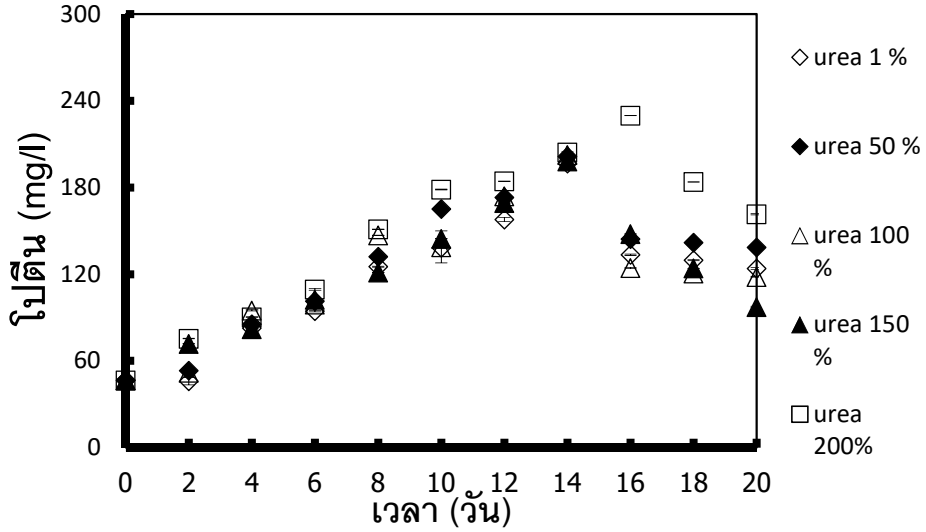
ภาพที่ 4.18 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *B. braunii* ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.56±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.19)

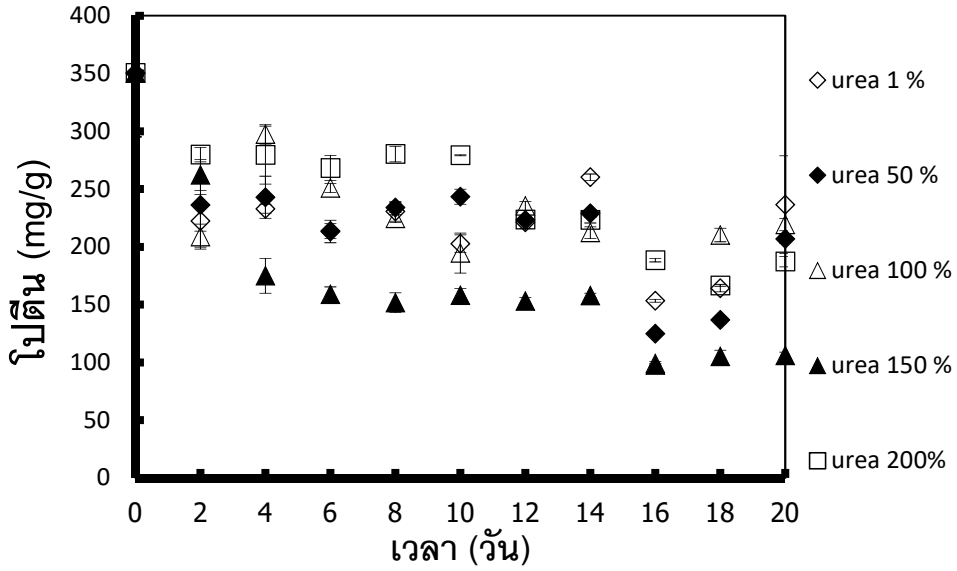


ภาพที่ 4.19 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *B. braunii* มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกชุดการทดลองโดยสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 229.77±0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติทุกชุดการทดลอง และ 350.37±55.19 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) (ภาพที่ 4.20-4.21)

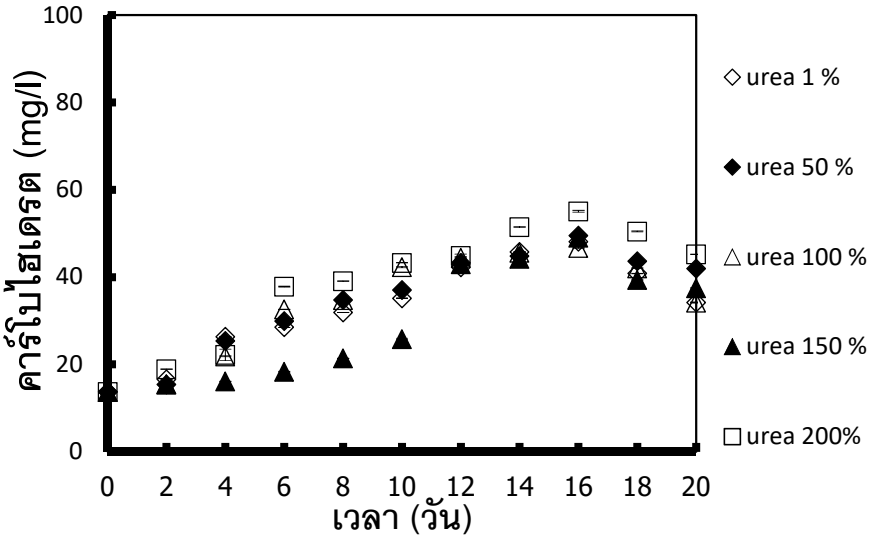


ภาพที่ 4.20 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

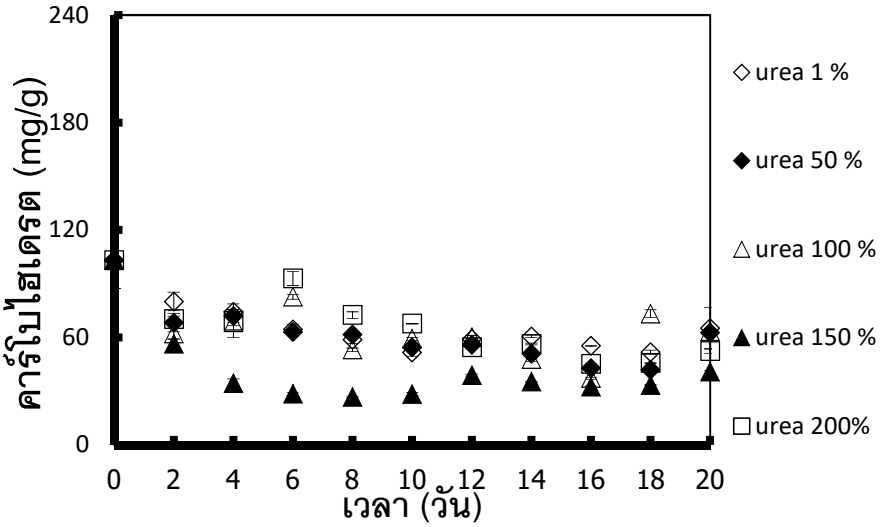


ภาพที่ 4.21 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่ายขนาดเล็ก *B. braunii* เลี้ยงในระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ทุกระดับความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดเมื่อเลี้ยงสาหร่ายที่ปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % เท่ากับ 55.10±0.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลองที่ และ 103.05±15.70 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.22-4.23)



ภาพที่ 4.22 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ



ภาพที่ 4.23 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

การสะสมไขมันของ *B. braunii* ภายใต้ความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายที่ระดับปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % ปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 47.07±0.51 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับทุกชุดการทดลองระดับปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % ผลผลิตน้ำมันมีค่าสูงสุดเมื่อเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % เท่ากับ 0.63±0.01 กรัมต่อลิตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดในชุดการทดลองที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % เท่ากับ 104.28±16.15 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยพบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ตารางที่ 4.5)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่ผันแปร 5 ระดับ 1-200 % โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมด (ภาพที่ 4.24) ซึ่งพบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้น พบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัว ปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกชุดการทดลองเท่ากับ 34.92 – 37.33 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 70.52 - 75.96 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 95.66 – 96.31 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.5 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรปุ๋ยการค้า (ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0)

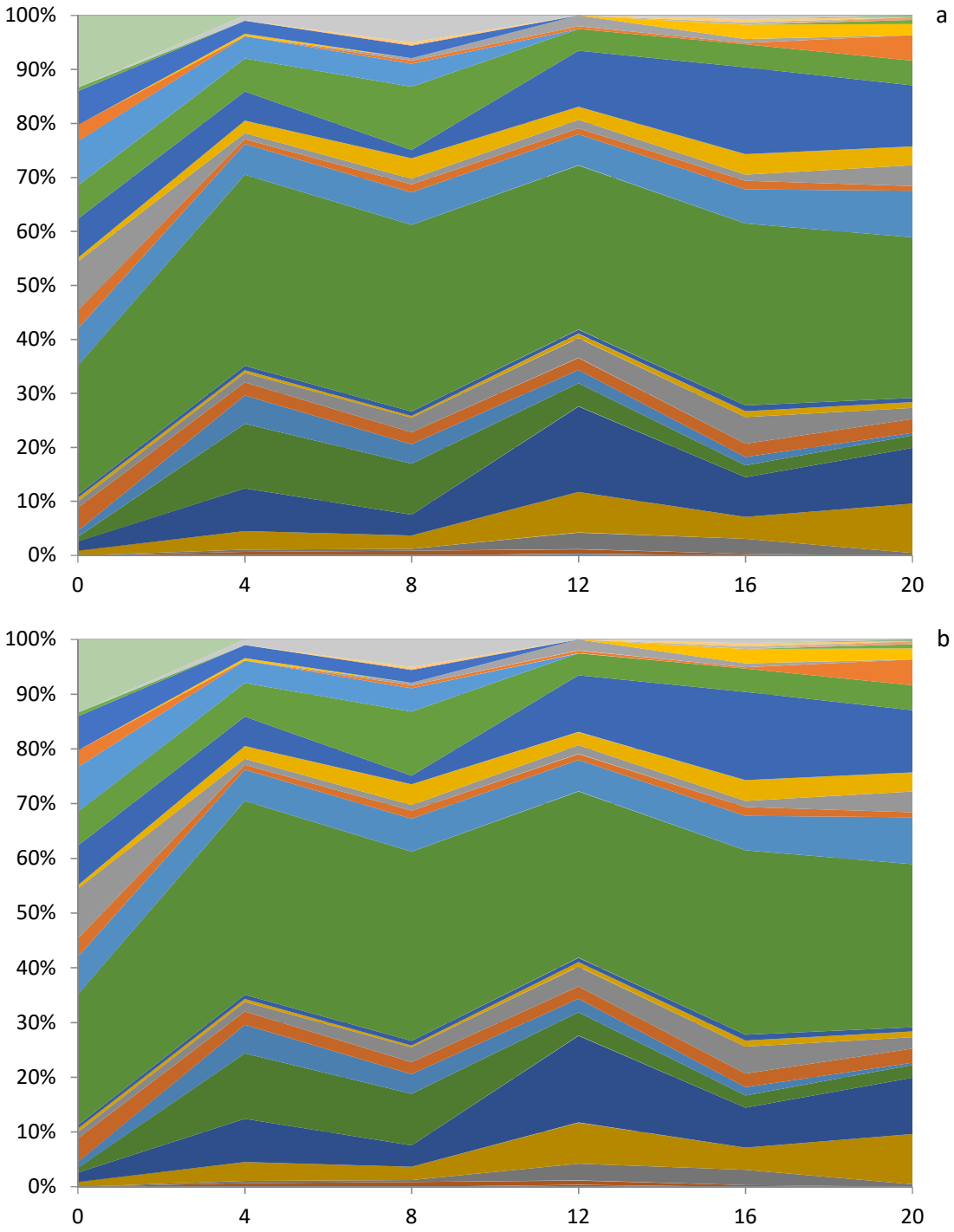
วัน ระดับความเข้มข้น	ผลผลิตน้ำมัน (mg/l)					ปริมาณน้ำมัน (%)				
	1%	50%	100%	150%	200%	1%	50%	100%	150%	200%
0	0.04 ± 0.04^{aA}	0.04 ± 0.01^{aA}	0.04 ± 0.01^{aA}	0.04 ± 0.01^{aA}	0.04 ± 0.01^{aA}	27.72 ± 0.94^{aA}	27.72 ± 0.94^{aA}	27.72 ± 0.94^{aA}	27.72 ± 0.94^{aA}	27.72 ± 0.94^{aA}
4	0.10 ± 0.00^{aB}	0.11 ± 0.01^{aB}	0.10 ± 0.00^{aB}	0.16 ± 0.01^{bB}	0.11 ± 0.01^{aB}	29.08 ± 0.82^{aA}	31.18 ± 0.76^{abB}	32.53 ± 1.11^{bcB}	33.87 ± 0.69^{cB}	34.04 ± 0.43^{cB}
8	0.20 ± 0.00^{aC}	0.21 ± 0.00^{aC}	0.24 ± 0.01^{bC}	0.3 ± 0.00^{cC}	0.20 ± 0.00^{aC}	36.57 ± 0.54^{aB}	36.83 ± 0.68^{aC}	37.10 ± 0.69^{aC}	37.23 ± 0.43^{aC}	37.50 ± 0.51^{aC}
12	0.27 ± 0.00^{aD}	0.30 ± 0.00^{bD}	0.29 ± 0.01^{bD}	0.43 ± 0.01^{dD}	0.33 ± 0.00^{cD}	37.90 ± 1.02^{aB}	38.16 ± 0.26^{aC}	38.95 ± 0.86^{aCD}	39.21 ± 0.90^{aCD}	39.58 ± 0.00^{aD}
16	0.34 ± 0.01^{aE}	0.47 ± 0.00^{bE}	0.51 ± 0.01^{cE}	0.63 ± 0.01^{dE}	0.51 ± 0.01^{cF}	38.83 ± 0.69^{aBC}	40.79 ± 0.26^{abD}	40.89 ± 0.50^{abD}	41.41 ± 0.66^{bD}	41.67 ± 0.95^{bE}
20	0.24 ± 0.04^{aCD}	0.29 ± 0.01^{aD}	0.24 ± 0.01^{aC}	0.42 ± 0.02^{bD}	0.41 ± 0.01^{bE}	41.22 ± 0.80^{aC}	43.09 ± 0.92^{abE}	44.41 ± 0.51^{bcE}	45.74 ± 0.75^{cdE}	47.07 ± 0.51^{dF}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

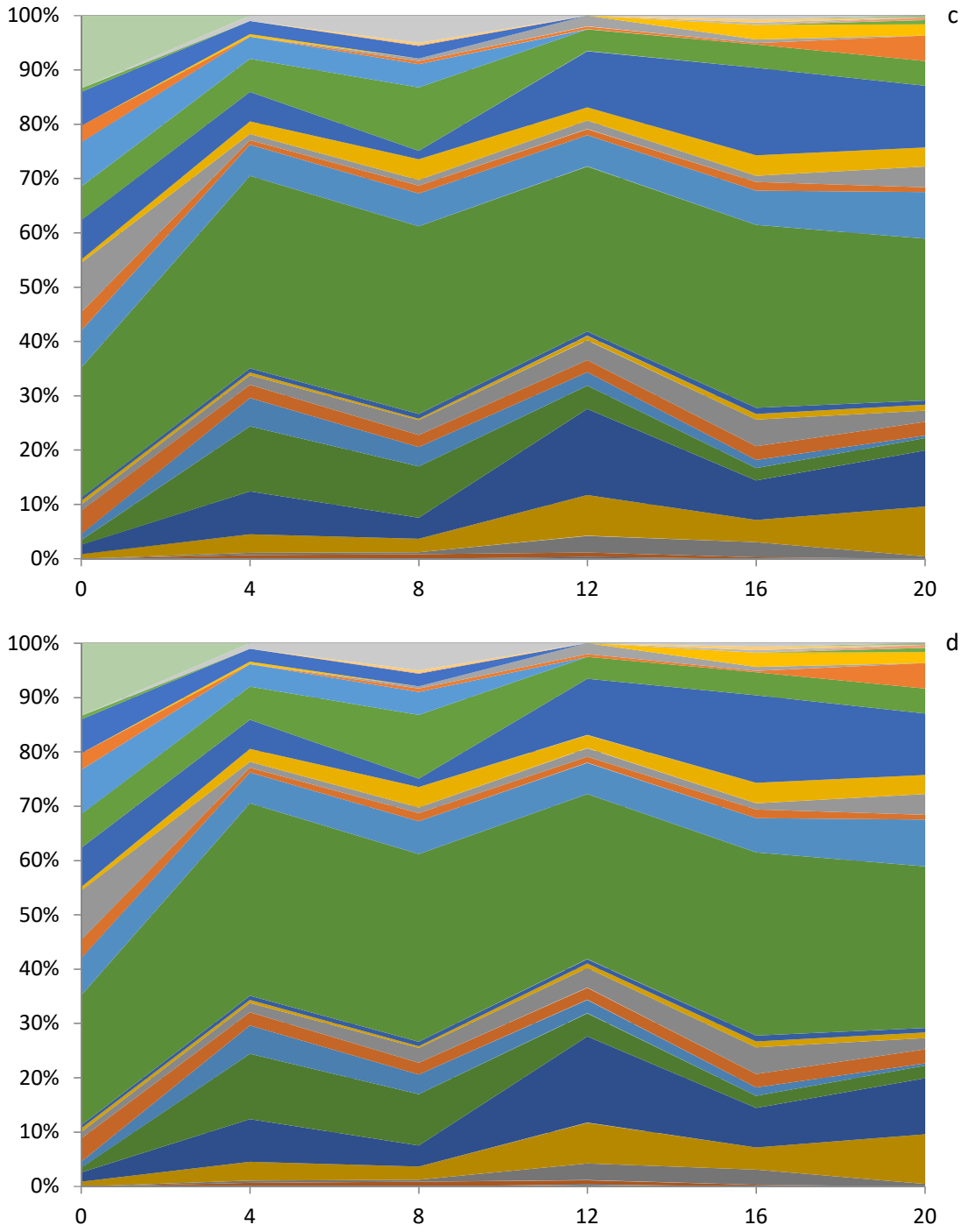
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรปุ๋ยการค้า (ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0)

วัน ระดับความเข้มข้น	กำลังการผลิตไขมัน (mg/l/d)					อัตราการเจริญเติบโต (1/day)				
	1%	50%	100%	150%	200%	1%	50%	100%	150%	200%
0	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}
4	68.10 ± 12.28^{aB}	91.07 ± 23.36^{aB}	66.59 ± 12.68^{aB}	104.28 ± 16.15^{aC}	73.07 ± 15.95^{aB}	0.24 ± 0.04^{aC}	0.30 ± 0.08^{aC}	0.21 ± 0.05^{aB}	0.31 ± 0.04^{aC}	0.21 ± 0.05^{aC}
8	62.28 ± 8.34^{aB}	71.10 ± 12.67^{aB}	72.18 ± 8.71^{aB}	81.76 ± 8.52^{aBC}	63.55 ± 8.47^{aB}	0.17 ± 0.02^{aBC}	0.19 ± 0.04^{aBC}	0.19 ± 0.02^{aB}	0.22 ± 0.02^{aB}	0.17 ± 0.02^{aBC}
12	58.70 ± 9.06^{aB}	57.86 ± 7.65^{aB}	57.27 ± 6.91^{aB}	68.07 ± 6.16^{aB}	58.82 ± 5.76^{aB}	0.15 ± 0.02^{aB}	0.15 ± 0.02^{aB}	0.15 ± 0.02^{aB}	0.17 ± 0.01^{aB}	0.15 ± 0.01^{aBC}
16	44.56 ± 4.15^{aB}	54.04 ± 4.31^{abB}	56.17 ± 4.02^{abB}	61.75 ± 4.00^{bB}	56.61 ± 4.44^{abB}	0.11 ± 0.01^{aB}	0.13 ± 0.01^{aB}	0.14 ± 0.01^{aB}	0.15 ± 0.01^{aB}	0.14 ± 0.01^{aB}
20	47.14 ± 3.92^{aB}	57.07 ± 4.72^{abB}	61.18 ± 5.08^{abB}	68.48 ± 5.50^{bB}	64.06 ± 5.45^{bB}	0.11 ± 0.01^{aB}	0.13 ± 0.01^{aB}	0.14 ± 0.01^{aB}	0.15 ± 0.01^{aB}	0.14 ± 0.01^{aB}

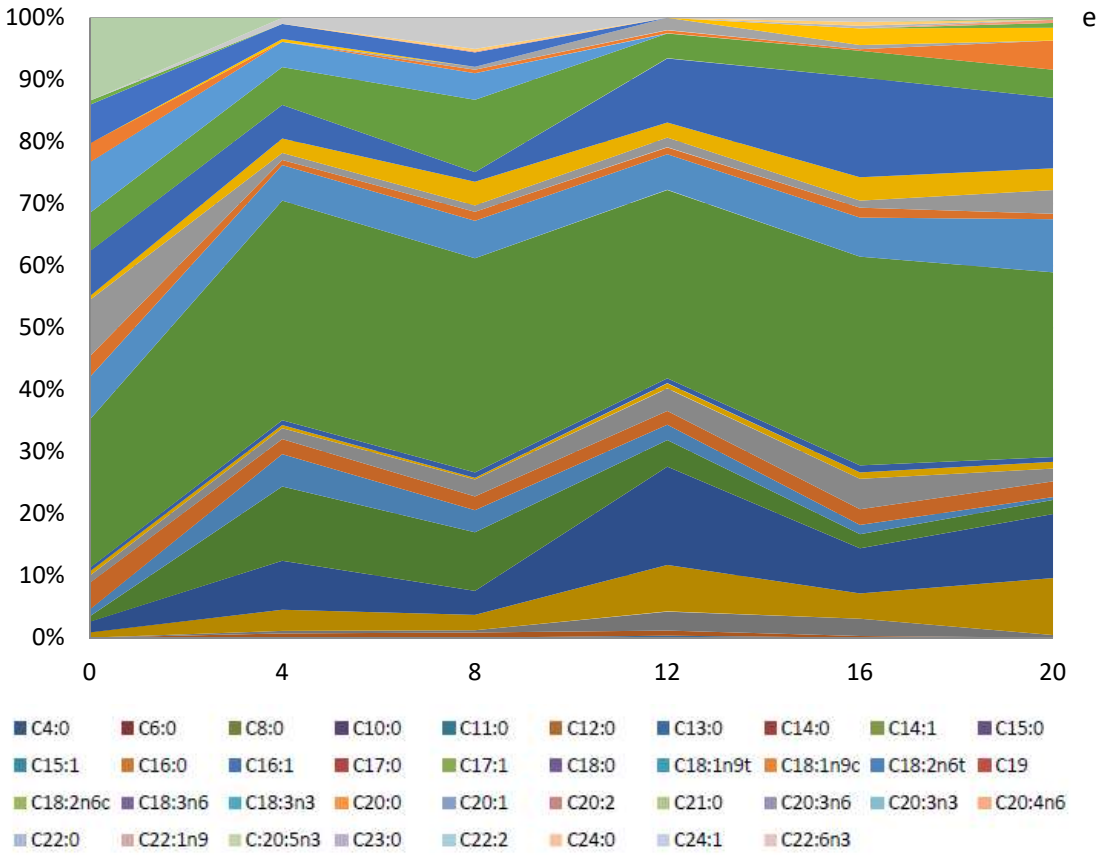
สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$



ภาพที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *B. braunii* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e)



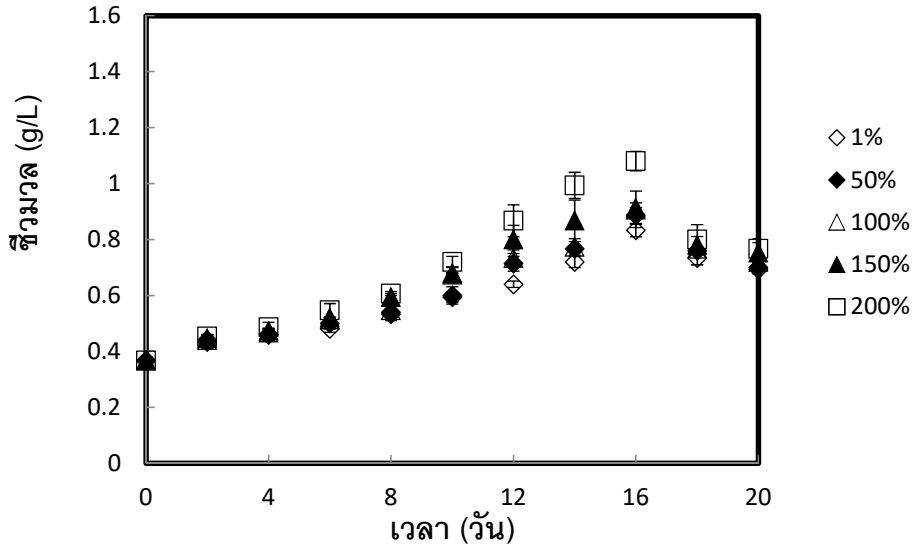
ภาพที่ 4.24 (ต่อ) เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *B. braunii* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e)



ภาพที่ 4.24 (ต่อ) เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *B. braunii* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e)

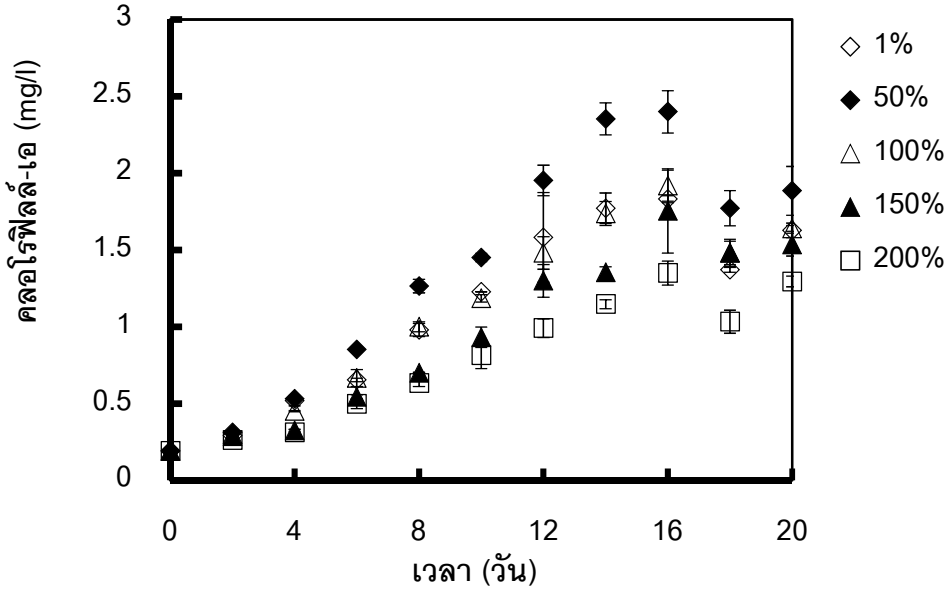
4.2.2 การศึกษาผลของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % เท่ากับ 1.08 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 16 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.25)



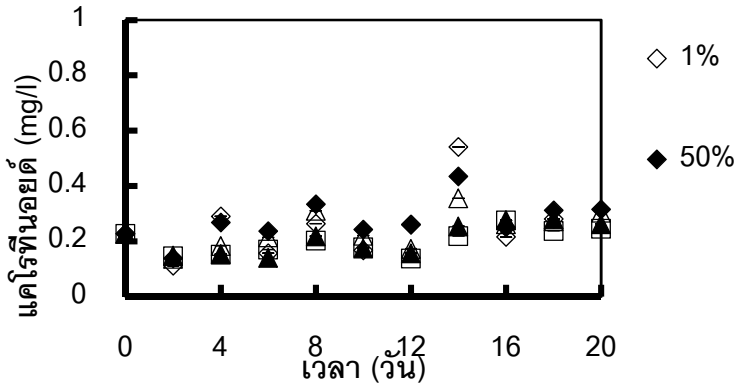
ภาพที่ 4.25 ชีวมวล (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) เพิ่มมากขึ้น โดยอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 50 % มีค่าคลอโรฟิลล์ เอ สูงสุดเท่ากับ 2.40±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.26)



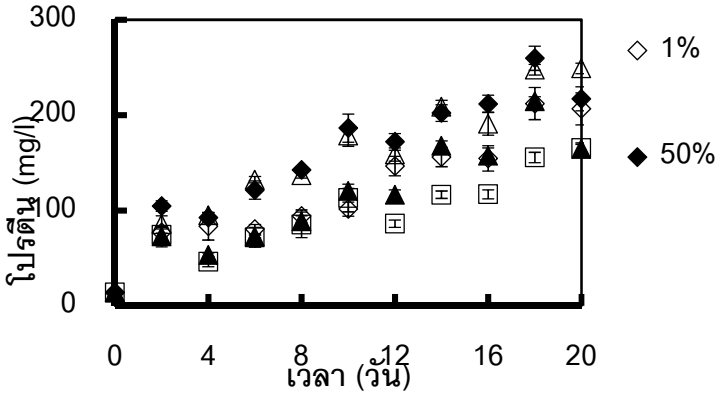
ภาพที่ 4.26 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 1 % มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.54±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.27)

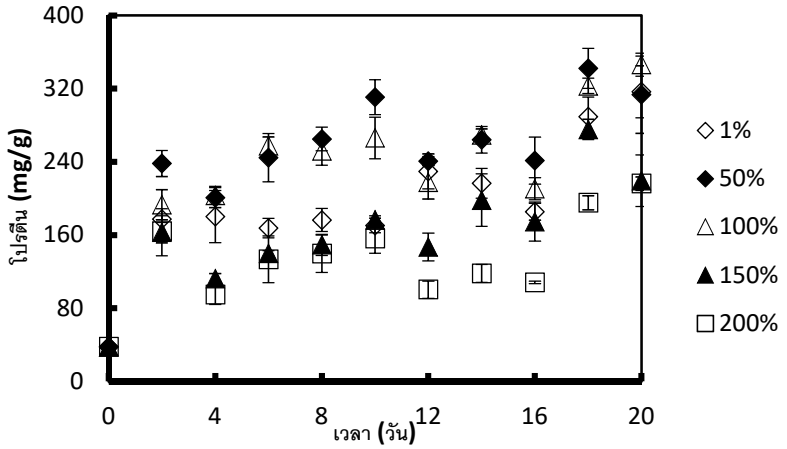


ภาพที่ 4.27 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *S. dimorphus* มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 50 % มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 259.56±12.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 1, 150 และ 200 % และ 346.31±12.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 20 ของการทดลอง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 1 และ 50 % (ภาพที่ 4.28-4.29)

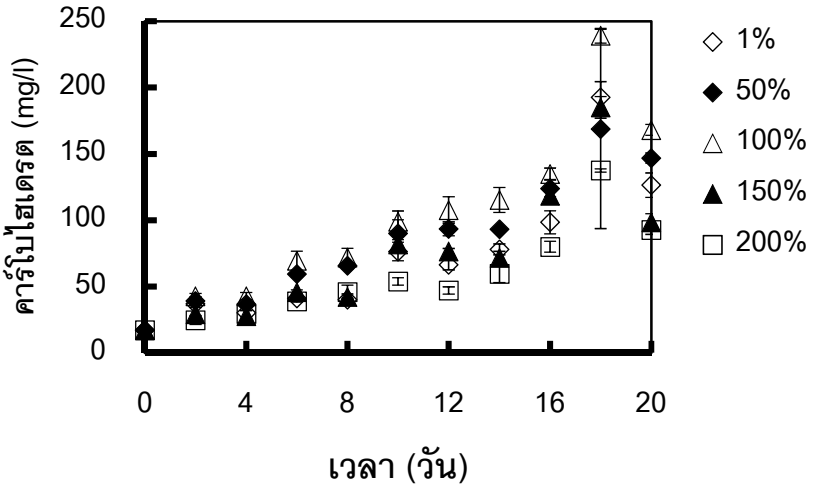


ภาพที่ 4.28 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

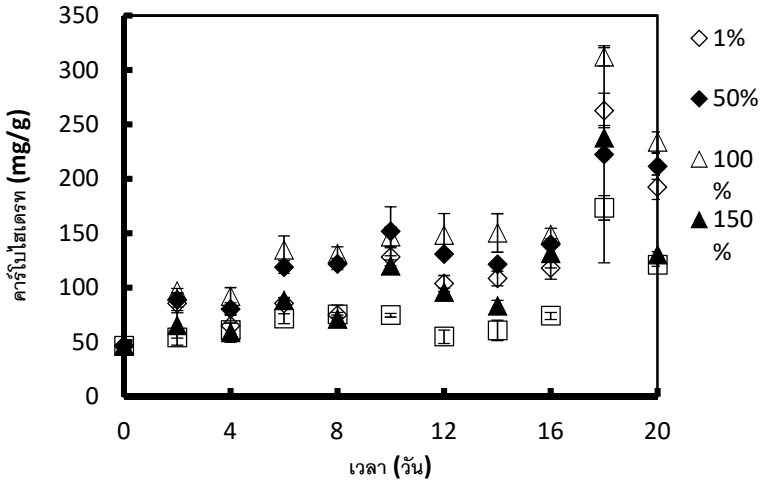


ภาพที่ 4.29 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกระดับความเข้มข้น โดยปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดเมื่อเลี้ยงสาหร่ายที่ปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 100 % เท่ากับ 239.16±5.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลองที่ และ 312.03±8.31 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 18 ของการทดลอง ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.30-4.31)



ภาพที่ 4.30 คาร์โบไฮเดรต (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ



ภาพที่ 4.31 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

การสะสมไขมันของ *S. dimorphus* ภายใต้ความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายที่ระดับปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % ปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 40.80±0.97 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง ผลผลิตน้ำมันค่าสูงสุดเท่ากับ 0.42±0.01 กรัมต่อลิตร เมื่อเลี้ยงสาหร่ายในอาหารที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกชุดการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดในชุดการทดลองที่มีปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % 36.28±3.67 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองที่ระดับปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 1,50 และ 100 % (ตารางที่ 4.6)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *S. dimorphus* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่ผันแปร 5 ระดับ 1-200 % โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมด (ภาพที่ 4.32) ซึ่งพบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้นพบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัว ปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกชุดการทดลองเท่ากับ 52.41 – 67.29 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 79.02 - 84.69 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 99.29 – 99.40 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.6 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

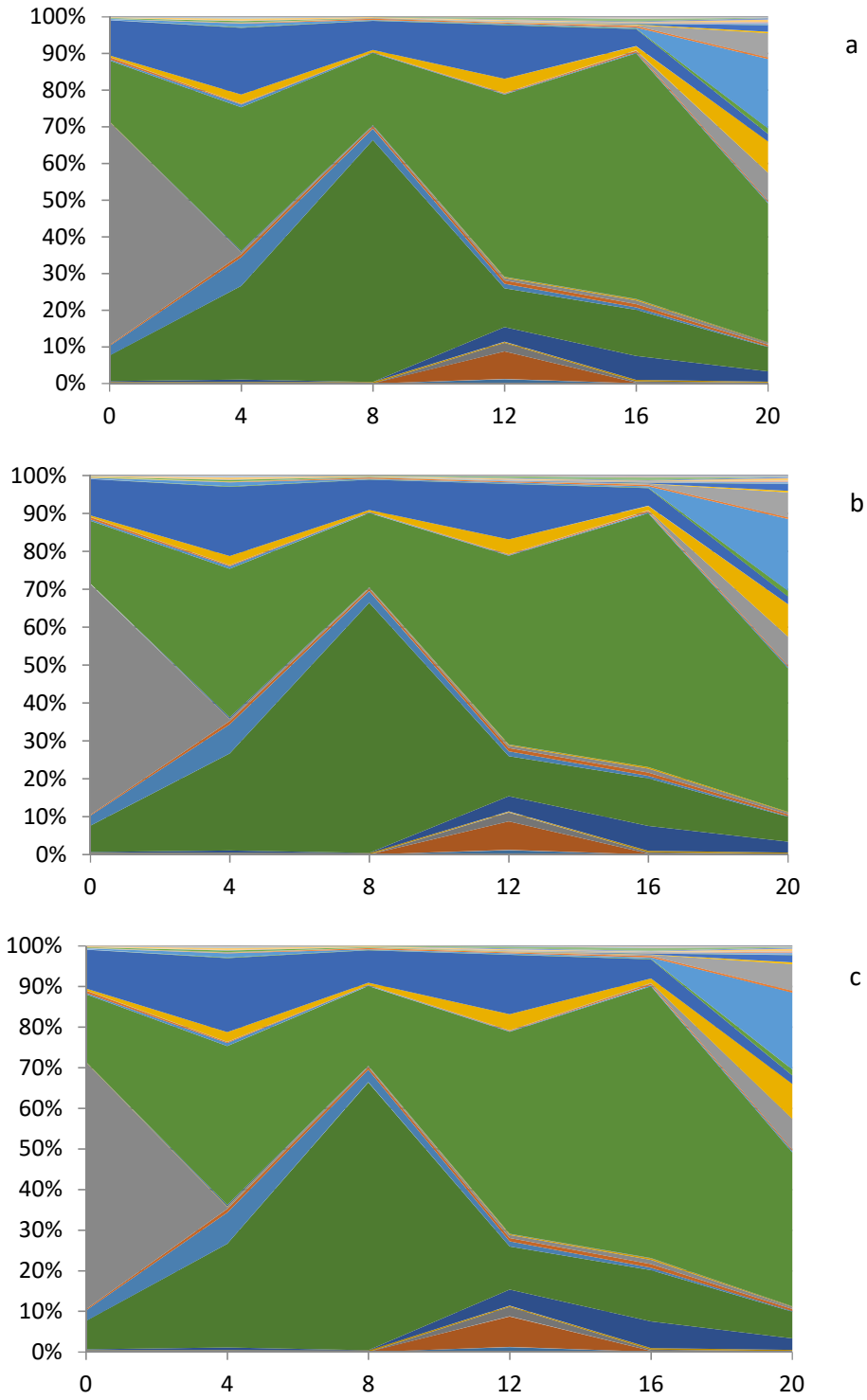
วัน/ระดับความเข้มข้น	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)					ปริมาณน้ำมัน (%)				
	1%	50%	100%	150%	200%	1%	50%	100%	150%	200%
0	0.12± 0.00^{aB}	0.12± 0.00^{aA}	0.12± 0.00^{aA}	0.12± 0.00^{aA}	0.12± 0.00^{aA}	31.87±0.39^{aE}	31.87±0.39^{aC}	31.87±0.39^{aCD}	31.87±0.39^{aCD}	31.87±0.39^{aB}
4	0.10±0.00^{aA}	0.09±0.00^{aA}	0.10±0.00^{aA}	0.10±0.00^{aA}	0.11±0.00^{bA}	20.69±0.55^{aA}	19.35±0.40^{aA}	20.74±0.38^{aA}	20.88±0.69^{aA}	24.12±0.44^{bA}
8	0.13±0.00^{aB}	0.12±0.00^{aA}	0.14±0.00^{bB}	0.14±0.00^{bB}	0.14±0.01^{bB}	23.08±0.81^{abB}	21.65±0.25^{aA}	26.84±0.89^{bB}	22.87±0.66^{abB}	22.45±1.12^{abA}
12	0.17±0.00^{aC}	0.19±0.01^{abB}	0.21±0.01^{bcC}	0.24±0.01^{cdC}	0.26±0.02^{dD}	27.96±0.84^{aC}	24.74±0.79^{aB}	31.05±1.37^{abC}	29.57±0.89^{abC}	32.42±0.79^{bB}
16	0.27±0.00^{aE}	0.31±0.02^{aC}	0.30±0.00^{aD}	0.29±0.02^{aD}	0.42±0.01^{bE}	31.91±0.59^{aE}	33.33±1.46^{aD}	32.78±0.53^{aE}	32.98±0.98^{aD}	40.80±0.97^{bC}
20	0.19±0.01^{aD}	0.21±0.01^{bB}	0.23±0.00^{bcC}	0.22±0.01^{bcC}	0.22±0.01^{bcC}	29.26±0.67^{aD}	29.12±0.72^{abC}	31.82±0.27^{bDE}	28.95±0.39^{bC}	27.66±0.59^{bB}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

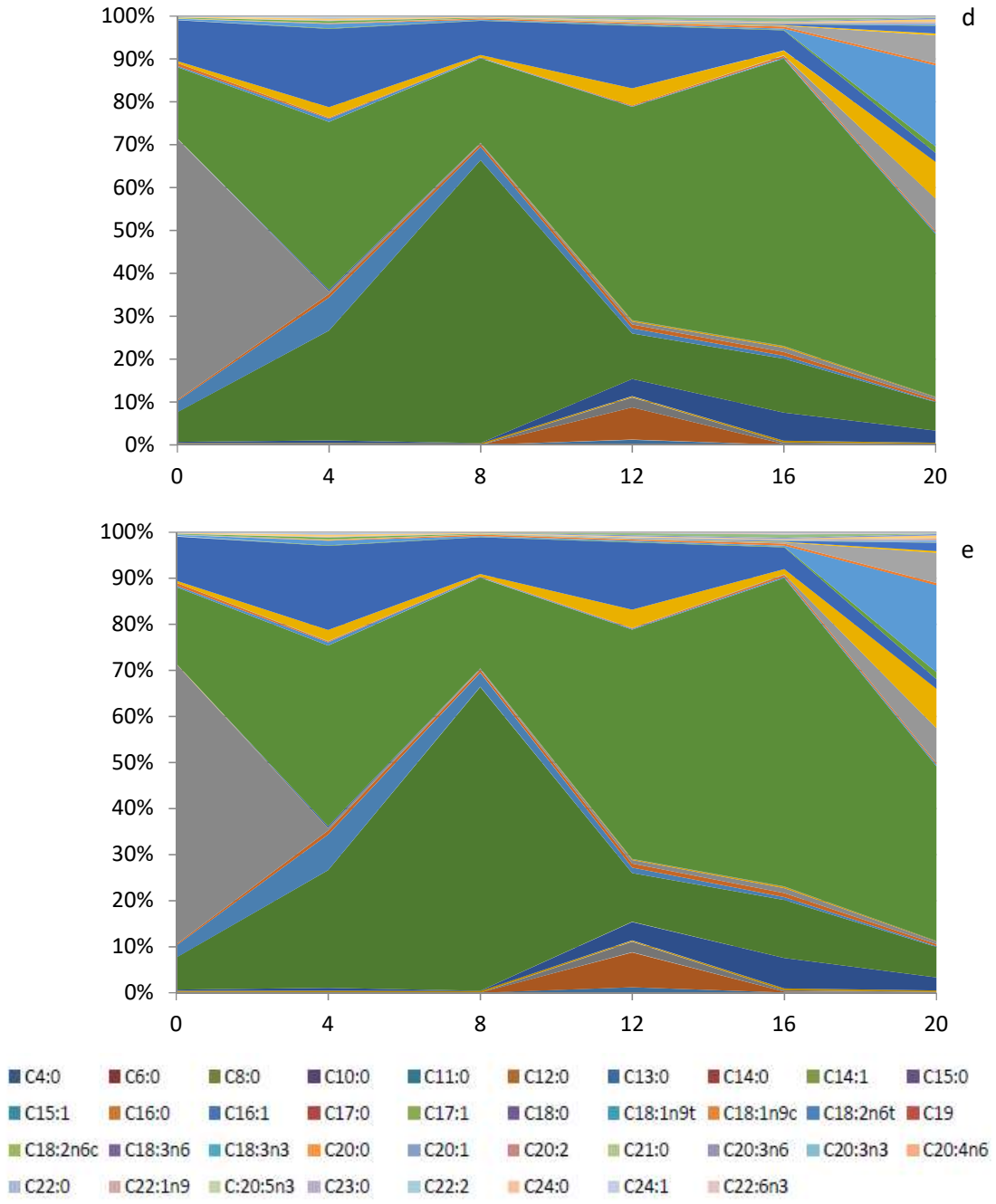
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

วัน/ระดับความเข้มข้น	กำลังการผลิตไขมัน (mg/l/d)					อัตราการเจิญเติบโตจำเพาะ (1/day)				
	1%	50%	100%	150%	200%	1%	50%	100%	150%	200%
0	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}
4	29.35 ±3.04^{aC}	27.16±2.39^{aC}	32.69±2.04^{aB}	33.46±2.71 ^{abCD}	40.604±1.33^{bD}	0.14±0.01^{aC}	0.14±0.01^{aC}	0.15±0.01^{abD}	0.16±0.01^{abD}	0.2±0.01^{bD}
8	20.17±1.54^{aB}	19.79±1.52^{aB}	27.48±3.71^{aB}	26.13±2.56 ^{aB}	25.231±2.69^{aB}	0.09 ±0.01^{aB}	0.09±0.01^{aB}	0.11±0.01^{aC}	0.11 ±0.01^{aBC}	0.11±0.01^{aCD}
12	23.43±0.67^{aB}	24.38±1.25^{aBC}	27.64±2.05^{abB}	36.28±3.67 ^{cdD}	33.645±1.45^{cC}	0.1±0.00^{aB}	0.10±0.00^{aB}	0.12±0.00^{abBC}	0.11±0.00^{cC}	0.08 ±0.00^{bcE}
16	24.80±1.12^{aB}	28.73±2.39^{abC}	27.03±1.19^{aB}	27.54±0.60 ^{aBC}	32.817±0.91^{bC}	0.08±0.00^{aB}	0.08±0.00^{aB}	0.08±0.00^{aB}	0.09±0.00^{aB}	0.09±0.00^{aB}
20	20.90±0.70^{aB}	24.41±1.08^{bBC}	27.45±0.16^{bB}	24.77±0.90 ^{bB}	27.312±1.40^{bB}	0.07 ±0.00^{aB}	0.1±0.00^{bB}	0.09±0.00^{bcBC}	0.09±0.00^{bB}	0.09±0.00^{cBC}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$



ภาพที่ 4.32 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus dimorphus* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e)



ภาพที่ 4.32 (ต่อ) เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่พบในสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus dimorphus* เมื่อเลี้ยงภายใต้ระดับความเข้มข้นปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ (1 % = a, 50 % = b, 100 % = c, 150 % = d, 200 % = e)

4.3. ศึกษาผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม ยูเรียร่วมกับเหล็ก และยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัส ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย

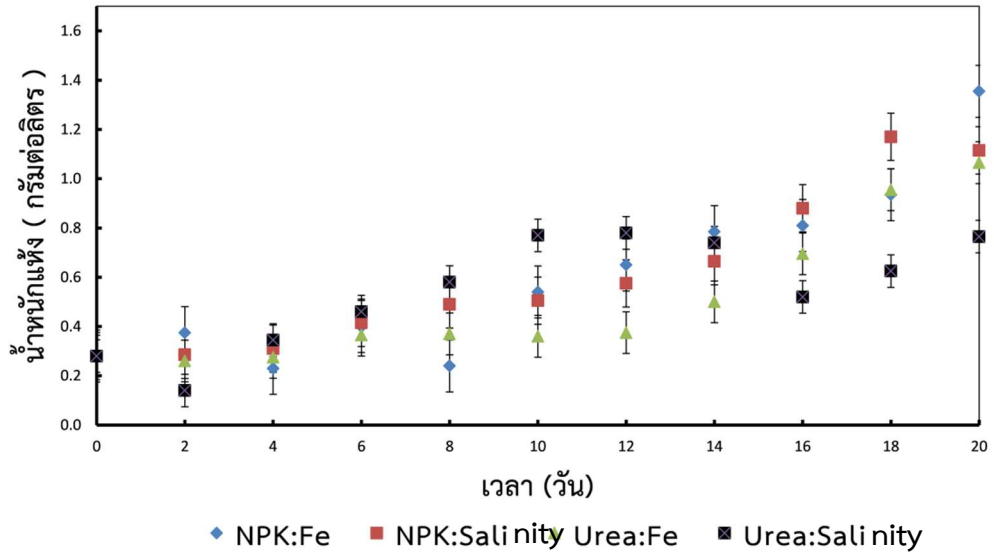
เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็มที่เหมาะสม (ทดสอบขั้นต้นและเลือกความเค็มที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**)** และ ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็กที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม **(**จากการทดสอบขั้นต้นและเลือกความเข้มข้นเหล็กที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**)** โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

เพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้งสองชนิด ในอาหารที่มีความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสม (ความเข้มข้นที่สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงที่สุด) ร่วมกับความเค็มที่เหมาะสม (ทดสอบขั้นต้นและเลือกความเค็มที่ทำให้สาหร่ายมีผลผลิตไขมันสูงสุด**),** ปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสมร่วมกับเหล็กที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม และปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสมร่วมกับฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยเพาะเลี้ยงในโหลแก้วขนาด 10 ลิตร นอกห้องปฏิบัติการ โดยให้แสง (พรางแสงประมาณ 50 %) และอุณหภูมิตามธรรมชาติ วิเคราะห์ปริมาณน้ำหนักแห้ง, คลอโรฟิลล์ เอ, แคโรทีนอยด์, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรท ทุก 2 วัน วิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอน ไขมันและชนิดกรดไขมันทุก 4 วัน ทำการเพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะ late exponential phase

4.3.1 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อสาหร่าย *B. brunii*

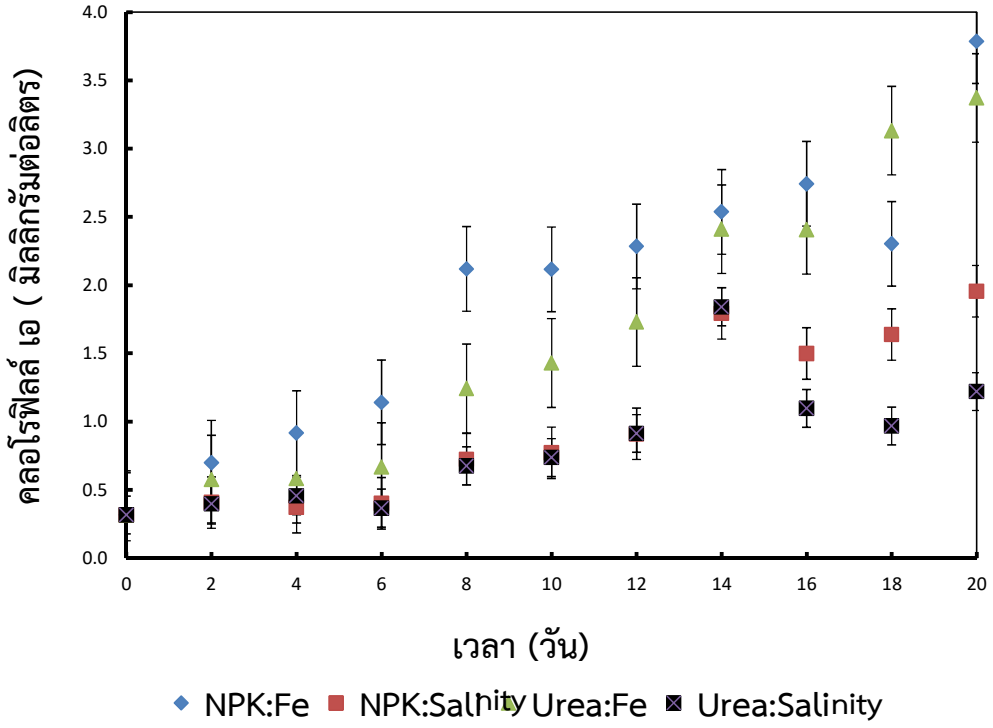
การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกันคือ ปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) ร่วมกับ เหล็ก, N:P:K ร่วมกับ ความเค็ม, ยูเรียร่วมกับเหล็ก และยูเรีย ร่วมกับความเค็ม เป็นเวลา 20 วัน เมื่อทำการพิจารณาพบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหาร (N:P:K) ร่วมกับเหล็ก มีผลผลิตชีวมวลที่สูงที่สุดคือ 1.36±0.24 กรัมต่อลิตร (0.136 เปอร์เซ็นต์) (ภาพที่ 4.33) โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยปุ๋ยสูตรอื่น โดยการเจริญเติบโตของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาของวันที่เลี้ยงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.7) พบว่าค่าชีวมวลของสาหร่าย *Botryococcus braunii* มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปุ๋ยสูตรการค้าประกอบไปด้วยธาตุอาหารหลัก 3 ชนิดคือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) โดยมีการผสมตามอัตราส่วนของ N:P:K โดยเทียบอัตราส่วนจากสูตรอาหารคลอเรลลา ปุ๋ยสูตรการค้าถูกนำมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายเนื่องจากมีธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบเรื่องต้นทุนที่ต่ำกว่าปุ๋ยสูตรมาตรฐานชนิดอื่นๆ โดยธาตุอาหารทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมพบว่ามีส่วนช่วยในเรื่องเป็นส่วนประกอบของสารสำคัญต่างๆในวัฏจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเจริญเติบโตได้แก่กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจของสาหร่าย ผลการทดลองสอดคล้องกับ Liu *et al.* (2008) กับการทดลองที่ว่าค่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเลี้ยงด้วยอาหารที่มีเหล็กมากขึ้น เนื่องจากเหล็กมีบทบาทหน้าที่ในการสังเคราะห์ด้วยแสงในการเคลื่อนย้ายอิเล็คตรอนและช่วยในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตเนื่องจากว่าผลผลิตที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดผลผลิตและถูกนำไปใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของเซลล์ทำให้เซลล์มีการเจริญเติบโต และมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Sasireka *et al.*

(2015) เหล็ก ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณชีวมวลของสาหร่ายที่ความเข้มข้นเหล็ก 50 μM มีปริมาณชีวมวลสูงที่สุด



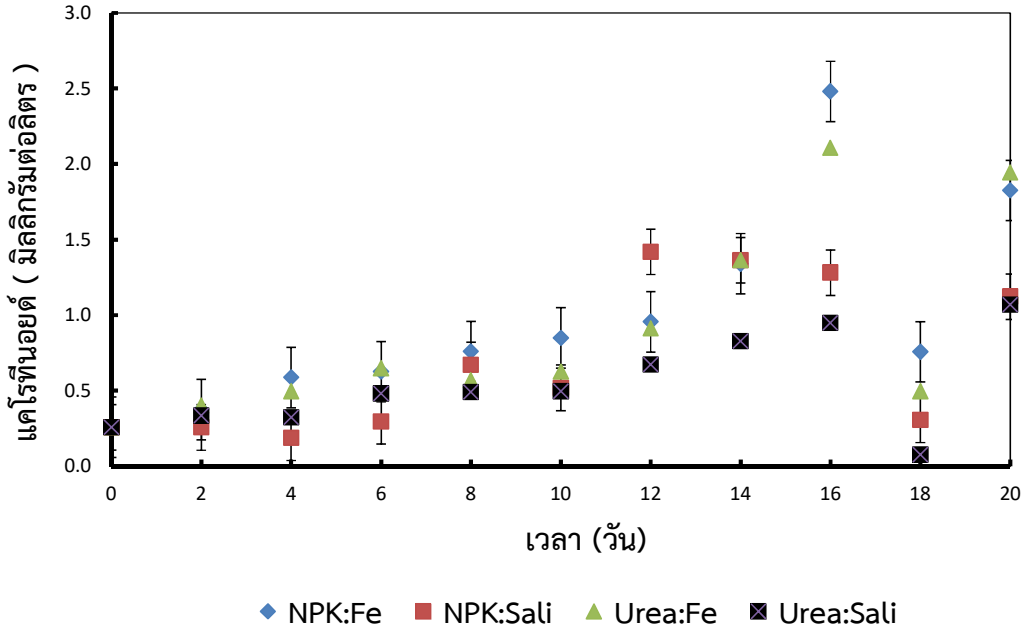
ภาพที่ 4.33 การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงและเริ่มเข้าสู่ระยะ Death phase ในวันที่ 16 ของการทดลองและพบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรยูเรียร่วมกับเหล็ก มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ 3.45±0.04 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 20 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.34) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการทดลองอาหารสูตรอื่นๆ ($p<0.05$) (ตารางที่ 4.8) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Yasmine *et al*. (2017) ได้ทดสอบเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Nannochloropsis gaditana* จากแหล่ง ไนโตรเจนต่างๆ เป็นระยะเวลา 12 วัน พบว่า NH_4Cl (Ammonium Chloride) นั้นให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่สูงที่สุดรองลงมาคือ CH_4N_2O (ยูเรีย) แต่เนื่องจากยูเรียนั้น เป็นแหล่งไนโตรเจนที่มีราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับแหล่งไนโตรเจนอื่นๆจึงเหมาะสมที่จะนำมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งธาตุเหล็กมีบทบาทในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของสาหร่ายโดยเหล็กมีผลกระตุ้นการทำงานของ Delta-Aminolevulinic acid ซึ่งทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ Koopman *et al.* (1980) พบว่าคลอโรฟิลล์มีประโยชน์ในด้านการกระตุ้นการทำงานของตับให้ดีขึ้นส่งเสริมเติบโตของเซลล์ ช่วยให้การขับถ่ายดีขึ้นเพราะคลอโรฟิลล์จะช่วยกระตุ้นการบีบรูดตัวของลำไส้ Herrera *et al.* (1989) และมีการใช้คลอโรฟิลล์เติมในนมสำหรับเด็กทารกและเด็กขาดสารอาหาร เจียมจิตต์ (2535) และน้ำคลอโรฟิลล์เป็นที่นิยมมากเพราะคลอโรฟิลล์มีรูปแบบเหมือนกับฮีโมโกลบินแตกต่างกันที่สารฮีโมโกลบินมีธาตุเหล็กเป็นศูนย์กลางส่วนคลอโรฟิลล์มีธาตุแมกนีเซียมเป็นศูนย์กลางสารนี้ให้พลังงานแก่เซลล์ คลอโรฟิลล์เป็นสารที่กำจัดพิษในร่างกายได้ดีทำให้การดูดซึมธาตุเหล็กดีขึ้นเพิ่มจำนวนเม็ดเลือดแดงต่อต้านสารพิษ



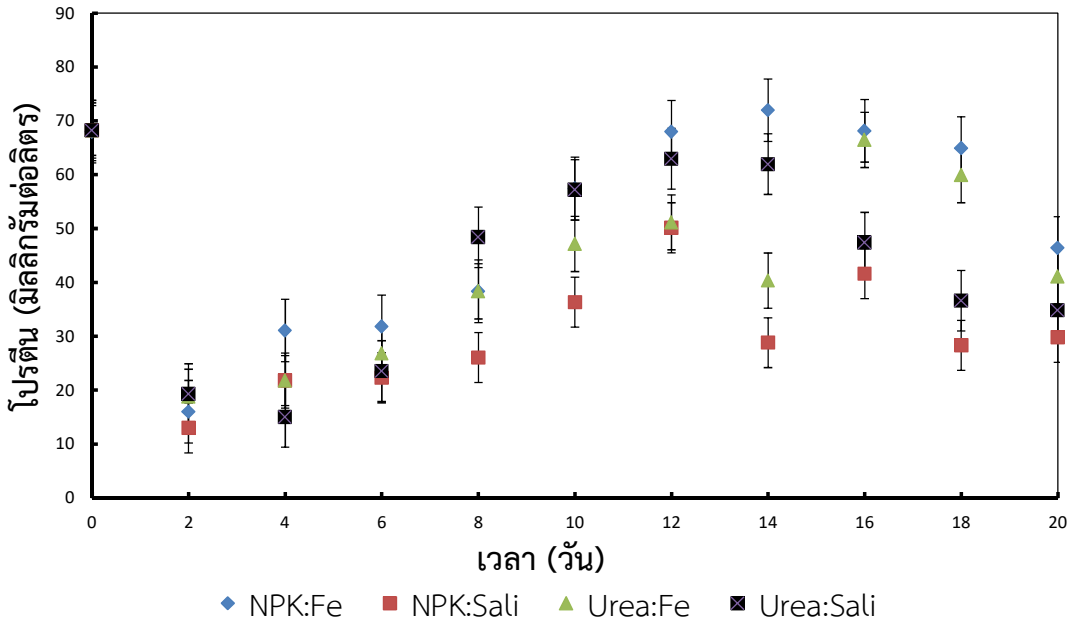
ภาพที่ 4.34 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น โดยพบปริมาณแคโรทีนอยด์มากที่สุดที่สูตรอาหาร N:P:K ร่วมกับเหล็ก โดยมีค่าเท่ากับ 2.48±0.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่16 ของการเพาะเลี้ยงโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสาหร่ายที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรยูเรียร่วมกับความเค็ม ($p<0.05$) (ภาพที่ 4.35, ตารางที่ 4.9) และจะเข้าสู่ระยะ Death phase ในวันที่ 18 ของการทดลองในทุกสูตรอาหารซึ่งผลการทดลองเป็นเช่นนี้เนื่องด้วยแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญเหล็ก มีส่วนช่วยทำให้รงควัตถุใน สาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 นั้นสูงขึ้นและปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลผลิตคือปริมาณไนโตรเจนเพราะมีหน้าที่หลักคือช่วยในการสังเคราะห์แสงสร้างรงควัตถุช่วยในกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ องค์ประกอบที่มีความสำคัญของแคโรทีนอยด์คือ astaxanthin Donkin (1976) ซึ่งนิยมใช้ astaxanthin เติมลงในอาหารสัตว์ทั้งสัตว์บกและสัตว์น้ำเพื่อที่จะทำให้สัตว์น้ำหรือผลผลิตจากสัตว์บกเช่นสีไข่แดง สีเนื้อหมูให้มีสีสันสวยงามและขายได้ในราคาสูง Johnson and Scrroeder (1995) และใช้ astaxanthin ทาที่ผิวของปูอัดทำให้ปูอัดมีสีแดงน่ารับประทาน เจียมจิตต์ (2535) นอกจากนี้ astaxanthin จากสาหร่ายมีคุณสมบัติในการเป็น antioxidant ที่สูง Kobayashi and Sakamoto (1999) สามารถป้องกันการเกิดโรคมะเร็งและเนื้องอกได้ Palozza and Krinsky (1992)



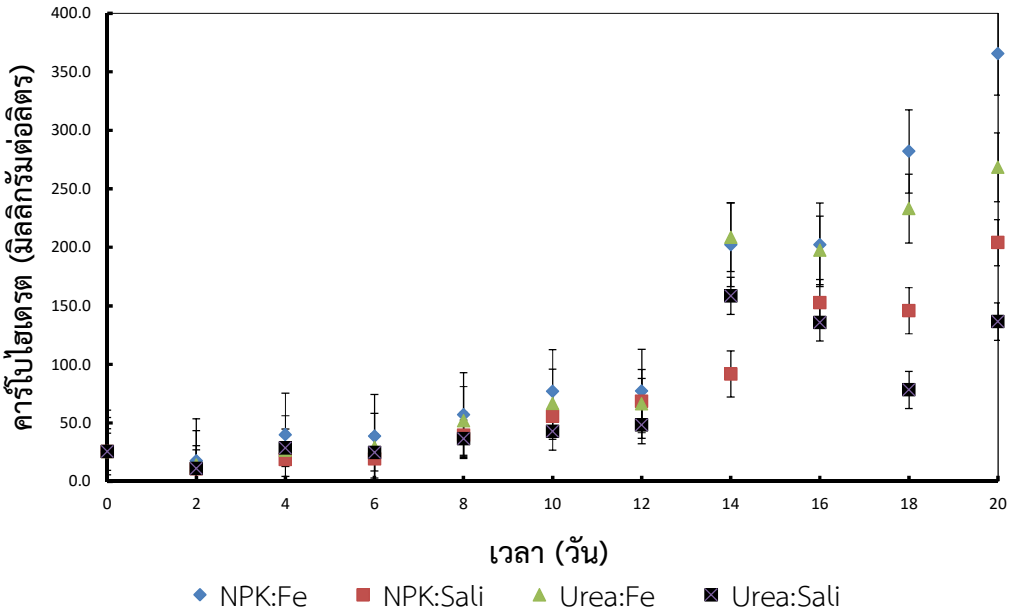
ภาพที่ 4.35 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงและจะเข้าสู่ระยะ Death phase ในวันที่ 18 ของการทดลองในทุกสูตรอาหาร สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหาร N:P:K ร่วมกับเหล็ก มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 71.99±0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 ของการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอาหารที่เลี้ยงสาหร่ายสูตรอื่นๆ ($p<0.05$) (ภาพที่ 4.36, ตารางที่ 4.10) **และพบว่า**จะเข้าสู่ระยะ Death phase ในวันที่ 16 ของการทดลองซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Subramaniyan Venkatesan *et al*. (2013) ทำการศึกษาผลของปุ๋ยสูตร K_2HPO_4 ต่อปริมาณโปรตีนที่ได้ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KM-104 ที่ช่วงความเข้มข้น 0.29 mM นั้นจะให้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด (ภาพที่ 2.14) และปริมาณโปรตีนจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดลองพบว่าธาตุอาหารที่ได้จากสูตรอาหาร (N:P:K) โดยธาตุอาหารทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมพบว่ามีส่วนช่วยในเรื่องเป็นส่วนประกอบของสารสำคัญต่างๆ ในวัฏจักรที่เกี่ยวข้องกบกระบวนการเจริญเติบโตได้แก่กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจของสาหร่ายอีกทั้งธาตุเหล็กมีบทบาทในเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและเมตตาบอลิซึมของสาหร่ายส่งผลทำให้เกิดโปรตีนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าโปรตีนที่ได้จากสาหร่ายสามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ Tararat *et al*. (2557) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella* sp. TISTR 8990 ที่ผ่านการสกัดไขมันโดยทำการหมักเศษเซลล์สาหร่ายกับจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนพบว่ามีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 86.30 มิลลิลิตร และการผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 1.92 มิลลิลิตร ในระยะเวลา 15 วัน เมื่อคิดเป็นสัดส่วนระหว่างก๊าซมีเทนต่อก๊าซชีวภาพโดยรวมที่ผลิตได้ในวันที่ 15 ของการหมักเท่ากับ 2.23 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.36 ปริมาณโปรตีนของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงและลดลงในช่วงวันที่ 16 ของการทดลอง และปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น**อย่าง**รวดเร็ว พบว่าสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตรอาหาร N:P:K ร่วมกับเหล็ก มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดเท่ากับ 365.50±23.90 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 20 ของการเพาะเลี้ยงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรอาหาร N:P:K ร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับความเค็ม ($P<0.05$) (ภาพที่ 4.37, ตารางที่ 4.11) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Subramaniyan Venkatesan *et al.* (2013) ศึกษา K_2HPO_4 ต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ได้ของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KM-104 ที่ช่วงความเข้มข้น 0.63 mM กลับพบว่าให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดในช่วงท้ายๆ ซึ่งทุกความเข้มข้นนั้นต่างก็มีแนวโน้มทิศทางเดียวกัน คาร์โบไฮเดรตนั้นจะเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีผลต่อการนำไปผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ผลจากการศึกษาจะพบว่าธาตุเหล็กนั้นมีบทบาทต่อปริมาณคาร์โบไฮเดรตเนื่องจากธาตุเหล็กมีบทบาทในเรื่องการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นกระบวนการที่ทำให้สาหร่ายสร้างคาร์โบไฮเดรตซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณไขมันที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยถ้าปรับปริมาณเหล็กมากเกินความจำเป็นจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมของไขมันทำให้สาหร่ายเกิดความเครียดเซลล์สาหร่ายจะปรับเปลี่ยนรูปแบบการสะสมอาหารจากคาร์โบไฮเดรตเป็นไขมันซึ่งสามารถนำไปเป็นแหล่งของการผลิตไบโอเอทานอลโดยสามารถสร้างคาร์โบไฮเดรตแทนที่จะเป็นไขมันสำรองจึงเหมาะสำหรับการผลิตไบโอเอทานอลเป็นคาร์โบไฮเดรตจากสาหร่ายสามารถสกัดเพื่อผลิตหมักได้น้ำตาลมีการประมาณว่าสามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุด 15,000 แกลอน / เอเคอร์ / ปี Cheryl. (2008)



ภาพที่ 4.37 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารที่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.7 การเจริญเติบโตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	2	4	6	8	10
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.28±0.02^{cA}	0.375±0.04^{cA}	0.23±0.06^{cA}	0.4±0.03^{cA}	0.24±0.05^{cA}	0.54±0.02^{bcAB}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.28±0.02^{efA}	0.29±0.04^{defAB}	0.31±0.08^{defA}	0.12±0.04^{fB}	0.49±0.02^{efA}	0.73±0.14^{cdA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.28±0.02^{aA}	0.26±0.03^{aAB}	0.27±0.02^{aA}	0.37±0.11^{aAB}	0.37±0.02^{aA}	0.26±0.10^{aB}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.28±0.02^{aA}	0.14±0.05^{aB}	0.34±0.12^{aA}	0.16**±0.04**^{aAB}	0.58±0.42^{aA}	0.77±0.09^{aA}

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) การเจริญเติบโตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)				
	12	14	16	18	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.65±0.04^{bcA}	0.39±0.12^{cA}	0.81±0.15^{bA}	0.94±0.09^{bA}	1.36±0.24^{aA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.57±0.10^{deA}	0.67±0.02^{cdA}	0.88±0.16^{abcC}	1.17±0.19^{aA}	1.12±0.06^{abA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.37±0.09^{aA}	0.50±0.11^{aA}	0.70±0.07^{aA}	0.96±0.31^{aA}	1.07±0.23^{aA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.78±0.48^{aA}	0.74±0.09^{aA}	0.52±0.12^{aA}	0.63±0.09^{aA}	0.77±0.18^{aA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	2	4	6	8	10
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.32 ± 0.00^{gA}	0.70 ± 0.07^{eA}	0.92 ± 0.11^{efA}	1.14 ± 0.03^{eA}	2.12 ± 0.12^{dA}	2.12 ± 0.05^{dA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.32 ± 0.00^{eA}	0.41 ± 0.08^{eB}	0.37 ± 0.02^{eB}	0.41 ± 0.01^{dC}	0.72 ± 0.06^{dC}	0.78 ± 0.03^{dC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.37 ± 0.00^{hA}	0.58 ± 0.07^{hgAB}	0.58 ± 0.07^{hgB}	0.67 ± 0.06^{gB}	1.24 ± 0.12^{fB}	1.43 ± 0.12^{fB}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.32 ± 0.00^{fA}	$0.390.04^{fB}$	0.46 ± 0.05^{fB}	0.37 ± 0.05^{fC}	0.68 ± 0.02^{eC}	0.74 ± 0.03^{eC}

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)				
	12	14	16	18	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	2.29 ± 0.02^{dA}	2.54 ± 0.02^{bcA}	3.74 ± 0.03^{aA}	2.30 ± 0.11^{cdB}	3.79 ± 0.30^{aA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.91 ± 0.02^{dC}	1.79 ± 0.04^{abB}	1.50 ± 0.07^{cB}	1.64 ± 0.13^{bcC}	1.95 ± 0.08^{aC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	1.73 ± 0.02^{eB}	2.41 ± 0.02^{dA}	2.81 ± 0.05^{cA}	3.13 ± 0.03^{bA}	3.45 ± 0.04^{aB}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.92 ± 0.04^{dC}	1.84 ± 0.04^{aB}	1.10 ± 0.04^{cC}	0.97 ± 0.04^{cdD}	1.22 ± 0.04^{bD}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคโรทีนอยด์ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	2	4	6	8	10
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.26 ± 0.00^{fA}	0.38 ± 0.01^{efA}	0.59 ± 0.02^{efA}	0.63 ± 0.02^{defA}	0.76 ± 0.15^{defA}	0.85 ± 0.85^{deA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.26 ± 0.00^{dA}	0.26 ± 0.04^{dB}	0.19 ± 0.03^{dB}	0.29 ± 0.02^{dC}	0.67 ± 0.06^{cA}	0.52 ± 0.04^{cC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.26 ± 0.00^{dA}	0.40 ± 0.03^{dA}	0.49 ± 0.06^{dA}	0.65 ± 0.01^{dA}	0.56 ± 0.01^{dA}	0.63 ± 0.01^{dB}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.25 ± 0.00^{eA}	0.34 ± 0.01^{eAB}	0.32 ± 0.07^{eB}	0.49 ± 0.02^{dB}	0.49 ± 0.04^{dA}	0.49 ± 0.01^{dC}

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ปริมาณแคโรทีนอยด์ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในกาเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)				
	12	14	16	18	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.96 ± 0.01^{cdB}	1.34 ± 0.00^{cA}	2.48 ± 0.33^{aA}	0.76 ± 0.02^{defA}	1.83 ± 0.04^{bB}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	1.41 ± 0.00^{aA}	1.36 ± 0.01^{aA}	1.28 ± 0.08^{aAB}	0.30 ± 0.04^{dBC}	1.12 ± 0.02^{bC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.91 ± 0.01^{cdC}	1.36 ± 0.01^{bcA}	2.10 ± 0.51^{aAB}	0.49 ± 0.14^{dAB}	1.94 ± 0.01^{abA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.67 ± 0.00^{cD}	0.83 ± 0.01^{bB}	0.95 ± 0.07^{bB}	0.08 ± 0.01^{aC}	1.07 ± 0.05^{aC}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณโปรตีนในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.)

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	2	4	6	8	10
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	67.97 ± 0.25^{abA}	16.01 ± 0.65^{fAB}	31.07 ± 1.20^{eA}	31.8 ± 1.03^{edA}	38.35 ± 2.02^{eA}	57.43 ± 1.55^{cA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	68.23 ± 0.29^{aA}	13.01 ± 0.65^{fB}	21.79 ± 3.34^{dfB}	22.30 ± 0.48^{dfC}	26.06 ± 2.76^{deA}	36.35 ± 1.20^{cdC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	68.23 ± 0.29^{aA}	18.78 ± 0.86^{eA}	21.79 ± 1.90^{eB}	26.81 ± 0.48^{eB}	38.36 ± 2.76^{cdA}	47.14 ± 1.20^{bcB}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	68.22 ± 0.29^{aA}	19.28 ± 1.11^{fA}	15.01 ± 0.29^{fB}	23.55 ± 0.41^{fC}	48.39 ± 3.94^{bcB}	57.18 ± 2.91^{abA}

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) ปริมาณโปรตีนในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.)

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	12	14	16	18	20	12
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	67.97 ± 0.48^{abA}	71.99 ± 0.63^{aA}	48.14 ± 1.56^{cdAB}	64.96 ± 5.87^{abA}	46.39 ± 5.69^{cdA}	67.97 ± 0.48^{abA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	50.15 ± 1.86^{bC}	28.82 ± 0.48^{deD}	41.62 ± 2.05^{bcB}	28.32 ± 7.40^{deB}	29.82 ± 0.95^{deA}	50.15 ± 1.86^{bC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	51.16 ± 0.65^{bcC}	40.36 ± 1.50^{cdC}	66.47 ± 5.82^{aA}	59.94 ± 5.96^{abA}	41.12 ± 6.10^{cdA}	51.16 ± 0.65^{bcC}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	62.95 ± 1.80^{abA}	61.95 ± 2.76^{abB}	47.39 ± 9.13^{bcAB}	36.60 ± 6.05^{cdB}	34.84 ± 2.02^{cdeA}	62.95 ± 1.80^{abA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.)

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)				
	0	2	4	6	8
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	25.31 ± 0.07^{eA}	17.67 ± 1.79^{eA}	39.79 ± 1.70^{deA}	38.59 ± 3.23^{deA}	57.05 ± 4.50^{deA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	25.31 ± 0.07^{eA}	10.75 ± 0.59^{eB}	18.63 ± 0.47^{eC}	19.12 ± 0.09^{eC}	39.23 ± 2.13^{eC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	25.30 ± 0.07^{dA}	13.96 ± 0.92^{fAB}	26.66 ± 2.19^{dB}	28.91 ± 0.14^{dB}	51.64 ± 0.03^{dB}
เรียร่วมกับความเค็ม	25.30 ± 0.07^{eA}	10.99 ± 0.76^{fB}	28.63 ± 0.93^{eB}	24.69 ± 0.22^{eBC}	36.46 ± 0.63^{eBC}

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในการเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน (mg/L.)

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)				
	12	14	16	18	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	77.2 ± 0.25^{dA}	202.25 ± 0.21^{cA}	202.14 ± 1.73^{cA}	281.94 ± 17.85^{bA}	365.50 ± 23.90^{aA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	68.33 ± 1.45^{dC}	91.88 ± 4.64^{cC}	152.77 ± 1.89^{bC}	145.84 ± 15.36^{bB}	204.04 ± 4.18^{aBC}
เรียร่วมกับเหล็ก	66.11 ± 0.14^{cB}	208.66 ± 0.08^{aA}	197.38 ± 0.46^{bA}	233.02 ± 3.14^{eA}	268.35 ± 31.90^{dA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	48.01 ± 0.14^{dB}	158.50 ± 0.31^{aB}	135.74 ± 0.52^{bB}	78.14 ± 1.57^{cC}	136.55 ± 3.40^{bB}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณไขมันในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	4	8	12	16	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	19.25 ± 0.29^{abB}	19.79 ± 0.43^{abB}	23.38 ± 2.19^{aAB}	22.38 ± 0.28^{abB}	20.74 ± 0.92^{abB}	18.58 ± 0.63^{bB}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	19.25 ± 0.29^{cB}	0.09 ± 0.02^{aC}	0.05 ± 0.01^{abB}	0.13 ± 0.02^{bcC}	0.19 ± 0.03^{bcBC}	0.23 ± 0.01^{cC}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	20.30 ± 0.30^{cAB}	22.50 ± 0.88^{cA}	16.19 ± 0.71^{dB}	35.66 ± 0.78^{aA}	26.30 ± 1.52^{bAB}	23.28 ± 0.86^{abA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	20.55 ± 0.31^{aA}	11.43 ± 0.58^{aA}	16.67 ± 2.27^{aB}	20.72 ± 0.70^{aB}	30.52 ± 1.55^{aA}	20.51 ± 0.42^{aB}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.13 ผลผลิตไขมัน (Lipid yield) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	4	8	12	16	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.05 ± 0.00^{A}	0.04 ± 0.01^{aA}	0.06 ± 0.01^{aA}	12	16	20
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.05 ± 0.00^{A}	0.09 ± 0.02^{aA}	0.05 ± 0.01^{aA}	0.15 ± 0.02^{aA}	0.18 ± 0.03^{aA}	0.24 ± 0.05^{aA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.06 ± 0.00^{A}	0.04 ± 0.02^{aA}	0.14 ± 0.04^{aA}	0.13 ± 0.02^{aA}	0.19 ± 0.03^{aA}	0.23 ± 0.01^{aA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.06 ± 0.00^{A}	0.04 ± 0.01^{aA}	0.12 ± 0.10^{aA}	0.14 ± 0.04^{aA}	0.18 ± 0.02^{aA}	0.25 ± 0.06^{aA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.14 กำลังการผลิตไขมัน (Lipid Productivity) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	4	8	12	16	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.00±0.00	3.76±1.77^{aA}	3.13±1.01^{aA}	2.78±0.53^{aB}	2.27±0.37^{aB}	2.54±0.24^{aA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.00±0.00	3.91±0.75^{aA}	4.77±0.80^{aA}	6.39±0.33^{aA}	3.43±0.48^{aAB}	3.38±0.32^{aA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.00±0.00	3.33±0.73^{aA}	2.21±0.54^{aA}	4.16±0.70^{aA}	2.84±0.13^{aB}	3.36±0.36^{aA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.00±0.00	3.49±0.19^{aA}	4.25±1.66^{aA}	4.60±0.62^{aA}	5.17±0.73^{aA}	3.59±0.33^{aA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.15 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	4	8	12	16	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.00±0.00	0.19±0.08^{aA}	0.13±0.04^{abA}	0.12±0.02^{abA}	0.14±0.02^{abA}	0.14±0.00^{abA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.00±0.00	0.14±0.03^{aA}	0.17±0.03^{aA}	0.19±0.03^{aA}	0.15±0.02^{aA}	0.17±0.02^{aA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.00±0.00	0.15±0.03^{aA}	0.13±0.03^{aA}	0.12±0.02^{aA}	0.11±0.01^{aA}	0.14±0.01^{aA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.00±0.00	0.31±0.03^{aA}	0.23±0.06^{aA}	0.22±0.03^{aA}	0.17±0.02^{aA}	0.18±0.02^{aA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.16 น้ำหนักชีวมวล (Biomass) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

สูตรอาหาร	เวลา (วัน)					
	0	4	8	12	16	20
N:P:K ร่วมกับเหล็ก	0.28 ± 0.02^{cA}	0.23 ± 0.06^{cA}	0.24 ± 0.05^{cA}	0.65 ± 0.04^{bcA}	0.81 ± 0.15^{bA}	1.36 ± 0.24^{aA}
N:P:K ร่วมกับความเค็ม	0.28 ± 0.02^{cdA}	0.31 ± 0.03^{cdA}	0.49 ± 0.02^{cA}	0.57 ± 0.10^{bcA}	0.88 ± 0.16^{abA}	1.12 ± 0.06^{aA}
ยูเรียร่วมกับเหล็ก	0.28 ± 0.02^{bcA}	0.27 ± 0.02^{cA}	0.37 ± 0.02^{bcA}	0.37 ± 0.09^{bcA}	0.70 ± 0.07^{abA}	1.07 ± 0.23^{aA}
ยูเรียร่วมกับความเค็ม	0.28 ± 0.02^{aA}	0.34 ± 0.12^{aA}	0.58 ± 0.42^{aA}	078 ± 0.48^{aA}	0.52 ± 0.12^{aA}	0.77 ± 0.18^{aA}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแถวนอนเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในแถวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ปริมาณไขมัน (Lipid content) ที่สูงที่สุดพบในสูตรอาหาร ยูเรียร่วมกับเหล็ก เท่ากับ 35.66±0.78 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 12 ของการทดลองโดยการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอาหารสูตรยูเรียร่วมกับความเค็มและสูตร N:P:K ร่วมกับความเค็ม ($P<0.05$) (ตารางที่ 4.12)

ผลผลิตไขมัน (Lipid yield) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกันที่สูงที่สุดพบในสูตรอาหาร ยูเรียร่วมกับเหล็ก เท่ากับ0.25±0.06 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 20 ของการทดลองโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอาหารสูตรอื่น ($P<0.05$) (ตารางที่ 4.13)

กำลังการผลิตไขมัน (Lipid Productivity) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน ที่สูงที่สุดพบในสูตรอาหารยูเรียร่วมกับความเค็ม เท่ากับ 5.17±0.73 กรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 16 โดยการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับทุกสูตรอาหาร ($P<0.05$) (ตารางที่ 4.14)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL2 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้ สูตรอาหารที่แตกต่างกัน ที่สูงที่สุดพบในสูตรอาหารยูเรียร่วมกับเหล็ก เท่ากับ 0.31±0.03 กรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 4 โดยการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอาหารสูตรยูเรียร่วมกับความเค็ม ($P<0.05$) (ตารางที่ 4.15)

จากการทดลองพบว่าปริมาณไขมันผลผลิตไขมันในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ในสูตรอาหารยูเรียร่วมกับเหล็ก มีค่าสูงที่สุดเนื่องจากไนโตรเจนมีผลต่อขบวนการเมตาบอลิซึมทำให้ปริมาณไขมันมากขึ้นในสาหร่ายขนาดเล็ก ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนให้แก่สาหร่าย ในการศึกษาก่อนๆนั้นพบว่า lipid content จะสามารถเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการเพาะเลี้ยงในสภาวะต่างๆ เช่น การจำกัดการให้ไนโตรเจน (Limiting) จะส่งผลให้มีปริมาณไขมันที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Hsieh and Wu (2009) โดยได้ทดลองลดไนโตรเจน (ยูเรีย) ในการเลี้ยงสาหร่ายน้ำเค็ม *Chlorella* sp. ในสภาวะลดไนโตรเจน (ยูเรีย) ที่ 0.025, 0.050, 0.100, 0.150 และ 0.200 กรัมต่อลิตร ผลพบว่ายูเรียที่ระดับ 0.025 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้ *Chlorella* sp. มีปริมาณไขมันสูงสุดคือ 0.661 กรัมต่อกรัม เพราะไนโตรเจนมีผลต่อขบวนการเมตาบอลิซึมทำให้ปริมาณไขมันมากขึ้นในสาหร่ายขนาดเล็ก และสอดคล้องกันกับ Goswami *et al.* (2011) ได้ศึกษาการเติบโตของสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus* และ *Scenedesmus quadricauda* เป็นเวลา 11 วัน ภายใต้ความเข้มข้นของยูเรียที่แตกต่างกัน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันว่ายูเรียนั้น เป็นแหล่งไนโตรเจนที่มีธาตุอาหารเพียงพอต่อความต้องการในการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพบว่ามีปริมาณลิพิดในเซลล์สาหร่ายนั้นมีแนวโน้มที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย (Nayak *et al.*, 2016) พบว่าปริมาณ $NaNO_3$ ที่ลดลงและการเกิด metabolism ที่มากขึ้นนั้นทำให้ปริมาณ biomass นั้นลดลง แต่การเพิ่ม Nitrogen Content นั้นก็ทำให้ lipid content เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า หากมีการปรับการให้ ไนโตรเจน ที่เหมาะสมโดยการให้ยูเรีย หรือเติม $NaNO_3$ จะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีและผลิต lipid content ได้มากขึ้นด้วย

กำลังการผลิตไขมัน (Lipid Productivity) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ในสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 สูงที่สุดพบในสูตรอาหารยูเรียร่วมกับความเค็ม ซึ่งสอดคล้องกับ (Furuhashi *et al.*, 2016) พบว่าความเค็มมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *B. braunii* เนื่องจากในความเค็มมีธาตุอาหารอยู่ในปริมาณที่สูงทำให้สาหร่ายสามารถดึงเอาธาตุอาหารมาใช้ในการเจริญเติบโตทำให้เซลล์มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผลผลิตไขมันมีปริมาณที่สูงขึ้นมีผลทำให้มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

สาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL2 ในสูตรอาหารที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อพิจารณาถึงกลุ่มกรดไขมัน (C10:0-C18:1) มีมากถึง 80.95 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่อาหารสูตรยูเรียร่วมกับความเค็ม ซึ่งกรดไขมันนี้มีคุณสมบัติเหมาะต่อการนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล (ตารางที่ 4.17-4.22) ตามมาตรฐานของ (ASTMD975) กรดไขมันต้องมีเลขซีเทนที่สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ต้องมีเลขซีเทนไม่ต่ำกว่า 40 Knothe. (2005) จากการทดลองครั้งนี้พบว่า สาหร่ายที่เลี้ยงในอาหารทุกสูตร มีกรดไขมันที่มีค่าซีเทนมากกว่า 40 (C10:0-C18:1) อยู่ในช่วง 57.46-80.95 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองสองคล้องกับ Danielo (2005) พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กที่มีรายงานการวิจัยว่ามีศักยภาพในการใช้เป็นแหล่งน้ำมันหลายชนิดเ ช่ น สาหร่ายสีเขียวในสกุล *Chlorella sp.* สาหร่ายกลมไดอะตอม สาหร่ายขนาดเล็กสะสมลิพิดและกรดไขมันที่เซลล์เมมเบรนโดยเป็นแหล่งพลังงานสะสม แสดงปริมาณลิพิดที่พบในสาหร่ายชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.17 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 0 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K-Fe	N:P:K-S	ยูเรีย-Fe	ยูเรีย-S
Butyric Acid	C4:0	74.21	5.91	74.21	74.21
Caproic Acid	C6:0	0.20	0.20	0.20	0.20
Caprylic Acid	C8:0	1.07	1.07	1.07	1.07
Capric Acid	C10:0	1.50	1.50	1.50	1.50
Undecanoic Acid	C11:0	2.74	2.74	2.74	2.74
Lauric Acid	C12:0	2.60	2.60	2.60	2.60
Tridecanoic Acid	C13:0	1.77	1.77	1.77	1.77
Myristic Acid	C14:0	1.61	1.61	1.61	1.61
Myristoleic Acid	C14:1	0.75	0.75	0.75	0.75
Pentadecanoic Acid	C15:0	0.23	0.23	0.23	0.23
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	0.16	0.16	0.16	0.16
Palmitic Acid	C16:0	0.17	0.17	0.17	0.17
Palmitoleic Acid	C16:1	0.10	0.10	0.10	0.10
Heptadecanoic Acid	C17:0	3.54	3.54	3.54	3.54
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	0.57	0.57	0.57	0.57
Stearic Acid	C18:0	0.78	0.78	0.78	0.78
Elaidic Acid	C18:1n9t	0.85	0.85	0.85	0.85
Oleic Acid	C18:1n9c	0.21	0.21	0.21	0.21
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	0.36	0.36	0.36	0.36
Linoleic Acid	C18:2n6c	1.72	1.72	1.72	1.72
Linolenic Acid	C18:3n3	0.52	0.52	0.52	0.52
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.09	0.09	0.09	0.09
Arachidic Acid	C20:0	2.67	2.67	2.67	2.67
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	1.15	1.15	1.15	1.15
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.06	0.06	0.06	0.06
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.00	0.00	0.00	0.00
Arachidonic Acid	C20:4n6	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.00	0.00	0.00	0.00
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.00	0.00	0.00	0.00
Behenic Acid	C22:0	0.00	0.00	0.00	0.00
Erucic Acid	C22:1n9	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.21	0.21	0.21	0.21
Tricosanoice Acid	C23:0	0.00	0.00	0.00	0.00
Lignoceric Acid	C24:0	0.03	0.03	0.03	0.03
Nervonic Acid	C24:1	0.13	0.13	0.13	0.13
Saturated fatty acid		93.12	24.82	93.12	93.12
Unsaturated fatty acid		6.88	6.88	6.88	6.88
Monounsaturated fatty acid		3.92	3.92	3.92	3.92
Polyunsaturated fatty acid		2.96	2.96	2.96	2.96
Total fatty acid		100.00	31.69	100.00	100.00
C16-C18		8.91	8.91	8.91	8.91
C10:0-C18:1		19.66	19.66	19.66	19.66

ตารางที่ 4.18 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 4 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K ร่วมกับเหล็ก	N:P:K ร่วมกับความเค็ม	ยูเรียร่วมกับเหล็ก	ยูเรียร่วมกับความเค็ม
Butyric Acid	C4:0	0.32	0.61	0.39	1.90
Caproic Acid	C6:0	1.59	1.88	2.37	1.78
Caprylic Acid	C8:0	2.92	2.05	4.28	5.87
Capric Acid	C10:0	5.52	6.62	15.57	10.02
Undecanoic Acid	C11:0	11.66	6.19	11.45	24.41
Lauric Acid	C12:0	6.42	8.30	7.34	10.89
Tridecanoic Acid	C13:0	3.48	5.69	5.52	8.09
Myristic Acid	C14:0	10.28	3.11	6.28	7.29
Myristoleic Acid	C14:1	2.91	2.42	7.13	2.86
Pentadecanoic Acid	C15:0	2.34	1.34	1.52	2.39
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	1.05	0.62	0.79	1.24
Palmitic Acid	C16:0	0.70	0.59	0.79	0.38
Palmitoleic Acid	C16:1	0.49	0.09	0.35	0.36
Heptadecanoic Acid	C17:0	16.97	0.36	11.44	7.19
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	2.90	16.39	1.33	0.94
Stearic Acid	C18:0	2.86	1.94	0.87	1.01
Elaidic Acid	C18:1n9t	2.58	2.86	1.52	1.07
Oleic Acid	C18:1n9c	1.39	5.25	1.33	0.91
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	0.79	5.01	1.12	1.07
Linoleic Acid	C18:2n6c	1.89	8.69	4.62	0.45
Linolenic Acid	C18:3n3	2.00	2.40	0.94	0.70
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.55	0.34	0.59	2.07
Arachidic Acid	C20:0	9.91	9.93	5.22	3.72
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	6.11	5.37	1.78	1.99
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.52	0.75	0.26	0.20
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.16	0.00	0.00	0.15
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.14	0.14	0.70	0.16
Arachidonic Acid	C20:4n6	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 4.18 (ต่อ

cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.08	0.00	0.00	0.00
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.31	0.30	1.34	0.30
Behenic Acid	C22:0	0.00	0.00	0.17	0.08
Erucic Acid	C22:1n9	0.00	0.38	1.27	0.28
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.11	0.20	0.36	0.07
Tricosanoice Acid	C23:0	0.06	0.00	0.48	0.00
Lignoceric Acid	C24:0	0.43	0.05	0.28	0.10
Nervonic Acid	C24:1	0.56	0.16	0.61	0.07
Saturated fatty acid		75.78	48.95	75.32	85.41
Unsaturated fatty acid		24.22	51.05	24.68	14.59
Monounsaturated fatty acid		17.98	33.52	16.11	9.73
Polyunsaturated fatty acid		6.23	17.53	8.57	4.86
Total fatty acid		100.00	100.00	100.00	100.00
C16-C18		33.13	43.91	24.90	16.15
C10:0-C18:1		74.24	75.45	78.97	80.95

ตารางที่ 4.19 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 8 ภายใต้การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K ร่วมกับเหล็ก	N:P:K ร่วมกับความเค็ม	ยูเรียร่วมกับเหล็ก	ยูเรียร่วมกับความเค็ม
Butyric Acid	C4:0	0.32	0.00	1.23	0.30
Caproic Acid	C6:0	1.09	2.72	1.82	1.22
Caprylic Acid	C8:0	1.71	9.00	1.79	2.47
Capric Acid	C10:0	3.85	12.94	3.89	4.02
Undecanoic Acid	C11:0	5.98	14.46	9.26	6.34
Lauric Acid	C12:0	7.87	10.40	4.69	4.15
Tridecanoic Acid	C13:0	2.64	12.04	4.25	5.14
Myristic Acid	C14:0	4.67	3.25	4.78	5.87
Myristoleic Acid	C14:1	4.59	4.47	2.83	6.52
Pentadecanoic Acid	C15:0	3.15	1.53	1.15	4.59
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	1.26	0.89	0.88	1.10
Palmitic Acid	C16:0	0.78	0.28	0.15	0.72
Palmitoleic Acid	C16:1	0.59	0.32	0.38	0.37
Heptadecanoic Acid	C17:0	0.48	9.77	18.41	16.34
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	18.71	1.08	2.08	3.25
Stearic Acid	C18:0	3.01	0.94	3.07	3.75
Elaidic Acid	C18:1n9t	2.30	0.71	5.02	2.53
Oleic Acid	C18:1n9c	1.31	0.71	1.66	1.15
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	1.48	1.22	3.61	2.00
Linoleic Acid	C18:2n6c	8.97	2.85	2.83	7.25
Linolenic Acid	C18:3n3	2.17	0.82	2.17	2.71
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.58	0.40	6.41	0.47
Arachidic Acid	C20:0	10.49	4.67	10.58	10.26
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	6.42	0.82	5.16	5.60
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.64	2.04	0.56	0.60
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.00	0.18	0.09	0.04
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.12	0.30	0.00	0.00

ตารางที่ 4.19 (ต่อ)

Arachidonic Acid	C20:4n6	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.00	0.00	0.00	0.04
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.33	0.54	0.68	0.23
Behenic Acid	C22:0	0.00	0.00	0.00	0.05
Erucic Acid	C22:1n9	0.75	0.27	0.14	0.00
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.17	0.12	0.00	0.13
Tricosanoice Acid	C23:0	0.00	0.07	0.04	0.14
Lignoceric Acid	C24:0	3.58	0.10	0.24	0.57
Nervonic Acid	C24:1	0.00	0.07	0.14	0.12
Saturated fatty acid		49.95	82.74	66.02	66.13
Unsaturated fatty acid		50.05	17.26	33.98	33.87
Monounsaturated fatty acid		35.93	9.34	18.31	20.63
Polyunsaturated fatty acid		14.12	7.93	15.67	13.24
Total fatty acid		100.00	100.00	100.00	100.00
C16-C18		40.37	19.11	45.79	40.53
C10:0-C18:1		71.63	77.88	68.96	75.06

ตารางที่ 4.20 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 12 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K ร่วมกับเหล็ก	N:P:K ร่วมกับความเค็ม	ยูเรียร่วมกับเหล็ก	ยูเรียร่วมกับความเค็ม
Butyric Acid	C4:0	0.32	0.62	0.35	1.56
Caproic Acid	C6:0	0.59	2.39	1.08	0.72
Caprylic Acid	C8:0	2.85	3.11	5.36	2.52
Capric Acid	C10:0	3.99	15.48	15.82	11.71
Undecanoic Acid	C11:0	5.93	11.66	12.64	17.79
Lauric Acid	C12:0	6.90	10.21	9.04	8.93
Tridecanoic Acid	C13:0	3.73	10.17	5.20	7.88
Myristic Acid	C14:0	3.65	3.75	10.03	5.75
Myristoleic Acid	C14:1	6.44	2.93	3.44	2.89
Pentadecanoic Acid	C15:0	2.17	2.48	1.37	2.29
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	0.83	0.82	1.10	0.83
Palmitic Acid	C16:0	0.64	0.92	0.92	0.87
Palmitoleic Acid	C16:1	0.28	0.46	0.41	0.61
Heptadecanoic Acid	C17:0	15.57	9.88	9.05	10.17
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	4.05	1.40	0.74	1.76
Stearic Acid	C18:0	3.19	1.79	1.24	1.96
Elaidic Acid	C18:1n9t	3.89	2.86	1.58	2.61
Oleic Acid	C18:1n9c	1.23	1.39	1.39	1.06
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	2.83	0.85	1.81	1.86
Linoleic Acid	C18:2n6c	7.70	3.92	1.47	0.87
Linolenic Acid	C18:3n3	2.45	1.49	1.58	1.15
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.44	0.37	3.74	3.43
Arachidic Acid	C20:0	11.77	6.03	5.06	6.58
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	6.38	4.09	2.52	3.30
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.57	0.30	0.42	0.27
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.07	0.06	0.14	0.03
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.12	0.00	0.07	0.08

ตารางที่ 4.20 (ต่อ)

Arachidonic Acid	C20:4n6	0.00	0.00	0.00v	0.00
cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.00	0.06	0.00	0.00
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.20	0.00	0.25	0.19
Behenic Acid	C22:0	0.00	0.00	0.03	0.00
Erucic Acid	C22:1n9	0.22	0.00	0.50	0.00
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.00	0.00	0.00	0.00
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.12	0.14	0.63	0.14
Tricosanoice Acid	C23:0	0.05	0.07	0.26	0.00
Lignoceric Acid	C24:0	0.70	0.16	0.24	0.08
Nervonic Acid	C24:1	0.14	0.16	0.52	0.10
Saturated fatty acid		62.25	78.69	77.93	79.00
Unsaturated fatty acid		37.75	21.31	22.07	21.00
Monounsaturated fatty acid		23.45	14.12	12.20	13.16
Polyunsaturated fatty acid		14.29	7.19	9.86	7.84
Total fatty acid		100.00	100.00	100.00	100.00
C16-C18		42.26	25.32	23.93	26.34
C10:0-C18:1		73.00	80.56	77.25	79.83

ตารางที่ 4.21 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 16 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K ร่วมกับเหล็ก	N:P:K ร่วมกับความเค็ม	ยูเรียร่วมกับเหล็ก	ยูเรียร่วมกับความเค็ม
Butyric Acid	C4:0	0.47	0.71	0.32	1.88
Caproic Acid	C6:0	1.49	2.46	1.33	8.45
Caprylic Acid	C8:0	3.11	3.49	2.24	12.09
Capric Acid	C10:0	11.67	5.52	4.51	15.26
Undecanoic Acid	C11:0	9.96	13.86	6.19	11.01
Lauric Acid	C12:0	6.97	9.34	7.52	6.69
Tridecanoic Acid	C13:0	4.58	3.09	2.80	9.15
Myristic Acid	C14:0	8.44	2.49	2.16	4.81
Myristoleic Acid	C14:1	2.40	4.00	6.90	1.37
Pentadecanoic Acid	C15:0	2.20	4.62	3.90	1.49
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	0.65	0.82	0.82	0.29
Palmitic Acid	C16:0	0.88	0.72	0.56	0.40
Palmitoleic Acid	C16:1	0.20	0.49	0.41	0.23
Heptadecanoic Acid	C17:0	9.60	11.44	12.86	10.06
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	2.28	2.07	3.45	1.04
Stearic Acid	C18:0	3.18	3.13	3.15	2.68
Elaidic Acid	C18:1n9t	3.58	3.95	5.95	1.05
Oleic Acid	C18:1n9c	1.02	1.34	0.53	0.67
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	3.59	4.02	5.13	0.74
Linoleic Acid	C18:2n6c	4.99	5.24	8.12	2.10
Linolenic Acid	C18:3n3	1.76	1.86	1.92	0.00
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.42	0.35	0.61	0.38
Arachidic Acid	C20:0	8.67	7.71	10.52	3.39
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	4.85	5.30	5.97	0.28
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.62	0.54	0.37	0.28
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.12	0.15	0.17	0.25
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.00	0.00	0.08	0.00
Arachidonic Acid	C20:4n6	0.10	0.00	0.00	0.11

ตารางที่ 4.21 (ต่อ)

cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.00	0.02	0.00	0.60
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.21	0.25	0.35	0.00
Behenic Acid	C22:0	0.12	0.07	0.05	0.15
Erucic Acid	C22:1n9	0.27	0.32	0.26	0.00
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.25	0.00	0.00	0.12
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.32	0.23	0.18	1.70
Tricosanoice Acid	C23:0	0.03	0.05	0.19	0.95
Lignoceric Acid	C24:0	0.82	0.28	0.35	0.21
Nervonic Acid	C24:1	0.18	0.06	0.13	0.11
Saturated fatty acid		72.40	69.25	58.99	88.68
Unsaturated fatty acid		27.60	30.75	41.01	11.32
Monounsaturated fatty acid		15.42	18.35	24.42	5.05
Polyunsaturated fatty acid		12.18	12.40	16.58	6.28
Total fatty acid		100.00	100.00	100.00	100.00
C16-C18		31.51	34.61	42.70	19.36
C10:0-C18:1		76.19	76.15	74.98	69.05

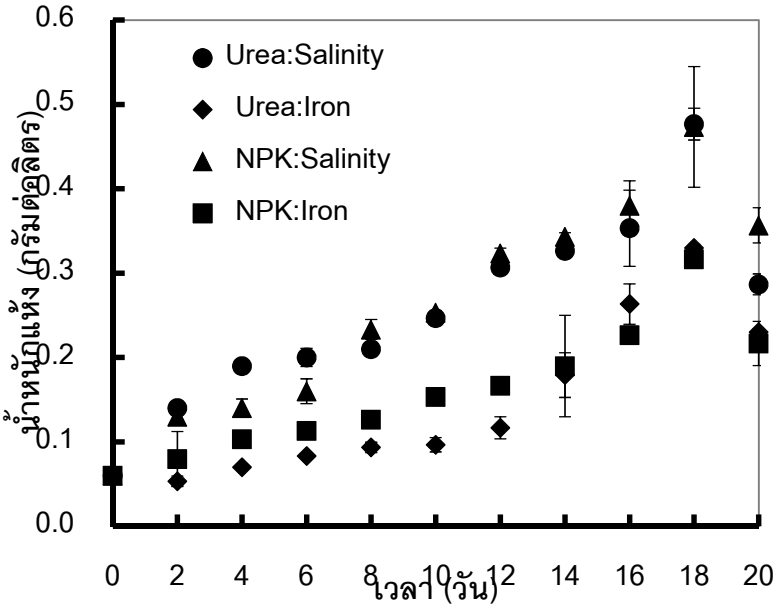
ตารางที่ 4.22 ชนิดกรดไขมันของสาหร่าย *Botryococcus braunii* KMITL 2 ของวันที่ 20 ภายใต้ การเพาะเลี้ยงโดยใช้สูตรอาหารที่แตกต่างกัน

ชนิดกรดไขมัน		สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย			
		N:P:K ร่วมกับเหล็ก	N:P:K ร่วมกับความเค็ม	ยูเรียร่วมกับเหล็ก	ยูเรียร่วมกับความเค็ม
Butyric Acid	C4:0	0.29	0.32	0.25	2.65
Caproic Acid	C6:0	1.76	1.14	0.74	11.99
Caprylic Acid	C8:0	2.40	2.10	3.00	20.80
Capric Acid	C10:0	5.27	3.26	4.44	9.37
Undecanoic Acid	C11:0	11.92	5.29	7.13	9.10
Lauric Acid	C12:0	5.85	7.09	3.95	6.14
Tridecanoic Acid	C13:0	3.64	5.65	5.21	3.81
Myristic Acid	C14:0	7.82	2.50	5.05	1.37
Myristoleic Acid	C14:1	2.98	2.00	7.49	1.00
Pentadecanoic Acid	C15:0	1.41	1.34	2.26	0.29
cis-10-Pentadecenoic Acid	C15:1	0.77	0.66	0.86	0.34
Palmitic Acid	C16:0	0.71	0.34	0.39	10.61
Palmitoleic Acid	C16:1	0.32	0.42	0.27	1.55
Heptadecanoic Acid	C17:0	10.52	15.81	13.06	1.48
cis-10-Heptadecenoic Acid	C17:1	2.77	2.28	3.70	1.27
Stearic Acid	C18:0	4.07	4.16	3.71	1.50
Elaidic Acid	C18:1n9t	3.95	5.94	5.15	0.72
Oleic Acid	C18:1n9c	1.01	1.92	1.01	3.27
Linolelaidic Acid	C18:2n6t	4.27	5.57	3.38	0.35
Linoleic Acid	C18:2n6c	6.06	6.69	7.46	5.27
Linolenic Acid	C18:3n3	2.03	2.53	2.19	1.09
Y-Linolenic Acid	C18:3n6	0.39	0.54	0.57	0.53
Arachidic Acid	C20:0	10.18	11.74	10.16	3.28
cis-11-Eicosenoic Acid	C20:1	5.63	6.75	4.83	0.24
cis-11,14-Eicosadienoic Acid	C20:2	0.54	0.77	0.84	0.00
cis-11,14,17-Eicosatrienoic Acid	C20:3n3	0.00	0.20	0.14	0.00
cis-8,11,14-Eicosatrienoic Acid	C20:3n6	0.00	0.52	0.12	0.26
Arachidonic Acid	C20:4n6	0.00	0.00	0.09	0.60

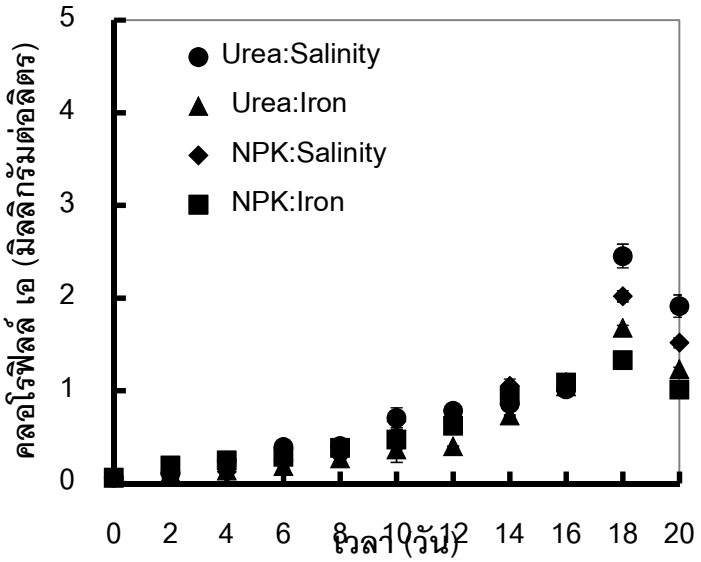
ตารางที่ **4.**22 (ต่อ)

cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid	C:20:5n3	0.00	0.00	0.23	0.13
Heneicosanoic Acid	C21:0	0.16	0.84	0.39	0.64
Behenic Acid	C22:0	0.00	0.09	0.05	0.00
Erucic Acid	C22:1n9	0.24	0.52	0.12	0.00
cis-13,16-Docosadienoic Acid	C22:2	0.00	0.00	0.09	0.00
cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic Acid	C22:6n3	0.26	0.18	0.18	0.19
Tricosanoice Acid	C23:0	0.00	0.00	0.13	0.00
Lignoceric Acid	C24:0	2.09	0.58	1.10	0.15
Nervonic Acid	C24:1	0.69	0.29	0.27	0.00
Saturated fatty acid		68.08	62.24	61.03	83.19
Unsaturated fatty acid		31.92	37.76	38.97	16.81
Monounsaturated fatty acid		18.37	20.77	23.69	8.39
Polyunsaturated fatty acid		13.55	16.99	15.28	8.42
Total fatty acid		100.00	100.00	100.00	100.00
C16-C18		36.11	46.19	40.89	27.65
C10:0-C18:1		73.34	70.90	74.52	57.46

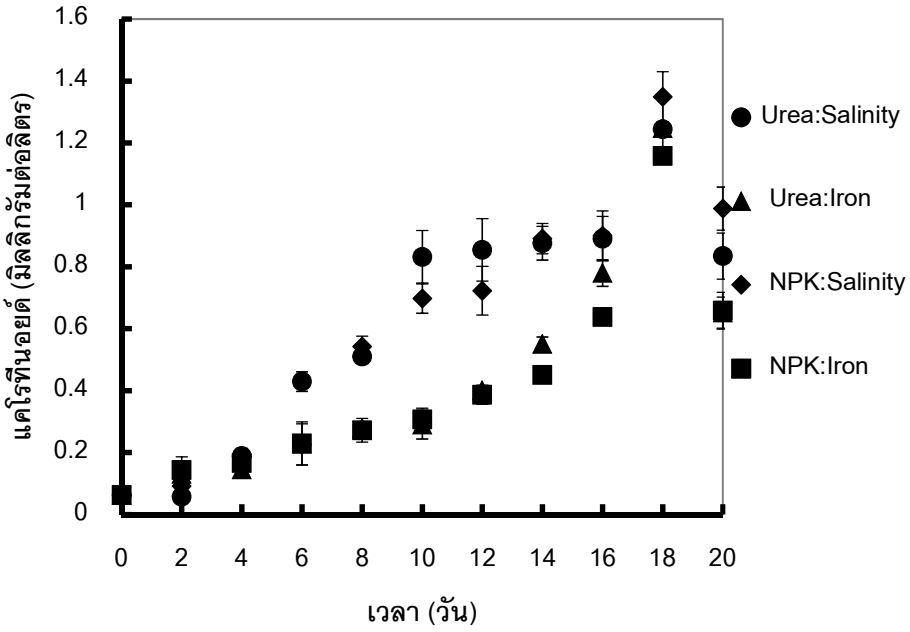
4.3.2 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*



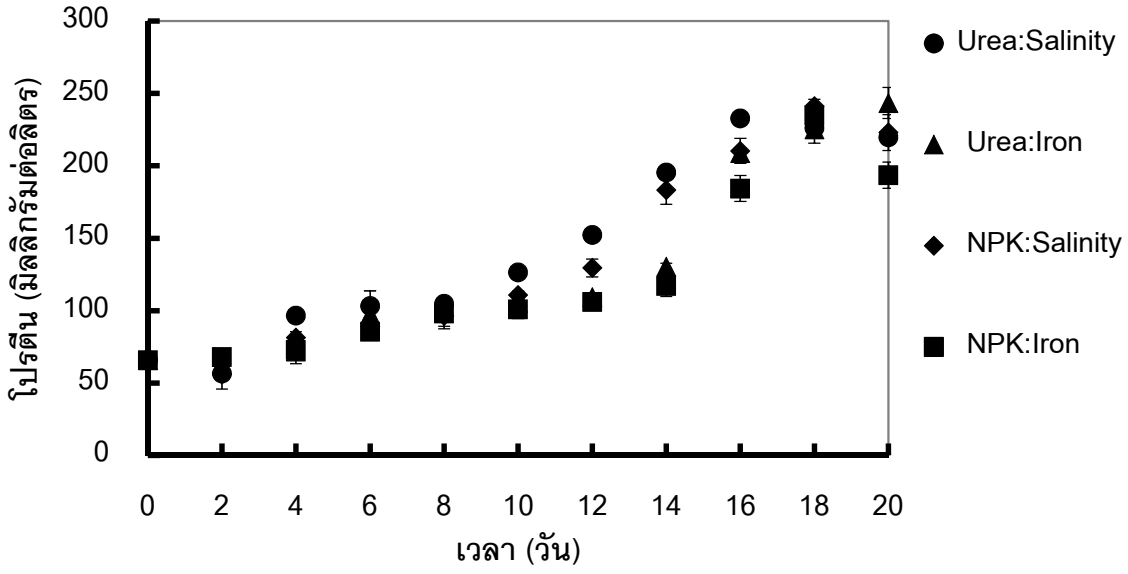
ภาพที่ 4.38 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตของ *Scenedesmus dimorphus*



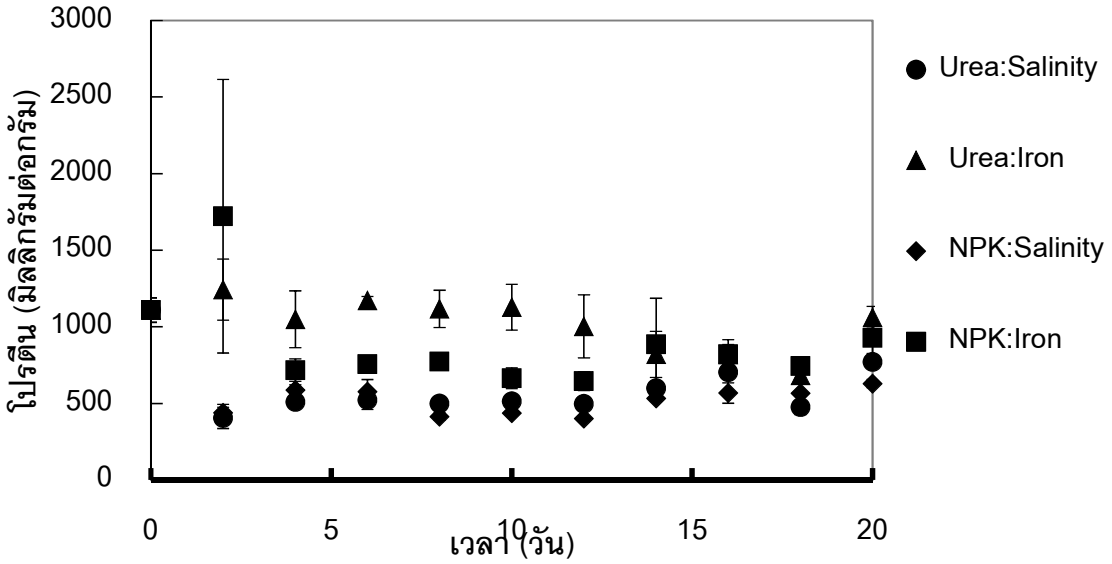
ภาพที่ 4.39 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคลอโรฟิลล์ของ *Scenedesmus dimorphus*



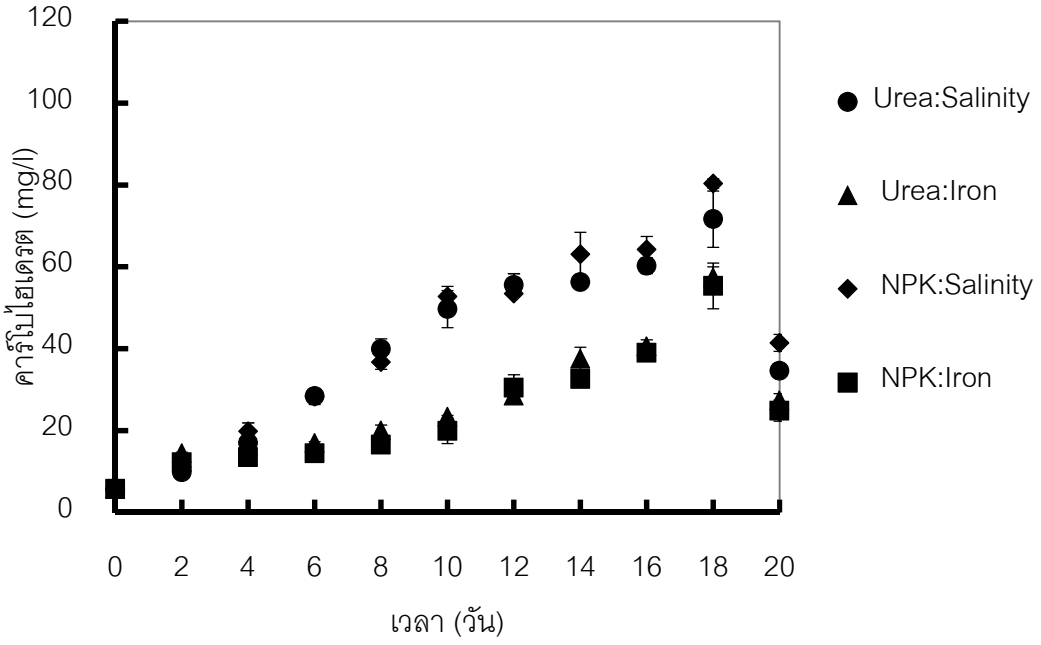
ภาพที่ 4.40 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อแคโรทีนอยด์ของ *Scenedesmus dimorphus*



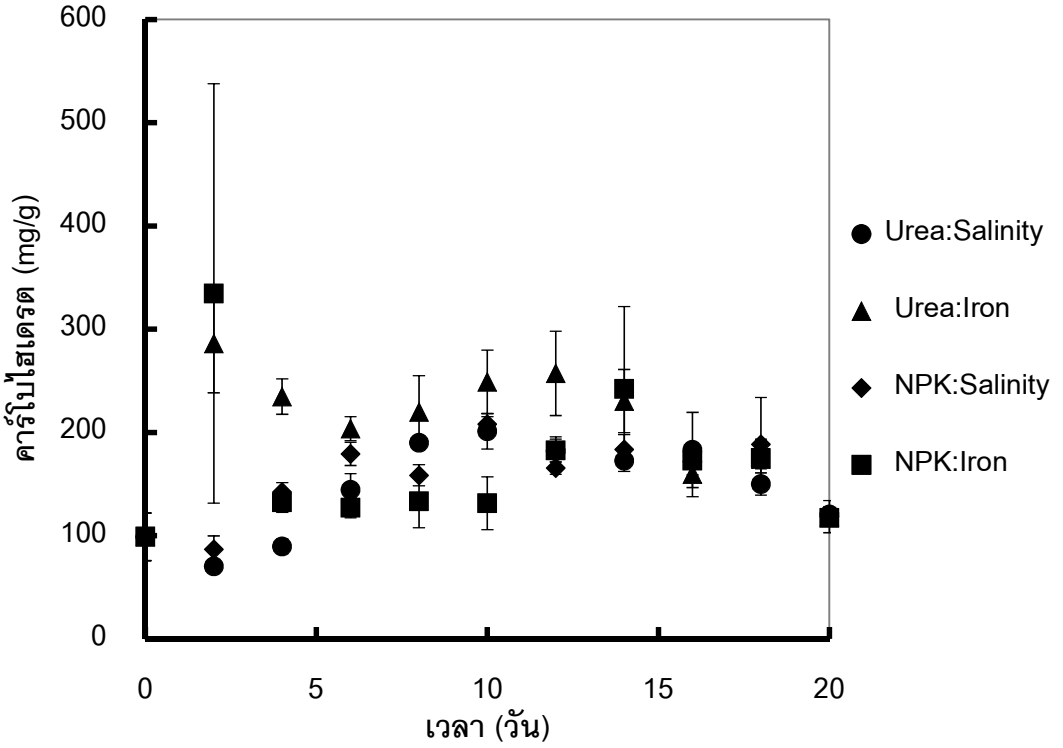
ภาพที่ 4.41 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *Scenedesmus dimorphus*



ภาพที่ 4.42 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *Scenedesmus dimorphus*



ภาพที่ 4.43 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *Scenedesmus dimorphus*



ภาพที่ 4.44 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *Scenedesmus dimorphus*

ตารางที่ 4.23 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อการเจริญเติบโตของ *S. dimorphus*

วันที่	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	0.06±0.00^{aA}	0.14±0.01^{cB}	0.19±0.00^{dC}	0.20±0.01^{dCD}	0.21±0.01^{cCD}	0.25±0.00^{cDE}	0.31±0.01^{cFG}	0.33±0.01^{bFG}	0.35±0.05^{bcG}	0.48±0.02^{bH}	0.29±0.01^{bEF}
Urea:Iron	0.06±0.00^{aAB}	0.05±0.01^{aA}	0.07±0.00^{aAB}	0.08±0.00^{aABC}	0.09±0.01^{aBC}	0.10±0.01^{aBC}	0.12±0.01^{aC}	0.18±0.03^{aD}	0.26±0.02^{abE}	0.33±0.00^{aF}	0.23±0.00^{aE}
NPK:Salinity	0.06±0.00^{aA}	0.13±0.01^{bcAB}	0.14±0.01^{cB}	0.16±0.01^{cB}	0.23±0.01^{cC}	0.25±0.00^{cCD}	0.32±0.01^{cDE}	0.34±0.00^{bE}	0.38±0.03^{cE}	0.47±0.07^{bF}	0.36±0.02^{cE}
NPK:Iron	0.06±0.00^{aA}	0.08±0.03^{abA}	0.10±0.01^{bAB}	0.11±0.00^{bAB}	0.13±0.01^{bABC}	0.15±0.00^{bBCD}	0.17±0.01^{bBCDE}	0.19±0.06^{aCDE}	0.23±0.01^{aE}	0.32±0.01^{aF}	0.22±0.03^{aDE}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.24 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคลอโรฟิลล์ของ *S. dimorphus*

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	0.06±0.00^{aA}	0.11±0.02^{aA}	0.24±0.03^{aAB}	0.39±0.04^{bB}	0.40±0.03^{bB}	0.71±0.11^{aC}	0.78±0.06^{bC}	0.86±0.06^{abCD}	1.02±0.04^{aD}	2.45±0.13^{dF}	1.91±0.12^{cE}
Urea:Iron	0.06±0.00^{aA}	0.12±0.00^{aAB}	0.14±0.01^{aABC}	0.19±0.01^{aBCD}	0.27±0.03^{aCDE}	0.37±0.14^{aDE}	0.40±0.00^{aE}	0.73±0.01^{aF}	1.05±0.02^{aG}	1.68±0.03^{bI}	1.23±0.02^{aH}
NPK:Salinity	0.06±0.00^{aA}	0.12±0.01^{aA}	0.13±0.05^{aA}	0.25±0.02^{abB}	0.30±0.04^{abB}	0.67±0.09^{aC}	0.70±0.08^{bC}	1.05±0.07^{cD}	1.10±0.00^{aD}	2.02±0.06^{cF}	1.52±0.06^{bE}
NPK:Iron	0.06±0.00^{aA}	0.19±0.01^{bAB}	0.25±0.08^{aBC}	0.29±0.08^{abCD}	0.38±0.03^{bCD}	0.47±0.10^{aD}	0.62±0.04^{bE}	0.94±0.03^{bcF}	1.09±0.02^{aG}	1.33±0.04^{aH}	1.01±0.03^{aFG}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.25 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อแคโรทีนอยด์ของ *S. dimorphus*

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	0.06±0.01^{aA}	0.06±0.00^{aA}	0.19±0.01^{aA}	0.43±0.03^{bB}	0.51±0.02^{bB}	0.83±0.08^{bC}	0.85±0.10^{bC}	0.88±0.05^{bC}	0.89±0.07^{bC}	1.24±0.10^{aD}	0.83±0.07^{abC}
Urea:Iron	0.06±0.01^{aA}	0.13±0.01^{abA}	0.15±0.01^{aAB}	0.23±0.02^{aBC}	0.28±0.01^{aC}	0.29±0.05^{aC}	0.40±0.01^{aC}	0.55±0.02^{aD}	0.78±0.04^{abF}	1.25±0.02^{aG}	0.65±0.05^{aE}
NPK:Salinity	0.06±0.01^{aA}	0.09±0.01^{abA}	0.19±0.03a^{A}	0.23±0.07^{aA}	0.54±0.03^{bB}	0.70±0.05^{bBC}	0.72±0.08^{bCE}	0.89±0.05^{bD}	0.90±0.08^{bD}	1.35±0.08^{aE}	0.99±0.07^{bD}
NPK:Iron	0.06±0.01^{aA}	0.14±0.04^{bAB}	0.17±0.02^{aABC}	0.23±0.07^{aBCD}	0.27±0.04^{aCDE}	0.31±0.04^{aDE}	0.39±0.03^{aEF}	0.45±0.02^{aF}	0.64±0.02^{aG}	1.16±0.01^{aH}	0.66±0.06^{aG}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.26 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *S. dimorphus*

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	65.85±3.67^{aA}	56.64±10.75^{aA}	96.65±3.34^{bB}	103.18±10.45^{aB}	104.85±3.94^{aB}	126.45±3.36^{bC}	152.39±4.27^{cD}	195.42±1.84^{bE}	232.75±3.52^{cF}	226.22±10.55^{aF}	219.86±3.34^{abF}
Urea:Iron	65.85±3.67^{aA}	62.84±0.44^{aA}	71.88±8.61^{aA}	97.49±2.04^{aA}	102.17±2.03^{aB}	105.52±2.18^{aB}	109.37±2.18^{aB}	130.47±2.36^{aC}	208.98±2.85^{bD}	225.21±3.27^{aE}	243.46±10.73^{bF}
NPK:Salinity	65.85±3.6^{7aAB}	55.97±3.27^{aA}	81.25±4.20^{abBC}	89.12±5.03^{aBC}	96.32±7.13^{aCD}	110.71±2.77^{aDE}	129.46±6.23^{bE}	183.36±9.88^{bF}	210.32±8.60^{bF}	241.12±4.93^{aG}	223.04±12.37^{abG}
NPK:Iron	65.85±3.67^{aA}	68.19±1.93^{aA}	72.88±1.93^{aA}	85.60±4.27^{aAB}	98.16±10.66^{aBC}	101.00±6.58^{aBC}	106.19±4.18^{aC}	117.07±7.25^{aC}	184.37±8.99^{aD}	234.92±5.47^{aE}	193.58±9.11^{aD}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.27 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อโปรตีนของ *S. dimorphus*

		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	1110.07±80.40^{aE}	405.41±69.34^{aA}	509.05±15.89^{aAB}	521.63±60.62^{aAB}	500.27±8.91^{aAB}	512.86±15.95^{aAB}	497.58±17.16^{aAB}	599.40±16.28^{aBC}	703.87±129.26^{aCD}	475.22±10.41^{aAB}	771.23±34.81^{abD}
Urea:Iron	1110.07±80.40^{aAB}	1243.63±199.45^{aB}	1048.96±185.76^{bAB}	1171.33±121.64^{cB}	1117.33±121.64^{cAB}	1128.66±149.17^{bAB}	1002.78±206.48^{bAB}	820.16±150.91^{bAB}	818.68±97.79^{aAB}	683.17±20.82^{abA}	1061.86±71.75^{cAB}
NPK:Salinity	1110.07±80.40^{aC}	438.43±54.83^{aAB}	587.50±34.42^{aAB}	576.60±79.37^{aAB}	414.13±22.92^{aA}	436.89±5.12^{aAB}	400.31±14.67^{aA}	533.53±20.93^{aAB}	567.54±66.27^{aAB}	566.13±138.09^{abAB}	629.07±26.64^{aB}
NPK:Iron	1110.07±80.40^{aAB}	1721.92±892.77^{aB}	717.13±72.75^{aA}	755.57±34.54^{bA}	772.04±40.03^{bA}	663.92±67.32^{aA}	645.30±62.29^{aA}	885.43±301.09^{aAB}	820.24±64.23^{aAB}	744.53±38.99^{bA}	928.45±102.78^{bcAB}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.28 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *S. dimorphus*

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	5.67±0.77^{aA}	9.81±0.56^{aAB}	16.96±0.85^{abB}	28.41±1.39^{bC}	39.88±2.48^{bD}	49.66±4.55^{bE}	55.55±2.75^{bEF}	56.27±0.65^{bEF}	60.29±1.92^{bF}	71.64±6.90^{bcG}	34.56±0.55^{bCD}
Urea:Iron	5.67±0.77^{aA}	14.43±0.27^{bB}	16.24±0.20^{abBC}	16.90±0.34^{aBC}	19.92±1.43^{aCD}	23.33±0.37^{aDE}	28.50±0.95^{aF}	37.52±2.80^{aG}	40.57±1.55^{aG}	57.39±2.59^{abH}	27.32±1.70^{aEF}
NPK:Salinity	5.67±0.77^{aA}	11.05±1.06^{aA}	19.80±2.04^{bB}	28.22±1.85^{bC}	36.71±1.74^{bD}	52.74±2.44^{bE}	53.43±0.79^{bE}	63.09±5.33^{bF}	64.21±3.19^{bF}	80.33±1.12^{cG}	41.39±2.10^{cD}
NPK:Iron	5.67±0.77^{aA}	12.23±1.37^{abAB}	13.50±0.19^{aB}	14.37±0.90^{aB}	16.49±2.07^{aB}	19.85±3.08^{aBC}	30.47±3.14^{aBC}	32.58±1.13^{aEF}	38.94±0.90^{aF}	55.33±5.61^{aG}	24.84±2.58^{aCD}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.29 ผลของปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับความเค็ม ปุ๋ยเคมี NPK ร่วมกับเหล็ก ยูเรียร่วมกับความเค็ม และ ยูเรียร่วมกับเหล็ก ต่อคาร์โบไฮเดรทของ *S. dimorphus*

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Urea:Salinity	98.89±23.01 aAB	70.50±3.56^{aA}	89.71±7.21^{aA}	144.33±15.91^{a} bBC	189.92±15.91^{a} bCD	201.16±17.13^{abD}	181.87±13.97^{abCD}	172.58±4.39^{a} CD	183.07±36.42^{aCD}	150.07±10.80^{aBCD}	120.64±7.62 aAB
Urea:Iron	98.89±23.01 aA	286.30±47.88^{aE}	234.79±17.13^{c} CDE	203.76±11.61^{c} BCDE	219.90±35.14^{b} CDE	249.05±30.82^{bCDE}	257.22±40.81^{bDE}	230.48±30.56^{aCDE}	129.59±21.80^{aABC}	174.09±9.31^{a} ABCD	118.57±4.47 aAB
NPK:Salinity	98.89±23.01 aA	86.70±13.11 aA	142.17±9.33^{bA} BC	179.28±11.29^{b} cBCD	158.50±10.27^{a} bBCD	208.03±7.23 bD	165.56±5.96 aBCD	183.66±14.18^{aCD}	171.70±12.86^{aBCD}	188.53±45.36^{aCD}	118.48±15.59^{aAB}
NPK:Iron	98.89±23.01 aA	334.62±203.02^{aB}	132.24±9.66^{bA} B	127.18±9.79^{aAB}	133.31±25.61^{a} AB	131.45±25.62^{aAB}	182.54±11.16^{abAB}	242.20±79.82^{aAB}	172.74±7.66^{a} AB	175.02±18.41^{aAB}	117.07±7.08 aAB

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

ตารางที่ 4.30 การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)				ปริมาณน้ำมัน (%)			
	Urea:Salinity	Urea:Iron	NPK:Salinity	NPK:Iron	Urea:Salinity	Urea:Iron	NPK:Salinity	NPK:Iron
0	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	0.00±0.00^{aA}	22.41±0.33^{aA}	22.41±0.33^{aA}	22.41±0.33^{aA}	22.41±0.33^{aA}
4	0.05±0.00^{cB}	0.02±0.00^{aAB}	0.03±0.00^{bA}	0.03±0.00^{abB}	28.87±1.68^{bB}	28.57±1.12^{bB}	23.58±1.71^{aA}	26.89±0.58^{abB}
8	0.07±0.00^{bBC}	0.03±0.00^{aBC}	0.07±0.00^{bB}	0.04±0.00^{aB}	31.20±0.98^{abBC}	31.91±0.55^{bC}	30.90±0.40^{abB}	29.32±0.31^{aBC}
12	0.10±0.01^{bD}	0.04±0.00^{aC}	0.12±0.00^{cC}	0.05±0.00^{aC}	32.89±1.10^{bC}	32.14±0.71^{abC}	35.73±0.72^{cC}	30.00±0.37^{aC}
16	0.11±0.01^{bcD}	0.09±0.01^{abD}	0.13±0.01^{cC}	0.07±0.00^{aD}	31.83±1.61^{aBC}	33.70±1.95^{aC}	35.09±1.60^{aC}	33.05±1.47^{aD}
20	0.07±0.00^{aC}	0.08±0.00^{aD}	0.13±0.01^{bC}	0.07±0.01^{aD}	25.21±0.51^{aA}	33.20±1.23^{bC}	35.46±1.24^{bC}	34.69±1.18^{bD}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

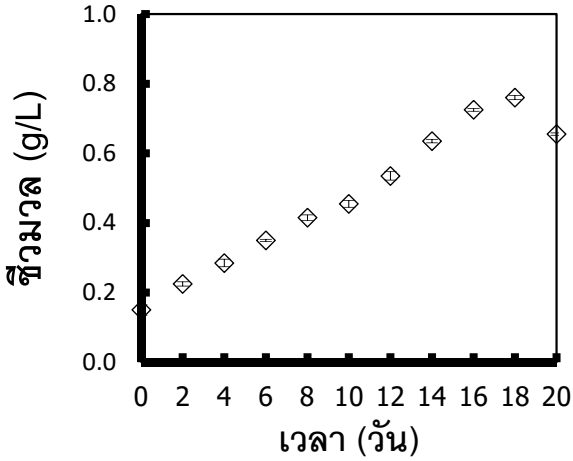
ตารางที่ 4.30 (ต่อ) การเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (46-0-0) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ระดับ

	กำลังการผลิตไขมัน (mg/l/d)				อัตราการเจิญเติบโตจำเพาะ (1/day)			
	Urea:Salinity	Urea:Iron	NPK:Salinity	NPK:Iron	Urea:Salinity	Urea:Iron	NPK:Salinity	NPK:Iron
0	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}	0.00 ± 0.00^{aA}
4	84.11 ± 9.58^{bD}	19.78 ± 5.69^{aB}	64.15 ± 11.71^{abC}	86.54 ± 24.25^{bC}	0.29 ± 0.02^{bD}	0.07 ± 0.02^{aB}	0.27 ± 0.05^{bC}	0.32 ± 0.09^{bC}
8	55.24 ± 7.34^{bC}	25.91 ± 6.52^{aB}	52.61 ± 1.81^{bBC}	44.48 ± 9.21^{abB}	0.18 ± 0.02^{bC}	0.08 ± 0.02^{aB}	0.17 ± 0.00^{bB}	0.15 ± 0.03^{bB}
12	45.06 ± 3.49^{bcC}	24.27 ± 3.23^{aB}	50.36 ± 2.26^{cBC}	35.19 ± 5.65^{abAB}	0.14 ± 0.01^{bB}	0.08 ± 0.01^{aB}	0.14 ± 0.00^{bB}	0.12 ± 0.02^{bAB}
16	37.11 ± 1.68^{aBC}	33.60 ± 4.19^{aB}	42.75 ± 3.25^{aBC}	38.53 ± 6.31^{aB}	0.12 ± 0.00^{aB}	0.10 ± 0.01^{aB}	0.12 ± 0.01^{aB}	0.12 ± 0.02^{aAB}
20	29.08 ± 0.71^{aB}	33.77 ± 1.35^{abB}	42.46 ± 1.21^{cB}	38.84 ± 4.68^{bcAB}	0.12 ± 0.00^{aB}	0.10 ± 0.01^{aB}	0.12 ± 0.01^{aB}	0.11 ± 0.02^{aAB}

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างจากแถวแนวตั้ง $P<0.05$ สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างจากแนวนอน $P<0.05$

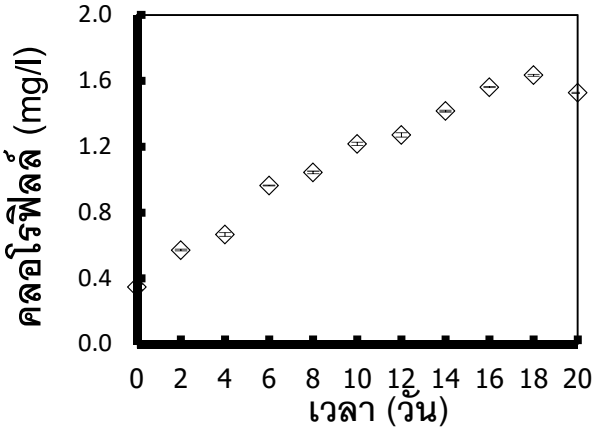
4.3.3 ยูเรียร่วมกับฟอสฟอรัสต่อ *B. braunii*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.76 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 18 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.45, ตารางที่ 4.32)



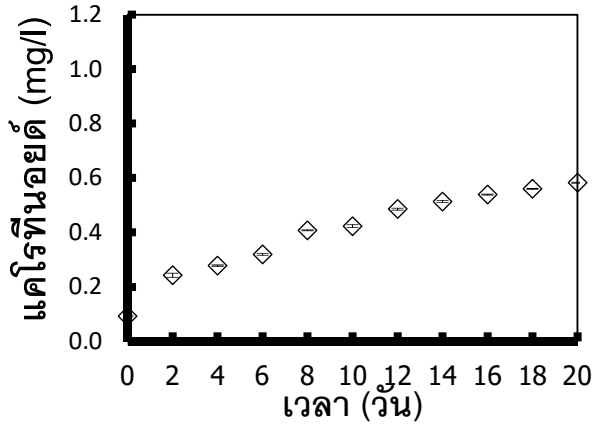
ภาพที่ 4.45 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L พบว่ามีค่าคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.64±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.46, ตารางที่ 4.32)



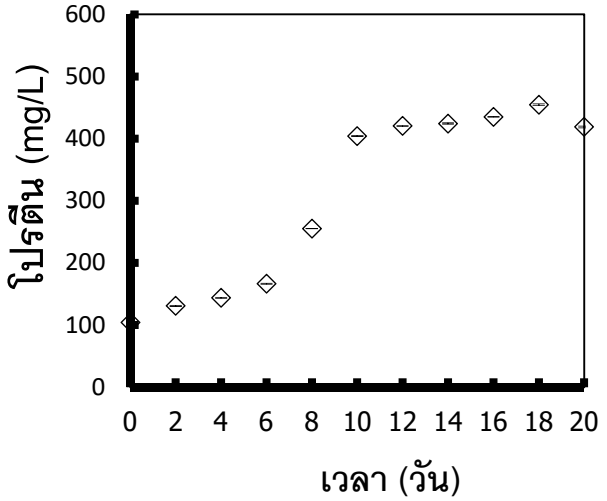
ภาพที่ 4.46 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.58±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.47, ตารางที่ 4.32)

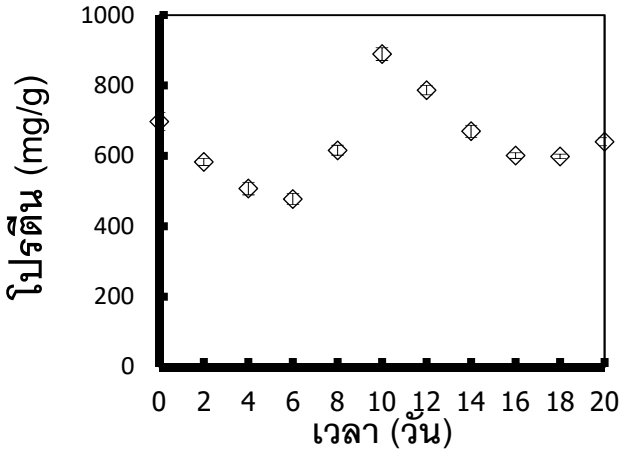


ภาพที่ 4.47 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 454.77±1.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 18 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 889.19±18.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 10 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.48-4.49, ตารางที่ 4.32)

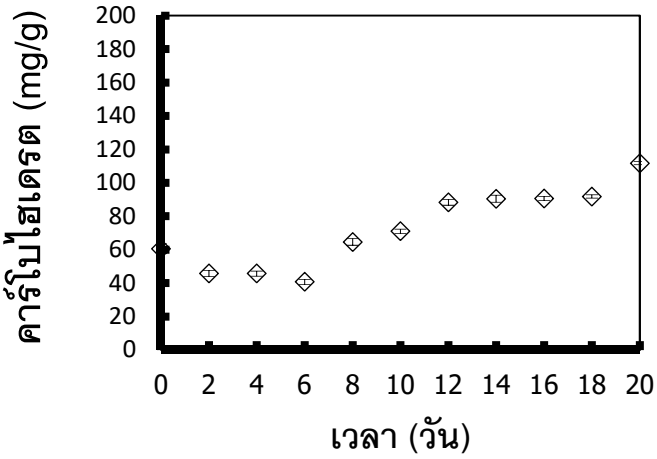


ภาพที่ 4.48 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

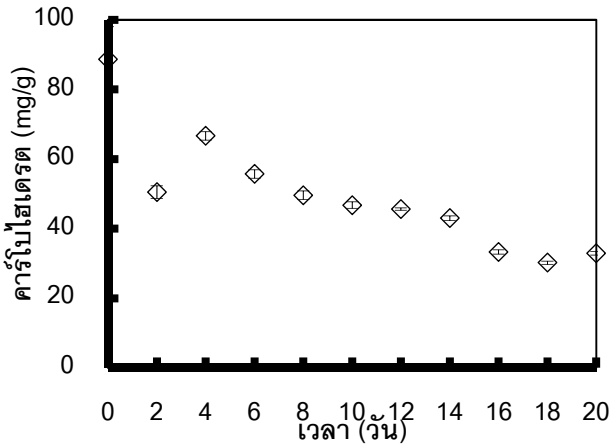


ภาพที่ 4.49 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L สาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 73.18±0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลองที่ และ 111.76±1.01 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 20 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.50-4.51, ตารางที่ 4.32)



ภาพที่ 4.50 คาร์โบไฮเดรต (µg/ml) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L



ภาพที่ 4.51 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

ปริมาณไขมัน การสะสมไขมันของ *B. braunii* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L พบว่า ปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 33.82±0.29 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 16 ของการทดลอง ผลผลิตน้ำมันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.23±0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลองโดยไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 20 ของการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 41.49±1.47 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 4 ของการทดลอง โดยพบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ตารางที่ 4.31)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมด พบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้น พบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัวปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกวันของการทดลองเท่ากับ 24.48 – 40.36 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 46.63 - 80.32 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 59.68 – 95.03 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละวันของการทดลอง

ตารางที่ 4.31 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

วัน	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (1/day)	ชีวมวล (g/l)	ปริมาณน้ำมัน (%)	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)	กำลังผลิตน้ำมัน (mg/l/day)
0	0.00±0.00^{a}	0.15±0.01^{a}	20.98±0.55^{a}	0.03±0.00^{a}	0.00±0.00^{a}
4	0.16±0.00^{e}	0.29±0.01^{b}	25.85±0.85^{b}	0.07±0.00^{b}	41.49±1.47^{c}
8	0.13±0.01^{d}	0.42±0.01^{c}	28.09±1.12^{bc}	0.12±0.01^{c}	35.93±3.11^{b}
12	0.11±0.00^{c}	0.56±0.01^{d}	29.07±0.67^{c}	0.16±0.01^{d}	30.87±1.54^{b}
16	0.10±0.00^{bc}	0.73±0.01^{e}	32.23±1.34^{d}	0.23±0.01^{e}	31.86±2.11^{b}
20	0.09±0.00^{b}	0.66±0.01^{f}	33.82±0.29^{d}	0.22±0.00^{e}	30.52±0.73^{b}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

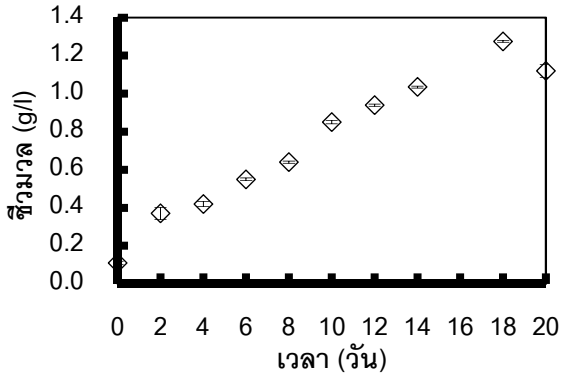
ตารางที่ 4.32 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *B. braunii* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 150 % : ฟอสฟอรัส 0.56 g/L

วัน	ชีวมวล (g/l)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)	แคโรทีนอยด์ (mg/l)	โปรตีน (mg/l)	โปรตีน(mg/g)	คาร์โบไฮเดรท (mg/l)	คาร์โบไฮเดรท (mg/g)
0	0.15±0.01 a	0.35±0.02 a	0.09±0.00 a	104.12±0.48 a	697.11±26.06 e	9.05±0.16 a	60.63±2.96 b
2	0.22±0.01 b	0.57±0.01 b	0.24±0.01 b	130.98±0.92 b	582.75±9.97 b	10.27±0.25 b	45.75±1.83 a
4	0.29±0.01 c	0.67±0.01 c	0.28±0.00 c	144.03±0.92 c	507.14±18.04 a	12.99±0.12 c	45.71±1.49 a
6	0.35±0.01 d	0.96±0.00 d	0.32±0.00 d	166.62±0.96 d	477.72±15.20 a	14.21±0.04 d	40.77±1.50 a
8	0.42±0.01 e	1.04±0.01 e	0.41±0.00 e	255.22±0.25 e	615.96±14.09 bc	26.76±0.31 d	64.60±1.95 b
10	0.46±0.01 f	1.22±0.01 f	0.42±0.01 f	404.06±0.58 f	889.19±18.09 g	32.28±0.08 e	71.03±1.36 c
12	0.56±0.01 e	1.27±0.01 g	0.49±0.00 g	420.38±0.63 g	786.48±13.47 f	47.23±0.26 f	88.37±1.78 d
14	0.64±0.02 h	1.42±0.01 h	0.51±0.00 h	424.39±0.86 h	669.72±17.15 de	57.35±0.21 g	90.48±2.10 d
16	0.73±0.01 i	1.56±0.00 j	0.54±0.00 i	435.19±0.58 i	600.57±7.80 bc	65.66±0.38 h	90.61±1.29 d
18	0.76±0.01 j	1.64±0.01 k	0.56±0.00 j	454.77±1.33 j	598.57±6.46 bc	69.78±0.15 i	91.85±1.00 d
20	0.66±0.01 h	1.53±0.00 i	0.58±0.00 k	418.87±1.66 g	639.99±11.32 cd	73.18±0.44 j	111.76±1.01 e

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

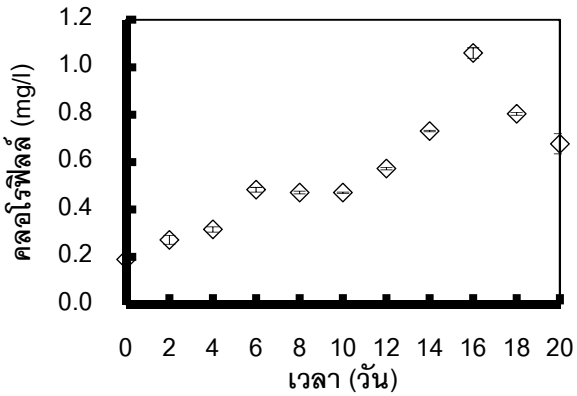
4.3.4 การศึกษาผลของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไขมันของสาหร่าย *Scenedesmus dimorphus*

การเจริญเติบโต ค่าชีวมวลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L พบว่าน้ำหนักแห้งของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.59 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ณ วันที่ 16 ของการทดลองโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.52, ตารางที่ 4.33)



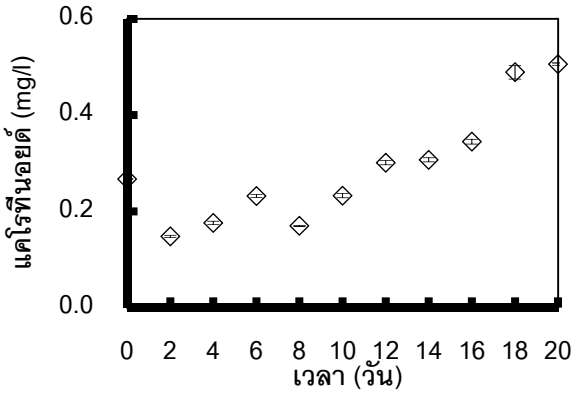
ภาพที่ 4.52 ชีวมวล (g/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

รงควัตถุ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L พบว่ามีค่าคลอโรฟิลล์ เอ ของสาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.06±0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.53, ตารางที่ 4.33)



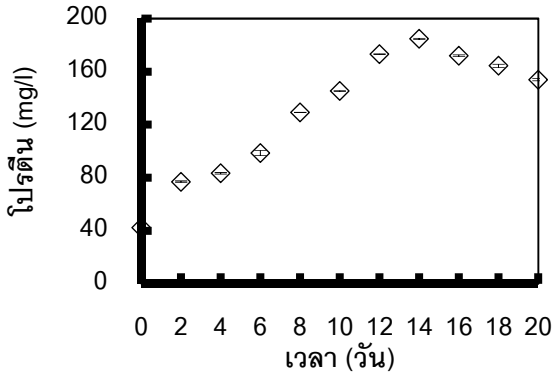
ภาพที่ 4.53 คลอโรฟิลล์-เอ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

ปริมาณแคโรทีนอยด์ ของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น มีค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ สูงสุดเท่ากับ 0.51±0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.54, ตารางที่ 4.33)

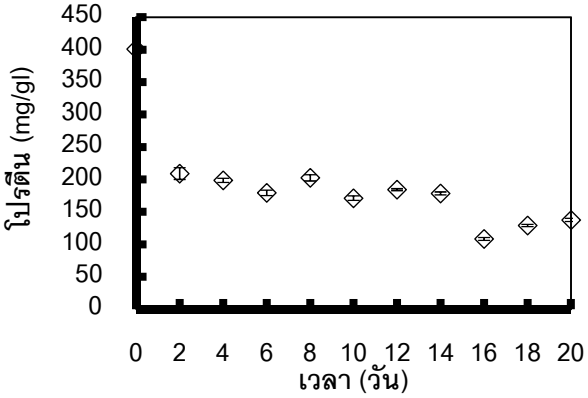


ภาพที่ 4.54 แคโรทีนอยด์ (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

ปริมาณโปรตีนของสาหร่ายขนาดเล็ก *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดเท่ากับ 184.69±0.51 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 14 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง และ 400.79±48.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง มีความแตกต่างกันทางสถิติกับวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.55-4.56, ตารางที่ 4.33)

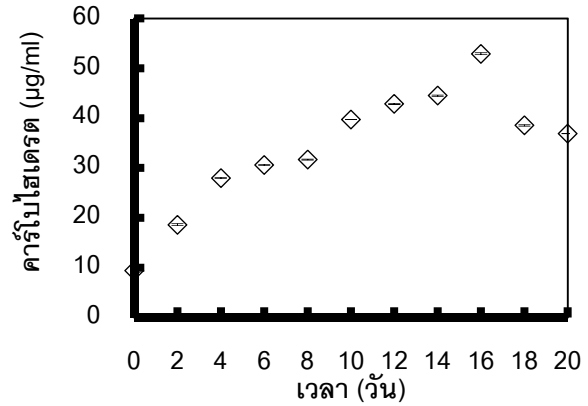


ภาพที่ 4.55 โปรตีน (mg/l) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

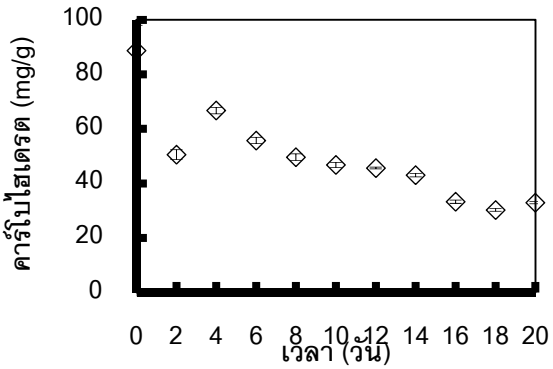


ภาพที่ 4.56 โปรตีน (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L สาหร่ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 52.90±0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลองที่ และ 88.66±9.34 มิลลิกรัมต่อกรัม ในวันที่ 0 ของการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ภาพที่ 4.57-4.58, ตารางที่ 4.33)



ภาพที่ 4.57 คาร์โบไฮเดรต (µg/ml) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L



ภาพที่ 4.58 คาร์โบไฮเดรต (mg/g) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

ปริมาณไขมัน การสะสมไขมันของ *S. dimorphus* ที่เลี้ยงในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L พบว่า ปริมาณน้ำมันที่พบในสาหร่ายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 28.39±0.99 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยไม่แตกต่างทางสถิติกับวันที่ 16 ของการทดลอง ผลผลิตน้ำมันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.44±0.01 กรัมต่อลิตร ในวันที่ 16 ของการทดลองซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง กำลังการผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 78.67±6.92 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 4 ของการทดลองโดยพบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกวันของการทดลอง (ตารางที่ 4.34)

ปริมาณกรดไขมัน จากการทดลองเลี้ยงสาหร่าย *S. dimorphus* ในความเข้มข้นของปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) โดยเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบไขมันทั้งหมด (ภาพที่ 4.59) ซึ่งพบค่ากรดไขมันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าของกรดไขมันที่พบมากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นนั้น พบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัว ปาล์มิติก (C16:0) มากที่สุดในทุกวันของการทดลองเท่ากับ 24.48 – 40.36 % และเปอร์เซ็นต์รวมทั้งหมดของกรดไขมัน C 16-18 เท่ากับ 46.63 - 80.32 % และ C 10 ถึง C 18 : 2 มีค่าเท่ากับ 59.68 – 95.03 % ของกรดไขมันทั้งหมดในแต่ละวันของการทดลอง

ตารางที่ 4.33 คุณค่าทางโภชนาการและรงควัตถุของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

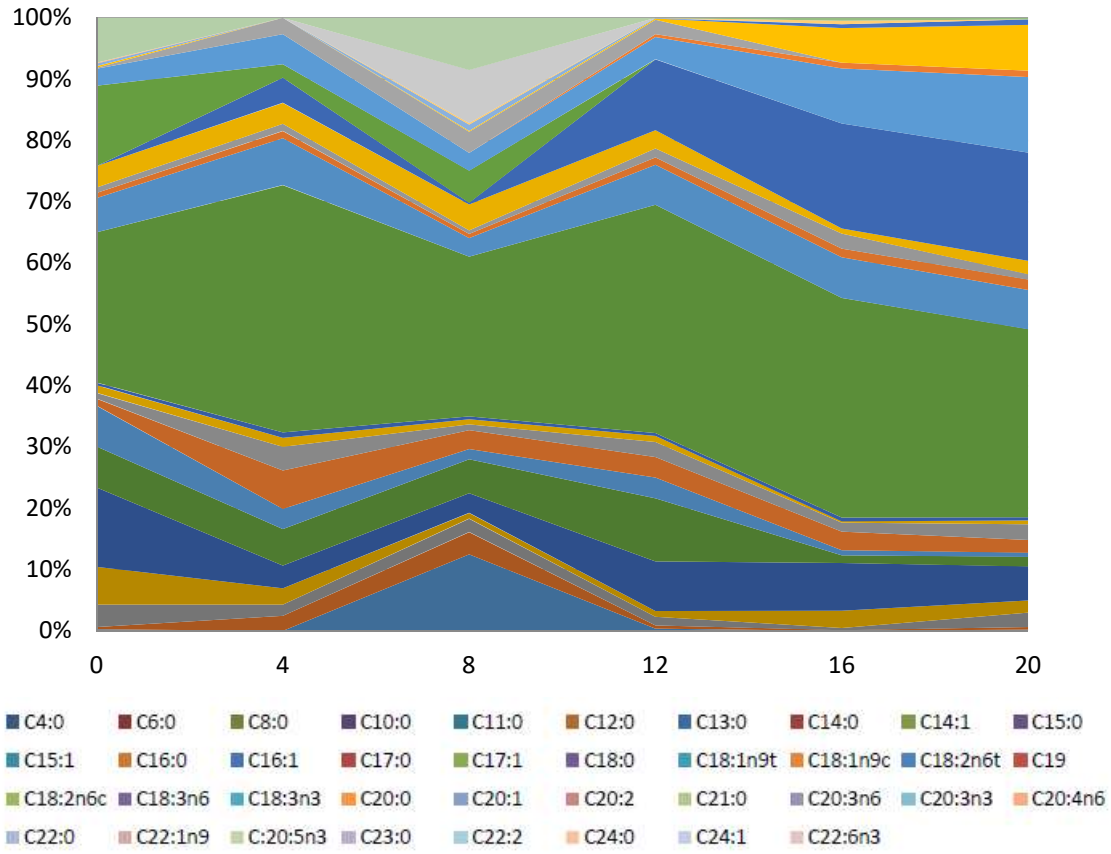
วัน	ชีวมวล (g/l)	คลอโรฟิลล์ เอ (mg/l)	แคโรทีนอยด์ (mg/l)	โปรตีน (mg/l)	โปรตีน(mg/g)	คาร์โบไฮเดรท (mg/l)	คาร์โบไฮเดรท (mg/g)
0	0.11±0.01^{a}	0.19±0.00^{a}	0.27±0.00^{d}	42.22±0.21^{a}	400.79±48.85^{e}	9.41±0.34^{a}	88.66±9.34^{e}
2	0.37±0.01^{b}	0.27±0.00^{b}	0.15±0.00^{a}	76.95±0.59^{b}	208.91±8.92^{d}	18.62±0.18^{b}	50.49±1.80^{bc}
4	0.42±0.01^{c}	0.32±0.01^{c}	0.18±0.00^{b}	83.31±0.51^{c}	198.54±3.21^{d}	27.97±0.07^{c}	66.67±1.20^{d}
6	0.55±0.01^{d}	0.48±0.00^{c}	0.23±0.00^{c}	98.52±1.76^{d}	179.35±4.33^{cd}	30.59±0.11^{d}	55.70±1.18^{c}
8	0.64±0.01^{e}	0.47±0.00^{c}	0.17±0.00^{b}	129.26±0.18^{e}	202.28±4.70^{d}	31.71±0.08^{e}	49.62±1.16^{bc}
10	0.85±0.02^{f}	0.47±0.00^{c}	0.23±0.00^{c}	145.33±0.21^{f}	171.17±3.27^{bcd}	39.71±0.05^{h}	46.78±0.89^{bc}
12	0.94±0.01^{g}	0.57±0.01^{d}	0.30±0.00^{e}	173.15±0.11^{j}	184.24±1.51^{cd}	42.86±0.12^{i}	45.61±0.34^{b}
14	1.04±0.01^{h}	0.73±0.01^{f}	0.31±0.00^{e}	184.69±0.51^{k}	178.53±2.24^{cd}	45.51±0.12^{j}	43.03±0.63^{b}
16	1.59±0.03^{j}	1.06±0.02^{h}	0.35±0.00^{f}	171.97±0.56^{i}	108.26±2.08^{a}	52.90±0.20^{k}	33.30±0.63^{a}
18	1.28±0.02^{k}	0.8±0.01^{g}	0.49±0.01^{g}	164.42±1.25^{h}	129.03±1.76^{ab}	38.54±0.13^{g}	30.25±0.46^{a}
20	1.12±0.02^{i}	0.68±0.03^{e}	0.51±0.00^{h}	153.96±0.95^{g}	137.56±2.36^{abc}	36.98±0.05^{f}	32.96±0.51^{a}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

ตารางที่ 4.34 การเจริญเติบโตและปริมาณน้ำมันของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

วัน	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (1/day)	ชีวมวล (g/l)	ปริมาณน้ำมัน (%)	ผลผลิตน้ำมัน (g/l)	กำลังผลิตน้ำมัน (mg/l/day)
0	0.00±0.00^{a}	0.11±0.01^{a}	22.37±0.26^{a}	0.02±0.00^{a}	0.00±0.00^{a}
4	0.34±0.03^{d}	0.42±0.01^{b}	23.18±0.26^{ab}	0.10±0.00^{b}	78.67±6.92^{c}
8	0.22±0.02^{c}	0.64±0.01^{c}	24.48±0.30^{ab}	0.16±0.00^{c}	54.56±4.05^{b}
12	0.18±0.01^{bc}	0.94±0.01^{d}	25.26±0.89^{b}	0.24±0.01^{d}	45.38±1.61^{b}
16	0.17±0.01^{b}	1.59±0.03^{f}	27.86±1.07^{c}	0.44±0.01^{f}	47.08±3.59^{b}
20	0.17±0.01^{b}	1.12±0.02^{e}	28.39±0.99^{c}	0.32±0.01^{e}	47.59±0.89^{b}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันคือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$



ภาพที่ 4.59 ปริมาณกรดไขมัน (%) ของสาหร่าย *S. dimorphus* ในอาหารสูตรการค้า (urea 46-0-0) 200 % : ฟอสฟอรัส 0.28 g/L

4.4. ศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ได้จาก *B. braunii* KMITL

นำน้ำมันที่สกัดได้จากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในทุกชุดการทดลอง (รวม 22 ชุดการทดลอง) มาเปลี่ยนรูปเป็นไบโอดีเซลและศึกษาคุณสมบัติ โดยวิเคราะห์ค่าตามมาตรฐานกำหนดคือ Cetane number (CN), Degree of unsaturation (DU), Cold filter plugging point (CFPP), Saponification value (SV) และ Iodine value (IV) (ตารางที่ 4.35-4.40)

จากการนำน้ำมันที่ได้จากสาหร่ายมาเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลและทำการศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลของน้ำมันที่ได้ พบว่าค่าซีเทน หรือ cetane number (CN) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นดัชนีหลักในการบอกคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล เป็นค่าที่มีผลต่อความเร็วในการจุดติดและคุณภาพของการเผาไหม้ โดยไบโอดีเซลที่มีค่า CN สูง จะมีคุณสมบัติในการจุดติดที่ดี ทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยมาตรฐานระดับโลกจากสองแหล่งกำหนดเกณฑ์ค่า CN ไว้ ว่าต้องไม่ต่ำกว่า 47 และ 51 (ASTM D6751, 2012 และ EN 14214 Fuel Standard (Biodiesel) Determination, 2003) เมื่อพิจารณาจากค่าซีเทนของกรดไขมัน โดยพิจารณาเฉพาะกรดไขมันที่ให้ซีเทนมากกว่า 47 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานต่ำสุดที่กำหนดไว้ โดยพบว่าสาหร่ายในทุกชุดการทดลองมีค่าซีเทน สูงกว่าค่ามาตรฐานทั้งหมด

ค่า iodine value (IV) คือค่าของความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความคงตัวต่อการถูกออกซิไดส์ โดยไบโอดีเซลที่มีค่า IV สูง นั่นคือจะมีความเสถียรหรือความคงตัวต่ำ จะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายกว่าไบโอดีเซลที่มีค่า IV ต่ำ (Knothe, 2009) โดยเกณฑ์มาตรฐานของยุโรปกำหนดค่า IV ไว้ว่าต้องไม่เกิน 120 g I_2/100 g ซึ่งหากสาหร่ายมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง จะส่งผลให้ค่า IV ของไบโอดีเซลสูง ซึ่งปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวยังส่งผลต่อค่า degree of unsaturation (DU) เป็นค่าที่ระบุถึงความสามารถหรือระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำมันไบโอดีเซลให้คงตัวอยู่ในสภาพเดิมไม่ถูกออกซิไดส์ โดยไบโอดีเซลที่มีค่า DU ต่ำ จะมีความเสถียรหรือยังคงตัวที่ดีแม้เก็บรักษาเป็นเวลานาน นั่นคือหากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณต่ำ จะทำให้เก็บรักษาน้ำมันไบโอดีเซลได้นานนั่นเอง โดยจากการทดลองนี้สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในทุกชุดการทดลองมีค่า IV อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกค่า ซึ่งส่งผลดีต่อการเก็บรักษาน้ำมันไบโอดีเซล

ค่า cold filter plugging point (CFPP) คือค่าในการทำนายคุณสมบัติการไหลของน้ำมันไบโอดีเซลที่ระดับอุณหภูมิต่ำ ไบโอดีเซลที่มีค่า CFPP สูง จะมีการไหลที่อุณหภูมิต่ำด้อยกว่าไบโอดีเซลที่มีค่า CFPP ต่ำ (Wu *et al*., 2005) โดยค่า CFPP สูงจะมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนและอุดตันตัวกรองได้ง่าย (Mittelbach and Remschmidt, 2004) ซึ่งหากสาหร่ายมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงจะส่งผลให้ค่า CFPP สูงด้วยเช่นกัน โดยพบว่าสาหร่ายที่มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงที่สุด ซึ่งหากนำไขมันจากสาหร่ายนี้ไปทำไบโอดีเซล ย่อมมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันเครื่องยนต์ได้

ตารางที่ 4.35 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* และ *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยสูตรการค้า (NPK)

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^{o}C)
B. braunii							
	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	207.24	69.11	55.01	74.88	4.83	-1.31
	8	228.04	41.38	59.68	47.93	6.19	2.97
	12	216.69	45.86	59.79	46.94	4.77	-1.48
	16	223.46	44.88	59.28	46.93	4.58	-2.10
	20	223.82	35.21	61.71	37.05	5.25	0.01
S. dimorphus							
	0	227.74	25.72	63.71	28.47	18.84	42.72
	4	220.87	38.49	61.20	39.75	5.57	1.01
	8	222.58	27.66	63.77	29.96	36.37	97.79
	12	254.52	24.47	61.50	25.25	4.78	-1.46
	16	211.71	39.60	61.98	41.72	5.09	-0.49
	20	201.91	43.09	62.34	43.96	39.55	107.78

ตารางที่ 4.36 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรียที่ระดับแตกต่างกัน

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^oC)
Urea 1%	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	222.96	28.65	63.48	32.02	7.11	5.85
	8	214.82	40.21	61.45	45.66	7.69	7.69
	12	234.28	29.96	61.96	31.21	4.24	-3.14
	16	218.93	43.91	60.03	44.53	5.25	0.03
	20	220.95	43.47	59.92	46.50	4.73	-1.61
Urea 50%	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	231.01	30.75	62.08	32.81	4.81	-1.37
	8	206.89	59.91	57.41	74.59	6.42	3.68
	12	239.27	28.29	61.90	29.92	4.38	-2.72
	16	218.72	37.83	61.61	39.88	5.63	1.21
	20	216.56	38.02	61.81	39.87	6.77	4.81
Urea 100%	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	224.49	31.34	62.62	33.04	6.37	3.52
	8	222.65	34.45	62.03	39.26	6.14	2.80
	12	224.44	33.87	61.98	35.87	5.55	0.97
	16	220.33	38.64	61.22	40.54	5.08	-0.51
	20	217.65	40.93	60.94	42.85	6.30	3.31
Urea 150%	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	227.52	24.14	64.13	26.04	5.59	1.09
	8	209.74	43.02	61.35	51.69	8.42	9.96
	12	217.66	51.74	58.18	57.80	4.91	-1.06
	16	224.28	35.85	61.49	38.22	5.28	0.12
	20	215.44	39.04	61.68	41.65	7.56	7.29
Urea 200%	0	195.39	47.87	62.03	54.25	35.69	95.65
	4	220.93	29.53	63.47	32.19	7.06	5.71
	8	212.03	46.60	60.16	52.12	14.90	30.32
	12	222.53	51.25	57.76	56.11	4.48	-2.39
	16	212.86	53.30	58.35	56.62	5.74	1.56
	20	217.08	38.63	61.59	40.92	7.51	7.12

ตารางที่ 4.37 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรียที่ระดับแตกต่างกัน

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^oC)
Urea 1%	0	226.35	74.31	51.46	72.27	1.93	-10.42
	4	220.63	21.67	65.51	24.40	5.28	0.11
	8	242.79	9.10	66.46	10.24	2.36	-9.05
	12	237.04	17.12	64.96	18.76	7.68	7.64
	16	218.56	9.96	68.73	10.21	8.83	11.27
	20	204.80	66.12	56.09	68.09	10.29	15.84
Urea 50%	0	226.35	74.31	51.46	72.27	1.93	-10.42
	4	218.34	23.19	65.38	25.95	7.10	5.82
	8	209.44	30.51	64.58	32.87	8.60	10.54
	12	219.09	10.28	68.59	9.81	12.34	22.28
	16	220.23	15.67	67.09	16.46	9.36	12.94
	20	213.15	66.03	55.07	67.30	13.55	26.08
Urea 100%	0	226.35	74.31	51.46	72.27	1.93	-10.42
	4	213.49	25.28	65.42	28.42	6.14	2.80
	8	214.07	23.74	65.74	26.22	6.98	5.44
	12	219.69	28.61	63.85	32.03	5.21	-0.12
	16	224.31	12.57	67.43	13.83	8.32	9.67
	20	218.90	39.99	61.04	39.77	6.35	3.48
Urea 150%	0	226.35	74.31	51.46	72.27	1.93	-10.42
	4	213.25	24.24	65.71	27.56	6.78	4.83
	8	212.03	27.37	65.06	30.52	8.51	10.26
	12	219.62	8.65	68.95	9.02	8.09	8.94
	16	215.37	32.41	63.38	32.26	9.18	12.37
	20	225.04	18.94	65.72	19.51	6.85	5.06
Urea 200%	0	226.35	74.31	51.46	72.27	1.93	-10.42
	4	214.41	34.11	63.06	38.70	6.42	3.69
	8	213.70	19.94	66.76	21.60	10.81	17.47
	12	219.26	7.81	69.20	8.33	8.83	11.28
	16	214.62	22.63	65.96	23.54	9.40	13.04
	20	205.63	39.94	62.66	42.37	20.29	47.28

ตารางที่ 4.38 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยร่วมกันที่ระดับเหมาะสม

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^oC)
Urea+Fe	0	228.79	37.38	60.62	38.04	12.14	21.67
	4	244.33	32.52	60.35	33.26	6.55	4.11
	8	221.89	50.62	57.99	49.65	12.61	23.14
	12	245.70	34.48	59.72	31.93	6.30	3.31
	16	218.27	53.53	57.66	57.59	12.92	24.12
	20	218.16	51.62	58.15	54.26	14.34	28.57
Urea+salt	0	465.67	9.67	55.56	9.84	3.14	-6.61
	4	223.00	62.67	54.79	68.58	11.05	18.25
	8	255.65	24.06	61.51	25.19	5.36	0.38
	12	246.10	27.12	61.56	28.50	7.33	6.55
	16	233.56	40.34	59.38	43.16	10.01	14.98
	20	213.16	50.65	58.99	54.75	15.15	31.11
NPK+Fe	0	465.67	9.67	55.56	9.84	3.14	-6.61
	4	227.16	29.34	62.85	30.45	12.27	22.08
	8	215.05	59.35	56.54	64.17	19.24	43.95
	12	216.60	48.72	59.08	52.04	14.84	30.13
	16	232.56	37.33	60.25	39.78	12.15	21.70
	20	223.65	42.14	59.96	45.48	16.47	35.26
NPK+Salt	0	228.79	37.38	60.62	38.04	12.14	21.67
	4	260.41	20.14	62.12	19.45	4.59	-2.07
	8	218.84	44.88	59.80	47.11	13.41	25.66
	12	244.61	29.80	61.01	28.84	7.80	8.04
	16	275.38	22.07	60.49	17.60	5.42	0.56
	20	289.73	25.42	58.66	25.24	5.38	0.44

ตารางที่ 4.39 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยปุ๋ยร่วมกันที่ระดับเหมาะสม

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^oC)
ยูเรียร่วมกับเหล็ก							
	0	223.89	77.95	50.80	67.40	20.21	47.01
	4	271.14	46.60	54.55	47.63	5.81	1.77
	8	222.33	64.42	54.42	66.51	5.79	1.72
	12	202.58	84.65	51.66	69.47	9.14	12.22
	16	217.46	67.08	54.29	66.37	4.48	-2.41
	20	206.82	66.95	55.62	71.50	4.58	-2.09
ยูเรียร่วมกับความเค็ม							
	0	223.89	77.95	50.80	67.40	20.21	47.01
	4	213.15	49.00	59.41	50.83	5.98	2.32
	8	235.09	41.04	59.05	42.39	4.82	-1.34
	12	206.47	61.59	57.03	66.95	8.35	9.74
	16	199.75	68.02	56.28	74.79	14.45	28.93
	20	234.63	16.47	65.36	15.85	4.60	-2.04
NPKร่วมกับเหล็ก							
	0	223.89	77.95	50.80	67.40	20.21	47.01
	4	257.88	37.33	57.95	38.16	4.60	-2.01
	8	202.57	44.52	61.89	48.31	9.91	14.66
	12	211.89	55.11	58.01	60.60	10.13	15.34
	16	203.59	73.21	54.44	80.85	9.91	14.66
	20	205.92	54.26	58.97	59.81	12.47	22.70
NPK ร่วมกับความเค็ม							
	0	223.89	77.95	50.80	67.40	20.21	47.01
	4	216.96	48.45	59.10	50.20	6.19	2.98
	8	227.74	49.17	57.73	51.97	7.06	5.71
	12	206.76	53.34	59.10	59.51	12.19	21.82
	16	204.02	50.64	60.14	51.12	6.59	4.23
	20	213.68	63.73	55.59	70.63	7.36	6.63

ตารางที่ 4.40 คุณสมบัติไบโอดีเซลของสาหร่าย *B. braunii* และ *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงโดยได้รับปุ๋ยยูเรีย ร่วมกับฟอสฟอรัส

	Day	SV	IV (g I_2 100 g^{-1})	CN	DU (wt.%)	LCSF (wt. %)	CFPP (^oC)
B. braunii							
	0	208.34	48.84	60.04	45.00	11.13	18.50
	4	196.72	71.52	55.81	48.47	14.65	29.54
	8	195.42	95.76	49.81	71.74	4.54	-2.20
	12	187.17	133.27	41.48	107.98	18.67	42.19
	16	195.40	75.74	54.92	56.79	13.23	25.09
	20	274.72	7.62	64.22	7.21	0.00	-16.48
S. dimorphus							
	0	227.74	25.72	63.71	28.47	18.84	42.72
	4	224.44	34.11	61.92	35.07	5.74	1.56
	8	256.23	38.90	57.68	43.40	21.73	51.80
	12	222.67	34.34	62.06	36.01	5.22	-0.07
	16	211.58	59.07	57.03	60.65	4.60	-2.03
	20	212.67	67.62	54.72	69.62	5.04	-0.64

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *B. braunii* ในปุ๋ยสูตรการค้า (N:P:K) สาหร่ายให้ชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 1.96+0.03 กรัมต่อลิตร และมีน้ำมันสูงสุด 47.07±0.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพาะเลี้ยงในยูเรีย 200 % ส่วนสาหร่าย *S. dimorphus* ที่เพาะเลี้ยงในปุ๋ย (N:P:K มีชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 1.65 ± 0.02 กรัมต่อลิตร และมีน้ำมันสูงสุด 40.80±0.97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพาะเลี้ยงในยูเรีย 200 % ค่าซีเทนของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากสาหร่ายทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM D975 กำหนดไว้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 50.80-69.20 โดยพบว่าการเพาะเลี้ยงโดยได้รับเพียงยูเรียและฟอสฟอรัส จะทำให้สาหร่ายมีค่าซีเทนต่ำที่สุด

บรรณานุกรม

Antoni, D.; Zverlov, V.V.; and Schwarz, H. 2007. Biofuels from Microbes. Appl. Microbiol. Biotechnol. 77:23-35.

Arumugam M., Agarwal A., Arya M.C. and Ahmed Z. 2013. Influence of nitrogen sources on biomass productivity of microalgae *Scenedesmus bijugatus*. Bioresource Technology. 131:246–249.

Ashokkumar, V., Agila, E., Sivakumar, P., Salam, Z., Rengasamy, R., Ani, F.N., 2014. Optimization and characterization of biodiesel production from microalgae *Botryococcus* grown at semi-continuous system. Energy Convers. Manage. 88, 936–946.

ASTM D6751, 2012. Standard specification for biodiesel fuel (B100) blend stock for middle distillate fuels. Retrieved from https://www.dieselnet.com/tech/fuel_biodiesel_std.php on 5 November 2015

Becker, E.W. 1994. Microalgae : biotechnology and microbiology In:Baddiley,J.(Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, NewYork.

Bertilsson, S., O. Berglund, D.M. Karl, S.W. Chisholm. 2003. Elemental composition of marine Prochlorococcus and Synechococcus: implications for the ecological stoichiometry of the sea, Limnol. Oceanogr. 48 : 1721–1731.

Bligh, E.G. and W.J. Dyer. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. Can. J. Biochem. Phys. 37: 911–917.

Campos H., Boeing W.J., Dungan B.N. and Schaub T. 2014. Cultivating the marine microalga *Nannochloropsis salina* under various nitrogen sources: Effect on biovolume yields, lipid content and composition, and invasive organisms. Biomass and Bioenegy. 66: 301-307.

Chen, C.Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.Jl., and Chang, J.S. 2011. Cultivation photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. Bioresource Technology. 102:71-81.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances 25:294–306.

Chisti, Y. 2008. Biodiesel from Microalgae Beats Bioethanol. Trends Biotechnol. 26:126-131.

Chu, F.F., Chu, P.N., Cai, P.J., Li, W.W., Lam, P.K.S. and Zeng, R.J. 2013. Phosphorus plays an important role in enhancing biodiesel productivity of Chlorella vulgaris under nitrogen deficiency. Bioresource Technology. 134:341-346.

Chu, F.F., Chu, P.N., Shen, X.F., Lam, P.K.S. and Zeng, R.J. 2014. Effect of phosphorus on biodiesel production from *Scenedesmus obliquus* under nitrogen-deficiency stress. Bioresource Technology. 152:241-246.

Colla, L.M., Reinehr, C.O., Reichert, C. and Costa, J.A.V. 2007. Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. Bioresource Technology 98 : 1489–1493.

Concas, A., Steriti, A., Pisu, M., and Cao, G. 2014. Comprehensive modeling and investigation of the effect of iron on the growth rate and lipid accumulation of Chlorella vulgaris cultured in batch photobioreacotors. Bioresource Technology. 153:340-350.

Converti, A., Casazza, A.A., Ortiz, E.Y., Perego, P., Del Borghi, M., 2009. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. Chem. Eng. Process. 48, 1146-1151.

Danesi, E.D.G., Rangel-Yagui, C.O., Carvalho, J.C.M., Sato, S., 2002. An investigation of effect of replacing nitrate by urea in the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*. Biomass Bioenerg. 23:261–269.

Demirbas, A. 2011. Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems. Applied Energy. 88:3541-3547.

Fang, J.Y., H.C. Chiu, J.T. Wu, Y.R. Chiang and S.H. Hsu. 2004. Fatty acids in *Botryococcus braunii* accelerate topical delivery of flurbiprofen into and across skin. Int. J. Pharm. 276: 163-173.

Feng, P., Deng, Z., Fan, L., and Hu, Z. 2012. Lipid accumulation and growth characteristics of *Chlorella zofingiensis* under different nitrate and phosphate concentrations. Journal of Bioscience and Bioengineering. 114:405-410.

Fernandes B., Teixeira J., Dragone G., Vicente A.A., Kawano S., Bišova K. I, Prˇibyl P., Zachleder V., Vitova M. 2013. Relationship between starch and lipid accumulation induced by nutrient depletion and replenishment in the microalga *Parachlorella kessleri*. Bioresource Technology 144:268–274.

Francisco, E.C., D.B. Neves, E.J. Lopes and T.T. Franco. 2010. Microalgae as feedstock for biodiesel production: carbon dioxide sequestration, lipid production and biofuel quality. J. Chem. Technol. Biotechnol. 85: 395–403.

Fuel Standard (Biodiesel) Determination, 2003. Approved under section 21 of the fuel quality standard act 2002 by the Australian minister for the environment and heritage, 2003. Retrieved from https://www.comlaw.gov.au/Details/F2006B01373 on 5 November 2015.

Ge, Y., J. Liu and G. Tian. 2011. Growth characteristics of *Botryococcus braunii* 765 under high CO_2 concentration in photobioreactor. Bioresource Technol. 102: 130-134.

Harold, F.M. 1966. Inorganic polyphosphates in biology:structure, metabolism, and function. Bacteriological Reviews. 30:772-794.

Hsieh, C.H., and Wu, W.T. 2009. Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation. Bioresource Technology 100:3921-3926.

http://sciinaction.blogspot.com/2007/12/blog-post_18.html

Hu, Q. 2004. Environmental effects on cell composition, in: Richmond, A., (Eds.). Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Science, Victoria, pp. 83-93.

Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., and Darzins, A. 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. The plant Journal. 54:621-639.

Huang, G.H., Chen, F., Wei, D., Zhang, X., and Chen, G. 2010. Biodiesel production by microalgal biotechnology. Applied Energy. 87:38–46

Kadam, K.L. 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. Energy 27: 905-922.

Karemore, A., Pal, R., and Sen, R. 2013. Strategic enhancement of algal biomass and lipid in Chlorococcum infusionum as bioenergy feedstock. Algal Research. 2:113-121.

Knothe, G. 2005. "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters." Fuel Process Technol. 86: 1059-1070.

Knothe, G. 2008. "Designer" biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. Energy Fuels. 22: 1358–1364.

Knothe, G., 2009. Improving biodiesel fuel properties by modifying fatty ester composition. Energy Environ. Sci. 2, 759–766.

Kuesel A.C., Sainoudis J., Leibfritz D., Grimme L.H. and Mayer A. 1989. P-31 in-vivo NMR investigation on the function of polyphosphates as phosphate- and energysource during the regreening of the green alga Chlorella fusca. Archives of Microbiology. 152:167-171.

Kumar, A., S. Ergas, X. Yuan, A. Sahu, Q. Zhang, J. Dewulf, F.X. Malcata and H. Langenhove. 2010. Enhanced CO_2 fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. Trends Biotechnol. 28: 371-380.

Lin Q and Lin J. 2011. Effects of nitrogen source and concentration on biomass and oil production of a *Scenedesmus rubescens* like microalga. Bioresource Technology 102 : 1615–1621.

Mata, T.M., Martins, A.A., and Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 :217–232

Matsudo M.C., Bezerra R.P., Sato S., Perego P., Converti A., Carvalho J.C.M. 2009. Repeated fed-batch cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* using urea as nitrogen source. Biochem. Eng. J. 43:52–57.

Miao, X.L., R.X. Li and H.Y. Yao. 2009. Effective acid-catalyzed transesterification for biodiesel production. Energy Convers. Manage. 50: 2680–2684.

Mittelbach, M., Remschmidt, C., 2004. Biodiesel: the Comprehensive Handbook, Boersedruck Ges. M.B.H., Vienna.

Nascimento, I.A., Marques, S.S.I., Cabanelas, I.T.D., Pereira, S.A., Druzian, J.I., Oliveira de Souza, C., Vich, D.V., Correia de Carvalho, G., Nascimento, M.A., 2013. Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty acid profiles as selective criteria. Bioenergy Res. 6, 1-13.

Pooja, K., Himabindu, V., 2012. CO_2 removal from industrial flue gas using *Botryococcus braunii* for simultaneous lipid production. Int. J. Sci. Res. 3: 366-373.

Ranga Rao, A., R. Sarada and G.A. Ravishankar. 2007. Influence of CO_2 on growth and hydrocarbon production in *Botryococcus braunii*. J. Microbiol. Biotechnol. 17: 414-419.

Rao,A.R., C.Dayananda, R.Sarada, T.R.Shamala and G.A.Ravishankar. 2007. Effect of salinity on growth of green alga *Botryococcus braunii* and its constituents. Bioresource Technology.98:560-564.

Ruangsomboon, S. 2015. Effects of different media and nitrogen sources and levels on growth and lipid of green microalga *Botryococcus braunii* KMITL and its biodiesel properties based on fatty acid composition. Bioresource Technol. 191: 377-384.

Ruangsomboon, S., 2012. Effect of light, nutrient, cultivation time and salinity on lipid production of newly isolated strain of the green microalga, *Botryococcus braunii* KMITL 2. Bioresource Technol. 109, 261-265.

Ruangsomboon, S., Ganmanee, M., Choochote, S., 2013. Effects of different nitrogen, phosphorus, and iron concentrations and salinity on lipid production in newly isolated strain of the tropical green microalga, *Scenedesmus dimorphus* KMITL. J. Appl. Phycol. 25, 867-874.

Sawayama, S., Inoue, S., Dote, Y. and Yokoyama, S. 1995. CO_2 fixation and oil production through microalga. Energy Convers. Mgmt. 36:6-9.

Shunqing, Z., Yuping, W., and Jianming, X. 2009. Phosphorus utilization and microbial community in response to lead/iron addition to w waterlogged soil. Journal of environmental Science. 21:1415-1423.

Singh, S.P. and P. Singh. 2014. Effect of CO_2 concentration on algal growth: A review. Renew Sust. Energ. Rev. 38: 172-179.

Spoehr, H., Milner, H.W. 1949. The chemical composition of Chlorella; effect of environmental conditions. Plant Physiology. 24: 120-149.

Sun, X., Cao, Y., Xu, H., Liu, Y., Sun, J., Qiao, D., and Cao, Y. 2014. Effect of nitrogen-stravation, light intensity and iron on triacylglyceride/carbohydrate production and fatty acid profile of *Neochloris oleoabundans* HK-129 a two-stage process. Bioresource Technology. 155:204-212.

Talebi, A.F., Mohtashami, S.K., Tabatabaei, M., Tohidfar, M., Bagheri, Zeinalabedini, M., Hadavand Mirzaei, H., Mirzajanzadeh, M., Shafaroudi, S.M., Bakhtiari, S., 2013. Fatty acids profiling; a selective criterion for screening microalgae strains for biodiesel production. Algal Res. 2, 258–267.

Toledo-Cervantes, A., Morales, M. Novelo, E., and Revah, S. 2013. Carbon dioxide fixation and lipid storage by Scenedesmus obtusiusculus. Bioresource Technology. 130:652-658.

Vonshak, A. and H. Maske. 1982. Algae: growth techniques and biomass production, pp. 66-77. In: J. Coombs and D.O. Hall, eds. Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis. Pergamon Press, Oxford.

Wei, L., Huang, X., Huang ,X. and Zhou, Z. 2013. Orthogonal test design for optimization of lipid accumulation and lipid property in *Nannochloropsis oculata* for biodiesel production. Bioresource Technology. 147:534-538.

Widjaja, A., Chao-Chang, Chien C., Yi-Hsu, C., Ju, Y.H. 2009. Study of increasing lipid production fromfreshwatermicroalgae Chlorella vulgaris. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40:13-20.

Wijffels, R.H., and Barbosa, M.J. 2010. An outlook microalgal biofuels. Science. 329:796-799.

Wu, H., Miao, X., 2014. Biodiesel quality and biochemical changes of microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* in response to nitrate levels. Bioresource Technol. 170, 421-427.

Wu, M., Wu, G., Han, L., Wang, J., 2005. Low-temperature fluidity of bio-diesel fuel prepared from edible vegetable oil. Petrol. Process. Petrochem. 36, 57-60.

Wu, Y.H., Yu Y., and Hu H.Y. 2013. Potential biomass yield per phosphorus and lipid accumulation property of seven microalgal species. Bioresource Technology. 130:599-602.

Xin, L., Hong-ying, H. and Jia, Y. 2010a. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp. LX1, growing in secondary effluent. New Biotechnology. 27:59-63.

Xin.L, H.H.ying, G.Ke and S.Ying-xue. 2010b. Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth,nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. Bioresource Technology.101.5494-5500.

Yoo, C., S-Y. Jun, J-Y. Lee, C-Y. Ahn and H-M. Oh. 2010. Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. Bioresource Technol. 101: 571-574.

Yoshimura, T., S. Okada and M. Honda. 2013. Culture of the hydrocarbon producing microalga *Botryococcus braunii* strain Showa: optimal CO_2, salinity, temperature, and irradiance conditions. Bioresource Technol. 133: 232-239.

Zhila, N.O., G.S. Kalacheva and T.G. Volova. 2005. Influence of nitrogen deficiency on biochemical composition of the green alga *Botryococcus*. J. Appl. Phycol. 17: 309-315.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์
Miss Suneerat Ruangsomboon

เพศ หญิง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ8

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2538	ตรี	วท.บ. (ประมง) วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม)	ม.เกษตรศาสตร์	ไทย
2541	โท	วท.ม. (วิทยาศาสตร์การประมง) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	ม.เกษตรศาสตร์	ไทย
2549	เอก	Ph.D. (Environmental Technology)	King Mongkut's University of Technology Thonburi (International program)	ไทย

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

อนุกรมวิธานของแพลงก์ตอน การใช้ประโยชน์สารสกัดจากสาหร่าย การบำบัดน้ำเสีย

ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

1. ความเป็นไปได้ในการผลิตไข่พักไรแดงเป็นการค้า (งบประมาณแผ่นดิน 2544)
2. การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสีย้อมปนเปื้อนโดยใช้ *Lemna, Chlorella* และ *Phormidium* (ทุนอุดหนุนการวิจัย ม.ศรีปทุม 2544)
3. การกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้ *Oscillatoria* และ *Microcystis* (งบประมาณแผ่นดิน 2546)
4. การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ (สกว. มิ.ย. 2546- มิ.ย. 2547)
5. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดลาบ *Nostoc commune* เพื่อการค้า (รายได้ภาคฯ 2547)
6. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเห็ดลาบ (*Nostoc commune*) และสาหร่ายสไปรูไลน่า (*Spirulina platensis*) ในน้ำนมดิบที่ทิ้งจากโรงงานผลิตนมเพื่อใช้เป็นอาหารปลาสวยงามและปลาเศรษฐกิจ (งบประมาณแผ่นดิน 2548-2549)
7. ผลกระทบของแสง และอุณหภูมิ ที่มีต่อเสถียรภาพการออกฤทธิ์ของสารสกัดจากสาหร่ายในการยับยั้งการงอกและการเติบโตของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2549)
8. ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาสารสกัดจากสาหร่ายต่อการงอกของเมล็ดพืชทดสอบ (รายได้ภาคฯ 2550)
9. การกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากสัตว์น้ำ (เปลือกกุ้ง เปลือกปู) (รายได้คณะฯ 2550)
10. แนวทางในการเพิ่มผลผลิต และปริมาณโปรตีนในปลาช่อนโดยการเลี้ยงด้วยอาหารผสม *Spirulina platensis* (เครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนบนประจำปีงบประมาณ 2550)

11. การเจริญเติบโต และคุณค่าทางโภชนาการของปลาช่อนที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* (รายได้ภาคฯ 2551)
12. ศักยภาพและแนวทางการใช้ประโยชน์จากสาหร่าย *Nostoc commune* (งบประมาณแผ่นดิน 2551-2552)
13. ศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เซลล์สาหร่ายไซยาโนแบคทีเรียที่มีชีวิตในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสีย (สกว. มิ.ย. 2550- มิ.ย. 2552)

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2544. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควบคุมปริมาณแพลงก์ตอนพืช *Oscillatoria*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 9(3):19-23.
2. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2545. การควบคุมการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช *Oscillatoria* โดยใช้ฟอร์มาลินและคลอรีน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 18(3):30-37.
3. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2545. การบำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่วและแคดเมียมปนเปื้อนโดยใช้แหนเป็ดเล็ก (*Lemna perpusilla* Torr.). วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 20 (3):1-11.
4. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์, ศักดิ์ชัย ชูโชติ, ปวีณา ทวีกิจการ และ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์. 2546. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายไซยาโนแบคทีเรีย : *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 21:48-60.
5. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์, ศักดิ์ชัย ชูโชติ, ปวีณา ทวีกิจการ และ จตุพร บัณฑิต. 2546. ผลของความเข้มแสงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำและการสร้างไข่พักของไรแดง. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 21:61-68
6. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2547. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Phormidium angustissimum* และ *Chlorella vulgaris*. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 3(1): 287-296.
7. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2547. การดูดซับตะกั่วและแดคเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ *Scenedesmus dimorphus* เป็นตัวดูดซับ. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 12(1):42-47.
8. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2547. การผลิตไข่พักของไรแดงภายใต้สภาวะการควบคุมระดับพีเอชและแอมโมเนีย. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 22(2):65-75.
9. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และ จำรูญ เล้าสินวัฒนา. 2548. ผลของสารสกัดจากสาหร่ายต่อการงอกของพืชทดสอบ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 36:978-981.
10. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ บุปผา จงพัฒน์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ และ ปวีณา ทวีกิจการ. 2548. คุณค่าทางโภชนาการของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher ที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่แตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 23(2):38-47.
11. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2549. การสร้างไข่พักของไรแดงที่ระดับอุณหภูมิต่ำและอัตราฟักของไข่พักที่ฆ่าเชื้อด้วยฟอร์มาลิน และไข่พักที่เก็บรักษาไว้ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24(2):54-62.
12. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2549. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไข่น้ำ *Wolffia arrhiza* (L.) Wimmer. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 24(3):1-14.

13. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และ จำรูญ เล้าสินวัฒนา. 2549. ผลของแสงและอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของ *Phormidium angustissimum* ในการยับยั้งการงอกของเมล็ดพืชทดสอบ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 37(6):925-928.
14. ผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโต ปริมาณโปรตีนและพอลิแซ็กคาไรด์ของไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* Vaucher. 2549. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14(2):40-49.
15. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2550. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Calothrix marchica* Lemm. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 25:13-26.
16. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2550. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria jasorvensis* และ *Microcystis aeruginosa*. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 14:46-54.
17. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ ปวีณา ทวีกิจการ นิธิ พันธุ์คงชื่น. 2551. การเจริญเติบโตของปลานิลแดง (*Oreochromis niloticus* X *O. mossambicus*) ที่เลี้ยงด้วยอาหารผสม *Spirulina platensis* แห้ง. การประชุมวิชาการประมงครั้งที่ 3 “เพื่อความมั่นคงด้านการประมงและทรัพยากรทางน้ำ” 8-9 ธันวาคม 2551. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ น. 95-104.
18. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ ปวีณา ทวีกิจการ ชาติสุพล เตรียมธนานันท์. 2551. คุณค่าทางโภชนาการและปริมาณรงควัตถุของ *Spirulina platensis* ที่เลี้ยงในปุ๋ยผสมมูลสุกร. การประชุมวิชาการประมงครั้งที่ 3 “เพื่อความมั่นคงด้านการประมงและทรัพยากรทางน้ำ” 8-9 ธันวาคม 2551. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ น. 105-115
19. อทิยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. .การดูดซับตะกั่วโดยไซยาโนแบคทีเรีย Stigonema sp. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 28:20-30.
20. อภิญญา สโมสร, สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์, อำมร อินทร์สังข์ และ จรงศักด์ พุมนวน. 2553. ประสิทธิภาพของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดใหญ่ ต่อไรฝุ่น *Dematophagoides pteronyssinus* (Trouessart) โดยวิธีสัมผัส. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 184-191.
21. อทิยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. การเจริญเติบโตและการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. ที่เลี้ยงภายใต้สารอาหารที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น 193-202.
22. นำถม ตั้งคำ และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกที่มีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. หน้า 305-312.
23. อทิยา สะพานกลาง และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. ผลของการจำกัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของไซยาโนแบคทีเรีย *Hapalosiphon* sp. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 7-8 ธันวาคม 2553. หน้า 1931-1938.

24. กวิน พันธุ์สัมฤทธิ์ และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2553. ผลของพีเอชต่อการดูดซับสีย้อม benewol red โดยสาหร่าย. การประชุมวิชาการงานเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 8 สาขาวิทยาศาสตร์การเกษตร. มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก. ระหว่างตีพิมพ์.
25. กวิน พันธ์สัมฤทธิ์ อทิยา สะพานกลาง และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2554. การดูดซับสีย้อมแอซิด benewol red โดยสาหร่ายสีแดง *Gracilaria fisheri*. ในการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ กุมภาพันธ์ 2554. หน้า 497-506.
26. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ และ ปวีณา ทวีกิจการ. 2555. การใช้อาหารผสมไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* สดและแห้งในการเลี้ยงปลาหมอสี Kenyi Cichlid, Pseudotropheus lombardoi. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40:208-217.
27. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ ศักดิ์ชัย ชูโชติ และ ดุสิต เอื้ออำนวย. 2556. ผลของระยะเวลา แสง และอุณหภูมิในการเก็บรักษาสารสกัดจากไซยาโนแบคทีเรีย, *Phormidium angustissimum* ต่อความสามารถในการยับยั้งการงอกของเมล็ดผักกาดเขียวกวางตุ้ง (*Brassica chinensis* var. *parachinensis* Tsen & Lee). วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 41:973-984.
28. ปิยมาภรณ์ เวียนรอบทิศ และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2556. ผลของเหล็กต่อการเจริญเติบโต ปริมาณไขมันและชนิดกรดไขมันในไซยาโนแบคทีเรีย *Oscillatoria limnetica* (Lemmermann). ในการประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติครั้งที่ 6 เชียงใหม่ มีนาคม 2556. หน้า 28-37.
29. ศุภลักษณ์ โภชนสมบูรณ์ เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม และ สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2556. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำและแพลงก์ตอนพืชในระบบเครือข่ายอ่างเก็บน้ำ (อ่างพวง) บริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี. ในการประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติครั้งที่ 6 เชียงใหม่ มีนาคม 2556. หน้า 77-89
30. จิรรัตน์ พรหมนารถ และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2556. ผลของความเข้มข้นของไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตไขมันของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Scenedesmus dimorphus.* วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 7:92-101
31. วัฒนา นุชซอและ และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2556. ผลของความเข้มข้นของเหล็กที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตไขมันของสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Scenedesmus dimorphus*. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 7:14-24.
32. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ มณฑล แก่นมณี และ จรงศักดิ์ พุมนวน. 2557. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาชะโดและบ่อปลูกผักกระเฉด. ในการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ กุมภาพันธ์ 2557. หน้า 275-283.
33. ปิยมาภรณ์ เวียนรอบทิศ และสุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2557. ผลของเหล็กต่อการเจริญเติบโต ปริมาณไขมันและชนิดกรดไขมันในสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Botryococcus braunii*. ในการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ กุมภาพันธ์ 2557. หน้า 334-342.
34. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์, อำมร อินทร์สังข์ และ จรงศักดิ์ พุมนวน. 2557. ผลของสารสกัดจากไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium angustissimum* ที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารต่างกัน ที่มีต่อฤทธิ์การกำจัดไรฝุ่น *Dermatophagoides pteronyssinus*. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 32:(1)13-20.

35. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และ ศักดิ์ชัย ชูโชติ. 2557. องค์ประกอบทางเคมีและการเติบโตของปลานิลที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมสาหร่ายสี*เขียว Cladophora glomerata*.วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 32:(2)1-8
36. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2558. การดูดซับสีย้อมแอซิด เบเนวอล เรด โดยใช้สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก *Scenedesmus dimorphus* ที่มีชีวิตแบบตรึงเซลล์. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 33:(2) 82-92.

งานวิจัยที่ตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ

1. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004. Bioremoval of Lead by cyanobacteria : *Gloeocapsa* sp. and *Calothrix marchi*ca. Proceeding of the 1st KMITL International Conference on Integration of Science and technology. 2:188-191.
2. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2004 . Lead (Pb^{2+}) Adsorption potentials of *Gloeocapsa* sp. and role of its capsular polysaccharides. Proceeding of The International Conference on Sustainable Energy and Environment. 3(011):210-213 .
3. Ruangsomboon, S., A. Chidthaisong, B. Bunnag, D. Inthorn and N.W. Harvey. 2004b. Lead (Pb^{2+}) Adsorption potentials of *Gloeocapsa* sp. and role of its capsular polysaccharides. Proceeding of The International Conference on Sustainable Energy and Environment. 3(011):210-213 .
4. Ruangsomboon, S. and Wongrat, L. 2006. Bioaccumulation of cadmium in an experimental aquatic food chain involving phytoplankton (*C. regularis)*, zooplankton (*M. macrocopa)*, and the predatory catfish. Aquatic Toxicology. 78:15-20.
5. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006. Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa.* Water Research. 40:3759-3766.
6. Ruangsomboon, S. and Wongrat, L. 2007. Bioaccumulation of Cadmium in an Experimental Aquatic Ecosystem Involving Phytoplankton, Zooplankton, Catfish and Sediment. Kasetsart Journal (Natural Science) 41:180-185.
7. Ruangsomboon, S. 2007. Removal of lead (Pb^{2+}) by the cyanobacterium *Phormidium angustissimum*. Proceedings of The International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST) “Biological Diversity, Food and Agricultural Technology”, Bangkok, Thailand. 26-27 April 2007, 340-344.
8. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2007. Lead (Pb^{2+}) adsorption characteristics and sugar composition of capsular polysaccharides of cyanobacterium *Calothrix marchica.* Songklanakarin Journal of Science and Technology. 29:529-541.

9. Ruangsomboon, S. 2007. Removal of lead (Pb^{2+}) by the cyanobacterium *Phormidium angustissimum*. Proceedings of The International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST) "Biological Diversity, Food and Agricultural Technology". 26-27 April 2007. p. 340-344.
10. Ruangsomboon, S. 2007. Nitrate, ammonia and orthophosphate removal from wastewater by duckweed *Lemna perpusilla* Torr. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 922-925.
11. Ruangsomboon, S. 2007. Study of the parameters affecting the binding of cadmium (Cd^{2+}) in solution by *Phormidium angustissimum* West & G.S. West. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 918-921.
12. Ruangsomboon, S. and Choochote, S. 2007. Effect of feeding diets containing *Nostoc commune* on growth, survival, protein and carotenoid content of red tilapia *Oreochromis niloticus*. Proceedings of International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology. 21-23 November 2007. p. 772-775.
13. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2008. Removal of lead (Pb^{2+}) by cyanobacteria *Gloeocapsa sp*. Bioresource Technology. 99:5650-5658.
14. Ruangsomboon, S. Choochote, S. and Taveekijakarn P. 2010. Growth performance and nutritional composition of red tilapia (*Oreochromis niloticus* X *O. mossambicus*) fed Diets containing raw *Spirulina platensis*. The international conference on Sustainable community development 2010. 21-23 January, 2010. Khon Kaen University, Nong Khai campus, Thailand and Vientiane, Lao PDR. P. 27-31.
9. Saparnklang, A. and Ruangsomboon, S. 2010. Effects of Nitrogen and Phosphorus Limitation on Polysaccharides Content and Lead (Pb2+) Biosorption Capacity of Cyanobacterium *Phormidium* sp. Proceedings of 16th Asian Agricultural Symposium and 1st International Symposium on Agricultural Technology "Sufficiency Agriculture". 25-27 August 2010, Bangkok, Thailand. p. 476-479.
10. Samosorn, A., Pumnuan, J., Insung, A. and Ruangsomboon, S. 2010. Effectiveness of Cyanobacteria Extracts on the House Dust Mite, *Dermatophagoides Pteronyssinus* (Trouessart) by Contact Method. Proceedings of 16th Asian Agricultural Symposium and 1st International Symposium on Agricultural Technology "Sufficiency Agriculture". 25-27 August 2010, Bangkok, Thailand. p. 700-703.
11. Pumnuan, J., Ruangsomboon, S., Kangkunt, S. 2010. Insecticide Residues in Neptunia Plantation Water and Related Canals:A Case Study in Amphur Bangplee, Samutprakarn Province. .Proceedings of 16th Asian Agricultural Symposium and 1st

International Symposium on Agricultural Technology “Sufficiency Agriculture”. 25-27 August 2010, Bangkok, Thailand. p. 460-463.

12. Samosorn, A., Pumnuan, J., Insung, A. and Ruangsomboon, S. 2010. Effects Of Nitrogen And Phosphorus In Culture Medium On Bioactive Compounds Of *Oscillatoria* sp. Extracts On The House Dust Mite, *Dermatophagoides pteronyssinus* (Trouessart). The 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology. 4-6 October, 2010, Pattaya, Thailand. 215-219.
13. Pansamrit, K. and Ruangsomboon, S. 2010. Effect of pH on biosorption of basic-dye malachite green by algae. The 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology. 4-6 October, 2010, Pattaya, Thailand. 220-224.
14. Saparnklang, A. and Ruangsomboon S. 2010. Effects of nitrogen and phosphorus limitation on polysaccharides content and lead (Pb^{2+}) biosorption capacity of cyanobacterium *Hapalosiphon* sp. The 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology. 4-6 October, 2010, Pattaya, Thailand. 225-230.
15. Ruangsomboon S., Choochote S., Taveekijakarn P. and Worasing S. 2010. Antibacterial activity of lipophilic and hydrophilic extracts of algae. The 8th International Symposium on Biocontrol and Biotechnology. 4-6 October, 2010, Pattaya, Thailand. 231-237.
16. Suneerat Ruangsomboon and Ladda Wongrat. 2012. Toxic Effects of Low pH and Pb^{2+} on Chlorophyll Fluorescence and Growth of Cyanobacterium, *Hapalosiphon* sp. 2012 International Conference on Sustainable Environmental Technologies (ICSET). Century Park Hotel, Bangkok, Thailand; 26-27 April, 2012. p. 1-7
17. Suneerat Ruangsomboon and Sakchai Choochote. 2012. Effects of Different media on growth and lipid production in the green microalga, Botryococcus braunii KMITL2. Proceeding of 2nd Asia-Oceania algae innovation summit: algae for sustainable development, September 3-5, 2012.
18. Suneerat Ruangsomboon, Sakchai Choochote, Paveena Thaweekijakarn, Dusit Aue-umneoy. 2012. Nitrogen and Phosphorus removal from wastewater by green microalga, Scenedesmus dimorphus. Proceeding of 2nd Asia-Oceania algae innovation summit: algae for sustainable development, September 3-5, 2012.
19. Suneerat Ruangsomboon, Sakchai Choochote, Paveena Thaweekijakarn, Monthon Ganmanee and Chamroon Laosinwattana. 2012. Acute toxicity of cyanotbacterial extracts, Oscillatoria tenuis and Phormidium angustissimum on freshwater invertebrate, Water flea (Moina Macrocopa). Proceeding of 2nd International symposium of Biopesticides and Ecotoxicological Network (ISBioPEN): Contribution ot Organic Agriculture in the 21st Centrury”. September 24-26, 2012, Bangkok Thailand, p.329-338.

20. Ruangsomboon S., Choochote S., Taveekijakran P., and Ganmanee M. 2012. Effect of different nitrogen sources and concentrations on growth and microcystin production of toxic cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*. Proceeding of 2nd International symposium of Biopesticides and Ecotoxicological Network (ISBioPEN): Contribution ot Organic Agriculture in the 21st Century". September 24-26, 2012, Bangkok Thailand, p 339-346.
21. Ruangsomboon S., Choochote S., Taveekijakran P., and Ganmanee M. 2012. Toxic effect of *Oscillatoria tenuis* and *Arthrospira platensis* extracts on freshwater invertebrate, Lanchester's freshwater prawn (*Macrobrachium lanchesteri*). Proceeding of 2nd International symposium of Biopesticides and Ecotoxicological Network (ISBioPEN): Contribution to Organic Agriculture in the 21st Centrury". September 24-26, 2012, Bangkok Thailand, p 347-354.
22. Ruangsomboon S., Aue-Umneoy D., and Saparnklang A. 2013. Biosorption of basic dye, malachite green by brown alga Padina sp. Proceeding of 2nd International conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST 2013): Biological diversity, food and agricultural technology. November 28-29, 2013, Bangkok Thailand, p.490-501
23. Saparnklang A. and Ruangsomboon S. 2013. Growth, polysaccharide contents and biosorption of lead (Pb2+) by the cyanobacterium *Hapalosiphon* sp. cultured under different medium concentrations. Proceeding of 2nd International conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development (ICIST 2013): Biological diversity, food and agricultural technology. November 28-29, 2013, Bangkok Thailand, p.193-202.
24. Ruangsomboon S. 2015. Preliminary study on used microalga (*Nostoc commune*) as a protein supplement in dry-wet mixtures feed for juveniles snakehead (*Channa striata*). Proceeding of 2nd International Symposium on Agricultural Technology:Global Agriculture Trends for Sustainability (ISAT). July 1-3, 2015, Pattaya, Thailand, p. 321-324.

International Journal

1. Ruangsomboon, S. and Wongrat, L. 2006. Bioaccumulation of cadmium in an experimental aquatic food chain involving phytoplankton (*C. regularis)*, zooplankton (*M. macrocopa)*, and the predatory catfish. Aquatic Toxicology. 78:15-20.
2. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2006. Production, composition and Pb^{2+} adsorption characteristics of capsular polysaccharides extracted from a cyanobacterium *Gloeocapsa gelatinosa.* Water Research. 40:3759-3766.

3. Ruangsomboon, S., Chidthaisong, A., Bunnag, B., Inthorn, D. and Harvey, N.W. 2008. Removal of lead (Pb^{2+}) by cyanobacteria *Gloeocapsa sp*. Bioresource Technology. 99:5650-5658.
4. Ruangsobmoon S. 2012. Effect of Light, Nutrient, Cultivation Time and Salinity on Lipid Production of Newly Isolated Strain of the Green Microalga, *Botryococcus braunii* KMITL 2. Bioresource Technology. 109:261-265.
5. Ruangsomboon S., Ganmanee M, and Choochote S. 2013. Effects of different nitrogen, phosphorus, and iron concentrations and salinity on lipid production in newly isolated strain of the tropical green microalga, *Scenedesmus dimorphus* KMITL. Journal of Applied Phycology. 25:867-874.
6. Ruangsomboon S., Wongrat L., Choochote S., Ganmanee M. and Saparnklang A. 2013. Effects of low pH and Pb^{2+} stress on living cyanobacterium, *Phormidium angustissimum* West & G.S. West : A test of its feasibility as a living biosorbent. Journal of Applied Phycology. 25:905-911.
7. Ruangsomboon S. 2013. The effect of light, nutrient, cultivation time and salinity on lipid production of the tropical cyanobacterium, *Oscillatoria limnetica* KMITL. Academic Journal of Science. 2:311-321.
8. Ruangsomboon S. 2014. Effect of media and salinity on lipid content of cyanobacterium *Hapalosiphon* sp. *Chiang Mai J. Sci*. 41:307-315.
9. Ruangsomboon S., Yongmanitchai W., Taveekijakarn P., Ganmanee M. 2014. Cyanobacterial Composition and Microcystin Accumulation in Catfish Pond. *Chiang Mai J. Sci.* 41:27-38.
10. Ruangsomboon S. 2014. Biosorption of lead (Pb^{2+}) by living cyanobacterium, *Oscillatoria limnetica* Lemmermann. Academic Journal of Science. 03(02):459-469.
11. Ruangsomboon S. 2015. Enhanced Production of Polysaccharides and Protein Content in Cyanobacterium, *Oscillatoria limnetica* as a Defense Mechanism Against Low pH and Pb^{2+}. *Chiang Mai J. Sci.* 42(1):34-43.
12. Ruangsomboon S. 2015. Effects of different media and nitrogen sources and levels on growth and lipid of green microalga *Botryococcus braunii* KMITL and its biodiesel properties based on fatty acid composition Bioresource Technology. 191:377-384.