# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 1. การใช้แพลงก์ตอนพืชในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการพัฒนาก้าวหน้ายิ่งขึ้น ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเพาะเลี้ยงมีหลายประการ แต่อาหารนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเฉพาะในระยะวัยอ่อน โดยอาหารที่เหมาะสมมีความสำคัญในการกำหนดความสำเร็จในการเพาะเลี้ยง การเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชหรือสาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐานได้มีการทำกันมานานแล้ว โดยเลี้ยงกันในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต้องการปริมาณไม่มากนัก แต่การเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชเพื่ออนุบาลลูกสัตว์น้ำเพิ่งเริ่มเลี้ยงกันอย่างจริงจังเมื่อประมาณ ปี พ.ศ. 2484 โดยนักเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชาวญี่ปุ่น ชื่อ มัสซุเอะ (Matsue) สามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์ไดอะตอมชนิดหนึ่งคือ *Skeletonema costatum* สำหรับใช้อนุบาลลูกกุ้งระยะวัยอ่อนได้สำเร็จ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาได้มีการพัฒนาการเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชอีกหลายชนิดสำหรับอนุบาลลูกสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ เช่น ปลาบู่ หอย เป็นต้น (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2532) สำหรับแพลงก์ตอนพืชที่ใช้เป็นอาหารสัตว์น้ำวัยอ่อน ส่วนใหญ่เป็นนาโนแพลงก์ตอน (nanoplankton) ซึ่งคือแพลงก์ตอนพืชที่มีขนาด 2-20 ไมโครเมตร ยกเว้นพวกไดอะตอมที่เป็นสาย เช่น *Skeletonema* spp. และพวก pennate ไดอะตอม เช่น *Nitzschia* spp. และ *Navicula* spp. เป็นต้น (Brown et al. 1997)

โดยทั่วไปแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหารหลักที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อน เช่น พวกครัสตาเซียน หอย แพลงก์ตอนสัตว์ และปลาวัยอ่อนบางชนิด เป็นต้น (ตารางที่ 1) สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อนโดยเฉพาะกุ้งและหอยสองฝา พบว่ามีการใช้ไดอะตอมสกุล *Chaetoceros* และ *Skeletonema* หลายชนิด ดังตารางที่ 2 ชนิดของแพลงก์ตอนพืชเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องเลือกสรรให้เหมาะสมกับขนาดและชนิดของสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยง โดยต้องคำนึงถึงขนาดและรูปร่าง และคุณค่าทางโภชนาการ (nutritional value) ของแพลงก์ตอนพืชที่ใช้เป็นอาหารแก่สัตว์น้ำชนิดนั้น ๆ ด้วย

**ตารางที่ 1** ชนิดของแพลงก์ตอนพืชที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำชนิดต่าง ๆ

| ชนิดสัตว์น้ำ | ชนิดของแพลงก์ตอนพืช |
|---|---|
| หอยนางรมวัยอ่อน: *Crassostrea gigas*, *Saccostrea commercialis*, *Pinctada maxima* | *Isochrysis galbana*[e], *Pavlova lutheri*[c], *Thalassiosira pseudonana*[c], *Chaetoceros muelleri*[c], *C. calcitrans*[c] *Skeletonema costatum*[d] |
| หอยพัดวัยอ่อน: *Pecten* spp. | *Isochrysis* sp.[c], *C. muelleri*[c], *C. calcitrans*[c] |
| หอยมือเสือวัยอ่อน: *Tridacna* spp. | *Isochrysis* sp.[c], *P. lutheri*[c], *C. muelleri*[c] |
| หอยเป๋าฮื้อวัยรุ่น: *Haliotis* spp. | *Navicula ulvacea*[b], *N.ramosissima*[b], *Amphora* spp.[c], *Nitzschia closterium*[c], *N. divergenus*[b], *N. acicularis*[b], *N. pseudohybrida*[b], *N. panduriformis*[b] |
| กุ้งวัยอ่อน: *Penaeus* spp. | *S. costatum*[d], *Skeletonema* sp.[d], *Tetraselmis chuii*[d], *T. suecica*[a], *C. muelleri*[a] |
| แพลงก์ตอนสัตว์*: *Brachionus plicatilis*, *Artemia* spp., *Daphnia* spp. | *Isochrysis* sp.[e], *P. lutheir*[e], *Nannochloropsis oculata*[e] *Chlorella* sp.[e], *Clamydomonas* sp.[e] |
| ลูกปลาวัยอ่อน: *Scophthalmus maximus*, *Hippooglossus hippooglossus* | *I. galbana*[f], *Tetraselmis* sp.[f] |

ที่มา: [a] Renaud et al. (1994) [b] Brown and Jeffrey (1995) [c] Brown et al. (1997) [d] Borowitzka (1997); [e] Duerr et al. (1998) [f] Reitan et al. (1997) * ใช้เป็นอาหารลูกปลา และลูกกุ้งวัยอ่อน

**ตารางที่ 2** *Chaetoceros* และ *Skeletonema* ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อน

| ชนิด | ชนิดของสัตว์น้ำที่ใช้เพาะเลี้ยง | ที่มา |
|---|---|---|
| *C. calcitrans* | หอยนางรมวัยอ่อน (*Crasostrea gigas*), หอยพัดวัยอ่อน (*Pecten* spp.), กุ้งวัยอ่อน (*Penaeus* spp., *P. monodon*) | Brown et al. (1997); Haryanti et al. (1994); Tobias-Quinitio and Villegas (1982) |
| *C. curvisetus* | หอยสองฝาวัยอ่อน | Enright et al. (1986a) |
| *C. gracilis* | หอยนางรมวัยอ่อน (*Ostrea edulis*), กุ้งวัยอ่อน (*Penaeus* spp.), กุ้งกุลาดำวัยอ่อน (*P. monodon*) | Napolitano et al. (1990), Kuban et al. (1985), Simon (1978) |
| *C. muelleri* | หอยพัดวัยอ่อน, หอยมือเสือวัยอ่อน (*Tridacna gigas*), กุ้งวัยอ่อน (*Penaeus* spp.) | Brown et al. (1997), D' Souza and Loneragan (1999) |
| *C. simplex* | หอยสองฝาวัยอ่อน | Enright et al. (1986a) |
| *C. ceratosporum* | กุ้งขาววัยอ่อน (*P. setiferus*) | Gallardo et al. (1995) |
| *C. malaysia* | กุ้งกุลาดำวัยอ่อน (*P. monodon*) | Shamsudin (1994) |
| *S. costatum* | หอยพัดวัยอ่อน (*Placopecten magellanicus*), กุ้งวัยอ่อน (*Penaeus* spp.), กุ้งกุลาดำวัยอ่อน (*P. monodon*) | Haryanti et al. (1994), Kurmaly et al. (1989), Kuban et al. (1985) |

## 2. ไดอะตอมสกุล *Chaetoceros* และ *Skeletonema*

ไดอะตอมเป็นแพลงก์ตอนพืชใน Division Chromophyta Class Bacillariophyceae (Tomas, 1997) พบเป็นเซลล์เดี่ยว ๆ หรือเป็นโคโลนี หรือต่อกันเป็นสาย ผนังเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา เซลล์ประกอบด้วยฝาสองฝาครอบกันพอดี ฝามีสมมาตรรัศมีหรือแบบซ้ายขวา (bilateral) ลวดลายบนฝาต่างกันตามแต่ชนิด รงควัตถุที่พบประกอบด้วยคลอโรฟิลล์_เอ คลอโรฟิลล์_ซี แคโรทีนอยด์ และแซนโธฟิลล์ อาหารสะสมเป็นแป้งชนิด chrysolaminarin และน้ำมัน การสืบพันธุ์ของไดอะตอมมีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

### 2.1 การจำแนกชนิด *Chaetoceros*

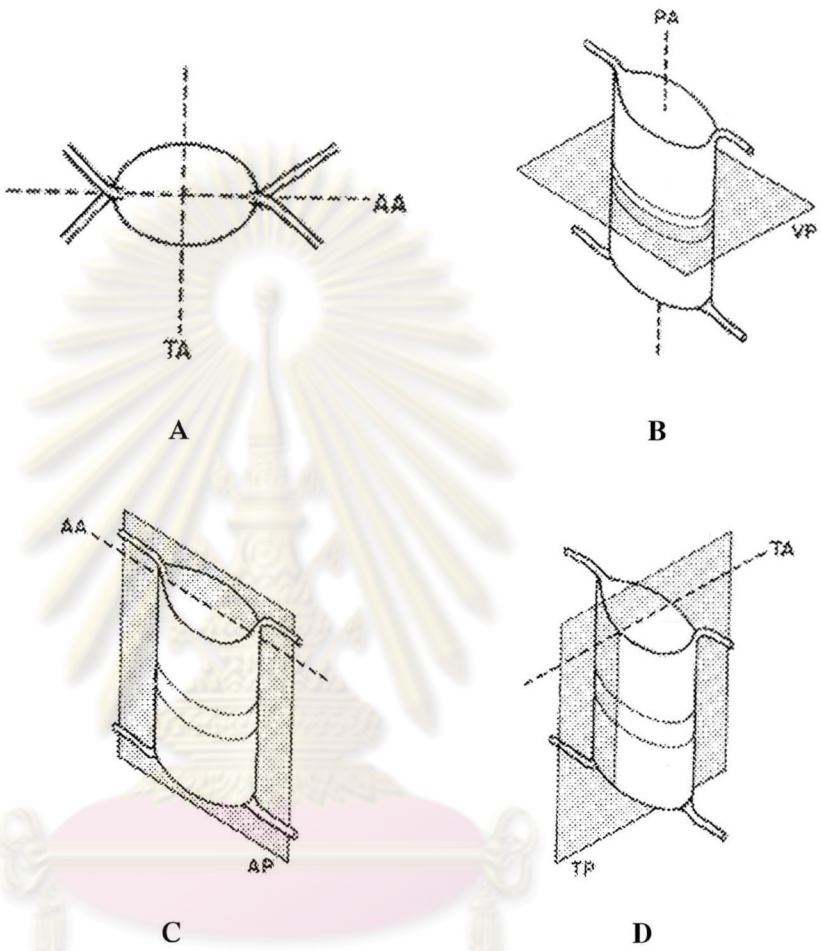
การจำแนกชนิด *Chaetoceros* ที่เป็นเซลล์เดี่ยว ตามเอกสารอ้างอิงของ Cupp (1943); Johansen and Rushforth (1985); Rines and Hargraves (1988); Hasle and Syverten (1997); Sar et al. (2002) เป็นดังนี้

Division Chromophyta
Class Bacillariophyceae
Order Biddulphiales
Family Chaetoceraceae
Genera *Chaetoceros* Ehrenberg
Subgenus Hyalochaetae Gran 1897
Section Simplicia Ostenfeld
*Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยว

*Chaetoceros* มีที่มาจากคำของภาษากรีก 2 คำ คือ χαιτη ซึ่งเป็นคำนามเกี่ยวกับผู้หญิง หมายถึง ผม (hair) และ κερας ซึ่งเป็นคำนามไม่มีเพศ หมายถึง เขา (horn) ซึ่ง Ehrenberg เป็นคนแรกที่ได้อธิบายที่มาของคำเหล่านี้ (Rines และ Hargraves, 1988 )

เซลล์ประกอบด้วยฝา (valve) 2 ฝา ครอบกันพอดี เรียกว่า 1 ฟรัสตุล (frustule) 1 ฟรัสตุล ประกอบด้วย ฝาบน เรียกว่า เอพิทีคา (epitheca) และฝาล่าง เรียกว่า ไฮโพทีคา (hypotheca) การมองเซลล์มองได้ 2 ด้าน คือมองจากด้านหน้าจะเห็นรูปร่างลักษณะและโครงสร้างเซลล์ทั้งหมด เรียกว่า ด้านวาลว์ (valve view) จะมีลักษณะเป็นรูปไข่จนถึงรูปกลม และมองจากด้านข้าง จะเห็นลักษณะและโครงสร้างของเกอเดิล เรียกว่า ด้านเกอเดิล (girdle view) ซึ่งส่วนใหญ่ด้านเกอเดิล

จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมถึงสี่เหลี่ยมผืนผ้า แกนยาวหรือแกนตั้งของฟรัสตุล เรียกว่าแกนอะพิคัล (apical axis) แกนขวางหรือแกนที่ตั้งฉากกับแกนอะพิคัล เรียกว่า แกนทรานซอะพิคัล (transapical axis) ส่วนแกนที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของเอพิทีคา และไฮโพทีคา เรียกว่า แกนเพอร์วาลวาร์




**รูปที่ 1** ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของ *Chaetoceros*

A. ด้านวาลว์ (valve view)

B., C., D. ด้านเกอเดิล (girdle view)

(PA, แกนเพอร์วาลวาร์ (pervalver axis); VP, ระนาบวาลวาร์ (valvar plane); AA, แกนอะพิคัล (apical axis); AP, ระนาบอะพิคัล (apical plane); TA, แกนทรานซอะพิคัล (transapical axis); TP, ระนาบทรานซอะพิคัล (transapical plane) (ที่มา: Rines and Hargraves, 1988)

(pervalvar axis) สำหรับใน *Chaetoceros* และ *Skeletonema* ความยาวของฟรัสตุลคือ แกนเพอร์วาลวาร์ ส่วนความกว้างคือเส้นผ่านศูนย์กลางของฟรัสตุล หรือ แกนอะพิคัล ระนาบของฟรัสตุลมีชื่อเรียกคล้ายกับแกน มี 3 ระนาบ ระนาบที่ 1 คือ ระนาบวาลวาร์ (valvar plane) เป็นระนาบที่ขนาน

กับหน้าฝา (valve face) ซึ่งการแบ่งตัวของเซลล์จะเกิดขึ้นบนระนาบนี้ ระนาบที่ 2 คือระนาบอะพิคัล (apical plane) เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแกนทรานซอะพิคัล ระนาบที่ 3 คือระนาบทรานซอะพิคัล (transapical plane) ซึ่งตั้งฉากกับแกนอะพิคัล (รูปที่ 1) ฟรัสตุลของ *Chaetoceros* และ *Skeletonema* จะสมมาตรกันทั้ง 3 ระนาบ ส่วนมุมฝา (valvae mantle) เป็นรูปทรงกระบอก ที่มุมฝาในแกนยาว (apical axis) มีซีตี (setae) ลักษณะเป็นเส้นหนามยาวออกมามุมละ 1 เส้น *Chaetoceros* ชนิดที่พบบริเวณชายฝั่งจะสร้างเรสติงสปอร์ (resting spore) เซลล์ปกติ 1 เซลล์จะสร้างเรสติงสปอร์เพียง 1 สปอร์ ตำแหน่งที่สร้างคือ บริเวณใกล้กับแถบเกอเดิล (girdle band) แต่บางชนิดอาจสร้างที่ขอบเซลล์ ขอบของสปอร์มีหนามยาวหรือหนามขนาดสั้น ๆ แต่ละสปอร์เมื่อถูกสร้างขึ้นมาใหม่จะมีผนังเรียบ

การจำแนกชนิดของ *Chaetoceros* ทั้งที่เป็นเซลล์เดี่ยวและต่อกันเป็นสาย พิจารณาจากลักษณะต่าง ๆ ของเซลล์ ได้แก่ คลอโรพลาสต์ (มี/ไม่มี, จำนวน, รูปร่าง และขนาด), ซีตี (ความหนา, หนามที่ขอบซีตี, การกางออกของซีตี/การทำมุมกับแกนอะพิคัลของเซลล์, เทอร์มินัลซีตีหรือซีตีที่อยู่ปลายสุดของสาย มีลักษณะต่างกัน/เหมือนกับซีตีที่อยู่ในสาย, การแตะกันของซีตีของเซลล์ที่อยู่ติดกัน), รูปร่างและขนาดของช่องว่างระหว่างเซลล์ (จุดตั้งต้นของซีตีบนด้านวาลว์, จุดที่มาแตะกัน), ความสูงของเกอเดิล, ลักษณะของโคโลนี (ตรง, โค้งหรือบิดเป็นเกลียว, จับกันเป็นคู่, เป็นเซลล์เดี่ยว), ลักษณะของเรสติงสปอร์ (ลักษณะฝาบนและฝาล่าง, พื้นผิว) เป็นต้น (Rines and Hargraves, 1988 )

สกุล *Chaetoceros* เป็นสกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยจำนวนชนิดมากมาย จึงนิยมแบ่งออกเป็นสกุลย่อย เพื่อสะดวกในการจำแนกชนิด ซึ่งประกอบด้วย 2 Subgenus และ 19 Sections ได้แก่ Subgenus Phaeoceros Gran 1897 และ Subgenus Hyalochaetae Gran 1897 *Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยวจัดอยู่ใน Subgenus Hyalochaetae มีลักษณะทั่วไปดังนี้

- มีคลอโรพลาสต์เป็นแผ่นมีจำนวน 1-2 แผ่น หรือมากกว่า มีไม่กี่ชนิดที่มีคลอโรพลาสต์เป็นเม็ดเล็ก ๆ จำนวนมาก
- ซีตีผอมบาง ลักษณะคล้ายเส้นผม บางชนิดมีหนามบนซีตี และในซีตีไม่มีคลอโรพลาสต์
- กลางฝา (ด้านวาลว์) ของเซลล์ปลายสุดมีก้าน (annulus) 1 ก้าน (มีไม่กี่ชนิดที่มีหลายก้าน) ซึ่งเซลล์ที่เป็นสายไม่มีก้านบนฝา (เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน: SEM)
- ฝามี costae (ลักษณะเป็นซี่ ๆ อยู่รอบก้าน (process) เกิดจากมีซิลิคอนฝังอยู่ปริมาณไม่เท่ากัน) ยื่นออกจาก annulus อย่างมีระเบียบ และมักจะมีรูระหว่าง costae (เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน: TEM)
- มีหลายชนิดที่สร้างเรสติงสปอร์และพบได้บริเวณชายฝั่งทะเล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเมื่อแบ่งย่อยจาก Subgenus จะเป็น Section ซึ่ง *Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยวส่วนใหญ่จะอยู่ใน Section Simplicia แต่การศึกษาใน Section นี้ค่อนข้างน้อย ซึ่งการศึกษาของ Rines and Hargraves (1988) และ Sar et al. (2002 ) ได้อธิบายลักษณะที่พบ ใน Section Simplicia ว่าจะเป็นพวกเซลล์เดี่ยว หรือจับกันเป็นคู่ ขนาดเซลล์เล็ก ผนังเซลล์บอบบาง มี 1-2 คลอโรพลาสต์ ซีตีเล็กเรียว ส่วนใหญ่สร้างเรสติงสปอร์ และอยู่บริเวณน้ำตื้นหรือชายฝั่งทะเล

*Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยว มีขนาดค่อนข้างเล็กมาก การจำแนกชนิดต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็คตรอน 2 แบบคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope หรือ TEM) เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่าง ๆ ของเซลล์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยวที่ใช้จำแนกชนิด สรุปจากการศึกษาของ Rines and Hargraves (1986); Johansen and Rushforth (1985); Rogerson et al. (1986) และ Sar et al. (2002 ) มีดังนี้คือ ขนาดเซลล์ (ความยาวแกนอะพิคัล และแกนเพอร์วาลวาร์), ความสูงของเกอเดิล, ตำแหน่งหรือการทำมุมของซีตีกับแกนอะพิคัล, รูปร่างด้านวาลว์ (กลม,รี), ความนูนของด้านวาลว์ของเซลล์, การมี/ไม่มี ก้าน (annulus) ที่ยื่นออกมาจากด้านวาลว์ของเซลล์และตำแหน่งที่อยู่บนวาลว์, รูปร่างของซีตีตามภาคตัดขวาง (cross-section), รูปแบบของ costae ในซีตี (TEM) และลักษณะหนามที่อยู่บนซีตี เป็นต้น สำหรับ *Chaetoceros* ชนิดที่เป็นเซลล์เดี่ยว ที่พบและมีการจำแนกชนิดไว้มีดังนี้

*Chaetoceros ceratosporus* Ostenfeld var. *ceratosporus*

*Chaetoceros ceratosporus* var. *brachysetus* Rines & Hargraves

*Chaetoceros distinguendum* Lemmermann

*Chaetoceros gracilis* Schütt

*Chaetoceros minutissimus* Makarova et Proshkina-Lavrenko

*Chaetoceros muelleri* Lemmermann var. *muelleri*

*Chaetoceros muelleri* var. *subsalsum* (Lemmermann) Johansen & Rushforth

(basionym = *Chaetoceros subsalsus* Lemmermann;

synonym = *Chaetoceros borgei* Lemmermann)

*Chaetoceros simplex* Ostenfeld

*Chaetoceros tenuissimus* Meunier

*Chaetoceros transisetus* Johansen et Boyer

*Chaetoceros vistulae* Apstein

**2.2 การจำแนกชนิด *Skeletonema***

การจำแนกชนิด *Skeletonema* ตามเอกสารอ้างอิงของ Fryxell (1976); Medlin et al. (1991); และ Hasle and Syverten (1997) เป็นดังนี้

Division Chromophyta

Class Bacillariophyceae

Order Biddulphiales

Family Thalassiosiraceae

Genera *Skeletonema*

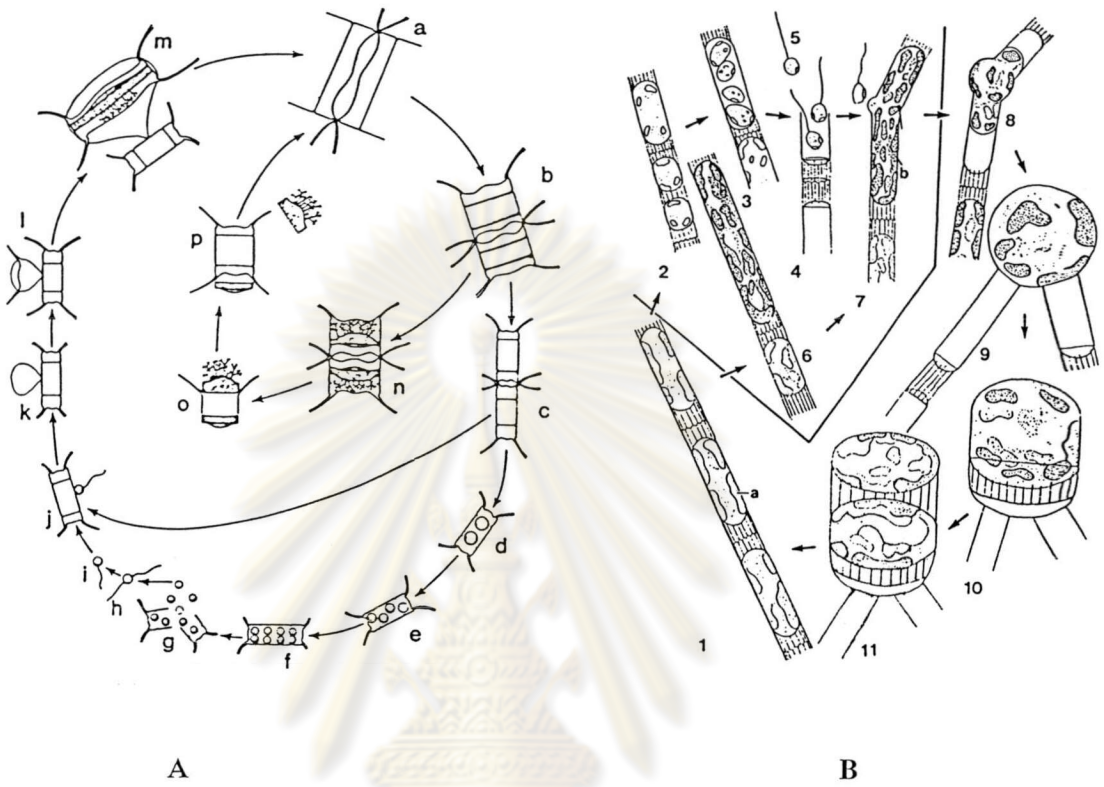
*Skeletonema costatum*

การจำแนกชนิด *S. costatum* สามารถมองเห็นและจำแนกความแตกต่างของลักษณะต่าง ๆ ของเซลล์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลนส์ประกอบ (compound microscope) พิจารณาจากลักษณะเซลล์ที่ต่อกันเป็นสายโซ่ โดยใช้สายที่มีลักษณะคล้ายท่อและยาวออกมาจาก strutted processes ที่บริเวณขอบฝา ซึ่งใช้เชื่อมระหว่างเซลล์หนึ่งกับอีกเซลล์หนึ่ง มีจำนวนอยู่ในช่วง 6-30 เส้น ระยะห่างของแต่ละเซลล์มากกว่าความยาวเซลล์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2-21 ไมโครเมตร และแกนเพอร์วาลวาร์อยู่ในช่วง 2-61 ไมโครเมตร เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบ labiate process 1 ก้าน อยู่ที่ขอบฝาหรืออยู่ใกล้กับกึ่งกลางฝา และบนฝามีลวดลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมเรียงกันในแนวรัศมี เป็นชนิดที่พบได้ทั่วโลกบริเวณชายฝั่งทะเล

**2.3 วงจรชีวิตของ *Chaetoceros* และ *Skeletonema***

ไดอะตอมส่วนใหญ่สืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแบ่งเซลล์ในแนวขนานกับฝาเดิม ให้เซลล์ลูกสองเซลล์ เซลล์หนึ่งจะมีขนาดเท่าเซลล์แม่ อีกเซลล์หนึ่งจะมีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากฝาทั้งสองของเซลล์แม่จะเปลี่ยนเป็นฝาบน (epitheca) ของเซลล์ลูก การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศจึงทำให้ขนาดของเซลล์ลดลงเรื่อย ๆ ตามจำนวนครั้งของการแบ่งเซลล์ ดังนั้นจึงมีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเพื่อให้เซลล์มีขนาดใหญ่ดังเดิม การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศในไดอะตอมอาศัยการสร้างออกโซสปอร์ (auxospore) และเกิดเมื่อเซลล์มีขนาดเล็กลงกว่าครึ่งหนึ่งของขนาดตัวสูงสุดซึ่งขึ้นกับชนิดของไดอะตอม การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของ *Chaetoceros diadema* เริ่มจากเซลล์ปกติ (vegetative cell) โดยเพศผู้สร้าง 2, 4 และ 8 spermatogonia และปล่อยออกจากเซลล์ก่อนสร้างหนวดแบบ biflagellate และ uniflagellate จากนั้นสเปริ์มจะผสมกับไข่ที่มีหนึ่งฟองในเซลล์แม่หนึ่งเซลล์ได้เป็นไซโกตที่มีขนาดใหญ่และสร้างเปลือกหุ้ม แล้วพัฒนาต่อไปเป็น ออกโซสปอร์

(auxospore) ซึ่งการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศที่มีการสร้างออกโซสปอร์ใน *Skeletonema costatum* ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2 (Garrison, 1984; French and Hargraves, 1985; Hiromu, 1993)




**รูปที่ 2** วงจรชีวิตของ A. *Chaetoceros diadema* B. *Skeletonema costatum*
(a-c) vegetative cells, (d-m) การสร้างออกโซสปอร์ (auxospore), (n-p) การสร้างเรสติงสปอร์ (resting spore), (1) vegetative cell, (2-11) การสร้างออกโซสปอร์
(ที่มา: French and Hargraves, 1985; Hiromu, 1993)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3. องค์ประกอบทางชีวเคมี**

**3.1 ลักษณะทั่วไป**

**โปรตีนและกรดอะมิโน**

โปรตีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 50–55 % ไฮโดรเจน 6.5–7.5 % ออกซิเจน 21.5–23.5 % ไนโตรเจน 15.5–18 % และกำมะถัน 0.5–2 % โมเลกุลของโปรตีนมีขนาดใหญ่ หน่วยย่อยที่สุดของโปรตีนมีขนาดของโมเลกุลเล็กที่สุดเรียกว่า กรดอะมิโน (amino acid) ซึ่งในธรรมชาติที่พบเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในพืชหรือสัตว์มีประมาณ 20 ชนิด โมเลกุลของกรดอะมิโนทุกชนิดมีสูตรโครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยหมู่อะมิโน ($NH_2$) หมู่คาร์บอกซิล (COOH) และหมู่อัลคีล (Alkyl group-R) กรดอะมิโนแต่ละโมเลกุลยึดต่อกันเป็นสายด้วยพันธะเปบไทด์ (peptide bond) โปรตีนจะเป็นโพลีเปบไทด์ (polypeptide) ที่ประกอบด้วยอะมิโนหลายโมเลกุลขึ้นไป (Lovell, 1998) การที่ร่างกายไม่สะสมโปรตีนทำให้ร่างกายจำเป็นที่จะต้องได้รับโปรตีนจากอาหาร ตามปกติร่างกายมีกระบวนการสร้างกรดอะมิโนขึ้นเองได้ กรดอะมิโนที่ร่างกายสร้างจัดเป็นกรดอะมิโนชนิดที่ไม่จำเป็น (nonessential amino acid) หรือกรดอะมิโนที่ร่างกายขาดได้ ส่วนกรดอะมิโนอีกกลุ่มหนึ่งเรียกว่ากรดอะมิโนชนิดจำเป็นหรือขาดไม่ได้ (essential amino acid) ซึ่งคือกรดอะมิโนที่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นไม่ได้จำเป็นต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น การสร้างสายโปรตีนหรือโพลิเมอร์ของกรดอะมิโนหรือโพลีเปปไทด์ เพื่อใช้ทำงานในร่างกายจำเป็นจะต้องใช้กรดอะมิโนเกือบทุกตัว ซึ่งกรดอะมิโนจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของโปรตีน หมายถึงโปรตีนในอาหารที่ร่างกายสามารถนำ ไปใช้เพื่อช่วยในการเจริญเติบโตรวมถึงใช้ซ่อมแซมโปรตีนส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย ในอาหารธรรมชาติหลายชนิด เช่น พืชต่าง ๆ แม้บางชนิดจะมีโปรตีนในปริมาณสูง แต่อาจเป็นโปรตีนที่คุณภาพต่ำเพราะขาดกรดอะมิโนชนิดจำเป็นบางตัวหรือมีครบแต่มีในปริมาณจำกัด ทำให้ไม่สามารถนำโปรตีนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาคุณภาพของโปรตีน จึงจำเป็นต้องพิจารณาลักษณะกรดอะมิโนที่ร่างกายต้องการ เปรียบเทียบกับกรดอะมิโนที่มีในโปรตีนของอาหารชนิดนั้น

<u>หน้าที่</u>

1. จ่ายกรดอะมิโนจำเป็น โปรตีนเป็นสายโพลีเมอร์ของกรดอะมิโนประมาณ 20 ชนิด ในที่นี้มีประมาณ 8-10 ชนิด ที่เป็นกรดอะมิโนจำเป็นซึ่งร่างกายสร้างไม่ได้ต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น โปรตีนในอาหารจึงทำหน้าที่จ่ายกรดอะมิโนที่จำเป็นแก่ร่างกาย
2. สร้างกล้ามเนื้อและโครงสร้าง โปรตีนเป็นอาหารที่ร่างกายนำไปใช้ในการสร้างสารต่าง ๆ ร่างกายใช้กรดอะมิโนเป็นหน่วยก่อสร้างมากกว่าที่จะเป็นหน่วยพลังงาน พิจารณาจากทุกเซลล์และเนื้อเยื่อจะเห็นได้ว่า โปรตีนเป็นสารอาหารหลักที่ประกอบเป็นโครงสร้างขึ้นมา
3. สร้างสารทำงาน เช่น ฮอร์โมนและเอนไซม์ โปรตีนถูกใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อสร้างสารทำงานต่าง ๆ เช่น เอนไซม์ (enzymes) และ ฮอร์โมนหลายชนิด

4. สร้างภูมิต้านทาน โปรตีนทำหน้าที่สำคัญในกลไกภูมิต้านทาน โดยการสร้างเป็นสารแอนติบอดีส์ ทำหน้าที่ในการจับและทำลายสารแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย

5. ดูแลสมดุลของเหลว โดยทำหน้าที่รักษาสมดุลออสโมติก (osmotic balance) ทั้งในเลือดและในเซลล์

6. ดูแลสมดุลกรด-ด่าง โปรตีนในเลือดช่วยควบคุมปริมาณอิออนไฮโดรเจน ทำให้ pH ในเลือดและในเซลล์อยู่ในสภาวะที่เป็นด่างอ่อน ซึ่งเหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ โปรตีนจึงทำหน้าที่เสมือนบัฟเฟอร์

7. สร้างกลูโคส แหล่งพลังงานที่สำคัญที่สุดในร่างกายคือกลูโคส เนื่องจากเป็นสารอาหารของสมอง เมื่อกลูโคสในเลือดลดต่ำลงสมองยังจำเป็นต้องได้รับน้ำตาลอยู่ระยะหนึ่งก่อนที่จะปรับตัวหาแหล่งพลังงานอันใหม่ ได้แก่ คีโตนบอดีส์ (ketone bodies) ในภาวะเช่นนี้ ร่างกายจะพยายามสร้างน้ำตาลขึ้นจากสารที่มิใช่คาร์โบไฮเดรต (gluconeogenesis) เช่น ใช้กลีเซอรอลที่ได้จากการสลายไขมัน ใช้กรดอะมิโนในกลุ่มกลูโคเจนิก (glucogenic) ดังนั้น โปรตีนจึงทำหน้าที่จ่ายกรดอะมิโนเหล่านี้ให้ร่างกายไปสร้างเป็นกลูโคส

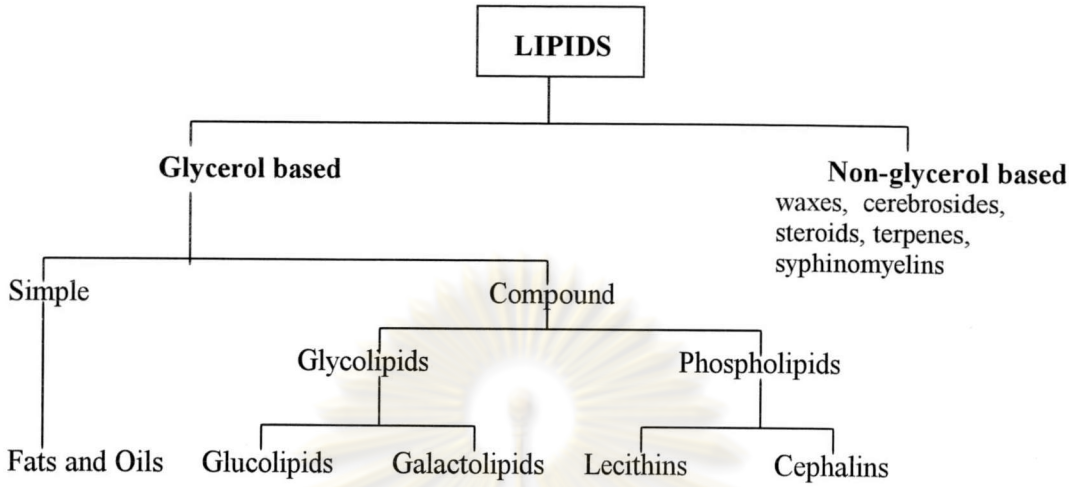
8. แหล่งพลังงาน ในบางภาวะที่ร่างกายขาดอาหารอย่างรุนแรงร่างกายสามารถสลายโปรตีนในร่างกายให้เป็นกรดอะมิโนอิสระ นำไปสร้างเป็นน้ำตาลและคีโตนบอดีส์เพื่อสร้างพลังงานให้แก่ร่างกายได้

<u>การใช้โปรตีนและกรดอะมิโน</u>

หลังจากกรดอะมิโนถูกดูดซึมและถูกนำเข้าสู่กระแสโลหิตเพื่อส่งมายังตับแล้ว จากนั้นจะถูกส่งออกไปยังเซลล์ต่าง ๆ เซลล์เหล่านี้จะรับกรดอะมิโนเพื่อสังเคราะห์โปรตีนชนิดต่าง ๆ เพื่อทดแทนส่วนที่เสื่อมไปเพื่อการเจริญเติบโตและเพื่อการทำงานภายในร่างกาย แต่การสังเคราะห์โปรตีนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเซลล์ได้รับกรดอะมิโนที่จำเป็นครบทุกชนิดในปริมาณที่มากพอ ถ้าขาดกรดอะมิโนที่จำเป็นชนิดหนึ่งชนิดใด การสังเคราะห์โปรตีนจะไม่เกิดขึ้น กรดอะมิโนจะถูกส่งกลับมาสลายตัวที่ตับโดยกระบวนการ deamination และถูกขับถ่ายออกจากร่างกาย ในร่างกายสัตว์น้ำไม่มีเซลล์พิเศษสำหรับเก็บกรดอะมิโน กรดอะมิโนส่วนที่เกินความต้องการจึงถูกส่งไปใช้เป็นพลังงานโดยจะถูกส่งมายังตับ ตับจะแยกส่วนที่เป็นหมู่กรดอะมิโนออกจากโมเลกุลแล้วเปลี่ยนสภาพผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ จนกลายเป็นกรดคีโต (keto acid) และแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียจะถูกขับออกจากร่างกาย ส่วนกรดคีโตจะถูกนำไปสลายเพื่อเป็นพลังงานในวัฏจักรเครปส์ (Krebs cycle) บางส่วนถูกนำไปแปรสภาพเป็นไกลโคเจนหรือไตรกลีเซอไรด์ แล้วเก็บสะสมไว้ในร่างกาย หรือนำไปสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโนชนิดใหม่ในกระบวนการ transamination (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2536; เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2543; พัชรา วีระกะลัส, 2544; Akiyama et al. 1992; De Silva and Anderson, 1995; Lovell, 1998)

**ไขมันและกรดไขมัน**

เราสามารถจำแนกกลุ่มของไขมันตามวิธีของ Tacon (1990) ได้ดังนี้




**ไขมัน (lipid)**

ไขมันเมื่อเป็นของแข็งเรียกว่า ไขมัน (fat) หากเป็นของเหลวเรียกว่า น้ำมัน (oil) โดยทั่วไป โครงสร้างโมเลกุลของไขมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เรียกว่ากลีเซอรอล (glycerol) ซึ่งเป็นโพลีแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นหมู่ฟังก์ชันนัล 3 หมู่กับส่วนที่เรียกว่ากรดไขมัน (fatty acid) ซึ่งมีคาร์บอนต่อกันเป็นแถว ตรงส่วนปลายมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่แสดงสมบัติของกรดอินทรีย์ ไขมันส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมดที่พบในอาหารเป็นไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) หรือไตรอะซิลกลีเซอรอล (triacylglycerols) ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมัน 3 โมเลกุลจับอยู่กับกลีเซอรอล (Tacon, 1990)

<u>หน้าที่ของไขมัน</u> (วีรพงศ์ วุฒิพันธ์, 2536; เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2543; นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545; วินัย ดะห์ลันและคณะ, 2545)

1. เป็นแหล่งสะสมพลังงาน ไขมันในร่างกายในรูปไตรกลีเซอไรด์ที่สะสมในเนื้อเยื่อไขมันเป็นแหล่งพลังงานสะสมใหญ่ของร่างกาย
2. เป็นแหล่งของกรดไขมันที่ร่างกายสังเคราะห์ขึ้นเองไม่ได้ จำเป็นต้องได้รับจากอาหาร
3. เป็นแหล่งของวิตามินที่ละลายในไขมัน ได้แก่วิตามินเอ ดี อี เค
4. เป็นองค์ประกอบของเซลล์เมมเบรน เรียกว่า ลิพิดเมมเบรน (lipid membrane) ซึ่งมีสมบัติเป็น highly selsective gate คือ จะยอมให้สารผ่านเข้า-ออก ได้เฉพาะบางสารเท่านั้น เรียกสมบัตินี้ว่า selective membrane permeability
5. ปกป้องอวัยวะต่าง ๆ โดยไขมันที่สะสมอยู่รอบอวัยวะต่าง ๆ ทำหน้าที่สำคัญคือช่วยยึดอวัยวะให้อยู่ในตำแหน่ง ป้องกันการกระทบกระแทกจากภายนอกและระหว่างอวัยวะด้วยกันเอง
6. มีบทบาทในกระบวนการผลิตอาหารสัตว์น้ำ คือเป็นสื่อความร้อนช่วยเพิ่มความชวนกินให้

กับอาหาร เป็นตัวหล่อลื่นทำให้อัดเม็ดง่ายลดความเป็นฝุ่นในอาหาร ช่วยให้อาหารมีลักษณะนุ่ม อีกทั้งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และช่วยให้อาหารที่มีไขมันและน้ำเป็นส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นต้น

ไขมันและน้ำมันในอาหารจะแตกต่างกันที่ชนิดของกรดไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบกันเป็นไขมันและน้ำมัน กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ มักจะเป็นเลขคู่เสมอ และเป็นสายตรง แต่มีบางชนิดและเป็นจำนวนน้อยที่เป็นเลขคี่ หรือเป็นสายแขนง (branched chain acid) หรือเป็นกรดไฮดรอกซี (hydroxy acid) ซึ่งพบได้ทั้งในธรรมชาติและไขมันที่ผ่านกระบวนการ (processed fats) และน้ำมันที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันยังอาจเกิดไอโซเมอร์ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้ด้วย

**กรดไขมัน (fatty acid)**

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์สายตรงที่มีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ (straight chain aliphatic monocarboxylic acid) ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในไขมัน น้ำมัน และฟอสโฟกลีเซอไรด์เป็นส่วนใหญ่ ที่พบในรูปของกรดไขมันอิสระมีน้อยมาก การสังเคราะห์กรดไขมันในร่างกายจะมีสารเริ่มต้นเป็นหมู่อะซิติล ซึ่งมีคาร์บอนในโมเลกุล 2 อะตอม มาต่อกันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ทำให้มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเป็นเลขคู่เสมอ พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของกรดไขมัน มีทั้งที่เป็นพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ กรดไขมันที่มีพันธะเดียวทั้งหมด เรียกว่า กรดไขมันชนิดอิ่มตัว (saturated fatty acids) ส่วนกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 1 อัน หรือมากกว่า 1 อัน เรียกว่า กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids)

<u>กรดไขมันชนิดอิ่มตัว</u>

กรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated fatty acids หรือ SFAs) (มีสูตรทั่วไปเป็น $C_n H_{2n} O_2$ เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยวและไม่สามารถรับไฮโดรเจนได้อีก กรดไขมันที่อิ่มตัวเมื่อมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเพิ่มขึ้น จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น ทำให้เป็นสาเหตุหนึ่งที่สัตว์น้ำ ย่อยกรดไขมันที่อิ่มตัวได้ไม่ดี และสัมประสิทธิ์การย่อยมีค่าต่ำลง กรดไขมันที่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะพบในไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์ เช่น น้ำมันวัว น้ำมันหมู เป็นต้น ซึ่งจะมีสภาพเป็นไขหรือแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

<u>กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว</u>

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลบางตำแหน่งเป็นพันธะคู่ทำให้สามารถเติมไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้อีก กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนพันธะคู่เพิ่มขึ้นจะมีจุดหลอมเหลวต่ำลง ทำให้สัตว์น้ำสามารถย่อยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวได้ดีและมีค่าสัมประสิทธิ์ทางการย่อยสูงขึ้น เพราะสัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือด

เย็นมีอุณหภูมิร่างกายเท่ากับอุณหภูมิน้ำ จึงสามารถย่อยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่ในสภาพของเหลวได้ดี กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวนิยมเขียนสัญลักษณ์ย่อเป็นชื่อ โอเมกา (omega name) ซึ่งจะนิยมใช้อย่างมากเกี่ยวกับการสังเคราะห์กรดไขมันของสัตว์น้ำความหมายของสัญลักษณ์ดังกล่าวนั้น ตัวเลขแรก หมายถึง จำนวนคาร์บอนทั้งหมดที่มีในกรดไขมัน และตัวเลขที่สองหมายถึง จำนวนพันธะคู่ทั้งหมดที่มีในกรดไขมัน โดย n หรือ w (omega) จะแสดงถึงตำแหน่งพันธะคู่ตัวแรกที่ปรากฏในกรดไขมัน นับจากด้านปลายกลุ่มเมธิล การบอกตำแหน่งพันธะคู่เป็นระบบ n หรือ w ทำให้ทราบว่ากรดไขมันที่อิ่มตัวชนิดนั้นอยู่ในกลุ่มเดียวกันหรือไม่ แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตามจำนวนพันธะคู่ได้ดังนี้

1. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเพียง 1 อัน (Mono unsaturated fatty acids หรือ MUFAs) มีสูตรทั่ว ๆ ไป เป็น $C_2 H_{2n-1}COOH$ เช่น กรดปาล์มิโตเลอิค (C16:1n-7) เป็นต้น

2. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 2-3 อัน (Poly unsaturated fatty acids หรือ PUFAs) กรดไขมันกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18-22 อะตอม และมีพันธะคู่ 2-3 อัน เช่น กรดไลโนเลอิค (C18:2n-6) และกรดไลโนเลนิค (C18:3n-3) เป็นต้น

3. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ตั้งแต่ 4 อันขึ้นไป (High unsaterated fatty acids หรือ HUFAs) เช่น กรดอะราคิโดนิค (C20:4n-6) เป็นต้น

<u>ไอโซเมอร์ของกรดไขมัน</u>

การที่กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ทำให้อะตอมหรือหมู่ที่เกาะอยู่กับคาร์บอนอะตอมระหว่างพันธะคู่ มีโอกาสเรียงตัวได้แตกต่างกันและเกิดเป็นไอโซเมอร์ขึ้นได้ เรียกว่า Geometric isomerism ถ้าหมู่หรืออะตอมที่เหมือนกันเกาะอยู่กับคาร์บอนอะตอมระหว่างพันธะคู่และอยู่ด้านเดียวกัน เรียกว่า รูปซิส (*cis*-form) แต่ถ้าหมู่หรืออะตอมที่เหมือนกันอยู่ด้านตรงข้ามกันระหว่างพันธะคู่ เรียกว่า รูปทรานส์ (*trans*-form) ซึ่งในธรรมชาติกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป*ซิส* กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่หลายอันจะมีไอโซเมอร์ได้หลายไอโซเมอร์ และกรดไขมันที่อยู่ในรูป*ซิส*และรูป*ทรานส์*จะมีสมบัติแตกต่างกัน

<u>หน้าที่ของกรดไขมัน</u>

กรดไขมันเข้าสู่ร่างกายในรูปของไขมันหลังจากถูกย่อยและถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในรูปของกรดไขมันอิสระและโมโนกลีเซอไรด์แล้ว กรดไขมันในรูปของไตรกลีเซอไรด์ถูกขนส่งในพาร์ติเคิลของไลโปโปรตีนผ่านกระแสเลือดเข้าสู่เซลล์ตับและเซลล์ต่าง ๆ กรดไขมันเมื่อเข้าสู่เซลล์แล้วมันจะแยกกันทำหน้าที่หลายประการได้แก่

1. เป็นแหล่งพลังงาน โดยการย่อยสลายกรดไขมันผ่านกระบวนการ beta oxidation ในไมโตคอนเดรียของเซลล์สร้างสาร ATP หรือนำไปสร้างคีโตนบอดีส์
2. สร้างไตรกลีเซอไรด์ เก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อไขมัน
3. สร้างเป็นกรดไขมันอื่น ๆ ที่ยาวขึ้นและ/หรือมีพันธะคู่มากขึ้น ในกรณีของกรดไขมัน

ที่มีพันธะคู่ในตำแหน่งไกลกว่าคาร์บอนตัวที่ 9 นับจากหมู่คาร์บอกซิล ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ จำเป็นต้องมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวกลุ่มโอเมกา-6 และโอเมกา-3 จากอาหารเป็นตัวเริ่มต้น ด้วยเหตุนี้เองทำให้กรดไขมันทั้งสองกลุ่มถูกจัดเป็นกรดไขมันชนิดจำเป็น

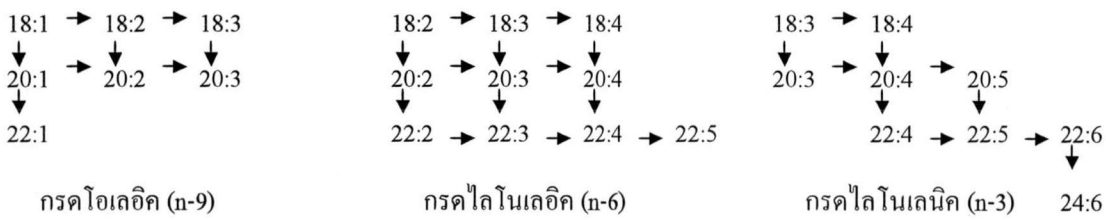
4. เป็นองค์ประกอบของลิพิดที่ทำหน้าต่าง ๆ ดังเช่น เป็นองค์ประกอบของฟอสโฟลิปิด ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเยื่อบุผิว (membrane) ต่าง ๆ เป็นต้น

5. เป็นแหล่งกำเนิด (precursor) ของสารอนุพันธ์ที่หน้าที่สำคัญ หลายประการ ดังเช่น กรดอะราคิโดนิค (arachidonic acid, C20:4n-6) เป็นแหล่งกำเนิดสารคล้ายฮอร์โมนพรอสตาแกลนดิน (prostaglandin) เป็นต้น

<u>การใช้ไขมันและกรดไขมัน</u>

ไขมันที่มาจากอาหารหรือที่สะสมไว้ในเซลล์ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์และฟอสโฟไลปิด เมื่อถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ย่อยไขมันจนได้เป็นกรดไขมันกับกลีเซอรอล กลีเซอรอลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการไกลโคไลซิสเพื่อให้ได้พลังงาน ส่วนกรดไขมันจะถูกนำไปเผาผลาญในกระบวนการเบตา-ออกซิเดชัน (β-oxidation) เพื่อให้ได้เป็นอะเซทิลโคเอ (acetyl-coA) ซึ่งเป็นสารเคมีหน่วยเล็ก ๆ ที่ร่างกายสามารถนำไปสลายเป็นพลังงานหรือนำไปสร้างสารต่าง ๆ เช่น ฮอร์โมนชนิดต่าง ๆ หรือเอนไซม์บางชนิด แล้วนำไปสะสมในอวัยวะต่าง ๆ (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2536; เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2543; พัชรา วีระกะลัส, 2544; Akiyama et al. 1992; De Silva and Anderson, 1995; Lovell, 1998)

กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในธรรมชาติมีหลายชนิด แต่กรดไขมันที่นักโภชนาการอาหารสัตว์น้ำศึกษากันมาก ได้แก่ กรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูง (PUFAs และ HUFAs) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 18 20 และ 22 อะตอม และจะมีพันธะคู่ตั้งแต่ 2-6 คู่ เรียงตัวกันในลักษณะไอโซเมอร์แบบซิส กรดไขมันที่มีความไม่อิ่มสูงที่พบแพร่หลายในองค์ประกอบเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำมีอยู่ 3 กลุ่มคือ กลุ่มโอเมกา-9 (n-9), กลุ่มโอเมกา-6 (n-6) และกลุ่มโอเมกา-3 (n-3) โดยแต่ละกลุ่มสามารถสร้างหรือสังเคราะห์กรดไขมันชนิดอื่นได้จากสารตั้งต้นโดยการเติมคาร์บอน (elongation) และการเติมพันธะคู่ (desaturation) กระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวในปลาและกุ้ง สรุปได้ดังนี้ (Tacon, 1990)



**คาร์โบไฮเดรต**

คาร์โบไฮเดรต เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นสารอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติโดยจะพบในพืชมากกว่าสัตว์ คาร์โบไฮเดรตที่ใช้เป็นอาหารสัตว์น้ำคือแป้ง โดยสัตว์น้ำไม่สามารถสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เหมือนพืชจึงพบในร่างกายเพียงเล็กน้อยและต้องอาศัยจากพืชเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ พืชสีเขียว สาหร่าย รวมทั้งแพลงก์ตอนพืชเป็นผู้สังเคราะห์แสง (photosynthesis) ที่มีสารเริ่มต้นเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ น้ำ และพลังงานที่คลอโรฟิลล์ได้รับจากแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เป็นโมเลกุลของน้ำตาล น้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง จะถูกนำไปใช้สังเคราะห์เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ เช่น ไดแซคคาไรด์ (disaccharide), โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) และโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide)

คาร์โบไฮเดรตจำแนกออกตามโครงสร้างโมเลกุลได้ 4 กลุ่มคือ

1. โมโนแซคคาไรด์

เป็นน้ำตาลโมเลกุลเชิงเดี่ยว และมีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด ไม่สามารถถูกไฮดโดรไลซ์ให้เล็ก ลงได้อีก บางครั้งเรียกว่า simple sugar มีสูตรทั่วไปคือ $(CH_2O)_n$ n จะมีค่าตั้งแต่ 3-7 การเรียกชื่อโมโนแซคคาไรด์จะเรียกตามจำนวนคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุล หรือเรียกตาม functional group เช่น โมโนแซคคาไรด์ที่มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อยที่สุดมี 3 อะตอม คือ กลีเซอรัลดีไฮด์ และไดไฮดรอกซีอะซิโตน ซึ่งเป็นโพลีไฮดรอกซีคีโตน

2. ไดแซคคาไรด์

เป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ 2 โมเลกุล ซึ่งอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันได้ ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ สูตรทั่วไปของไดแซคคาไรด์ คือ $C_{12}(H_2O)_{11}$ เช่น น้ำตาลซูโครส มอลโทส และแล็กโทส

3. โอลิโกแซคคาไรด์

เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ในโมเลกุลประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ตั้งแต่ 3-10 โมเลกุล เช่น แรฟฟิโนส (raffinose) และสตาคีโอส (stachyose)

4. โพลีแซคคาไรด์

ในโมเลกุลประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ ตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไป เป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุด ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืชและสัตว์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกติน เป็นองค์ประกอบอยู่ในผนังเซลล์ของพืช ไคตินเป็นองค์ประกอบในเปลือกของสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง และปู โพลีแซคคาไรด์บางชนิดเป็นแหล่งสะสมอาหาร เช่น สตาร์ชเป็นแหล่งสะสมอาหารของพืช และไกลโคเจนเป็นแหล่งสะสมอาหารของสัตว์

<u>หน้าที่</u>

1. เป็นโครงสร้างของร่างกายโดยเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของเยื่อหุ้มเซลล์และสาร

พื้นฐานในเนื้อเยื่อตามอวัยวะสำคัญต่าง ๆ ซึ่งรวมมิวโคโพลีแซคคาไรด์ (mucopolysaccharide) และไกลโคไลปิด (glycolipid)

2. เป็นคลังอาหารและพลังงาน ไกลโคเจนเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สัตว์สะสมไว้ใช้ในยามฉุกเฉิน ส่วนแป้งซึ่งสะสมในพืชเป็นอาหารหลักของสัตว์ ทั้งไกลโคเจนและแป้งจะถูกสลายและเผาผลาญเป็นพลังงานเมื่อสัตว์ต้องการ

**3.2 องค์ประกอบทางชีวเคมีในแพลงก์ตอนพืช**

**ไขมันและกรดไขมัน**

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดประกอบไปด้วยไขมันและกรดไขมัน นอกจากเป็นองค์ประกอบของเซลล์เมมเบรนแล้ว ไขมันยังเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการเมแทบอลิซึม ไขมันในแพลงก์ตอนพืชมีทั้งชนิดมีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) ไขมันไม่มีขั้วส่วนใหญ่ในแพลงก์ตอนพืชเป็นพวกไตรกลีเซอไรด์ แต่อาจพบกรดไขมันอิสระ แวกซ์เอสเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน และสเตอรอล ส่วนไขมันที่มีขั้วเป็นพวกฟอสโฟลิปิดและไกลโคลิปิด ไขมันมีกรดไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 20-40 % กรดไขมันส่วนใหญ่จับอยู่กับอนุพันธ์ของกลีเซอรอลโดยพันธะโควาเลนต์ โดยพบกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในปริมาณน้อย การสังเคราะห์กรดไขมันในสิ่งมีชีวิตมักเกิดจากการเติมหมู่อะซิเตท กรดไขมันจึงเป็นสายยาวและมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ (12–22) กรดไขมันที่พบในแพลงก์ตอนพืชมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยมีจำนวนพันธะคู่ตั้งแต่ 1–6 คู่ และอยู่ในรูปซิส (cis–) ในแพลงก์ตอนพืชกรดไขมันส่วนใหญ่อยู่ที่เมมเบรน โดยจับอยู่กับไขมันอื่น ๆ และยังเป็นแหล่งที่มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์สูง (Cohen, 1986) ในไดอะตอม 4 ชนิดที่ทำการศึกษา ได้แก่ *Chaetoceros calcitrans*, *C. gracilis*, *Skeletonema costatum* และ *Thalassiosira pseudonana* จะมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ละกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูงกว่าแพลงก์ตอนพืชกลุ่มอื่น โดยมี 1.7–34.0 % และ 1.1–14.4 % ของไขมันทั้งหมด ตามลำดับ (Volkman et al. 1989) ไตรกลีเซอไรด์จะเป็นเหมือนแหล่งผลิตพลังงาน ส่วนฟอสโฟลิปิดและไกลโคลิปิดจะเป็นไขมันที่เป็นโครงสร้างในผนังเซลล์ แพลงก์ตอนพืชพวก Eukaryotic อาจมี SFAs และ MUFAs อยู่ถึง 80 % ของไขมันทั้งหมด นอกนั้นจะประกอบด้วย sulfoquinovosyl diglyceride, mono- และ di-galactosyldiglyceride, lecithin, phosphatidyl-glycerol และ γ-inositol จากรายงานพบว่าแพลงก์ตอนพืชในกลุ่มไดอะตอมมีปริมาณไขมัน อยู่ในช่วง 1-39 % น้ำหนักแห้ง โดยมีเปอร์เซนต์ขององค์ประกอบในไขมัน คือ Neutral, Glycolipids และ Phospholipids เท่ากับ 14–60, 13–44 และ 10–47 % ตามลำดับ (Borowtzka, 1988 อ้างโดย Becker, 1994)

**โปรตีนและกรดอะมิโน**

คุณภาพของโปรตีนขึ้นอยู่กับปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนในโปรตีน พืชสังเคราะห์กรดอะมิโนทุกชนิดได้ แต่สัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดจำเป็น กรดอะมิโนชนิดจำเป็นได้แก่ ฮิสติดีน อาร์จินีน ทรีโอนีน วาลีน ไลซีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน ฟีนิลอะลานีน เมทไธโอนีน และ ทริปโตเฟน จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดอะมิโนในแพลงก์ตอนพืชกับกรดอะมิโนในโปรตีนในไข่ไก่ พบว่ามีปริมาณแต่ละชนิดใกล้เคียงกัน (Teshima et al. 1986) จากการศึกษากรดอะมิโนในไดอะตอม 6 ชนิด พบว่าทุกชนิดพบเซรีนมาก และมีอาร์จินีนกับไอโซลิวซีนมากกว่ากรดแอสพาร์ติกและไลซีน (Darley, 1977 อ้างตาม Chuecas and Riley, 1969b; Chau et al. 1967)

**คาร์โบไฮเดรต**

โพลีแซคคาร์ไรด์ที่พบมากในไดอะตอมคือ chrysolaminaran (β1–3 glucan) และแมนโนส (mannose) ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กับการสร้างเปลือกหรือผนังเซลล์ที่เป็นสารซิลิกาในไดอะตอม การศึกษาของ Brown et al. (1997) พบว่าในไดอะตอม 10 ชนิดประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนส กาแลคโตส และกลูโคส มากกว่าน้ำตาลชนิดอื่น

**เถ้า**

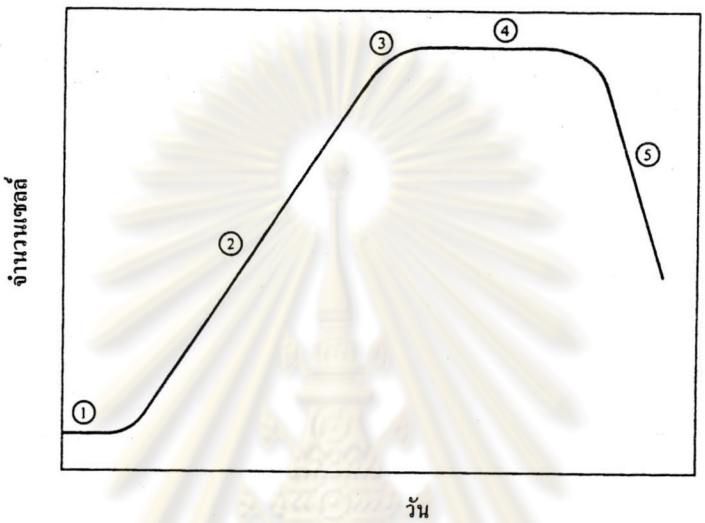
ปริมาณเถ้าในแพลงก์ตอนพืชมีความแปรผันของคุณภาพและปริมาณขึ้นกับสภาวะการเพาะเลี้ยงและธาตุอาหารที่ได้รับ ปริมาณเถ้าในแพลงก์ตอนพืชจะมีน้อย (ประมาณ 10 % ของน้ำหนักแห้ง) ยกเว้นแพลงก์ตอนพืชที่ทนเค็มสูงและในไดอะตอม ซึ่งมีโครงสร้างผนังเซลล์เป็นซิลิกาจึงมีปริมาณเถ้าสูง (Werner, 1977; Becker, 1986)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**4. การเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืช**

**4.1 ลักษณะการเติบโตของแพลงก์ตอนพืช**

Fogg and Thake (1987) และ Becker (1994) ได้อธิบายลักษณะการเจริญเติบโตหรือรูปแบบการเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ประเภทที่เป็นการเก็บเกี่ยวครั้งเดียว (Batch culture) โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ระยะดังนี้ (รูปที่ 3)




**รูปที่ 3** ลักษณะรูปแบบการเติบโตของแพลงก์ตอนพืช (ที่มา: Fogg and Thake, 1987)

1. ระยะปรับตัว (lag phase)

เป็นระยะที่เซลล์ปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ เช่น แสง อุณหภูมิ และธาตุอาหาร เป็นต้น ระยะนี้แพลงก์ตอนพืชจะไม่มีการแบ่งเซลล์หรือเจริญเติบโต ซึ่งถ้าเซลล์ที่ไม่สามารถปรับตัวได้ก็จะตายลง เมื่อนำแพลงก์ตอนพืชที่อยู่ในระยะเอกซ์โพเนนเชียล หรือระยะต้น stationary phase มาทำการถ่ายเชื้อใหม่ (subculture) จะมีช่วงระยะเวลาปรับตัว ที่สั้นกว่าเซลล์ที่มาจากระยะปลาย stationary phase ช่วงเวลาที่แพลงก์ตอนพืชจะอยู่ในระยะนี้ขึ้นกับความแข็งแรงของเซลล์ และความอุดมสมบูรณ์ของสารอาหารและปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เลี้ยง

2. ระยะเอกซ์โพเนนเชียล (exponential phase หรือ log phase)

เป็นระยะที่แพลงก์ตอนพืชเติบโตและแบ่งเซลล์อย่างรวดเร็ว ซึ่งระยะเวลานี้จะนานเท่าใดอยู่กับปริมาณสารอาหารและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี ของสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ช่วงเวลาได้รับแสง รวมทั้งผลผลิตสู่ภายนอกเซลล์ของแพลงก์ตอนพืช สภาวะรวมของสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ลักษณะการเติบโตในระยะนี้เป็นแบบที่รวดเร็วในระยะแรกและจะค่อย ๆ ช้าลงตามลำดับ

3. ระยะเฉื่อย (phase of declining relative growth หรือ declining phase)

เป็นช่วงที่เซลล์เริ่มมีการเติบโตต่ำลงเพราะปริมาณธาตุอาหารลดลง เนื่องจากปริมาณเซลล์

มีความหนาแน่นมากเกินไป มีการเสียสมดุล pH เพราะมีของเสียหรือมีแอมโมเนียเกิดขึ้นมาก หรือแสงถูกจำกัดเพราะเซลล์เกิดบังกันเอง อีกทั้งมีกระบวนการหายใจของเซลล์แพลงก์ตอนพืชเพิ่มขึ้น

4. ระยะคงที่ (stationary phase)

เป็นระยะที่การเติบโตของแพลงก์ตอนพืชลดลงจนหยุดนิ่ง เนื่องจากธาตุอาหารลดน้อยลง มีการหายใจของเซลล์แพลงก์ตอนเพิ่มมากขึ้น กระบวนการสังเคราะห์สารภายในเซลล์หยุด และเกิดสารพิษจากกระบวนการเมแทบอลิซึมหรือการสลายตัวของเซลล์เพิ่มมากขึ้น

5. ระยะตาย (death phase)

เป็นระยะที่เซลล์หยุดการเติบโตโดยสิ้นเชิง เนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมไม่เหมาะสม ความจำกัดของแสงและสารอาหาร อายุของเซลล์มาก หรือมีการปนเปื้อนจากสิ่งมีชีวิตอื่น เซลล์จะเริ่มตาย โดยจะมีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ยับยั้งการเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อ

**4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีและการเติบโตของแพลงก์ตอนพืช**

ปริมาณและคุณภาพองค์ประกอบทางชีวเคมีในแพลงก์ตอนพืชได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน กรดไขมัน และกรดอะมิโน มีความสัมพันธ์กับชนิด (species) และสายพันธุ์ (strain) ของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งจะมีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมของเซลล์ ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแหล่งที่มาแพลงก์ตอนพืช วิธีการและสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สารต่าง ๆ รวมทั้งปัจจัยแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาที่ได้รับแสง ความเข้มแสง ความเค็ม ความเป็นกรด-เบส ปริมาณสารอาหาร และระยะการเติบโตของเซลล์ที่เก็บเกี่ยวขึ้นมาวิเคราะห์ เป็นต้น

4.2.1 ชนิด (species) และสายพันธุ์ (strain) ของแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนพืชต่างชนิดและต่างสายพันธุ์กันจะมีความแตกต่างขององค์ประกอบทางชีวเคมี เช่น การศึกษาของ Brown (1991) และ Johansen et al. (1990) ดังตารางที่ 3 และ 4

**ตารางที่ 3** ปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ใน *Chaetoceros* 2 ชนิด

| ชนิด | แหล่งที่มา | ปริมาณ ( %น้ำหนักแห้ง ) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | โปรตีน | คาร์โบไฮเดรต | ไขมัน |
| *C. calcitrans* | West Boothbay Harbor, USA. | 34 | 6 | 16 |
| *C. gracilis* | West Boothbay Harbor, USA. | 12 | 4.7 | 7.2 |

ที่มา: Brown (1991)

**ตารางที่ 4** ปริมาณไขมัน (%น้ำหนักแห้งปราศจากเถ้า) และกรดไขมัน EPA และ DHA (% กรดไขมันรวม) ใน *Chaetoceros muelleri* 10 สายพันธุ์

| สายพันธุ์ | แหล่งที่มา | ไขมัน | EPA | DHA |
|---|---|---|---|---|
| CHAET6 | Cowpond, New Mexico | 14 | 34.0 | 0 |
| CHAET9 | Sheep pond, Utah | 18 | 34.3 | 5.6 |
| CHAET10 | Great Salt L., Utah | 18 | 35.4 | 0 |
| CHAET15 | Zzyzx spr., California | 18 | 12.1 | 0 |
| CHAET39 | Utah Lake, Utah | 11 | 31.3 | 0 |
| CHAET57 | Utah Lake, Utah | 16 | 19.1 | 3.9 |
| CHAET58 | Soap Lake, Washington | 21 | 23.2 | 0 |
| CHAET59 | Great Salt L., Utah | 17 | 20.4 | 4.0 |
| CHAET61 | Great Salt L., Utah | 14 | 30.5 | 0 |
| CHAET63 | Great Salt L., Utah | 17 | 31.3 | 5.8 |

ที่มา: Johansen et al. (1990)

4.2.2 อุณหภูมิ ระดับของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการเพาะเลี้ยง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเติบโตและปริมาณองค์ประกอบทางชีวเคมีในแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิด เช่นการศึกษาของ Mortensen et al. (1988) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ *C. gracilis* มีอัตราการเติบโตสูงสุดอยู่ในช่วง 30-32 °C เมื่ออุณหภูมิลดลงหรือเพิ่มขึ้น อัตราการเติบโตจะลดลง และปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกลุ่มโอเมกา-3 (HUFA) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการเลี้ยงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลที่ว่า ยิ่งกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูงมากเท่าไหร่ (degree of unsaturation) ก็ยิ่งต้องการสภาพที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อทำให้เนื้อเยื่อชั้นฟอสโฟลิพิด มีความยืดหยุ่น (flexibility) และมีการผ่านเข้าออกของสารต่าง ๆ ได้ดี (Castell, 1983 อ้างโดย Mortensen et al., 1988) เพ็ญแข อนันต์คูศรี (2539) พบว่าการเพาะเลี้ยง *C. calcitrans* ที่ 22 °C มีอัตราการผลิต EPA มากกว่าที่อุณหภูมิอื่น แต่ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตทำให้เซลล์มีน้ำหนักแห้งต่อลิตรมากที่สุด แต่มีปริมาณ EPA ลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Renaud et al. (2002) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของ *Chaetoceros* sp. อยู่ในช่วง 27-30 °C ทำให้มีสัมประสิทธิ์การเติบโตสูงสุด 0.87 ต่อวัน *Chaetoceros* sp. จะมีปริมาณไขมันสูงสุด 16.8 % น้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 °C ส่วนโปรตีนจะมีปริมาณสูงสุด เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-33 °C สำหรับปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (HUFA) พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จาก 25 ถึง 35 °C Thompson et al. (1992) พบว่าใน *C. gracilis* และ *C. simplex* มีปริมาณไขมันลดลงเมื่ออุณหภูมิของการเลี้ยงเพิ่มขึ้น จาก 10 จนถึง 25 °C การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเติบโต ปริมาณไขมันและกรดไขมันในไดอะตอม ได้แก่ *Nitzschia closterium* และ *N. paleacea* ซึ่งนำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 °C พบว่า *N. closterium* จะมีอัตราการเติบโตต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C และสูงกว่า 30 °C ส่วน *N. paleacea* จะมีอัตราการเติบโตต่ำลงที่อุณหภูมิ 10 °C แต่จะผลิตไขมันได้สูงที่สุด ส่วนการผลิตกรดไขมันไม่อิ่มตัว (PUFAs) จะมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 °C ใน *N. closterium* และ 10 °C ใน

*N. paleacea* (Renaud et al. 1995)

4.2.3 แสง เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งอาจได้จากธรรมชาติหรือแสงไฟฟ้า การควบคุมปริมาณแสงให้เหมาะสมจะมีความสำคัญมากต่อผลผลิตแพลงก์ตอนพืช ในไดอะตอมการแบ่งเซลล์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ได้รับแสงสว่าง การให้แสงตลอดเวลาจะไปเร่งให้เกิดการแบ่งเซลล์เร็วขึ้นแต่ก็ทำให้ขนาดของเซลล์ลดลงเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะเวลาการให้แสงสว่างให้เหมาะสมเพื่อให้ไดอะตอมเจริญเติบโตมีเซลล์ที่สมบูรณ์ การเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชจะต้องพิจารณาทั้ง ความเข้มแสง (light intensity) และช่วงเวลาที่ได้รับแสงต่อช่วงเวลาที่ไม่ได้รับแสง (light-dark cycle)

Mortensen et al. (1988) ศึกษาผลความเข้มแสงที่มีผลต่อการเติบโตและปริมาณกรดไขมันใน *C. gracilis* โดยทำการทดลองที่ความเข้มแสง 3 ระดับคือ 83, 814 และ 1395 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 28 °C พบว่าเฉพาะปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (HUFA (n-3)) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และมีอัตราส่วนของกรดไขมันชนิด (n-3)/(n-6) เพิ่มขึ้น 48 % จากความเข้มแสงต่ำ 83 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$ ถึงความเข้มแสงสูง 1395 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$

Thompson et al. (1993) ทำการศึกษาผลของความเข้มแสงต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีใน *C. gracilis* และ *C. simplex* ที่ความเข้มแสง 2 ระดับคือ 225 และ 11 $\mu$mol photons $.m^{-2}.s^{-1}$ พบว่าปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ในเซลล์แพลงก์ตอนมีความแตกต่างกัน จากการเลี้ยงในสองระดับความเข้มแสง แต่ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนนัก

สรุปจากการศึกษาของ Sicko-Goad and Anderson (1991) ซึ่งทำการเลี้ยงไดอะตอม 3 ชนิดภายใต้สภาวะ ช่วงเวลาที่ได้แสง:ช่วงเวลาที่ไม่ได้รับแสง 3 แบบ คือ 16:8, 20:4 และ 12:12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 °C พบว่า *Melosira varians* จะมีการเจริญเติบโตดีที่สุดที่สภาวะแสง 12:12 ชั่วโมง สำหรับ *Strephanodiscus binderanus* ในสภาวะแสง 20:4 ชั่งโมง เซลล์จะตายหมด ซึ่งก็พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ 12:12 ชั่วโมง และ *Cyclotella meneghiniana* พบว่าที่สภาวะแสง 12:12 ชั่งโมง เซลล์ตายหมด แต่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ 20:4 ชั่งโมง สำหรับปริมาณไขมัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาวะแสงในไดอะตอมแต่ละชนิด

4.2.4 ความเค็ม แพลงก์ตอนพืชเติบโตได้ในน้ำที่มีความเค็มเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้าง โดยขึ้นอยู่กับชนิดและที่อยู่อาศัย บางชนิดสามารถเติบโตได้ดีในช่วงความเค็มที่เปลี่ยนแปลงมาก แต่ก็จะมีความเค็มระดับหนึ่งที่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโต ซึ่งจะทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด จากการศึกษาของ Renaud and Parry (1994) เกี่ยวกับผลของความเค็มต่อการเติบโตและองค์ประกอบทางชีวเคมีในแพลงก์ตอนพืช 3 ชนิด คือ *Isochrysis* sp., *Nannochloropsis oculata* และ

*Nitzschia frustulum* โดยทำการทดลองที่ความเค็ม 6 ระดับ คือ 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 psu พบว่าอัตราการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชทั้งสามไม่มีความแตกต่างกันที่ความเค็มทั้ง 6 ระดับ แต่พบว่าใน *Isochrysis* sp., *N. oculata* ปริมาณไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น แต่ *N. frustulum* มีปริมาณไขมันลดลงในช่วงความเค็ม 10-15 psu แต่ไม่พบอิทธิพลของความเค็มต่อปริมาณโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต การศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของ *Skeletonema costatum* ในห้องปฏิบัติการ พบว่า เมื่อทดลองเลี้ยงที่ความเค็ม 3 ระดับ คือ 15, 25 และ 33 psu *S. costatum* มีการเพิ่มจำนวนเซล์เป็น 2 เท่า เร็วที่สุดที่ความเค็ม 25 psu (มาวิทย์ อัศวอารีย์ และ ธิดา เพชรมณี, 2534)

4.2.5 ความเป็นกรด–ด่าง (pH) การเลี้ยง *Chlorella* sp. ในสภาพที่เป็นด่าง ทำให้มีการสะสมไขมัน triacylglycerol มากขึ้น Guckert and Cocksey (1990) ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนกลุ่มของกรดไขมันในเมแทบอลิซึมจากกลุ่มของกรดไขมันที่มีการสังเคราะห์ในเซลล์เมมเบรนไปเป็นการสะสมแทน ทำให้มีผลต่อองค์ประกอบของกรดไขมันในเซลล์ด้วย เมื่อ pH ในอาหารสูงเกินกว่า 11 จะทำให้สัดส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวลดลงในไขมัน 3 กลุ่ม คือ triacylglycerol, glycolipid และ polar lipid ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวลดลงด้วย เพ็ญแข อนันต์คูศรี (2539) ทำการปรับ pH เริ่มต้นในอาหารที่เพาะเลี้ยง *C. calcitrans* ให้อยู่ในช่วง 5–9 พบว่าที่ pH = 5 *C. calcitrans* ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เนื่องจาก pH มีความเป็นกรดสูง ที่ pH = 6 อัตราการเติบโตและการผลิต EPA ลดลงอย่างมาก ที่ pH = 9 *C. calcitrans* สามารถเติบโตได้ดีและมี EPA สูง

4.2.6 ปริมาณธาตุอาหาร ความต้องการธาตุอาหารขึ้นอยู่กับความต้องการของแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิด ถ้าในอาหารเลี้ยงมีปริมาณธาตุอาหารไม่เพียงพอกับความต้องการของแพลงก์ตอนพืชจะทำให้อัตราการเติบโตลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางชีวเคมีในเซลล์แพลงก์ตอนพืช

ไนโตรเจน ปกติแพลงก์ตอนพืชสามารถใช้ไนโตรเจนได้จากหลายแหล่งทั้งในรูปสารอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือ 3 ชนิด คือ ไนเตรท ไนไตรท และแอมโมเนีย และในรูปของสารอินทรีย์ เช่น ยูเรีย เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของแก๊สได้อีกด้วย เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ แต่เนื่องจากกระบวนการชีวเคมีในเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน และกระบวนการในการนำเข้าไนโตรเจน (Nitrogen uptake) ก็มีความแตกต่างกันตามชนิดของไนโตรเจนจึงทำให้ประสิทธิภาพการนำเข้าไนโตรเจนมีความแตกต่างกัน (Syrett, 1981) ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่ออัตราการเจริญ ผลผลิตเซลล์ รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีบางประการภายในเซลล์ Kaplan et al. (1986) พบว่าไดอะตอมจะมีปริมาณไนโตรเจนใน

เซลล์ค่อนข้างต่ำเนื่องจากสารซิลิกาในส่วนของผนังเซลล์จะไปทำให้ความต้องการใช้สารประกอบไนโตรเจนต่ำลง นอกจากนี้แพลงก์ตอนพืชส่วนใหญ่ยังมีความแตกต่างในการใช้สารอนินทรีย์และอินทรีย์เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเติบโต สารอนินทรีย์ที่ใช้มากคือ แอมโมเนีย และไนเตรท ส่วนสารอินทรีย์ที่ใช้จะอยู่ในรูปยูเรีย การขาดไนโตรเจนหรืออยู่ในสภาวะที่ไนโตรเจนถูกจำกัดจะทำให้เกิดการสะสมปริมาณกรดไขมันเพิ่มขึ้นในแพลงก์ตอนพืชหลายชนิด (Ben-Amotz et al. 1985; Harrison et al., 1990)

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เพราะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่าง ๆ ของเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิค แพลงก์ตอนพืชต้องการใช้ฟอสฟอรัสในรูปของอนินทรีย์ ฉะนั้นสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสจึงจัดว่าเป็นแหล่งเบื้องต้นของฟอสฟอรัสซึ่งจะแตกตัวเป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฟอสฟอรัส และออโธฟอสเฟต หรือฟอสเฟต โดยอาศัยเอนไซม์ที่เรียกว่า ฟอสฟาเทส หรือฟอสโฟเอสทาเรส ถ้าขาดฟอสฟอรัสจะมีผลเสียต่อการเติบโต คือ ปริมาณโปรตีน รงควัตถุชนิดคลอโรฟิลด์-เอ RNA และ DNA จะลดลง แต่แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตกลับเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลทำให้รูปร่างเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540)

ซิลิเกต มีผลต่ออัตราการเติบโตและการเมแทบอลิซึมของกรดไขมัน ไดอะตอมต้องการซิลิเกตเป็นธาตุอาหารหลักที่ใช้ในการแบ่งเซลล์ ปกติซิลิเกตมักจะอยู่ในรูปของ metasilicate ซึ่งเมื่อถูกไฮโดรไลซ์จะเปลี่ยนไปเป็นกรด orthosilicic ที่เปลือกไดอะตอมจะอยู่ในรูป hydrated amorphous silica ($SiO_2.nH_2O$) ไดอะตอมทั่วไปมักจะตอบสนองต่อการขาดซิลิเกตโดยตรง เนื่องจากซิลิเกตมีผลต่อการสร้างผนังเซลล์ ถ้าขาดจะไม่สามารถทำการแบ่งเซลล์และสร้างเปลือกได้โดยจะมีการสะสมไขมันแทน (Taguchi et al. 1987) เมื่อซิลิเกตในอาหารเลี้ยงหมดไปจะทำให้ปริมาณไขมันในเซลล์แพลงก์ตอนพืชเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้การสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (HUFAs) ลดลง (Shifrin and Chisholm, 1981) สอดคล้องกับการศึกษาของ Enright et al. (1986b) ที่พบว่าในการเพาะเลี้ยงไดอะตอม *C. gracilis* ปริมาณกรดไขมัน EPA และ DHA จะลดลงเมื่อขาดซิลิเกต เนื่องจากไดอะตอมไม่สามารถแบ่งเซลล์ได้อย่างเป็นปกติเมื่อขาดซิลิเกต หรือปริมาณซิลิเกตต่ำกว่าความต้องการของเซลล์

4.2.7 การเก็บเกี่ยวเซลล์แพลงก์ตอนพืช

การเก็บเกี่ยวเซลล์แพลงก์ตอนพืชในระยะของการเติบโตที่ต่างกันจะมีผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมี Fernandez-Reiriz et al. (1989) พบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตและไขมันในแพลงก์ตอนพืชบางชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะ stationary phase ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีปริมาณสูงที่สุดในระยะ log phase

จากการศึกษาของ Brown et al. (1996) ที่เก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอม *Thalassiosira pseudonana* ในระยะ log phase และระยะ stationary phase เพื่อนำมาวิเคราะห์โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต พบว่า โปรตีนจะมีปริมาณสูงสุดในระยะ log phase ขณะที่คาร์โบไฮเดรตและไขมันมีปริมาณสูงสุดในระยะ stationary phase ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาข้างต้น สำหรับการศึกษาปริมาณกรดไขมัน EPA และ DHA ใน *C. calcitrans* และ *C. malaysia* โดยวิเคราะห์ในช่วงอายุของ culture แตกต่างกัน ในวันที่ 2, 8 และ 12 พบว่า *C. calcitrans* มีปริมาณ EPA เพิ่มขึ้น (7.4-7.9 %) ส่วน DHA จะไม่แน่นอน สำหรับ *C. malaysia* มี EPA ลดลง (14.1-12.7 %) แต่ DHA มีปริมาณเพิ่มขึ้น (0.4-1.2 %) เมื่อ culture มีอายุมากขึ้น (Shamsudin, 1994)

การเก็บเกี่ยวเซลล์แพลงก์ตอนพืช เป็นวิธีการที่จะเก็บผลผลิตสาหร่ายเซลล์เดียวให้เหลือน้อยที่สุด แต่มีความหนาแน่นมาก โดยสามารถทำได้หลายวิธี จากการศึกษาของ Goluek and Oswald (1965) ศึกษาวิธีการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืชโดยการกรอง (filtration) การทำให้ตกตะกอน (precipitation) การเหวี่ยงด้วยความเร็ว (centrifugation) การทำให้ตกตะกอนโดยใช้สารเคมีหรือนำเซลล์แพลงก์ตอนพืชไปผ่านบริเวณที่มีประจุไฟฟ้า และการใช้คลื่นเสียงอุลตราโซนิค การตกตะกอนแพลงก์ตอนพืชด้วยสารเคมี เป็นวิธีหนึ่งที่จะเก็บผลผลิตแพลงก์ตอนพืชให้เหลือปริมาตรน้อยและมีความหนาแน่นสูง โดยสารเคมีจะทำให้แพลงก์ตอนพืชเกาะกันเป็นกลุ่ม เมื่อมีน้ำหนักมากพอก็จะตกตะกอน เมื่อรวบรวมตะกอนไปใช้ก็สามารถลดปริมาตรน้ำลงไปได้มาก สารตกตะกอนที่ใช้มีหลายชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารส้ม ($AlK(SO_4)_2 . 12H_2O$) และเฟอริคคลอไรด์ ($FeCl_3 . 6H_2O$) การที่แพลงก์ตอนพืชตกตะกอนนั้นเนื่องจากเซลล์แพลงก์ตอนพืชมีประจุลบเมื่อจับกับประจุบวกในสารเคมีที่ใช้ เช่น $Al^{3+}$, $Fe^{2+}$ จะจับตัวกันทำให้เกิดการตกตะกอน ชนิดของสารตกตะกอนที่เหมาะสมในแพลงก์ตอนพืชแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป จากการศึกษาของ ผุสดี ศรีพยัตต์ (2525) ที่ทดลองใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารส้มตกตะกอนสาหร่ายเซลล์เดียวหลายชนิด พบว่าเมื่อใช้ NaOH เซลล์ส่วนใหญ่ตกตะกอนช้าเกิน 1 วัน แต่สารส้มเข้มข้น 40-200 mg/l ทำให้สาหร่ายทุกชนิดที่นำมาทำการทดลองตกตะกอนได้ภายในเวลา 0.5–1 ชั่วโมง แต่ไม่ได้รายงานว่าชนิดไหนตกได้มากน้อยเพียงใดในสภาพใด สำหรับการศึกษาของมาวิทย์ อัศวอารีย์และธิดา เพชรมณี (2534) ที่ตกตะกอนคลอเรลลาน้ำเค็มที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารเคมีที่ใช้ พบว่า อลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในพัน เป็นปริมาณน้อยที่สุดที่สามารถตกตะกอนคลอเรลลาได้ แต่ถ้าใช้สารส้มควรใช้ 100 ส่วนในพัน ธิดา เพชรมณีและมาวิทย์ อัศวอารีย์ (2538) ได้ทำการตกตะกอนสาหร่ายคลอเรลลาน้ำเค็มด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต และสารส้มซึ่งเป็นอลูมิเนียมซัลเฟตที่มีโปแตสเซียมอยู่ด้วย ในอัตราความเข้มข้นต่าง ๆ และตรวจวัดการตกตะกอนในเวลา 60 นาที ผู้วิจัยได้เสนอว่า ความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟตและสารส้มที่เหมาะสมกับการตกตะกอนสาหร่ายคลอเรลลาคือ 50 และ 100 ส่วนในพัน ตามลำดับ หลังจากตก

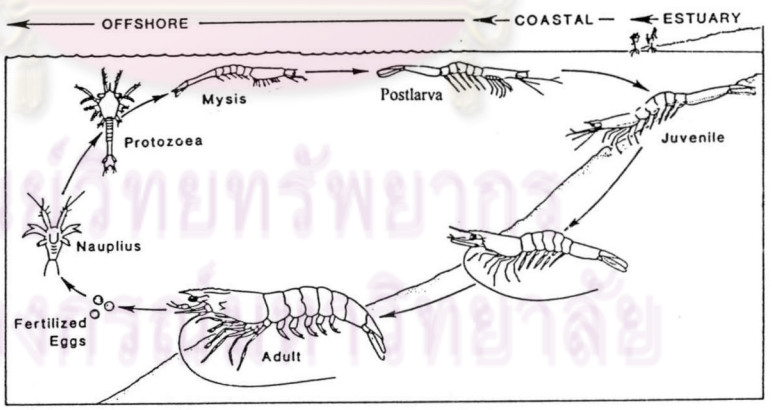
ตะกอนแล้วก็สามารถนำคลอเรลลาเข้มข้นนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ โดยสาหร่ายจะเพิ่มจำนวนได้ตามปกติ

## 5. กุ้งกุลาดำ

### 5.1 ลักษณะทั่วไปของกุ้งกุลาดำ

กุ้งกุลาดำเป็นกุ้งทะเลที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในวงศ์ Penaeidae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus monodon* Fabricius และมีชื่อสามัญว่า Giant tiger prawn ลำตัวมีสีม่วงแดง มีแถบสีดำหรือน้ำตาลพาดขวางลำตัว หนวดมีสีเข้มไม่มีลาย โคนขาว่ายน้ำมีสีเหลืองสลับน้ำเงิน

วงจรชีวิตของกุ้งกุลาดำมีลักษณะเช่นเดียวกับกุ้งทะเลทั่ว ๆ ไป (รูปที่ 4) เมื่อกุ้งกุลาดำเข้าสู่ระยะวัยรุ่น (juvenile) ก็จะเริ่มอพยพจากบริเวณริมฝั่งทะเล เขตน้ำกร่อย ปากแม่น้ำหรือป่าชายเลน ลงสู่ทะเลลึก ไกลฝั่ง เพื่อการเจริญพันธุ์และการผสมพันธุ์ เมื่อแม่กุ้งออกไข่ในทะเลแล้ว ไข่ที่ได้รับการผสมจะฟักเป็นตัวแล้วจะพัฒนาเป็นตัวอ่อนระยะต่าง ๆ จากนั้นเมื่อลูกกุ้งมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะอพยพเข้าสู่บริเวณพื้นที่อนุบาล ชายฝั่งปากแม่น้ำหรือป่าชายเลน ซึ่งเป็นบริเวณที่ลูกกุ้งใช้หาอาหารอนุบาลตัวอ่อน หรือหลบภัย จนพัฒนาและเจริญเติบโตเป็นกุ้งวัยรุ่น จึงอพยพลงสู่ทะเลอีกครั้ง เพื่อเจริญพันธุ์ต่อไป ชีวิตของกุ้งจะเป็นวงจรอย่างนี้ทำให้มีการแพร่กระจายทั่วไปในท้องทะเล (Motoh, 1984 ; Bailey-Brock and Moss, 1992)




**รูปที่ 4** วงจรชีวิตของกุ้งทะเล ที่มา: Bailey-Brock and Moss (1992)

### 5.2 ลักษณะรูปร่างและการพัฒนาของกุ้งกุลาดำวัยอ่อน

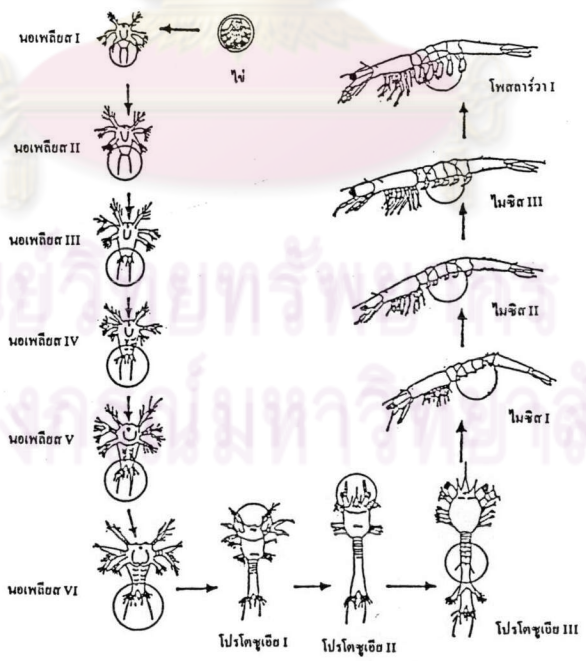
กุ้งกุลาดำวัยอ่อนมีการพัฒนาเป็นระยะต่าง ๆ 4 ระยะด้วยกันคือ (Motoh, 1981; Kungvankit, 1989; วัลลภ คงเพิ่มพูน, 2534) (รูปที่ 5)

1.ระยะนอเพลียส (Nauplius I-VI) เป็นลูกกุ้งที่ฟักออกเป็นตัวใหม่ ๆ จะแบ่งออกเป็น 6 ระยะย่อย มีลักษณะคล้ายแมงมุม ลำตัวไม่แบ่งเป็นปล้อง มีระยางค์ 3 คู่ ลูกกุ้งระยะนี้ไม่ต้องการอาหารจากภายนอก แต่จะใช้อาหารสะสมจาก yolk

2.ระยะโปรโตซูเอีย (Protozoea I-III) ลูกกุ้งจะมีส่วนของลำตัวยาวขึ้น ส่วน cephalothorax จะแยกจากส่วนของลำตัว แบ่งออกเป็น 3 ระยะย่อย ซึ่งในแต่ละระยะจะมีลักษณะแตกต่างกันคือ ระยะโปรโตซูเอีย I ส่วนของตาเป็นจุดติดกับหัว ระยะซูเอีย II ส่วนของตาแยกออกจากหัวอย่างเห็นได้ชัดเจน และระยะซูเอีย III ระยะนี้จะมีแพนหาง (uropods) เกิดขึ้น ลูกกุ้งในระยะนี้จะกินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหาร โดยใช้ระยางค์ส่วนหัวโบกพัดอาหารเข้าปาก

3.ระยะไมซิส (Mysis I-III) ลูกกุ้งจะมีการลอยตัวในลักษณะนอนหงายท้อง เอาด้านท้องขึ้นผิวน้ำตลอดเวลา การเคลื่อนที่ไปทางหางได้เร็ว มีการพัฒนาระยางค์ส่วนหัวทำให้สามารถจับเหยื่อจำพวกแพลงก์ตอนสัตว์กินเป็นอาหารได้ ลูกกุ้งระยะนี้เริ่มมีการพัฒนาขาว่ายน้ำ (pleopods) เกิดขึ้น แบ่งได้ 3 ระยะย่อย คือ ระยไมซิส I จะมีลักษณะเป็นตุ่มนูน (pleobasis) ขึ้นที่ฐานของขาว่ายน้ำทั้ง 5 คู่ ระยไมซิส II pleobasis จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดลักษณะเป็นปล้อง 1 ปล้อง และระยะไมซิส III ขาว่ายน้ำจะปรากฏให้เห็นอย่างสมบูรณ์ โดยจะเห็นเป็นปล้อง 2 ปล้อง ที่ขาว่ายน้ำทั้ง 5 คู่

4.ระยะโพสลาร์วา (Postlarva) จะมีลักษณะรูปร่างเหมือนกับกุ้งโตเต็มวัย และมีการพัฒนาของอวัยวะต่างๆ สมบูรณ์ จะว่ายน้ำในลักษณะคว่ำตัวลง แต่ยังว่ายน้ำในมวลน้ำตลอดเวลา แต่เมื่อลอกคราบ 4-5 ครั้ง เป็นกุ้งระยะโพสลาร์วา V จึงเริ่มลงเกาะกับพื้นดินและหากินบนพื้นเหมือนกุ้งพ่อแม่




**รูปที่ 5** ลักษณะรูปร่างของกุ้งกุลาดำวัยอ่อนระยะต่าง ๆ
(ในวงกลมแสดงลักษณะเด่นที่ใช้แยกระยะต่าง ๆ ของกุ้ง) ที่มา: ดัดแปลงจาก Motoh (1981)

**5.3 ความต้องการสารอาหารต่าง ๆ ในกุ้ง**

อาหารเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิดเพราะอาหารให้พลังงานและสารอาหารแก่ร่างกายเพื่อนำไปใช้ในการทำงานตามหน้าที่ แล้วส่งผลให้สิ่งมีชีวิตมีการเจริญเติบโต สามารถสืบพันธุ์และดำรงชีวิตได้ตามปกติ ซึ่งมาจากการที่ร่างกายได้รับอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วนในปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการ อันประกอบด้วยสารอาหารที่สำคัญได้แก่ โปรตีนและกรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต ไขมันและกรดไขมัน วิตามิน เกลือแร่ และน้ำ เมื่ออาหารผ่านกระบวนการย่อยและปลดปล่อยสารอาหาร สารอาหารจะถูกดูดซึมและขนส่งโดยระบบไหลเวียนของโลหิตไปใช้ประโยชน์ภายในเซลล์ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย การใช้ประโยชน์สารอาหารในระดับนี้แบ่งออกเป็น 3 ทางคือ (1) ใช้ทันทีตามความต้องการของร่างกาย (2) ถูกเก็บไว้ใช้ในรูปเดิม (3) ถูกเก็บไว้ใช้สังเคราะห์สารอื่น

**โปรตีนและกรดอะมิโน**

โดยทั่วไปสัตว์น้ำวัยอ่อน มีความต้องการโปรตีนสูงและความต้องการโปรตีนจะลดลงเมื่อสัตว์น้ำโตขึ้น (De Silva and Anderson, 1995) กุ้งในสกุล penaeid ในระยะโพสลาร์วาต้องการโปรตีนสูงกว่าระยะวัยรุ่นถึงโตเต็มวัย (Akiyama et al., 1992) กุ้งต้องการโปรตีนในอาหารแตกต่างกันไปตามชนิด ขนาด คุณภาพของโปรตีน ระดับพลังงานในอาหาร อัตราการให้อาหาร คุณภาพน้ำและปริมาณอาหารธรรมชาติ ซึ่งระดับโปรตีนที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของกุ้งสกุล penaeid จากที่มีการศึกษามาพบว่าอยู่ในช่วง 28% ถึง 60% (Lovell, 1998) และโดยทั่วไปกุ้งกุลาดำต้องการโปรตีนในอาหารสูงกว่าปลาและกุ้งก้ามกรามเกือบ 2 เท่า (Pandian, 1987 อ้างโดย เวียง เชื้อโพธิ์หัก, 2542) กุ้งวัยอ่อนต้องการโปรตีนในอาหาร 40-50 % (Lee,1971), 55 % (Tacon, 1990) และ 50-60 % (Klausmeier, 1991) ผลของระดับโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตต่อการเติบโตและอัตรารอดของ *P. japonicus* วัยอ่อน พบว่าระดับโปรตีนที่เหมาะสมจะเป็น 45%, 45-55% และ 55 % เมื่ออาหารมีระดับของคาร์โบไฮเดรต 25 %, 15 % และ 5 % ตามลำดับ (Teshima and Kanazawa, 1984)

จากหลายการศึกษาได้สรุปว่า กุ้งมีความต้องการกรดอะมิโนชนิดจำเป็น 10 ชนิด เช่นเดียวกับปลาและสัตว์บกทั่วไป ได้แก่ ทรีโอนีน วาลีน ลิวซีน ไอโซลิวซีน ฟีนิลอะลานีน เมไธโอนีน ทริปโตเฟน อาร์จินีน ฮิสติดีน และไลซีน (Kanazawa and Teshima, 1981; Tacon, 1990)

ส่วนใหญ่จะพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับความต้องการกรดอะมิโนในสัตว์น้ำ จะใช้วิธีการวัดกรดอะมิโนในเนื้อเยื่อ ซึ่งวิธีการดังกล่าวถูกพัฒนาโดย Ogino (1980 อ้างโดย Tacon, 1990) ในการประเมินความต้องการกรดอะมิโนของปลาเรนโบว์ ปลาเทร้า และปลาไน โดยการให้อาหารทดสอบที่มีคุณภาพสูงแก่ปลาแล้ววัดกรดอะมิโนที่สะสมในตัวปลา และพบว่าปลามีความต้องการกรดอะมิโนเช่นเดียวกับการประเมินโดยวิธีการวัดอัตราการเจริญเติบโต โดยทั้งหมดอาศัยหลักการ

ที่ว่าปริมาณกรดอะมิโนที่มีสะสมในสัตว์ทดลองจะเท่ากับความต้องการของสัตว์ทดลอง สำหรับการศึกษาความต้องการกรดอะมิโนในกุ้งวัยอ่อนจะมีค่อนข้างน้อย

**ไขมันและกรดไขมัน**

กุ้งมีความสามารถจำกัดในการเพิ่มจำนวนคาร์บอนอะตอม (elongation) และจำนวนพันธะคู่ (desaturation) ในโมเลกุลของ โอเมกา-3 ให้เป็น EPA (C20:5n-3) หรือ DHA (C22:6n-3) ดังนั้นจึงต้องการ EPA และ DHA ในอาหารซึ่งจะใช้ประโยชน์ได้มากกว่า (Lim, 1998) ความต้องการกรดไขมันชนิดจำเป็นในสัตว์น้ำแต่ละชนิดแตกต่างกันไปตาม อุณหภูมิ ความเค็มของน้ำ รวมทั้งวัยหรือขนาดของสัตว์น้ำ

มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสี่ชนิดที่จัดว่าเป็นกรดไขมันจำเป็นสำหรับกุ้ง ได้แก่ linoleic acid (18:2n-6), linolenic acid (18:3n-3), EPA (20:5n-3) และ DHA (22:6n-3) (Kanazawa et al. 1979; Jone et al. 1979 อ้างโดย Akiyama et al.1992; Kanazawa, 1984,1994; Volkman et al. 1989) ส่วนกรดไขมันชนิดที่ห้า คือ AA (C20:4n-6) พบว่ามีบทบาทในการพัฒนาจากไข่เป็นนอเพลียสในกุ้ง *Penaeus chinensis* (Tocher and Sargent, 1984; Xu et al. 1994) รายละเอียดดังตารางที่ 5

สัตว์ทะเลส่วนใหญ่มีความสามารถจำกัดที่จะสังเคราะห์ PUFAs C20:5n-3 (EPA) และ C22:6n-3 (DHA) จากกรดไขมันตั้งต้น เช่น linolenic acid (Kanazawa et al. 1979) มีสัตว์น้ำบางชนิดมีความต้องการอาหารที่มี EPA และ DHA (อาจไม่เต็มที่) แต่เมื่อมีกรดไขมันสองชนิดนี้ในอาหารที่มาจากแพลงก์ตอนพืช จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตและอัตรารอดของวัยอ่อนเพิ่มขึ้น (Rodger and Barlow, 1987)

มีการศึกษาค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับความต้องการกรดไขมันชนิดจำเป็น (EFAs) ในกุ้งวัยอ่อน แต่พบว่ากุ้งวัยอ่อนมีความสามารถสูงกว่ากุ้งวัยรุ่นในการเปลี่ยน (convert) C18:3n-3 ไปเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (HUFAs) (Teshima et al. 1992) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในกระบวนการเมแทบอลิซึมระหว่างกุ้งวัยอ่อนและกุ้งวัยรุ่น Jone et al. (1979) อ้างโดย Kanazawa (1984); Teshima and Kanazawa (1984) สรุปว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกลุ่มโอเมกา-3 (omega-3 highly polyunsaturated fatty acid หรือ n-3 HUFA) มีความจำเป็นต่อการเติบโตและอัตรารอดของกุ้ง *P. japonicus* วัยอ่อน

สำหรับ AA (20:4n-6) พบว่าเป็นสารตั้งต้นของฮอร์โมน prostaglandins และสารประกอบทางชีวภาพอื่นๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและแมลง (D' Souza and Loneragan, 1999 อ้างตาม Stanley-Samuelson, 1987; Brenner and Bernajconi, 1989) Sorgeloos and Le'ger (1992) ได้ให้ข้อสังเกตว่าอาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงพวก n-3 จะสามารถปรับปรุงการเจริญเติบโตและการรอดตายของกุ้งพีเนียสระยะวัยอ่อนได้

ระดับเหมาะสมของอาหารกุ้งควรมี C20:5n-3 หรือ C22:6n-3 อยู่ในช่วง 0.5–1.0 % สำหรับระดับที่เหมาะสมของกรดไขมันโอเมกา-6 ควรมีประมาณ 0.5 % และ 0.5 % ของโอเมกา-3 (n-3) ซึ่งทำให้กุ้งหลายชนิดมีการเจริญเติบโตสูง (Lim, 1998)

**ตารางที่ 5** กรดไขมันจำเป็น (Essential fatty acids) 5 ชนิด

| ชื่อสามัญ | ชื่อวิทยาศาสตร์ | สัญลักษณ์ย่อ |
|---|---|---|
| กรดไลโนเลอิค (Linoleic acid: LA) | cis, cis-9,12-Octadecadienoic | C18:2n-6 |
| อัลฟา-กรดไลโนเลนิค ($\alpha$-Linolenic acid: LNA) | all, cis-9,12,15-Octadecatrienoic | C18:3n-3 |
| กรดอะราคิโดนิค (Arachidonic acid: AA) | all cis-5,8,11,15-Eicosatetraenoic | C20:4n-6 |
| กรดไอโคซาเพนตาอีโนอิค (Eicosapentaenoic: EPA) | all cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic | C20:5n-3 |
| กรดโดโคซาเฮกซาอีโนอิค (Docosahexaenoic: DHA) | all cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexaenoic | C22:6n-3 |

**คาร์โบไฮเดรต**

การที่กุ้งได้รับคาร์โบไฮเดรตและไขมันน้อยกว่าความต้องการจะทำให้กุ้งใช้โปรตีนในอาหารบางส่วนเป็นพลังงาน และทำให้เหลือโปรตีนสำหรับการเจริญเติบโตน้อยลง ในทางกลับกันถ้ากุ้งได้รับคาร์โบไฮเดรตมากเกินกว่าต้องการ กุ้งจะเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตส่วนเกินให้อยู่ในรูปของไขมัน และสะสมในร่างกายและมีผลคล้ายคลึงกับการที่มีไขมันมากไปในตัวของกุ้ง นอกจากนี้การที่มีคาร์โบไฮเดรตมากเกินไปในอาหารกุ้งจะทำให้สัดส่วนของโปรตีนลดลง มีผลทำให้กุ้งเจริญเติบโตช้าลง (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2534)