สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

กระบวนการสะสมแร่ธาตุของกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) และประยุกต์การเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลและการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์

Biomineralization of *Litopenaeus vannamei* and Application of Minerals Supplementation in Commercial Larviculture and Grow-out Systems.

บุญรัตน์ ประทุมชาติ [1] อรสา สุริยาพันธุ์ [2] กิตติยา อุปถัมภ์[1] สว่างพงศ์ สมมาตร[1]

1 ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี
2 ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี

BK 01083?0
22 มิ.ย. 2552
249047
เงินบริการ
23 มิ.ย 2552

รายงานวิจัยงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปี 2550
โครงการต่อเนื่อง (ปีที่ 1)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด การทดลองที่ 1 ผลของการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ในการบำบัดน้ำ ต่อการเปลี่ยนแปลงของออสโมลาลิตี้ และความเข้มข้นของแร่ธาตุ 9 ชนิด (Ca, Mg, K, Na, Cl, P, S, Cu และ Mn) ที่ระดับความเค็มน้ำ 15, 20, 25 และ 30 ppt การทดลองที่ 2 ศึกษาความเข้มข้นของแร่ธาตุรวม 10 ชนิด (Ca, Mg, K, Na, Cl, P, S, Cu และ Mn) ไบคาร์บอเนต(HCO_3^-) และออสโมลาลิตี้ที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบน้ำที่ใช้อนุบาล และภายในร่างกายลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวา การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของการเสริมแร่ธาตุบางชนิดในระบบน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาวทั้ง 4 ระยะ ต่ออัตราการรอดตาย การเจริญเติบโต และระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาการ

ผลการศึกษาพบว่า การใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ มีผลทำให้ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำลดลง เมื่อใช้กับน้ำความเค็มสูงมากกว่า 25 ppt โดยเฉพาะโซเดียมและแมกนีเซียม ส่วนการเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้และแร่ธาตุของน้ำในระบบอนุบาลพบว่า ออสโมลาลิตี้ในระบบอนุบาลลูกกุ้งทุกระยะยกเว้นระยะซูเอีย มีค่าลดลง ($p<0.05$) และลูกกุ้งระยะนอเพลียส ซูเอีย และไมซิส พบการลดลงของไบคาร์บอเนตในน้ำ ($p<0.05$) ความเข้มข้นของโพแทสเซียม คลอรีน โซเดียม และแคลเซียมลดลง ($p<0.05$) ในน้ำที่ทำการอนุบาลระยะนอเพลียส ส่วนในร่างกายลูกกุ้งพบโพแทสเซียม และแมกนีเซียมสูง แต่ไม่พบแคลเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัสในน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอียลดลง ($p<0.05$) และมีแคลเซียมสูงในร่างกายลูกกุ้งระยะนี้ สำหรับระยะไมซิสและโพสลาวา ปริมาณแร่ธาตุในน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ($p>0.05$) ตลอดการอนุบาล โดยแมกนีเซียมมีค่าสูงในร่างกายลูกกุ้งระยะไมซิส ขณะที่ลูกกุ้งระยะโพสลาวา พบแคลเซียม และโพแทสเซียมสูง ทั้งนี้ไม่พบทองแดง และกำมะถันในร่างกายลูกกุ้งทุกระยะ

เมื่อเสริมไบคาร์บอเนตในน้ำในระบบอนุบาลลูกกุ้งขาวทุกระยะยกเว้นระยะโพสลาวา เสริมแมกนีเซียม และโพแทสเซียม ในระบบอนุบาลระยะนอเพลียส แคลเซียมในระยะซูเอีย แมกนีเซียมในระยะไมซิส และเสริมแคลเซียม และโพแทสเซียม ในระยะโพสลาวา พบว่า ลูกกุ้งกลุ่มที่เสริมแร่ธาตุทุกระยะยกเว้นระยะนอเพลียส มีอัตราการรอดตายสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ($p<0.05$) ส่วนการพัฒนาการ และการเจริญเติบโตของลูกกุ้งทุกระยะไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$)

Abstract

The study is divided into 3 experiments. The first, effect of calcium hypochloride on the variations of osmolality and minerals concentrations (Ca, Mg, K, Na, Cl, P, S, Cu, Mn) in four salinities (15, 20, 25, 30 ppt) were examined. The second, the variations of osmolality and minerals (Ca, Mg, K, Na, Cl, P, S, Cu, and Mn) concentrations and HCO_3^- in larviculture medium including the minerals change in *Litopenaeus vannamei* body at each larval stage (nauplius, zoea, mysis and postlarvae) were investigated. The third, effects of minerals supplementation in larviculture medium at four larval stages on growth, metamorphosis period and survival rate of *L. vannamei* larvae were evaluated.

The results of the study indicated that minerals concentrations were generally affected by using calciumhypochloride in $\geq$25 ppt for water treatment. Especially, Na and Mg were significantly ($p<0.05$) decreased.

Except for zoea stage, the osmolality in culture medium was significantly decreased ($p<0.05$). The significant ($p<0.05$) decrease of HCO_3^- in culture medium was found in nauplius, zoea and mysis stages. Concentrations of K, Na, Ca and Cl were significantly decreased ($p<0.05$) in culture medium for nauplius stage. K and Mg indicated obviously in the body content of nauplius, whereas missing of Ca. Concentrations of Ca and P were significantly decreased ($p<0.05$) in culture medium at zoea stage while high content of Ca was found in the body at this stage. Minerals concentrations in culture medium of mysis and postlarval stages were not significantly changed ($p>0.05$). High content of Mg was found in the body content of mysis stage while Ca and K were highly found at postlarval stage. Cu and S were not detected in all larval stages of *L. vannamei.*

Bicarbonate was supplemented in larviculture medium of all larval stages except postlavae. Mg and K, Ca, Mg, Ca and K were respectively applied in culture medium for nauplius, zoea, mysis and postlarval stages. Except for nauplius stage, survival rate of each larval stage of *L. vannamei* which minerals supplement was significantly ($p<0.05$) higher than that of the non-supplement one. Metamorphosis period and growth of each larval stage was not significantly different ($p>0.05$) between two groups.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
ขอบเขตการศึกษา	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
อนุกรมวิธานของกุ้งขาว	5
ลักษณะรูปร่างทั่วไปของกุ้งขาว	5
การพัฒนาการของกุ้งทะเลระยะวัยอ่อน	6
การอนุบาลกุ้งทะเลวัยอ่อน	7
โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกครัสเตเชียน	9
การลอกคราบของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนระยะตัวเต็มวัย	11
การลอกคราบของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนระยะตัวอ่อน	13
ส่วนประกอบทางเคมีของเลือด (Hemolymph) ในวงจรการลอกคราบของครัสเตเชียนระยะตัวอ่อน	16
องค์ประกอบของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ในเลือดครัสเตเชียน	17
การขนส่งแร่ธาตุในครัสเตเชียน	21
การควบคุมอิออน และระบบสมดุลเกลือแร่ (Ionic Regulation และ Osmoregulation)	22
ความสำคัญของแร่ธาตุในอาหารกุ้ง	29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย	37
	สัตว์ทดลอง	37
	วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี	37
	วิธีวิจัย	38
	การวางแผนการทดลอง	38
	การเตรียมสัตว์ทดลอง	38
	การเตรียมบ่อทดลองและน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้ง	38
	วิธีการทดลอง	40
	ศึกษาผลของการใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ ที่ความเค็ม 4 ระดับ	40
	ศึกษาปริมาณของแร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไป ในระบบการอนุบาลลูกกุ้งขาว	41
	ศึกษาผลของการใช้แร่ธาตุบางชนิดในระบบอนุบาลกุ้งขาว	44
4	ผลการวิจัย	46
	การทดลองที่ 1 ผลของการใช้และไม่ใช้คลอรีนบำบัดน้ำที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	46
	การทดลองที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุและสารประกอบ	49
	การเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*)	49
	ปริมาณแร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*)	58
	การเจริญเติบโต	63
	คุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง	64
	การทดลองที่ 3 ผลของการเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลลูกกุ้งขาว	66
	อัตราการรอดตาย	66
	ระยะเวลาพัฒนาการ	67
	การเจริญเติบโต	67
	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัว	70
	การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบ อนุบาล	71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	ปริมาณแร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล	82
	คุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง	87
5	อภิปรายและสรุปผล	89
	การใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ	89
	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุและสารประกอบ	90
	การเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลลูกกุ้งขาว	102
	สรุปผลการวิจัย	111
	ข้อเสนอแนะ	111
รายการอ้างอิง		113

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แร่ธาตุที่เสริมในการอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียส (mg/l/15 ชม.) ระยะซูเอีย ถึง โพสลาวา (mg/l/วัน)	45
2	ความยาวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 7 เมื่อทำการอนุบาลที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 28-8 ppt	63
3	คุณภาพน้ำในการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*)	65
4	คุณภาพน้ำในการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ	88

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างเปลือกของครัสเตเชียน	11
2	เปรียบเทียบออสโมลาลิตี้ในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	46
3	เปรียบเทียบความเข้มข้นโซเดียมในน้ำระหว่างใช้ และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	47
4	เปรียบเทียบความเข้มข้นแมกนีเซียมในน้ำระหว่างใช้ และไม่ใช้ แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	47
5	เปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัสในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้ แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	48
6	เปรียบเทียบความเข้มข้นคลอรีนในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	48
7	เปรียบเทียบความเข้มข้นกำมะถันในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	48
8	เปรียบเทียบความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	48
9	เปรียบเทียบความเข้มข้นโพแทสเซียมในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้ แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ	48
10	การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง	49
11	การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่างของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง	49
12	การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาล ลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

13 การเปลี่ยนแปลงโซเดียมและคลอรีน ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 50

14 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียมและแคลเซียม ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 50

15 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 50

16 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 50

17 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 51

18 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 51

19 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม และคลอรีน ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 52

20 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 52

21 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 52

22 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 53

23 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 53

24 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง... 53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

25 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม และคลอรีน ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 54

26 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 54

27 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้ อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง..... 54

28 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วันที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 55

29 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วันที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 55

30 การเปลี่ยนแปลงไบคาร์บอเนต ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วันที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 55

31 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วันที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 55

32 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 56

33 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

34 การเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียม ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 56

35 การเปลี่ยนแปลงแคลเซียม ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 56

36 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 57

37 การเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 57

38 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt..... 57

39 เปอร์เซ็นต์แร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 58

40 ปริมาณโพแทสเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 60

41 ปริมาณโซเดียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 61

42 ปริมาณคลอรีน ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 61

43 ปริมาณแมกนีเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 61

44 ปริมาณฟอสฟอรัส ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

45 ปริมาณแคลเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 62

46 ปริมาณแมงกานีส ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิสและโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 62

47 ความยาวลำตัวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 7 เมื่อทำการอนุบาลที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 28-8 ppt..... 63

48 อัตราการรอดตายของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 66

49 ระยะเวลาพัฒนาการของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย และไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 67

50 ช่วงเวลาที่ใช้ในการพัฒนาการเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ไมซิส 1 และโพสลาวา 1 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 67

51 ความยาวลำตัวของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 68

52 ความยาวลำตัวที่เพิ่มขึ้นของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในแต่ละระยะตั้งแต่ระยะนอเพลียส ถึงโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 68

53 น้ำหนักของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา 1 ถึง 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 69

54 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา 1 ถึง10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 69

55 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล.. 70

56 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 71

57 การเปลี่ยนแปลงความเค็มน้ำ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

58 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 71

59 การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 71

60 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 72

61 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 72

62 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 72

63 การเปลี่ยนแปลงไบคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 73

64 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 73

65 การเปลี่ยนแปลงความเค็มน้ำ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 73

66 การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 73

67 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไมเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 73

68 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 74

69 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

70 การเปลี่ยนแปลงไบคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 74

71 การเปลี่ยนแปลงความเค็มน้ำ ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 74

72 การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 75

73 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 75

74 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 75

75 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 76

76 การเปลี่ยนแปลงความเค็มน้ำ ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 76

77 การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 76

78 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 76

79 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 77

80 การเปลี่ยนแปลงไบคาร์บอเนต ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 77

81 การเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนต ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 77

82 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

83 การเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 78

84 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 78

85 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 78

86 การเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 79

87 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 79

88 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 80

89 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 80

90 การเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 80

91 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 80

92 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 81

93 การเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 81

94 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

95 การเปลี่ยนแปลงแคลเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 82

96 การเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียม ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 82

97 การเปลี่ยนแปลงฟอสฟอรัส ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 82

98 ปริมาณโซเดียม และแมกนีเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 83

99 ปริมาณฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และคลอรีน ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 83

100 ปริมาณแมกนีเซียม และโพแทสเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 84

101 ปริมาณโซเดียม และแคลเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 84

102 ปริมาณฟอสฟอรัส และคลอรีน ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 84

103 ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และคลอรีน ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 85

104 ปริมาณแมกนีเซียม และฟอสฟอรัส ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 85

105 ปริมาณโซเดียมในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 85

106 ปริมาณโซเดียมในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 86

107 ปริมาณโพแทสเซียมในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

108 ปริมาณฟอสฟอรัสในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 87

109 ปริมาณแคลเซียมในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 87

110 ปริมาณคลอรีนในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 87

111 ปริมาณแมกนีเซียมในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล..... 87

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทยเป็นไปอย่างรวดเร็ว กุ้งทะเลนับเป็นสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจกับประเทศไทยมาก ทั้งกุ้งกุลาดำที่มีการเพาะเลี้ยงกันมานาน และกุ้งขาวที่มีการเพาะเลี้ยงมากขึ้นในปัจจุบัน สาเหตุที่เกษตรกรเพาะเลี้ยงกุ้งขาวกันมากขึ้น เพราะประสบปัญหาหลายด้านในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ทั้งอัตราการรอดตายต่ำ การระบาดของเชื้อไวรัสต่าง ๆ และราคาที่ตกต่ำ กุ้งขาวเป็นกุ้งที่เหมาะสำหรับเพาะเลี้ยงในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถอาศัยอยู่ได้ในช่วงความเค็มกว้าง (1-40 ppt) มีความทนทานสูงต่อน้ำความเค็มต่ำ สามารถเพาะอนุบาลได้ตลอดปี (Davis et al., 2004) นอกจากนี้ กุ้งขาวยังมีอัตรารอดที่สูงกว่า และระยะเวลาในการเลี้ยงให้ได้ขนาดตามที่ตลาดต้องการเร็วกว่าการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ รวมถึงเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้ในการเลี้ยง กุ้งขาวใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่ากุ้งกุลาดำ และแนวโน้มในอนาคตอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวยังคงมีความสำคัญ แต่อุตสาหกรรมกุ้งทะเลไทยจะประสบความสำเร็จอย่างต่อเนื่อง ต้องมาจากสินค้าที่มีคุณภาพ และปัจจัยสำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งกุ้งคุณภาพนั้น ลูกพันธุ์กุ้ง นับเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยให้การเลี้ยงกุ้งประสบความสำเร็จ

ลูกพันธุ์กุ้งที่มีคุณภาพ ไม่ได้หมายถึงเพียงการมีอัตรารอดที่สูงเท่านั้น แต่ขนาดของลูกกุ้ง การพัฒนาการที่ดีในแต่ละระยะ ความแข็งแรง ความต้านทานหรือปลอดจากเชื้อโรคยังเป็นคุณสมบัติที่เกษตรกรต้องการ ลูกกุ้งที่จะมีคุณสมบัติดังนี้ต้องมาจากการอนุบาลที่มีการจัดการระหว่างเลี้ยงและคุณภาพน้ำที่ดี ทั้งอาหารต้องมีคุณค่าทางอาหารที่เหมาะสมสำหรับลูกกุ้งในแต่ละระยะ ปัญหาในการอนุบาลลูกกุ้งขาวในปัจจุบันจะพบว่าเมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะซูเอีย 2 – 3 จะไม่กินอาหารและตาย บางครั้งพบว่าลอกคราบไม่ออก กรีมีลักษณะไม่สมบูรณ์ ปัญหาเหล่านี้จะทำให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายต่ำ ความยาวไม่ได้มาตรฐาน และไม่แข็งแรง ในส่วนของน้ำทะเลที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งจำเป็นต้องผ่านการบำบัดและฆ่าเชื้อ โดยสารเคมีที่นิยมใช้กันมากคือ คลอรีนและ EDTA ซึ่งเป็นไปได้ว่าจะไปทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในน้ำ ทำให้ปริมาณแร่ธาตุหลายชนิดลดลง เป็นสาเหตุให้แร่ธาตุบางชนิดที่มีอยู่ในน้ำมีระดับไม่เพียงพอหรือไม่สมดุลต่อการเจริญเติบโตและการสร้างเปลือกของลูกกุ้ง

เนื่องจากสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนมีโครงร่างภายนอกที่เป็นเปลือกแข็ง การเจริญเติบโตของสัตว์ในกลุ่มนี้จึงต้องมีการลอกคราบเพื่อถอดเปลือกอันเดิมออก ซึ่งความสำเร็จในการลอก

คราบขึ้นอยู่กับความสมดุลของอิออนต่าง ๆ ทั้งในน้ำและในตัวกุ้ง การรักษาสมดุลของอิออนระหว่างเลือดและเปลือกผ่านทางชั้นเอพิเดอมิสมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ ได้มีการศึกษาว่าอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนจะลดลงหากได้รับอาหารที่ไม่ได้เสริมแร่ธาตุ เช่น ในกุ้งขาว *Litopenaeus vannamei* (Castille และ Lawrence, 1989 อ้างโดย Davis และ Lawrence, 1997) และกุ้งระยะวัยอ่อนซึ่งมีวงจรการลอกคราบในระยะเวลาอันสั้น หากอิออนต่าง ๆ ไม่เพียงพอน่าจะส่งผลให้การเจริญเติบโต การรอดตาย และการพัฒนาการลดลงเช่นกัน ทั้งนี้ในอาหารและในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งด้วยความหนาแน่นสูง อาจมีแร่ธาตุต่าง ๆ ในระดับที่ไม่เหมาะสมหรือไม่เพียงพอต่อความต้องการในการอนุบาลลูกกุ้ง

ด้วยเหตุที่มีการศึกษาเรื่องความต้องการแร่ธาตุของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนน้อยมาก และการศึกษาส่วนมากจะเน้นในกุ้งวัยรุ่นหรือกุ้งตัวเต็มวัย ในกุ้งระยะวัยอ่อนไม่พบว่ามีการศึกษาในเรื่องนี้ ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จะช่วยให้ทราบถึงปริมาณแร่ธาตุที่ลูกกุ้งต้องการใช้ ความสำคัญของแร่ธาตุและปริมาณที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตในแต่ละระยะการพัฒนาการของลูกกุ้ง ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการอนุบาลลูกกุ้งให้มีคุณภาพ แข็งแรง และช่วยลดปัญหาในการอนุบาลลูกกุ้งได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุหลัก (แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม คลอรีน และแมกนีเซียม) และแร่ธาตุรอง (ฟอสฟอรัส กำมะถัน ทองแดง และแมงกานีส) ในน้ำ

2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุหลัก (แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม คลอรีน และแมกนีเซียม) แร่ธาตุรอง (ฟอสฟอรัส กำมะถัน ทองแดง และแมงกานีส) และไบคาร์บอเนต ในน้ำที่ใช้ในการอนุบาลและในลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส 4-6 ระยะซูเอีย 1-3 ระยะไมซิส 1-3 และระยะโพสลาวา 1-10 ในเชิงพาณิชย์

3. เพื่อศึกษาผลของการเสริมแร่ธาตุบางชนิดในระบบการอนุบาลต่อการพัฒนาการ การเจริญเติบโต และอัตราการรอดตายของกุ้งขาวระยะนอเพลียส 4-6 ระยะซูเอีย 1-3 ระยะไมซิส 1-3 และระยะโพสลาวา 1-10 ในเชิงพาณิชย์

สมมติฐานของการวิจัย

1. แคลเซียมไฮโปคลอไรด์มีผลทำให้ความเข้มข้นแร่ธาตุและสารประกอบบางชนิดในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไป

2. มีการลดลงของแร่ธาตุหลัก แร่ธาตุรอง และสารประกอบบางชนิดในน้ำที่ใช้ในการอนุบาลและในลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส 4-6 ระยะซูเอีย 1-3 ระยะไมซิส 1-3 และระยะโพสลาวา 1-10

3. การเสริมแร่ธาตุบางชนิดในระบบการอนุบาลน่าจะมีผลให้การพัฒนาการ การเจริญเติบโต และอัตราการรอดตายของกุ้งขาวระยะนอเพลียส ระยะซูเอีย ระยะไมซิส และระยะโพสลาวา ดีกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแร่ธาตุ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในน้ำเมื่อใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ

2. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อลูกกุ้งในระบบการอนุบาลกุ้งขาวเชิงพาณิชย์

3. ทราบถึงความจำเป็นของการใช้แร่ธาตุเพื่อเสริมในระบบการอนุบาลกุ้งขาว ก่อให้เกิดความชัดเจนมากขึ้นในวิธีการอนุบาลและมีประโยชน์ในการพัฒนาการจัดการระหว่างอนุบาล และน่าจะเป็นการแก้ปัญหากุ้งลอกคราบได้ไม่ดี การแตกต่างของขนาด การเจริญเติบโต และการพัฒนาการเข้าสู่ระยะต่าง ๆได้ดีขึ้น

ขอบเขตการศึกษา

การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุระหว่างการใช้และไม่ใช้คลอรีนบำบัดน้ำ ในความเค็มน้ำ 4 ระดับ คือ 15, 20, 25 และ 30 ppt โดยนำน้ำไปวิเคราะห์แร่ธาตุเมื่อเริ่มต้นและเมื่อผ่านการบำบัดด้วยคลอรีน การทดลองที่ 2 อนุบาลกุ้งขาวระยะนอเพลียส 4-6 ซูเอีย 1-3 ไมซิส 1-3 และโพสลาวา 1-10 ในบ่อคอนกรีตขนาด 3 ลูกบาศก์เมตรที่ฟาร์มเอกชน ศึกษาปริมาณของแร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปในการอนุบาลกุ้งขาวทั้ง 4 ระยะ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำและลูกกุ้งในระยะต่าง ๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณของแร่ธาตุและสารประกอบรวม 10 ชนิด คือ Ca, Mg,

K, Na, Cl, P, S, Cu, Mn และ HCO_3^- การทดลองที่ 3 นำผลที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดความเข้มข้นในการเสริมแร่ธาตุในระบบการอนุบาลกุ้งขาวทั้ง 4 ระยะ โดยกำหนดการทดลองออกเป็นอีก 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ ระบบที่มีการเสริมแร่ธาตุในน้ำที่ใช้ในการอนุบาลและระบบเดิมที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ ตรวจสอบปริมาณออสโมลาลิตี้ในน้ำที่ใช้อนุบาล ปริมาณแร่ธาตุในน้ำและในลูกกุ้ง การพัฒนาการ การรอดตาย และขนาดที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุกรมวิธานของกุ้งขาว

กุ้งขาว หรือกุ้งแวนนาไม มีชื่อสามัญว่า Whiteleg shrimp หรือ White shrimp จัดอยู่ในวงศ์เดียวกับกุ้งกุลาดำ ค้นพบโดย Boone ในปี ค. ศ. 1931 มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Litopenaeus vannamei* เป็นสายพันธุ์กุ้งทะเลในกลุ่มกุ้งขาวแปซิฟิกที่มีการเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา เม็กซิโก เอกวาดอร์ เป็นต้น กลุ่มกุ้งขาวในปัจจุบันนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามถิ่นที่อยู่อาศัย คือ กุ้งขาวตะวันตก (Western coast white shrimp) ได้แก่ กุ้งขาวลิโทพีเนียส แวนนาไม (*L. vannamei*), กุ้งสีน้ำเงิน (*Penaeus stylirostris*) และ กุ้งขาวตะวันออก ได้แก่ กุ้งแชบ๊วย (*P. merguiensis*), กุ้งขาวจีน (*P. chinensis* หรือ *P. orientalis*), กุ้งขาวอินเดีย (*P. indicus*) (ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์, 2545)

ลักษณะรูปร่างทั่วไปของกุ้งขาว

กุ้งขาวมีลักษณะลำตัวสีขาว เคลื่อนไหวรวดเร็ว ร่างกายประกอบด้วย 8 ปล้อง ส่วนหัวมี 1 ปล้อง โดยเปลือกด้านข้างที่คลุมเหงือกทั้งสองด้าน เรียกว่า แบรนชิโอสตีไกท์ (Branciostegite) ลำตัวมี 6 ปล้อง และส่วนหางมี 1 ปล้อง มีกรียาวประมาณ 0.8 เท่าของความยาวเปลือกคลุมหัว สันกรีสูง ปลายกรีแคบ ส่วนของกรีมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมมีสีแดงอมน้ำตาล กรีด้านบนมีฟัน 8 ซี่ ด้านล่างมี 2 ซี่ ร่องบนกรีมองเห็นได้ชัดเจน ขาเดินมีสีขาว มีหนวด 1 คู่และตามีสีแดงเข้ม เปลือกของกุ้งขาวมีสีขาวอมชมพูถึงแดง ปลายหางมีสีแดงเข้ม เปลือกหุ้มตัวด้านบนของเปลือกกุ้ง เรียกว่า เทอไกท์ (Tergite) ด้านล่างที่คลุมโคนขาว่ายน้ำ เรียกว่า พรูรา (Pleura) ส่วนด้านท้องของกุ้ง เรียกว่า สเตอไนท์ (Sternite) ขนาดของกุ้งขาวเมื่อโตเต็มที่จะมีขนาดเล็กกว่ากุ้งกุลาดำ โดยมีความยาวประมาณ 23 เซนติเมตร น้ำหนักตัวเฉลี่ย 120 กรัม (ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์, 2545)

การพัฒนาการของกุ้งทะเลระยะวัยอ่อน

การพัฒนาการของลูกกุ้งทะเลสามารถแบ่งออกได้ 4 ระยะ ดังนี้

1. ระยะนอเพลียส (Nauplius stage) ลูกกุ้งที่ฟักออกมาจากไข่ใหม่ ๆ จะมีขนาดเล็กมาก รูปร่างค่อนข้างกลมมีรยางค์ 3 คู่ คู่แรกจะเจริญเป็นหนวดคู่สั้น (1st Antenna) อยู่ด้านหัวสุด รยางค์คู่ที่ 2 จะเจริญเป็นหนวดคู่ยาว (2nd Antenna) และคู่ที่ 3 จะเจริญเป็นขากรรไกร (Mandible) อยู่ต่ำลงมาเป็นลำดับ ระยะนี้ลูกกุ้งจะไม่กินอาหารเนื่องจากได้อาหารจากถุงไข่แดง (Yolk sac) ลูกกุ้งจะอยู่ในระยะนี้ประมาณ 45-50 ชั่วโมง มีการลอกคราบ 6 ครั้ง แล้วจึงพัฒนาเข้าสู่ระยะซูเอีย สำหรับกุ้ง *P. semisulcatus* ระยะนอเพลียส 1 ถึง 6 มีความยาวลำตัว (Body length) 0.32 – 0.45 มิลลิเมตร (Turkmen, 2005)

2. ระยะซูเอีย (Zoea stage) ลำตัวประกอบด้วย 3 ส่วน คือ หัว (Cephalic) อก (Thoracic) และท้อง (Abdomen) (Turkmen, 2005) ลูกกุ้งจะมีลำตัวยาวขึ้น ส่วนหัวโตเห็นได้ชัด ลูกกุ้งจะค่อย ๆ ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำและเริ่มกินอาหาร อาหารของลูกกุ้งในระยะนี้ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มแพลงก์ตอนพืชขนาด 50-100 ไมโครเมตร จะอยู่ในระยะนี้ประมาณ 4 วัน ลอกคราบ 3 ครั้ง แต่ละครั้งรูปร่างจะเปลี่ยนไปจากเดิม ดังนี้

2.1 ซูเอียระยะที่ 1 เมื่อลอกคราบครั้งที่หนึ่ง ตายังอยู่ภายในเปลือกมองเห็นเป็นจุดสีดำเปลือกคลุมหัวเรียบไม่มีหนาม ด้านหน้าค่อนข้างกลม ทางด้านหลังป้านเกือบเป็นเส้นตรง รยางค์คู่แรกตรงปลายไม่มีแฉก รยางค์คู่ที่ 2 ตรงปลายมีแฉกและยาวกว่ารยางค์คู่ที่ 1 ขากรรไกรเป็นแผ่นแบน ๆ และหยักตามขอบ แมกซิลลิเปด (Maxcilliped) อันที่หนึ่งและสองปรากฏเห็นชัด ตรงปลายเป็นแฉกทั้งคู่ แมกซิลลิเปดอันที่สองมีขนาดเล็กกว่าอันที่หนึ่ง ส่วนหางเป็นแฉกมีหนามแหลมข้างละ 7 อัน ในระยะนี้ลูกกุ้งจะมีลำตัวยาวประมาณ 0.85 มิลลิเมตร

2.2 ซูเอียระยะที่ 2 ตาเริ่มโผล่พ้นเปลือกคลุมหัว มีก้านตายาว กรีแหลมยื่นไปข้างหน้าและงุ้มลงด้านล่างเล็กน้อย ส่วนหัวมีเปลือกคลุมแมกซิลลิเปดอันที่หนึ่งและอันที่สองสามารถมองเห็นได้ชัดเจน มีลำตัวยาวจากปลายกรีถึงสุดปลายหางประมาณ 1.77 มิลลิเมตร

2.3 ซูเอียระยะที่ 3 แมกซิลลิเปดอันที่สามเจริญปรากฏเห็นได้ชัด ขาเดิน (Pereiopods) ในระยะนี้ตอนปลายยังเป็นแฉกแต่ไม่มีขน ปล้องนอกของรยางค์อันนี้จะยาวกว่าปล้องใน ลำตัวยาว 1.80 มิลลิเมตร รยางค์คู่ที่ 6 เริ่มปรากฏในระยะนี้ ที่หางจะมีขนข้างละ 6 เส้น

3. ระยะไมซิส (Mysis stage) ลูกกุ้งในระยะนี้มีลักษณะคล้ายพ่อแม่มากขึ้น สามารถมองเห็นส่วนหัวและส่วนท้องได้ชัดเจน ส่วนอกนั้นยังรวมอยู่กับส่วนหัวมีเปลือกคลุม กรีเห็นได้ชัด ส่วนท้องมี 6 ปล้อง ปล้องที่ 1 ถึงปล้องที่ 5 มีขนาดเท่ากัน ส่วนปล้องที่ 6 ยาวกว่าปล้องอื่น ๆ และมี

แพนหาง ลำตัวยาว 2.56 มิลลิเมตร ขาเดินเริ่มมีข้อปล้องเห็นได้ชัดขึ้น 3 คู่แรกจะมีลักษณะเป็นก้าม และพัฒนายาวขึ้นเรื่อย ๆ ขาว่ายน้ำเริ่มเกิด ปล้องท้องอันที่ 6 จะยาวกว่าลูกกุ้งที่อยู่ในระยะซูเอีย เปลือกคลุมปล้องต่าง ๆ ของส่วนอกทั้งหมดความยาว 1.0 มิลลิเมตร รยางค์คู่ที่ 6 (Uropod) เจริญมากขึ้น หางจะแคบเข้ามีขนข้างละ 7 เส้น ลูกกุ้งจะอยู่ในระยะนี้ประมาณ 3-5 วัน ลอกคราบ 3 ครั้ง จึงจะพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา

4. ระยะโพสลาวา (Post-larva stage) ระยะนี้ลูกกุ้งจะมีลำตัวยาวประมาณ 5.56 มิลลิเมตร เปลือกคลุมส่วนหัวยาวประมาณ 1.57 มิลลิเมตร ขาเดิน 3 คู่แรกมีลักษณะเป็นก้ามมองเห็นชัด คู่แรกสั้นและคู่ที่ 3 ยาวที่สุด หางจะแคบเข้าจนแหลม ลูกกุ้งในระยะนี้เริ่มมีรยางค์ครบเหมือนกุ้งเต็มวัย ลูกกุ้งจะมีการลอกคราบและพัฒนาการไปเรื่อย ๆ จนเข้าสู่กุ้งวัยรุ่น กุ้งจะอยู่ในระยะโพสลาวาประมาณ 30 วัน มีความยาวประมาณ 1.5-2.0 เซนติเมตร หนักประมาณ 1 กรัม

การอนุบาลกุ้งทะเลวัยอ่อน

ปัจจุบันการอนุบาลลูกกุ้งทะเลจะทำในบ่อปูนตั้งอยู่กลางแจ้งหรือในโรงเรือนมีหลังคา โดยสร้างบ่อในลักษณะกลมหรือบ่อเหลี่ยมขนาดเล็กที่สามารถบรรจุน้ำได้ตั้งแต่ 1– 5 ตัน เนื่องจากการดูแลและการจัดการบ่อทำได้ง่ายกว่าบ่อขนาดใหญ่ อนันต์ ตันสุตะพานิช และคณะ (2540) ทดลองอนุบาลลูกกุ้งกุลาดำระยะโพสลาวา 1-15 ในบ่อดินพบว่า มีอัตรารอดตายสูงกว่าเมื่ออนุบาลในบ่อปูน แต่เมื่ออนุบาลลูกกุ้งตั้งแต่ระยะนอเพลียสในบ่อดินจะมีอัตราการรอดตายต่ำมาก เนื่องจากถูกล่าโดยแพลงก์ตอนสัตว์ เช่น โคพีพอด กุ้งต้องมีการพัฒนาจนเข้าสู่ระยะไมซิส 3 จึงจะสามารถเป็นผู้ล่าและกินแพลงก์ตอนสัตว์เหล่านั้นได้

ขั้นตอนโดยทั่วไปในการอนุบาลกุ้งทะเลวัยอ่อนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ลูกกุ้งระยะนอเพลียส ควรอนุบาลที่ความหนาแน่น 70-150 ตัว/ลิตร น้ำทะเลที่ใช้ในการอนุบาลต้องสะอาดปราศจากเชื้อโรค มีความเค็มอยู่ระหว่าง 30-33 ppt อุณหภูมิ 28-30 °C ความเป็นกรดด่างของน้ำอยู่ระหว่าง 7.7-8.3 ให้อากาศตลอดเวลา ความแรงของฟองอากาศปานกลาง ลูกกุ้งระยะนี้จะยังไม่กินอาหารเนื่องจากยังมีถุงไข่แดง และส่วนของปาก (Mouthparts) ยังไม่สามารถทำหน้าที่ได้ ถุงไข่แดงนี้ประกอบด้วย โปรตีนโมเลกุลใหญ่, แคโรทีนอยด์ (Carotenoid), น้ำตาล และไขมัน (Scott, 2001)

2. ลูกกุ้งระยะซูเอีย ระยะนี้ลูกกุ้งจะเริ่มกินอาหารแต่เนื่องจากปากยังมีขนาดเล็ก อาหารที่เหมาะสมสำหรับลูกกุ้งระยะนี้คือ สาหร่ายเซลล์เดียว ที่นิยมใช้ได้แก่ *Chaetoceros* และ *Skeletonema* โดยเฉพาะกุ้งขาวซึ่งมีปากขนาดเล็กมาก อาหารที่นิยมใช้จึงเป็น *Chaetoceros*

เนื่องจากมีขนาดเซลล์เพียง 5-6 ไมครอน การให้อาหารจะบ่อยครั้งทุก 2-3 ชั่วโมง หรือให้มีความหนาแน่นของสาหร่ายเซลล์เดียวในบ่ออนุบาลไม่น้อยกว่า 6,000 เซลล์/มิลลิลิตร (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2543) อาจให้อาหารเสริมเป็นอาหารสำเร็จรูปร่วมด้วย แต่ไม่ควรให้มากเกินไป เพราะทำให้พัฒนาการของลูกกุ้งล่าช้าและอัตราการรอดตายต่ำกว่าการใช้สาหร่ายเซลล์เดียว การเลี้ยงลูกกุ้งระยะนี้ควรให้มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 70-150 ตัว/ลิตร และเริ่มมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลูกกุ้งเริ่มเข้าสู่ระยะซูเอีย 2-3 ซึ่งการอนุบาลลูกกุ้งขาว *L. vannamei* ความหนาแน่น 150 ตัวต่อลิตร โดยให้ *Chaetoceros muelleri* ความหนาแน่น 100 x 10^3 เซลล์/มิลลิลิตร สำหรับลูกกุ้งในระยะซูเอีย 1 ถึง 2 และค่อย ๆ เพิ่มปริมาณจนกระทั่งมีความเข้มข้น 250 x 10^3 เซลล์/มิลลิลิตรเมื่อเข้าสู่ระยะซูเอีย 3 ถึงไมซิส 1 จะทำให้ลูกกุ้งมีการเจริญเติบโตดีและมีการสะสมสารอินทรีย์ (Organic weight) สูง (Pina et al., 2005) ทั้งนี้การอนุบาลลูกกุ้งขาว *L. vannamei* ระยะซูเอีย 1 ถึง ไมซิส 1 ด้วย *Chaetoceros muelleri* เพียงอย่างเดียว ทำให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตาย การพัฒนาการ ความยาว และการสะสมสารอินทรีย์สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการอนุบาลด้วย *Isochrysis sp.*, *Tetraselmis suecica*, *Isochrysis sp.*ร่วมกับ *Tetraselmis suecica*, *Isochrysis sp.* ร่วมกับ *Chaetoceros muelleri*, *Tetraselmis suecica* ร่วมกับ *Chaetoceros muelleri* หรือ อนุบาลด้วยสาหร่ายเซลล์เดียวทั้ง 3 ชนิดร่วมกัน (Pina et al., 2006)

3. ลูกกุ้งระยะไมซิส ลูกกุ้งระยะนี้สามารถรับอาหารที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น โรติเฟอร์ หรือไรน้ำเค็มที่เพิ่งฟักเป็นตัวไม่เกิน 12 ชั่วโมงได้ โดยส่วนมากจะให้ไรน้ำเค็มเป็นอาหาร เพราะมีคุณค่าทางอาหารสูง การให้ไรน้ำเค็มในช่วงที่ลูกกุ้งอยู่ในระยะไมซิส 1-2 นี้ควรทำให้ไรน้ำเค็มไม่เคลื่อนไหวด้วยการแช่เย็นหรือลวกน้ำร้อน เนื่องจากลูกกุ้งระยะนี้ยังว่ายน้ำได้ช้าทำให้ไม่สามารถจับไรน้ำเค็มได้ทัน และอาจให้สาหร่ายเซลล์เดียวร่วมด้วย เพราะช่วยให้ลูกกุ้งมีการพัฒนาการและอัตรารอดสูง ในบางมื้ออาจเสริมด้วยอาหารสำเร็จรูปสลับกับไรน้ำเค็ม ควรมีการดูดตะกอนและเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกวันประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ ลูกกุ้งระยะนี้จะเริ่มปรับลดความเค็มน้ำลงมาอยู่ที่ 25 ppt

4. ลูกกุ้งระยะโพสลาวา ลูกกุ้งจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเหมือนตัวเต็มวัย ว่ายน้ำปราดเปรียว อาหารที่ให้ยังคงเป็นตัวอ่อนไรน้ำเค็มที่เพิ่งฟักร่วมกับอาหารสำเร็จรูป เมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะ P10 ขึ้นไปอาจนำไรน้ำเค็มตัวเต็มวัยมาให้ร่วมกับตัวอ่อนไรน้ำเค็ม เพื่อฝึกให้ลูกกุ้งสามารถกินอาหารที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (บุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2544) อย่างไรก็ตามอาหารที่เหมาะสมกับลูกกุ้งระยะโพสลาวายังคงเป็นตัวอ่อนไรน้ำเค็ม โดยเมื่อทำการอนุบาลกุ้งกุลาดำระยะโพสลาวา 7-25 ด้วยนอเพลียสอาร์ทีเมียแช่แข็ง ไรแดงแช่แข็ง อาร์ทีเมียเฟลก และอาหารสำเร็จรูปชนิดผง พบว่า กุ้งกุลาดำที่อนุบาลด้วยนอเพลียสอาร์ทีเมียแช่แข็งเป็นอาหารที่เหมาะสมที่สุด โดยมีน้ำหนักและความ

ยาวที่เพิ่มขึ้น รวมถึงอัตราการรอดตายสูงกว่ากลุ่มการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (คงศักดิ์ เรืองบุญส่ง, 2544) ลูกกุ้งในระยะนี้อาจมีการลดความเค็มน้ำในการอนุบาลลงได้ สำหรับลูกกุ้งทะเลอื่น ๆ เช่น *Penaeus semisulcatus* ระยะโพสลาวา พบว่า ความเค็มและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอนุบาลลูกกุ้ง คือ ความเค็ม 40 ppt และอุณหภูมิ 28 °C (Soyel & Kumlu, 2002) สำหรับลูกกุ้งชนิดเดียวกันนี้ Kumlu et al. (2000) ได้รายงานไว้ว่า ในระยะซูเอีย 1 ถึง โพสลาวา 1 อุณหภูมิมีผลต่อการพัฒนาการของลูกกุ้งมากกว่าความเค็มน้ำ โดยลูกกุ้งจะมีการเจริญเติบโตและการพัฒนาการที่ดีในช่วงอุณหภูมิที่แคบ (30-34°C) ขณะที่การเจริญเติบโตและการพัฒนาการยังคงปกติ เมื่ออยู่ในน้ำที่มีความเค็มความแตกต่างกันถึง 10 ppt (25-35 ppt) โดยความเค็มน้ำ และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอีย 1 ถึง โพสลาวา 1 คือ 30 ppt และ 30 °C

การอนุบาลลูกกุ้งทะเลวัยอ่อนเชิงพาณิชย์นั้นมักอนุบาลที่ความหนาแน่นสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตสูง ซึ่งตามหลักทฤษฎีการอนุบาลที่ความหนาแน่นต่ำ น่าจะส่งผลให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายสูง แต่สุพิศ ทองรอด และคณะ (2542) ได้ทดลองอนุบาลกุ้งกุลาดำวัยอ่อนตั้งแต่ระยะซูเอียถึงระยะโพสลาวา 3 ด้วยอาหารสำเร็จรูปในอัตราความหนาแน่นที่แตกต่างกัน พบว่า การอนุบาลลูกกุ้งที่ความหนาแน่นต่ำ 66 ตัว/ลิตร มีอัตราการรอดตายต่ำมาก ต่างจากการอนุบาลที่ความหนาแน่น 100-225 ตัว/ลิตร ที่มีอัตราการรอดตายสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของอาหารในน้ำมีน้อยตามปริมาณอาหารที่ให้ต่ออัตราความหนาแน่นของลูกกุ้งในบ่อ จึงมีผลทำให้ปริมาณการได้กินอาหารของลูกกุ้งน้อยลงไปด้วย ซึ่งผลผลิตที่สูงจากการอนุบาลที่ความหนาแน่นสูงนี้ ไม่เพียงพบเมื่ออนุบาลด้วยอาหารสำเร็จรูปเท่านั้นแต่เมื่ออนุบาลด้วยอาหารธรรมชาติ ตั้งแต่ระยะซูเอีย 2 เป็นต้นไปก็พบว่ากุ้งเข้าสู่ระยะโพสลาวาสูง 50,000 – 100,000ตัว/ตันเช่นเดียวกัน (บังอร ศรีมุกดา, 2530)

โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกครัสเตเชียน

โดยทั่วไปเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน มีองค์ประกอบเป็นสารอนินทรีย์ 55% โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม โพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบรองลงมา ขณะที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์อยู่ 45% โดยมีไคติน (Chitin) เป็นองค์ประกอบหลัก และโปรตีนเป็นองค์ประกอบรองลงมา (Pratoomchat et al., 2002a) เมื่อเจริญเติบโตจะมีการสร้างเปลือกใหม่ขึ้นมาภายใต้กระดองเก่าและทำการลอกคราบเอากระดองเก่าทิ้งไป สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างเปลือกที่หุ้มร่างกายสัตว์ครัสเตเชียนออกเป็นชั้นๆ (ภาพที่ 1) ดังนี้ คือ (Camaron „1985; Pratoomchat et al., 2002b)

1. เอพิคิวติเคิล (Epicuticle) เป็นชั้นที่อยู่นอกสุด ประกอบด้วยสารพวกไลโพโปรตีน (Lipoprotein) ซึ่งสร้างมาจากต่อมเทกิวเมนทัล (Tegumental gland) ที่อยู่ในชั้นเอพิเดอร์มิส (Epidermis) ในชั้นนี้จะไม่พบไคตินเป็นองค์ประกอบ มีหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านเข้าออกของน้ำ

2. โปรคิวติเคิล (Procuticle) เป็นเปลือกที่อยู่ถัดมาจากชั้นเอพิเดอร์มิส ประกอบด้วย 2 ชั้น คือ

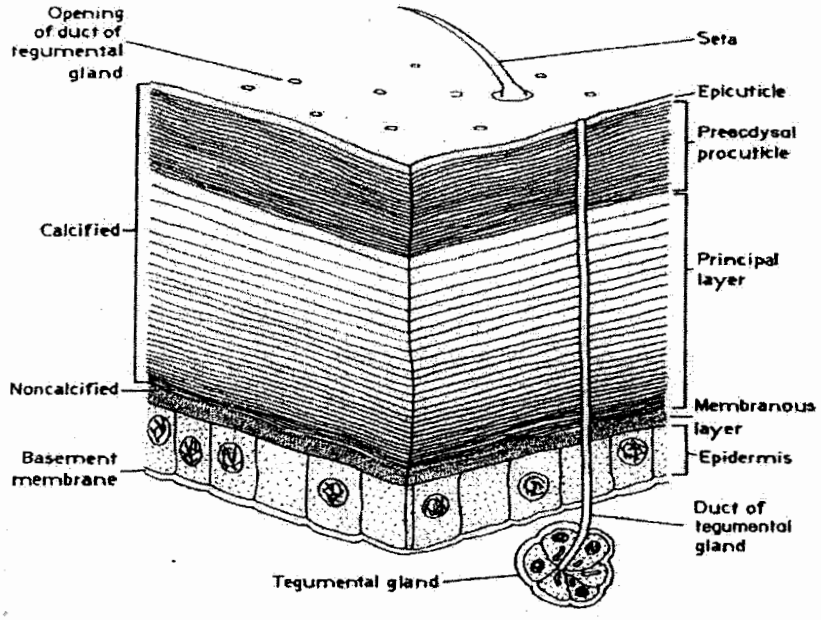
2.1 เอกโซคิวติเคิล (Exocuticle) เป็นชั้นที่มีการสะสมของเม็ดสี (Melanin pigment) ทำให้เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นเม็ดสี (pigmented layer) ซึ่งเป็นจุดกำเนิดสีต่าง ๆ ชั้นนี้มีไคตินเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 40-45% และมีการสะสมเกลือแคลเซียมด้วย

2.2 เอนโดคิวติเคิล (Endocuticle) มีไคตินเป็นองค์ประกอบ แบ่งออกเป็น 2 ชั้นย่อย คือ

2.2.1 ชั้นที่มีการสะสมเกลือแคลเซียม (Calcified layer) เป็นชั้นที่มีการสะสมเกลือแคลเซียม มีพื้นที่กว้างกว่าชั้นอื่น ๆ

2.2.2 ชั้นที่ไม่มีการสะสมเกลือแคลเซียม (Uncalcified layer) หรือชั้นเมมเบรนนาส (Membranous layer) เป็นชั้นที่อยู่ในสุดของเปลือกโดยเชื่อมอยู่ระหว่างเปลือกกับเอพิเดอร์มิส โดยชั้นนี้ไม่มีการสะสมของเกลือแคลเซียม

3. เอพิเดอร์มิส (Epidermis) เป็นชั้นเซลล์มีขนาดใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมทรงสูงอัดแน่น มีเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissue), เซลล์ต่อม (Grand cell), เม็ดสี (Pigment) และปลายประสาท ทำหน้าที่ขับสารออกไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเปลือก



ภาพที่ 1 โครงสร้างเปลือกของครัสเตเชียน (Stevenson, 1985)

สารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญของเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ คือ ไคติน อย่างไรก็ตามองค์ประกอบกลุ่มโปรตีนจะเพิ่มสูงช่วงหลังลอกคราบ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ในการสร้างชั้นเอพิคิวติเคิลและเอกโซคิวติเคิล หลังจากมีการลอกคราบใหม่ๆ ซึ่ง NaOH-protein มีความสำคัญต่อการนำไปสร้างเปลือกใหม่ (Sclerotization) และ HCl-protein สำหรับช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเปลือกในลำดับต่อมา (Pratoomchat et al., 2002a) ทั้งนี้พบว่า ชั้นเอพิคิวติเคิล และชั้นเอกโซคิวติเคิล จะมีการสร้างก่อนการลอกคราบ โดยจะมีการดูดกลับ (Resorb) สารอินทรีย์และอนินทรีย์บางส่วนจากเปลือกเก่ามาเก็บไว้เพื่อสร้างเปลือกอันใหม่ แต่โครงสร้างใหม่จะยังไม่แข็งตัวจนกระทั่งกระบวนการลอกคราบสิ้นสุด ภายหลังลอกคราบจะมีการสะสมแคลเซียมทันที เปลือกมีความแข็งมากขึ้น และมีการสร้างชั้นเอนโดคิวติเคิลในเวลาต่อมา (Coblentz, et al., 1998; Pratoomchat et al., 2002b)

การลอกคราบของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนระยะตัวเต็มวัย

เนื่องจากสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนมีโครงสร้างของเปลือกที่แข็ง การเจริญเติบโตโดยการเพิ่มขนาดไม่อาจทำได้ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีการลอกคราบเพื่อถอดเอาเปลือกอันเดิมออก และขณะที่เปลือกที่สร้างขึ้นใหม่ยังไม่แข็งตัวนั้น ร่างกายสามารถเพิ่มขนาดขึ้นได้เต็มที่จนกระทั่ง

เปลือกใหม่แข็งตัว ร่างกายก็จะหยุดการเพิ่มขนาด การลอกคราบในระยะตัวอ่อนจะมีหลายครั้งกว่าตอนที่เป็นตัวเต็มวัยแล้ว จำนวนครั้งในการลอกคราบก็จะแตกต่างกันไปในสัตว์แต่ละชนิด วงจรการลอกคราบโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะหลังการลอกคราบตอนต้นหรือระยะ A (Early postmolt) ระยะหลังการลอกคราบหรือระยะB (Post molt) ระยะคราบแข็งหรือระยะ C (Intermolt) ระยะก่อนลอกคราบหรือระยะ D (Premolt) และระยะลอกคราบหรือระยะ E (Ecdysis) ระยะการลอกคราบที่มีการจำแนกไว้นี้ยังสามารถแยกย่อยได้อีก 9 ระยะด้วยกัน ได้แก่ A, B, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3และระยะ E (Pratoomchat et al., 2002b) ยกตัวอย่างการลอกคราบของปูทะเลเป็นดังนี้

1. ระยะหลังการลอกคราบตอนต้นหรือระยะ A ระยะนี้เป็นระยะที่ปูทะเลเพิ่งเสร็จจากลอกคราบ เปลือกมีลักษณะเป็นหนังเหนียว ๆ ลื่น ๆ และมีความอ่อนนุ่ม เมื่อสัมผัสส่วนภายในและบริเวณฐานขนของรยางค์จะมีของเหลวสีน้ำตาลบรรจุอยู่ ระยะนี้ปูจะเริ่มสะสมแคลเซียมและดูดน้ำเข้าตัว ไม่มีการเคลื่อนที่ หรือกินอาหาร ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 12-24 ชั่วโมง (Pratoomchat et al., 2002b) ในปู Blue crabs (*Callinectes sapidus*) ระยะหลังลอกคราบ พบว่าปูยังไม่มีการกินอาหาร และพบอัตราการไหลเข้าของแคลเซียมสูงสุด โดยแคลเซียมส่วนใหญ่ดูดซึมผ่านเข้ามาทางเหงือก (Neufeld & Flik, 1994) ซึ่งการไหลเข้าสุทธิผ่านทางเหงือกสามารถตรวจสอบได้จากความสัมพันธ์ของการขับถ่ายไฮโดรเจน (Apparent hydrogen excretion) และการดูดซึมแคลเซียมสุทธิ (Net calcium uptake) เนื่องด้วยกระบวนการสร้างเปลือก เกิดขึ้นตามสมการ

$$Ca^{2+} + HCO_3^- \longrightarrow CaCO_3 + H^+$$

ดังนั้นเมื่อมีการขับถ่ายไฮโดรเจนอิออนออกมามาก แสดงว่าอัตราการนำแคลเซียมไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือกสูง (Neufeld & Cameron, 1993)

2. ระยะหลังการลอกคราบหรือระยะB เป็นระยะที่คราบเริ่มแข็งขึ้น เอน โดคิวติเคิลเริ่มมีการพัฒนา และจะสังเกตเห็นเม็ดสีมีการถอยกลับ ระยะนี้ใช้เวลา 3-5 วัน โดยทั่วไปพบว่าปริมาณอิออนในเลือดของครัสเตเชียนในระยะหลังการลอกคราบจะมีค่าต่ำกว่าในระยะก่อนการลอกคราบ ทั้งนี้เนื่องจากมีการไหลเข้าของน้ำภายนอกระหว่างการลอกคราบ จึงทำให้ออสโมลาลิตี้ของเลือดหลังลอกคราบมีค่าลดลง (Chang et al., 1995)

3. ระยะคราบแข็งหรือระยะ C_1 - C_3 เป็นระยะที่คราบมีความแข็งเต็มที่ เมื่อสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์พบว่า เม็ดสีมีการถอยกลับไปอยู่บริเวณปลายสุดของขน ระยะนี้ปูจะมีการสะสมสารต่าง ๆ และผิวชั้นใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่มีการสะสมแคลเซียมจะเริ่มแข็งขึ้นเรื่อย ๆ ใช้เวลาทั้งหมด 24-30 วัน ปูในระยะนี้จะเคลื่อนที่รวดเร็ว มีพฤติกรรมก้าวร้าวและกินอาหารมาก

ระยะนี้ยังพบการไหลเข้า (Influx) ของแคลเซียม แต่ต่ำกว่าระยะหลังการลอกคราบมาก (Neufeld & Cameron, 1993)

4. ระยะก่อนลอกคราบ ในระยะก่อนการลอกคราบนี้พบว่าปริมาณสารต่าง ๆในเลือดของครัสเตเชียนจะมีความเข้มข้นสูงขึ้น พบการละลายของแคลเซียมจากเปลือกเก่าส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในเลือดสูงขึ้น (Neufeld & Cameron, 1993) และความเข้มข้นของของฮีโมไซยานิน (Hemocyanin) ในเลือดครัสเตเชียนซึ่งมีค่าต่ำในระยะหลังลอกคราบ จะพบความเข้มข้นสูงขึ้นในระยะนี้ (Chang et al., 1995) เช่นเดียวกับการศึกษาใน Lobster *Homarus americanus* ซึ่งพบความเข้มข้นของฮีโมไซยานิน ทองแดง และสังกะสีสูงสุดก่อนลอกคราบ และจะลดลงต่ำสุดเมื่ออยู่ในระยะหลังการลอกคราบ (Engel et al., 2001) ระยะก่อนการลอกคราบยังสามรถแยกย่อยออกได้อีก ดังนี้

4.1 ระยะก่อนลอกคราบตอนต้นหรือระยะ D_1 (Early premolt) ระยะนี้เอพิเดอร์มิสจะหดกลับจนเห็นเป็นแนวได้ชัดเจนและขนชุดใหม่เริ่มมีการพัฒนา ใช้เวลา 7-10 วัน

4.2 ระยะก่อนลอกคราบตอนกลางหรือระยะ D_2 (Mid-premolt) ระยะนี้เอพิเดอร์มิสปรากฏเห็นเป็นแนวชัดขึ้นและใหญ่ขึ้น สังเกตเห็นขนมีลักษณะเป็นก้าน ใช้เวลา 7-10 วัน

4.3 ระยะก่อนลอกคราบตอนปลายหรือระยะ D_3 (Late premolt) ขนใหม่พัฒนาสมบูรณ์ เอพิเดอร์มิสหดกลับมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กระดองแข็งมากแต่มีความเปราะและแตกง่าย ปูจะกินอาหารน้อยลงและไม่กินเลยก่อนลอกคราบเพื่อเตรียมพร้อมที่จะลอกคราบ ใช้เวลา 5-7 วัน

5. ระยะระหว่างลอกคราบหรือระยะ E เป็นระยะที่ปูทะเลมีการลอกคราบและเป็นช่วงที่มีความอ่อนแอมากที่สุด ในระยะนี้น้ำจะเข้าตัวอย่างรวดเร็วทางรอยแตกทุกที่ มีการปรับความดันออสโมติกในเลือดให้ลดลง เนื่องจากทั้งโปรตีนและไขมันในเลือดเพิ่มขึ้นก่อนการลอกคราบทำให้ความดันเลือดสูงขึ้น จึงต้องมีการดูดซึมน้ำเข้าสู่ภายในตัว

การลอกคราบของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนระยะวัยอ่อน

สัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนเมื่อยังอยู่ในระยะวัยอ่อนจะมีเปลือกบางและโครงสร้างของเปลือกซับซ้อนน้อยกว่าระยะตัวเต็มวัย เมื่อเปรียบเทียบถึงระยะเวลาของวงจรการลอกคราบครัสเตเชียนระยะวัยอ่อนจะมีวงจรการลอกคราบสั้นกว่ามาก การแบ่งระยะการลอกคราบในครัสเตเชียนระยะตัวอ่อนยังไม่สามารถแยกย่อยได้เหมือนกับในตัวเต็มวัย Anger (2001) ได้ศึกษาระยะลอกคราบในปู Spider crab (*Hyas araneus*) ระยะวัยอ่อน พบว่ามีรายละเอียดดังนี้

1. ระยะหลังการลอกคราบหรือระยะ A-B

ระหว่างระยะหลังการลอกคราบตอนต้น โครงสร้างของเอพิเดอร์มิสจะมีช่องว่างมากมาย เปลือกอันใหม่จะเริ่มมีการพัฒนาเนื้อเยื่ออีก 2 ชั้นขึ้นมา คือ ชั้นเอพิคิวติเคิลและเอกโซคิวติเคิล รวมทั้งการสร้างเอนโดคิวติเคิลจะเริ่มเกิดขึ้นในระยะนี้ และพัฒนาต่อเนื่องไปจนถึงระยะหลังการลอกคราบและระยะคราบแข็ง การสร้างเปลือกนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ ในระยะนี้เปลือกจะนิ่ม สัตว์จะไม่กินอาหาร เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นทางเดินอาหารของตัวอ่อนมีสภาพไม่สมบูรณ์ ไม่พร้อมที่จะย่อยอาหาร

เมื่อเข้าสู่ระยะ B เนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส จะเริ่มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทั้งเปลือกจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความแข็งมากที่สุดในระยะคราบแข็ง ในตัวอ่อนระยะซูเอีย 1 ของปู Spider crab (*Hyas araneus*) ปริมาณของไคตินจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อฟักเป็นตัวครั้งแรกประมาณ 4 เท่าไม่ว่าจะได้รับอาหารหรือไม่ก็ตาม และในระยะหลังลอกคราบหรือระยะคราบแข็งตอนต้น ครัสเตเซียนระยะวัยอ่อนจะมีการสะสมอาหารมาก ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตและการรอดตายจะลดลง หากในระยะเริ่มต้นของวงจรการลอกคราบต้องประสบกับภาวะความเครียดจากแรงดันออสโมติกหรือสารอาหารไม่เพียงพอ (Osmotic or nutritional stress) (Torres et.al., 2002)

ตัวอ่อนระยะซูเอียโดยทั่วไปจะมีเปลือกที่ไม่มีการสะสมของแคลเซียม แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของตัวอ่อนจะขึ้นอยู่กับการสร้างเปลือกชั้นที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นเอนโดคิวติเคิล แต่ในตัวอ่อนระยะเมกาโลปา (Megalopa) และระยะวัยรุ่นโครงสร้างของเปลือกจะมีความแข็งมากกว่าและบางส่วนจะมีการสะสมของแคลเซียม การสะสมแคลเซียมนี้จะเกิดขึ้นหลังการลอกคราบไปจนถึงระยะคราบแข็ง ในพวกเดคาพอดที่อาศัยอยู่ในน้ำเค็ม แคลเซียมจะได้มาจากน้ำที่อยู่ภายนอก ส่วนพวกที่อยู่บนบกและอาศัยอยู่ในน้ำจืดจะได้มาจากการสะสมของคาร์บอเนตที่บริเวณตับอ่อน (Hepatopancreas)

จากการศึกษาวงจรการลอกคราบในระยะนี้ พบว่า เซลล์เอพิเดอร์มิส (Epidermal cell) จะผ่านการแบ่งตัว (Mitosis) ในช่วงเวลาสั้น ๆ ก่อนการลอกคราบ ทำให้เซลล์เอพิเดอร์มิสมีขนาดเฉลี่ยของเซลล์เล็กมากและมีสัดส่วนของไซโตพลาสซึมต่อนิวเคลียสต่ำมาก ขนาดเฉลี่ยของเซลล์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะหลังการลอกคราบ จากนั้นเซลล์เอพิเดอร์มิสจะเริ่มมีการเพิ่มจำนวนทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและช่องว่างภายในลดลง ในตัวอ่อนของปู Spider crab (*H. araneus*) ระยะหลังการลอกคราบ A และB จะเกิดในเวลาที่ใกล้เคียงกันไม่สามารถแยกได้ชัดเจน โดยช่วงเวลาของระยะหลังการลอกคราบนี้ประมาณ 10% ของวงจรการลอกคราบ นอกจากนี้พบว่าการควบคุมแรงดันออสโมติกภายในร่างกายให้สูงกว่าน้ำภายนอก (Hyperregulate) ภายหลังการลอกคราบของ *Homarus americanus* ระยะโพสลาวา (Stage IV-V) จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ

ระยะคราบแข็ง อาจเนื่องมาจากการไหลเข้าของน้ำจากภายนอกขณะลอกคราบ (Charmantier et.al., 2001)

2. ระยะคราบแข็งหรือระยะ C

ในครัสเตเชียนตัวเต็มวัยการเริ่มต้นของระยะคราบแข็ง จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเปลือก แต่เป็นการยากที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงนี้ในระยะที่เป็นวัยอ่อน จากการศึกษาทางเนื้อเยื่อวิทยา ในระยะนี้ชั้นเอนโดคิวติเคิลจะมีการพัฒนาเต็มที่ เปลือกทั้งหมดจะหนาขึ้นและมีความหนาแน่นสูงสุดในตอนปลายของระยะ เอพิเดอร์มิสจะมีการขยายตัวออกไป ช่องว่างภายในจะลดลง

โครงสร้างภายนอกของครัสเตเชียนตัวเต็มวัยจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆจนถึงระยะ C_3 และเมื่อเข้าสู่ระยะ C_4 การสร้างชั้นเมมเบรนนาสจะเสร็จสิ้น ส่วนในตัวอ่อน เปลือกจะมีความแข็งเพียงเล็กน้อย และไม่มีชั้นที่มีการสะสมแคลเซียมเหมือนกับในตัวเต็มวัย จะมีเพียงชั้นเมมเบรนนาส ทำให้ไม่สามารถแบ่งระยะคราบแข็งเป็นระยะย่อย ๆ ได้ ในระยะคราบแข็งของตัวอ่อนระยะซูเอียที่มีการพัฒนาไปสู่ระยะวัยรุ่นจะสังเกตเห็นว่ามีขาเดินและขาว่ายน้ำเกิดขึ้น

ระยะแรกของตัวอ่อนเดคาพอดหลายชนิด ช่วงเวลาของระยะการลอกคราบ A-C รวมกันประมาณ 1 ใน 2 ถึง 1 ใน 3 ของวงจรการลอกคราบ เฉพาะระยะคราบแข็งอย่างเดียวจะใช้เวลาประมาณ 20-40% ของวงจรการลอกคราบ

3. ระยะก่อนการลอกคราบหรือระยะ D

3.1 ระยะก่อนลอกคราบตอนต้นหรือระยะ D_0 หลังจากระยะคราบแข็งจะเริ่มเกิดการหดตัวของเอพิเดอร์มิส เรียกว่า อะโพไลซิส (Apolysis) โดยการทำงานของเอนไซม์โพทิโอไลติก (Poteolytic) และไคทิโอไลติก (Chitiolytic) และมีการสร้างขน (Setae) ขึ้นใหม่ ในตัวอ่อนระยะซูเอีย การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรยางค์อกส่วนหลัง (Posterior thoracic) จะมีการสร้างกล้ามเนื้อมีการพัฒนาของรยางค์ชุดใหม่ เช่น ในระยะซูเอีย 2 รยางค์บริเวณอก (Thoracic appendages) จะพัฒนาไปเป็นขาเดินและก้ามหนีบ

3.2 ระยะก่อนลอกคราบตอนกลางหรือระยะ D_1 ขณะที่การหดตัวของเอพิเดอร์มิสยังเกิดขึ้น ร่างกายของตัวอ่อนจะมีรอยแยก มีการเว้า (Invagination) ของเนื้อเยื่อชั้นเอพิเดอร์มิส ในระยะนี้การเปลี่ยนแปลงจะเห็นเด่นชัด เอพิเดอร์มิสปรากฏรอยแยกชัดเจนเพราะเนื้อเยื่อใหม่มีการเจริญขึ้น เมื่อสิ้นสุดระยะ D_1 รอยแยกจะมีความกว้างมากขึ้น

3.3 ระยะก่อนลอกคราบตอนปลายหรือระยะ D_{2-4} เริ่มจากเปลือกอันใหม่จะค่อย ๆ ปรากฏบนผิวหน้า ขนชุดใหม่มีการพัฒนาเสร็จสิ้น ในตัวอ่อนที่มีขนาดเล็กจะสังเกตเห็นยาก ซึ่งแตกต่างจากตัวเต็มวัย เนื่องจากเปลือกจะหนากว่าและมีการสะสมของแคลเซียม สำหรับตัวอ่อน

พบว่าไม่มีการนำสารในคราบเก่ากลับมาใช้อีก ในช่วงใกล้ลอกคราบจะมีการขยายตัวของเนื้อเยื่ออย่างรวดเร็ว เริ่มมีการซึมผ่านของน้ำเข้าไปตามรอยแยก ซึ่งระยะเวลาการเกิดระยะ D_{2-4} จะมีความผันแปรมากขึ้นกับเดคาพอดแต่ละชนิด ส่วนมากอยู่ในช่วง 10-30% ของวงจรการลอกคราบ

4. ระยะระหว่างลอกคราบหรือระยะ E (Ecdysis)

ในระยะตัวอ่อนกระบวนการลอกคราบจะสั้นมาก ในการศึกษาต้องทำภายใต้กล้องจุลทรรศน์โดยนำสัตว์ที่อยู่ในระยะ D_4 มาเฝ้าติดตามอย่างใกล้ชิด ในตัวเต็มวัยการลอกคราบจะเกิดขึ้นโดยคราบเก่าจะมีการแยกตัวออกระหว่างส่วนกระดองและส่วนท้อง ในขณะที่ตัวอ่อนจะดึงตัวเองออกจากคราบเก่า โดยการโค้งงอของส่วน Posteriorly pleon น้ำจะเข้าไปตามรอยแยก ทำให้มีขนาดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อวงจรการลอกคราบเสร็จสิ้น

ส่วนประกอบทางเคมีของเลือด (Hemolymph) ในวงจรการลอกคราบของครัสเตเชียนระยะตัวอ่อน

การลอกคราบเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมดุลของน้ำและไอออนภายในร่างกายโดยมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเลือด ซึ่งสำหรับตัวอ่อนความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้ยังมีเพียงเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนและสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น ค่าออสโมลาลิตี้ของเลือด จะมีค่าต่ำสุดในระยะหลังการลอกคราบตอนต้น (Mantel, 1985) จากนั้นคราบจะมีการขยายตัวทำให้เกิดการผ่านเข้าออกของสารมากขึ้น ทำให้มีการแพร่ของสารภายในตัวออกสู่ภายนอก ดังนั้นค่าออสโมลาลิตี้ ของตัวอ่อนเดคาพอดจะลดลงทันทีหลังการลอกคราบ (Charmanteir et al., 1994, 1998) และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งระหว่างระยะคราบแข็ง มีการศึกษาใน *Homarus americanus* ระยะวัยอ่อน (Stage I-III) พบว่า ออสโมลาลิตี้ของเลือดจะเพิ่มขึ้นในระยะก่อนลอกคราบ (Charmantier et.al., 2001)ซึ่งระยะก่อนการลอกคราบนี้การผ่านเข้าออกของสารจะลดลง ทำให้อัตราของการขับถ่ายยูรีน (Urine excretion) และการขับถ่ายแอมโมเนีย (Ammonia excretion) ลดลง (Regnault 1979, Mantel and Farmer, 1983)

ส่วนประกอบของเลือดของสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน จะมีการเปลี่ยนแปลงการผลิตเม็ดเลือดระหว่างวงจรการลอกคราบ โดยในกุ้งพีนิดระยะหลังการลอกคราบตอนต้น จะพบเม็ดเลือดเพียงเล็กน้อยในเนื้อเยื่อที่มีการสร้างเลือด (Hematopoietic tissues) (Martin and Hose, 1992) ในระหว่างระยะก่อนการลอกคราบเม็ดเลือดจะมีการสร้างขึ้นใหม่ และจะถูกปล่อยเข้าไปในแอ่งเลือด หลังจากนั้นอัตราการสร้างเม็ดเลือดจะลดลง ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้ยังสามารถพบได้ในปู Shore crab *Carcinus meanas* โดยจะมีอัตราการสร้างเม็ดเลือดอย่างรวดเร็วในระยะก่อนการลอกคราบตอนปลาย

การเปลี่ยนแปลงในทางชีวเคมีและองค์ประกอบของแร่ธาตุในเลือดครัสเตเชียนตัวเต็มวัย มีการศึกษาไว้มากมาย แต่ในระยะตัวอ่อนยังมีการศึกษาน้อยมากและยังไม่มีความชัดเจน ตัวอย่างเช่น โปรตีนในเลือดครัสเตเชียนระยะตัวเต็มวัยจะเพิ่มขึ้นในระยะก่อนการลอกคราบ ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายของโปรตีนบางส่วนจากคราบเก่านำมาใช้ใหม่ แต่ในระยะตัวอ่อน เช่น ซูเอีย จะไม่พบการนำสารประกอบจากคราบเก่ามาใช้ และปริมาณโปรตีนในน้ำเลือดจะคงที่ แต่ทั้งในระยะตัวเต็มวัยและระยะตัวอ่อนความเข้มข้นของโปรตีนจะมีค่าต่ำสุดในระยะที่มีการสร้างเอนโดคิวติเคิล (Anger, 2001)

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ในเลือดครัสเตเชียน

ครัสเตเชียนมีโครงสร้างอยู่ภายนอก (Exoskeleton) เจริญเติบโตโดยการลอกคราบ อาศัยอยู่ในน้ำ ไนโตรเจนและของเสียที่ขับถ่ายออกมามักจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย ซึ่งมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเลือดและสร้างสารสีที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ โดยองค์ประกอบของเลือดมีทั้งส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และคลอไรด์ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณพบว่า โซเดียม คลอไรด์ และแมกนีเซียม ของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในทะเลมีปริมาณมากกว่าสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำจืด ขณะที่แคลเซียมในเลือดของกลุ่มที่อยู่ในน้ำจืดจะมากกว่ากลุ่มที่อยู่ในทะเล และสัตว์จะพยายามควบคุมสมดุลของสารอนินทรีย์เหล่านี้ให้อยู่ในสภาพที่คงที่ Burton (1995) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของสารอนินทรีย์ทั้ง 4 ชนิดในเลือดของครัสเตเชียนกลุ่มมาลาคอสตราคา (Malacostraca) 74 ชนิด พบว่า ทั้งโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และคลอไรด์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยรักษาความสามารถในการผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ พบว่าค่าการเคลื่อนที่และความสามารถในการแพร่ผ่านของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และคลอไรด์คงที่

1.1 โซเดียม

โซเดียมนับว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความเข้มข้นสูงมากชนิดหนึ่งในเลือดของครัสเตเชียน แต่จะมีค่าต่ำกว่าน้ำภายนอกเล็กน้อย ทำหน้าที่รักษาสมดุลออสโมติก (Osmotic balance) ควบคู่ไปกับคลอไรด์โดยมีโพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมเป็นตัวช่วยปรับ และรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างในร่างกายให้สมดุล ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกล้ามเนื้อและระบบประสาท การควบคุมสมดุลของโซเดียมระหว่างภายในและภายนอกเซลล์จะมีความสัมพันธ์กับการทำงานของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase และ V- ATPase ภายในเหงือก ซึ่งการทำงานของเอนไซม์

Na^+/K^+A-TPase และ V- ATPase นี้จะเพิ่มขึ้น 2-3 เท่า เมื่อเกิดการเคลื่อนที่เข้าออกของโซเดียมในกุ้งน้ำจืด *Cherax destructor* (Zare & Greenaway, 1998)

1.2 คลอไรด์

พบในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์ สัตว์สามารถสะสมได้มากกว่าโซเดียมและโพแทสเซียม มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับโซเดียม ปริมาณของคลอไรด์ในเลือดของครัสเตเชียนจะเท่ากับน้ำทะเลหรือใกล้เคียงกัน จึงไม่มีปัญหาในการปรับสมดุลเหมือนตัวอื่น ๆ และยังเป็นแร่ธาตุที่มีการเคลื่อนย้ายรวดเร็วเมื่อน้ำภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงไป คลอไรด์ช่วยรักษาความดันออสโมติก ควบคุมการเข้าออกของสารและน้ำภายนอกเซลล์ ทั้งยังมีส่วนกระตุ้นน้ำย่อยอะไมเลส (Amylase) ให้ทำงานดีขึ้น รักษาความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อย และเป็นส่วนประกอบในน้ำย่อยด้วย คลอไรด์เกี่ยวข้องกับการเกิดสมดุลของไอออนบวก (Cation) และไอออนลบ (Anion) โดยอยู่รวมกับโซเดียม ถ้าอยู่ในสภาพสมดุลการแลกเปลี่ยนของแมกนีเซียมและซัลเฟตจะเกิดได้ดี

1.3 แคลเซียม

แคลเซียมเป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างภายนอกของครัสเตเชียน ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แหล่งหลักที่พบว่ามีการสะสมแคลเซียมในร่างกายของครัสเตเชียนมี 3 แหล่ง คือ ตับ (Hepatopancreas) พบในครัสเตเชียนส่วนมากทั้งที่อาศัยอยู่ในน้ำทะเลและน้ำจืด มีการสะสมแคลเซียมใน Cardiac stomach ซึ่งพบได้ใน Crayfish และปูบางชนิด สำหรับแอมฟิพอด เช่น *Orchestia cavimana* พบการสะสมแคลเซียมใน Posterior caeca ซึ่งการสะสมในตับจะอยู่ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต ($CaPO_4$) มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) (Zanotto & Wheatly, 2003) สัตว์อาจมีการสะสมแคลเซียมในเลือดและที่ส่วนอื่นของร่างกายโดยเชื่อมกับโปรตีน (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) อย่างไรก็ตามแคลเซียมส่วนใหญ่ (80%) พบอยู่ในโครงสร้างของเปลือก มีเพียง 20% ที่อยู่ในเลือด (Wheatly et.al., 2002)

นอกจากนี้แคลเซียมยังทำหน้าที่เกี่ยวกับการจับตัวของเลือด (Blood clotting) การหดตัวของกล้ามเนื้อ (Muscle contraction) การส่งกระแสประสาท (Nerve transmission) ควบคุมสมดุลเกลือแร่ (Osmoregulation) และเป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์ต่าง ๆ (Lovell, 1989; Cheng et al., 2005) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทสำหรับการทำงานของฮอร์โมน อย่างไรก็ตามสัตว์ต้องควบคุมไม่ให้ระดับของแคลเซียมในเลือดสูงเกินไป จึงต้องทำการขับออกนอกร่างกายนำไปใช้ในการสร้างเปลือกหรือเก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ

ในระหว่างวงจรการลอกคราบ เยื่อบุผิวของทางเดินอาหาร เหงือก ต่อมแอนเทนนัล (Antennal gland) และเปลือก (Integument) จะเป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมภายในร่างกาย (Ahearn et al., 2004) แคลเซียมจะมีการไหลเข้าสู่ร่างกายของครัสเตเชียนในระยะหลังการ

ลอกคราบ ในอัตรา 2 mmol/kg/h และไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระยะคราบแข็ง (Zero net flux) จากนั้นพบว่าแคลเซียมมีการเคลื่อนที่ออกไปสู่น้ำภายนอก (Efflux) ในระยะก่อนการลอกคราบ (Zanotto & Wheatly, 2003) แต่ในภาวะที่น้ำภายนอกมีความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำ จะทำให้แคลเซียมภายในร่างกายสูญเสียออกสู่น้ำภายนอก สัตว์จึงต้องมีการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยกลไกการใช้พลังงาน (Active transport) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการเข้า- ออกของประจุไฟฟ้า (Electrochemical gradient) การยอมให้อิออนผ่านเข้า-ออก และกลไกการใช้พลังงาน มีความสำคัญสำหรับครัสเตเชียนในการนำแคลเซียมจากน้ำภายนอกที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำเข้าสู่ร่างกาย (Neufeld & Cameron, 1993)

1.4 โพแทสเซียม

โพแทสเซียมพบอยู่ในเซลล์ของร่างกายและเลือด โดยพบว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมในเลือดของครัสเตเชียนอาจสูงหรือต่ำกว่าน้ำทะเลภายนอก (Burton, 1995) ถ้ามีโพแทสเซียมในร่างกายมากเกินไปจะเกิดปัญหา จึงต้องขับออกทางต่อมแอนเทนนัล ซึ่งในกุ้ง *P. monodon* เมื่อมีการลดความเค็มอย่างฉับพลันจาก 45 ppt ไปเป็น 15 ppt จะมีกลไกการรักษาสมดุลออสโมติก โดยการทำงานของต่อมแอนเทนนัล สัตว์จะพยายามรักษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไว้ และขับโซเดียมออกมา จึงพบความเข้มข้นของโซเดียมในปัสสาวะสูงกว่าในเลือด ขณะที่โพแทสเซียมในปัสสาวะจะต่ำกว่าในเลือด (Lin et al., 2000)

1.5 แมกนีเซียม

ในครัสเตเชียนทั่วไปที่อาศัยอยู่ในน้ำทะเลจะมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมภายในร่างกายต่ำกว่าน้ำทะเลภายนอก (Burton, 1995) แมกนีเซียมอยู่ในโครงสร้างของร่างกายประมาณ 70% ส่วนอีก 30% พบในเนื้อเยื่อและเลือด ในกุ้งกุลาดำ *P. monodon* เมื่อมีการปรับสภาพจากความเค็ม 5 ppt ไปเป็น 25 และ 45 ppt พบว่า สัดส่วนของแมกนีเซียมใน ปัสสาวะ: เลือด เพิ่มขึ้นจาก 2.3 เป็น 13.5 แสดงให้เห็นว่า ต่อมแอนเทนนัลช่วยควบคุมการขับแมกนีเซียมออกจากร่างกาย เพื่อให้กุ้งสามารถรักษาระดับของแมกนีเซียมในเลือดให้ต่ำกว่าน้ำภายนอก (Lin et al., 2000)

1.6 ฟอสฟอรัส

มีความสำคัญต่อการสร้างเปลือกร่วมกับแคลเซียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่กุ้งมีการสร้างเปลือกใหม่ (Pratoomchat et al., 2002a) ฟอสฟอรัสยังเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิกและสารประกอบฟอสโฟไลปิด (Phospholipids) ที่สำคัญในร่างกาย เช่น โคเอนไซม์ NADP และ ATP เป็นต้น ซึ่งอยู่ในบริเวณสมองและระบบประสาท (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) สำหรับกุ้งในกลุ่ม Penaeid นั้นมีความต้องการฟอสฟอรัสมากเนื่องจากในน้ำมีความเข้มข้นจำกัด (Cheng et al., 2005)

2. สารอินทรีย์ คือ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้ความเข้มข้นในเลือดของสัตว์มีความแตกต่างกัน

2.1 คาร์โบไฮเดรต

สารอินทรีย์ในกลุ่มกลูโคสทำหน้าที่ให้พลังงาน สร้างเนื้อเยื่อ และสร้างเป็นไคตินเพื่อใช้เป็นโครงสร้างเปลือก ซึ่งกลูโคสมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวงจรการลอกคราบ และตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ในกระบวนการลอกคราบของครัสเตเชียน จะมีการลดระดับของกลูโคสในเลือดลงอย่างมากในระยะที่คราบเริ่มแข็ง เนื่องจากเกิดการสังเคราะห์ไคตินทำให้ระดับกลูโคสลดลง เพราะกลูโคสในเลือดเป็นตัวหลักในการสร้างไคติน ในระยะการลอกคราบจึงต้องใช้พลังงานค่อนข้างมาก เมตาบอลิซึมในเลือดจึงมีความสัมพันธ์กับการลอกคราบ ถึงแม้ว่ากลูโคสในเลือดจะมาจากการขนส่งระหว่างตับอ่อน แต่ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต เลือดมีความสำคัญมากกว่าตับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในตับจะทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสในเลือดเปลี่ยนแปลง (Pratoomchat et al., 2002a) ปัจจัยอื่น ๆ นอกจากการเปลี่ยนแปลงในระยะลอกคราบที่สามารถทำให้ระดับกลูโคสในเลือดหรือในตับลดลงได้ เช่น ความเครียด การอดอาหาร ฤดูกาล ความเค็มน้ำ อุณหภูมิ วงจรการสืบพันธุ์ และสภาพร่างกาย เป็นต้น

2.2 ไขมัน

ไขมันพบว่ามีน้อยมาก ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฟอสโฟไลปิด และไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เช่นเดียวกับที่พบในครัสเตเชียนวัยอ่อน เช่น กุ้ง Ghost shrimp (*Lepidophthalmus louisianensis*) ที่ไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปฟอสโฟลิปิด (80 %) มีเพียงส่วนน้อย (16 %) ที่อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ (Nates & McKenney, 2000) ไขมันมีความสำคัญในแง่การประหยัดการใช้พลังงาน ปริมาณของไลปิดมีความสัมพันธ์กับขบวนการสันดาป (Catabolism) ของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวงจรการลอกคราบ และตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ปกติจะมีการเก็บไว้ในต่อมทางเดินอาหาร (Midgut gland) ในช่วงก่อนการลอกคราบ และจะขับออกมาหลังจากกุ้งมีการลอกคราบเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานและโครงสร้างเปลือก

2.3 โปรตีน

ปริมาณของโปรตีนในน้ำเลือด (Plasma) ของครัสเตเชียนมีปริมาณ 4% ซึ่งนับว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณสูงที่สุดในเลือด ประกอบด้วย ฮีโมไซยานิน (Hemocyanin) ซึ่งพบมากที่สุดประมาณ 80-95% ของโปรตีนทั้งหมดในเซรัม (Serum) และไฟบริโนเจน (Fribrinogen) โปรตีนมีความสำคัญต่อการจัดระเบียบโครงสร้างร่างกายเพื่อการเจริญเติบโต การพัฒนาการ

ชีวพลังงาน และสรีระร่างกาย เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก เอนไซม์ โคเอนไซม์ โครงสร้างพันธุกรรม ควบคุมเมตาบอลิซึม และการถ่ายทอดพลังงาน และมีการศึกษาพบว่าโปรตีนภายนอกเซลล์ (Extracellular proteins) มีส่วนควบคุมการสร้างเปลือก (Mineralization) (Coblentz et al., 1998)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโปรตีนในพลาสมาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะก่อนการลอกคราบ ในปูทะเล (*Scylla* sp.) พบว่าความเข้มข้นของโปรตีนในพลาสมาจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในระยะการลอกคราบตอนปลาย ซึ่งเท่ากับ 97 mg/ml และมีค่าต่ำสุดที่ 23 mg/ml ในระยะหลังลอกคราบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในระยะก่อนการลอกคราบ ปูจะมีการดูดกลับสารอินทรีย์ต่าง ๆ จากโครงสร้างเก่าทำให้เลือดมีความเข้มข้นของโปรตีนสูงขึ้น และในระยะลอกคราบปูจะมีการดูดน้ำเข้าสู่ร่างกายทำให้ระดับความเข้มข้นของโปรตีนในเลือดลดลง นอกจากนี้ยังเนื่องมาจากการนำโปรตีนไปใช้ในการสร้างโครงสร้างใหม่ด้วย (Pratoomchat et al.,2002a)

สำหรับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ในครัสเตเชียนระยะวัยอ่อนพบว่า มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบสูงสุด (30 %) รองลงมา คือ ไขมัน (< 20 %) ไคติน (< 15 %) และคาร์โบไฮเดรตอิสระ (< 5 %) ซึ่งสัดส่วนอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความสามารถในการกินอาหาร และความเค็ม (Torres et.al., 2002)

การขนส่งแร่ธาตุในครัสเตเชียน

กระบวนการขนส่งแร่ธาตุในครัสเตเชียนสามารถจำแนกได้ 2 วิธี (Rainbow, 1997) คือ

1. การขนส่งแบบใช้พลังงาน (Active transport) ส่วนมากจะเกิดขึ้นกับแร่ธาตุหลัก เช่น โซเดียม และแคลเซียม โดยมีการใช้พลังงานในการขนส่งแร่ธาตุต่าง ๆ เข้าสู่เซลล์ เช่น กรณีของโซเดียม ที่มีการเคลื่อนที่เข้า-ออกผ่านทางเหงือก โดยมีกิจกรรมของเอนไซม์ ATPase ช่วยควบคุมความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในเซลล์กับน้ำทะเลภายนอก โดยควบคุมช่องผ่านเข้า-ออกของโซเดียม

2. การแพร่ (Passive transport)

2.1 การขนส่งโดยผ่านตัวกลาง (Carrier-mediated transport) อิออนของแร่ธาตุจะจับกับโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ และเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปภายในไซโตโซล (Cytosol) ที่บริเวณนี้อิออนจะเปลี่ยนมาจับกับโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์ โดยที่โปรตีนจะถูกดักจับไว้ภายนอกเซลล์ การเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ของอิออนจะเกิดขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของอิออนภายในเซลล์สูงกว่าภายนอก

2.2 การขนส่งผ่านช่องโปรตีน (Protein channels) โดยอิออนจะเคลื่อนที่ผ่านช่องโปรตีนภายในเยื่อหุ้มเซลล์ด้านที่มีขั้ว (Hydrophilic cores)

2.3 การขนส่งโดยการแพร่ (Passive diffusion) อิออนที่เข้าสู่เซลล์ด้วยวิธีนี้จะเป็นอิออนที่สามารถละลายในไขมันได้ เพราะจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ผ่านชั้นไขมัน (Lipid bilayer) ของเยื่อหุ้มเซลล์

2.4 การขนส่งโดยวิธี Endocytosis กระบวนการที่เกิดขึ้นเริ่มจากเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการเว้าเข้าไปโดยโอบล้อมอิออนต่าง ๆ ไว้ภายใน จากนั้นอิออนจะถูกเคลื่อนย้ายเข้าภายในเซลล์

การควบคุมอิออน และระบบสมดุลเกลือแร่ (Ionic Regulation และ Osmoregulation)

การควบคุมสมดุลเกลือแร่ เมื่อสิ่งแวดล้อมภายนอกเปลี่ยนแปลงเป็นพัฒนาการที่มีความสำคัญมากสำหรับสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (Pequeux, 1995) เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าอิออนที่เป็นองค์ประกอบของเลือด จะมีความแตกต่างกับน้ำภายนอก (Mantel and Farmer, 1983) สำหรับกุ้งขาว พบว่า ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างเลือดกับน้ำภายนอก (Osmolality capacity) ขึ้นอยู่กับขนาด สารอาหารที่ได้รับ และระยะการพัฒนาการ (Lignot et al., 2000)

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าโซเดียม คลอรีน โพแทสเซียม ทำหน้าที่รักษาสมดุลออสโมติก โดยมี แคลเซียม และแมกนีเซียมเป็นตัวช่วยปรับ (Pratoomchat et al., 2002a) ความเข้มข้นของโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และ แคลเซียมอิออนในเลือดมีความแตกต่างกันมากในครัสเตเชียนแต่ละชนิด ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับความเค็มน้ำที่อาศัยอยู่ สำหรับครัสเตเชียนที่อาศัยอยู่ในทะเล ความเข้มข้นของเลือดจะไม่เท่ากับน้ำภายนอก โดยแมกนีเซียมจะมีค่าต่ำกว่าน้ำภายนอก แต่โพแทสเซียมเป็นได้ทั้งสูงกว่าหรือต่ำกว่าน้ำภายนอก (Burton, 1995) ส่วนโซเดียมและคลอรีนในเลือดมักจะใกล้เคียงกับค่าที่จุดสมดุล ซึ่งการควบคุมอิออนโมเลกุลเดี่ยว (Monovalent ions) จะเกิดขึ้นที่เหงือก (gill) ส่วนแคลเซียม และแมกนีเซียมถูกควบคุมโดยลำไส้ (gut) (Dall, 1974; 1977 อ้างโดย Lucu et al., 2000) ทั้งส่วนของ Midgut trunk และ Anterior และ Posterior midgut diverticula (Lovett & Felder, 1990) การศึกษาในกุ้ง *P. stylirostris* ระยะก่อนตัวเต็มวัย (sub-adult) 3 ขนาด (11.0-12.6, 12.7-14.3 และ 14.4-16.0 เซนติเมตร) พบว่า กุ้งทุกขนาดจะรักษาระดับความเข้มข้นของโซเดียมในเลือดให้คงที่ ขณะที่ระดับของโพแทสเซียมและออสโมลาลิตี้จะแตกต่างกันในกุ้งแต่ละขนาด โดยกุ้งขนาดใหญ่มีแนวโน้มว่ามีการสะสมโพแทสเซียมอิออนมากกว่า และเมื่อออสโมลาลิตี้ของเลือดเพิ่มขึ้นโพแทสเซียมและโซเดียมจะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่คงที่ (Vargas-

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Albores & Ochoa, 1992 อ้างโดย McGraw & Scarpa, 2004) เช่นเดียวกับกุ้ง West king prawn (*P. latisulcatus*) ที่ออสโมลาลิตี้ของเลือดจะสูงขึ้นตามความเค็มน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่ความเค็มที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงอยู่ที่ 22-34 ppt เพราะมีการรอดตายสูงสุดและอัตราการแลกเนื้อต่ำสุด โดยที่ความเค็มน้ำ 28-32 ppt เป็นจุดสมดุล (Isosmotic point) ออสโมลาลิตี้ของเลือดเท่ากับน้ำภายนอก (854-937 mOsm/kg)

ส่วนการรักษาสมดุลของอิออนที่มีประจุ 2 หน่วย (Divalent ion) มีความซับซ้อนมากกว่าบางส่วนของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะเกิดพันธะกับโปรตีนหรืออิออนอื่น ๆ และไม่แสดงความเป็นอิออน ตัวอย่างเช่น ปู *Gecarcinus lateralis* มีแคลเซียมทั้งหมดในเลือด 22 mmol ในขณะที่มีเพียง 8.6 mmol ในเลือดที่ผ่านการกรองอย่างละเอียดเพื่อขจัดโปรตีนออกไป นั่นคือมีแคลเซียมจับตัวกับโปรตีนอยู่ถึง 13.4 mmol (Skinner et al., 1965) แคลเซียมที่เกิดพันธะกับสารอื่นจะมีประมาณ 10% ของแคลเซียมทั้งหมดในเลือดของ *Emerita asiatica* (Sitaramaiah and Krishnan, 1966 อ้างโดย Mantel and Farmer, 1983) อีกทั้งใน Crayfish *Austropotamobius pallipes* มีแคลเซียมที่อยู่ในรูปของอิออนน้อยกว่า 50% ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ ไปเกิดพันธะกับโปรตีน อิออนของสารอินทรีย์ขนาดเล็ก หรือกับสารอนินทรีย์ เช่น SO^{2-}_4, HCO^{-}_3, PO^{3-}_4และ CO^{2-}_3 (Greenaway, 1972) ส่วนในกุ้ง *Orconectes limosus* พบว่า มีแคลเซียมที่อยู่ในรูปอิออน 82% และแมกนีเซียมก็พบว่าเป็นเช่นเดียวกัน (Andrews, 1976 โดย Mantel and Farmer, 1983) อิออนที่มีประจุ 2 หน่วย ที่มีการรักษาสมดุลไว้เป็นอย่างดี คือ Mg^{2+}และ SO^{2-}_4 กล่าวคือ เมื่อสัตว์อยู่ในน้ำทะเล ความเข้มข้นของ Mg^{2+} จะอยู่ระหว่าง 20-80% ของความเข้มข้นในน้ำทะเล โดยมีรายงานการศึกษาที่พบว่า *Hyas Lithodes* และ *Dromia* มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในร่างกายประมาณ 80% ของแมกนีเซียมในน้ำทะเล หรือในปู *Uca* sp. และปู *Ocypode Quadrata* มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในร่างกายมากกว่า 65% ของแมกนีเซียมในน้ำทะเล ส่วนปู Grapsids พบว่ามีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในร่างกายประมาณ 20-30% ของน้ำทะเล (Robertson,1960)

การควบคุมแรงดันออสโมติก หรือรักษาสมดุลอิออนของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่ ระยะการพัฒนาการ หรือขนาดของสัตว์ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่รายงานรูปแบบของการควบคุมแรงดันออสโมติกในครัสเตเชียน (Charmantier et al., 2001; Lignot & Charmantier, 2001; Torres et.al., 2002) พบว่า การควบคุมแรงดันออสโมติกเปลี่ยนแปลงไปตามการพัฒนาการ สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. แรงดันออสโมติกภายในร่างกายแปรไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) ตั้งแต่ระยะวัยอ่อน จนกระทั่งเป็นตัวเต็มวัยจึงสามารถรักษาสมดุลออสโมติกภายในร่างกายได้เล็กน้อย

ล๙. ๔๘
ก๕๒
น. ๒
249047

ครัสเตเชียนกลุ่มนี้มีความทนทานต่อความเค็มได้ในช่วงแคบ เช่น *Libinia marginata*, *Chionoecetes opilio*

2. สามารถรักษาสมดุลออสโมติก (Osmoregulation) ได้ทันทีหลังการฟัก (Postembryonic stage) พบว่าอาศัยอยู่ได้ทั้งในน้ำจืด น้ำความเค็มต่ำมากหรือสูงมาก หรือในสิ่งแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก มีความทนทานต่อความเค็มได้ในช่วงกว้าง เช่น *Macrobrachium petersi*, *Palaemonetes argentinus*

3. ระยะวัยอ่อนแรงดันออสโมติกภายในร่างกายแปรไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) แต่หลังจากเปลี่ยนรูปร่าง (Metamorphosis) จะสามารถรักษาสมดุลออสโมติกได้ (Osmoregulation) เช่น *Penaeus japonicus*, *Cancer irroratus*

ใน European lobster (*Homarus gammarus*) พบว่าเป็นรูปแบบที่ 3 โดยหลังจากเปลี่ยนรูปร่าง (Postmetamorphic stage) เมื่อเผชิญกับน้ำทะเลเจือจาง จะควบคุมแรงดันออสโมติกภายในร่างกายให้สูงกว่าน้ำภายนอกได้เล็กน้อย (Slightly hyper-regulation) (Furriel et al., 2000) เช่นเดียวกับกุ้งในกลุ่ม Penaeid ที่ความสามารถในการรักษาสมดุลออสโมติกในระยะวัยอ่อนค่อนข้างจำกัด แต่เมื่อพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา จะสามารถรักษาสมดุลออสโมติก และดำรงชีวิตอยู่ได้ในน้ำความเค็มต่ำ ซึ่งความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็ม (Salinity telorence) จะเพิ่มขึ้นตามอายุของลูกกุ้ง ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของลูกกุ้งได้ (Samocha et.al., 1998) พฤติกรรมนี้ยังพบใน Homarid lobsters ระยะตัวอ่อน (embryos) และระยะวัยอ่อน (larvae) แรงดันออสโมติกภายในร่างกายแปรไปตามน้ำภายนอก แต่ในระยะตัวอ่อนยังมีเยื่อหุ้มเซลล์ของไข่ (Egg membrane) ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันออสโมติก แต่ในระยะโพสลาวา พบว่าเมื่อเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำจะมีการควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอก (Hyper-regulation) ไปจนกระทั่งเป็นตัวเต็มวัย เหตุผลหนึ่งที่ตัวอ่อนระยะโพสลาวาควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอก เนื่องจากต้องการเพิ่มความหนาแน่นของร่างกายเพื่อช่วยให้จมและดำรงชีวิตอยู่ใต้น้ำได้ (Charmantier et.al., 2001)

Anger et.al. (2000) ทำการศึกษาปู *Armases miersii* ระยะซูเอีย พบว่า ที่น้ำความเค็มสูงแรงดันออสโมติกภายในร่างกายเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) เมื่ออนุบาลด้วยน้ำความเค็ม 35-45 ppt พบว่ามีการเจริญเติบโตดีกว่าเมื่ออนุบาลด้วยน้ำความเค็ม 15-25 ppt ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องสูญเสียพลังงานไปเพื่อการปรับสมดุล พลังงานทั้งหมดใช้สำหรับการเจริญเติบโตเพียงอย่างเดียว ส่วนระยะเมกาโลปา (Megalopa) และระยะเป็นตัวปู (Crab I) พบว่า มีการเจริญเติบโตที่ดีในช่วงความเค็มกว้าง 15-35 ppt เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมแรงดันออสโมติกภายในร่างกายให้สูงกว่าน้ำภายนอก (Hyper-regulation) ได้ที่ความเค็มต่ำ รวมทั้งมี

เหงือกที่ทำหน้าที่ได้ดี และมีเยื่อบุผิวสำหรับการขนส่งขยายขนาดขึ้น และปู *Carcinus maenas* ระยะซูเอีย 1 จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ที่ความเค็มน้ำต่ำ เนื่องจากประสบภาวะเครียดจากการที่น้ำภายนอกมีแรงดันออสโมติกต่ำกว่าในร่างกาย (Hypo-osmotic stress) โดยเมื่อปูฟักตัวออกมาเป็นซูเอีย 1 และมีการอนุบาลในน้ำความเค็ม 15 ppt จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้จนกระทั่งพัฒนาเข้าสู่ระยะก่อนการลอกคราบ ปูจะมีการสะสมสารอินทรีย์สำหรับการลอกคราบครั้งถัดไป แต่จะลอกคราบไม่สำเร็จ ตัวอ่อนจะตายเมื่อมันพยายามลอกคราบเข้าสู่ระยะซูเอีย 2 (Anger et.al., 1998)

นอกจากความเค็มน้ำแล้ว ปัจจัยเรื่องถิ่นอาศัยก็มีผลต่อการรักษาสมดุลอิออน เช่น ปู *Chasmagnathus granulate* ระยะซูเอีย 1 สามารถควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอกได้เล็กน้อย (Hyper-regulators) เมื่ออยู่ในน้ำความเค็มต่ำ และเมื่ออยู่ในน้ำความเค็มสูง แรงดันออสโมติกภายในเลือดจะแปรไปตามน้ำภายนอก แต่ยังคงสูงกว่าน้ำภายนอก (Hyper-osmoconformers) เป็นเช่นนี้จนถึงระยะซูเอีย 2-4 จากนั้นเมื่อเข้าสู่ระยะเมกาโลปา เป็นต้นไปปูจะสามารถควบคุมให้แรงดันออสโมติกของเลือดสูงหรือต่ำกว่าน้ำภายนอก (Hyper-hypo regulation) ซึ่งสอดคล้องกับถิ่นอาศัยของปูที่ระยะซูเอีย 1 มีการฟักบริเวณปากแม่น้ำ และเคลื่อนย้ายสู่ทะเลซึ่งมีความเค็มสูงและคงที่ในระยะระยะซูเอีย 2-4 และระยะเมกาโลปา เป็นต้นจะอพยพกลับมาอาศัยอยู่บริเวณปากแม่น้ำอีกครั้ง (Charmantier et al., 2002)

สำหรับรายงานในครัสเตเชียนชนิดอื่น ๆ พบว่า ปู *Hemigrapsus edwardsii* และ *H. crenulatus* ซึ่งอาศัยอยู่ในเขตน้ำขึ้นน้ำลง ตัวเต็มวัยสามารถอาศัยอยู่ได้ในช่วงความเค็มน้ำกว้าง (Euryhaline) และสามารถควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอกได้เป็นอย่างดี (Strong hyper-osmoregulator) ส่วนในระยะตัวอ่อน เมื่อเผชิญกับน้ำทะเล 100 % และน้ำทะเลเจือจาง 50 %, 10% และ 1% พบว่า ในช่วง 96 ชั่วโมง ระยะเป็นตัวอ่อนที่ยังอยู่ในไข่ (Detached eggs) และระยะคลีเวจ (Cleavage stage) มีความทนทานต่อน้ำทะเลเจือจางได้น้อย และแรงดันออสโมติกในเลือดสูงกว่าและเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำภายนอก (Hyper-osmoconformer) ขณะที่ระยะโพสแกสตรูลา (Post-gastrulation stage) จะควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอกได้เป็นอย่างดี แต่ความสามารถในการรักษาสมดุลออสโมติกจะลดลงในระยะก่อนการฟัก และพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase สูงขึ้นตามการพัฒนาการของตัวอ่อน (Taylor & Seneviratna, 2005)

ส่วนครัสเตเชียนในระยะตัวเต็มวัยพบว่า ความสามารถในการรักษาสมดุลเกลือแร่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่ต้องเผชิญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค็มน้ำ เมื่อสัตว์ต้องประสบกับภาวะที่ความเค็มน้ำมีการเปลี่ยนแปลง จะมีพฤติกรรมเพื่อปรับตัวให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ 2 ทาง คือ หลีกเลี่ยงไปจากสภาพนั้น หรือมีกระบวนการทางสรีรวิทยาเพื่อควบคุมแรงดัน

ออสโมติก (Charmantier et.al., 2001) เอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase เป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลออสโมติก ทำงานเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายโซเดียมอิออน (Flik & Haond, 2000) ในครัสเตเชียนที่แรงดันออสโมติกภายในร่างกายเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) จะไม่มีความสามารถในการรักษาสมดุลเกลือแร่ (Osmoregulation) จึงสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในความเค็มน้ำจำกัด เช่นใน Spiny lobster *Palinurus elephas* เมื่ออยู่ในน้ำความเค็มน้ำสูง ความเข้มข้นของเลือดจะต่ำกว่าน้ำภายนอก (Hypoosmotic) แต่เมื่อเคลื่อนย้ายไปสู่น้ำทะเลเจือจางความเข้มข้นของเลือดจะเท่ากับน้ำภายนอก (Isosmotic) ภายใน 24 ชั่วโมง และพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับ ครัสเตเชียนที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในช่วงความเค็มแคบ (Stenohaline) เช่น *Maja crispate* และ *Dromia personata* (Lucu et al., 2000) ต่างไปจากในกุ้งก้ามกรามน้ำจืด *Macrobrachium olfersii* ที่พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase และ Carbonic anhydrase สูงขึ้น เมื่อสัตว์ต้องเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ ทั้งนี้กุ้งในจีนัส *Macrobrachium* จะรักษาความเข้มข้นของออสโมลาลิตี้และอิออนในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอก (High hemolymp osmo-ionic concentrations) (Furriel et al., 2000)

มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาถึงความสามารถของ Lobster *Homarus gammarus* ในการรักษาสมดุลเกลือแร่ (Lucu & Devescovi, 1999; Flik &Haond, 2000; Furriel et al., 2000; Charmantier et.al., 2001) พบว่า *Homarus gammarus* ซึ่งแรงดันออสโมติกของเลือดแปรผันตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) ขณะที่อาศัยในน้ำทะเล แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำทะเลเจือจาง หรือเมื่ออยู่ในน้ำความเค็มต่ำสามารถควบคุมให้แรงดันออสโมติกในเลือดสูงกว่าน้ำภายนอก (Hyperosmoregulation) โดยสามารถอยู่ได้ในน้ำความเค็มต่ำถึง 17 ppt พบว่า คลอไรด์ และโซเดียมในเลือดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ขณะที่แมกนีเซียมอิออนจะควบคุมให้ต่ำกว่าน้ำภายนอกไม่ว่าจะอยู่ในน้ำความเค็มเท่าใดก็ตาม ซึ่ง Lobster จะมีความสามารถในการควบคุมแรงดันออสโมติกตั้งแต่ระยะโพสลาวาเป็นต้นไป ในระยะโพสลาวานี้พบว่ามีฮอร์โมนที่ควบคุมสมดุลออสโมติกปรากฏขึ้น รวมถึงมี Crustacean hyperglycaemic hormone เมื่อเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ อวัยวะที่ทำหน้าที่ในการรักษาแรงดันออสโมติก คือ เหงือก แบรนชิโอสตีไกท์ (Branchiostegites) และ เอพิโพไดต์ (Epipodites) ซึ่งอวัยวะเหล่านี้พบทันทีหลังการฟัก เอพิโพไดต์ทำหน้าที่ได้ตั้งแต่ระยะวัยอ่อน ส่วนแบรนชิโอสตีไกท์ ทำหน้าที่ได้เมื่อเข้าสู่ระยะโพสลาวา อวัยวะเหล่านี้เป็นที่ผลิตเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase เยื่อบุผิวของเอพิโพไดต์ และแบรนชิโอสตีไกท์ มีลักษณะพิเศษเฉพาะสำหรับขนส่งอิออน เมื่อเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ เยื่อบุผิวนี้จะมีการขยายตัวมากกว่าปกติ การทำงานของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase กิจกรรมของ Ca^{2+} transporter และ การแลกเปลี่ยน Na^+/Ca^{2+} บริเวณเอพิโพไดต์ และแบรนชิโอสตีไกท์ สูงขึ้น ส่วนเหงือก ทำหน้าที่ในการหายใจมากกว่าดูด

ซึมอิออนจากน้ำ และในระยะโพสลาวานี้เริ่มมีการปรากฏของเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอิออน (Osmoregulatory tissue) ทำให้ตั้งแต่ระยะโพสลาวาเป็นต้นไปมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มมากขึ้นสอดคล้องกับรายงานของ Samocha et.al. (1998) ที่พบว่ากุ้ง Penaeid ระยะวัยรุ่นและระยะตัวเต็มวัยมีความแตกต่างจากระยะวัยอ่อน คือสามารถควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้ต่ำหรือสูงกว่าน้ำภายนอก (Hypoosmotic and hyperosmotic) จึงสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในช่วงความเค็มกว้าง เมื่อกุ้งอยู่ในน้ำความเค็มต่ำเป็นเวลาหลายสัปดาห์จะมีความทนทานต่อน้ำความเค็มต่ำได้นานขึ้น เนื่องจากการปรับตัวทางสรีรวิทยาต่อความเข้มข้นของน้ำภายนอกที่ต่ำลง (Hypertonic) โดยการยอมให้อิออนผ่านเข้า-ออกของเหงือกจะมีการพัฒนามากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการอยู่ในน้ำความเค็มต่ำเป็นเวลานาน ซึ่งการควบคุมระบบสมดุลอิออนและสมดุลเกลือแร่ (Iono- and osmoregulation) เป็นการทำงานร่วมกันของเหงือก ต่อมแอนเทนนัล และลำไส้ โดยที่เหงือกควบคุมโดยกลไกการใช้พลังงาน (Active transport pathways) ต่อมแอนเทนนัล ทำหน้าที่ควบคุมการขับถ่ายยูรีน และลำไส้ทำงานร่วมกับเหงือกในการควบคุมการดูดซึมน้ำ (Mantel & Farmer, 1983) เช่นที่พบใน กุ้งขาว *L. vannamei* ระยะโพสลาวา จะมีอัตราการตายลดลงเมื่อนำไปปรับสภาพให้อยู่ในน้ำจืด (< 1 ppt) ถ้าระยะเวลาในการปรับสภาพนานขึ้น (48-72 ชั่วโมง ดีกว่า 32-40 ชั่วโมง) (McGraw & Scarpa, 2004) เช่นเดียวกับ ปู *Armases roberti* ระยะเมกาโลปา หลังลอกคราบ จะตายภายใน 24 ชั่วโมง ถ้าถูกเคลื่อนย้ายไปสู่น้ำความเค็ม ≤3 ppt แต่ถ้ามีการปรับสภาพแบบค่อยเป็นค่อยไปจากความเค็ม 25 - ≤ 3 ppt โดยใช้เวลา 6 วัน เป็นการช่วยลดความเครียดจากแรงดันออสโมติกที่เปลี่ยนแปลง ปูจะสามารถพัฒนาเข้าสู่ระยะตัวปู (Crab) ได้ และสามารถอยู่ได้ที่ความเค็มต่ำกว่า 0.2 ppt (Torres et al., 2006)

ในกรณีที่สัตว์ต้องเผชิญกับความเค็มน้ำที่สูงมาก หรือต่ำมาก หรือสัตว์ที่อยู่ในเขตน้ำขึ้นน้ำลงซึ่งน้ำที่อาศัยอยู่มีการเปลี่ยนแปลงมาก สัตว์กลุ่มนี้จะมีระบบรักษาสมดุลออสโมติกที่แตกต่างกันไป เช่น แอมฟีพอดน้ำจืด *Gammarus tigrinus* เมื่ออยู่ในแม่น้ำที่มีการปนเปื้อนของเกลือ (Salt-polluted rivers) สามารถควบคุมความเข้มข้นของ คลอรีน ซัลเฟต ฟอสเฟต โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมอิออนในเลือดได้ โดยสามารถทนต่อช่วงเวลาที่ความเข้มข้นของโซเดียมและคลอรีนสูงมาก (> 380 mmol/l) โดยไม่มีการขับโซเดียมและคลอรีนส่วนเกินออกนอกเซลล์ ขณะที่โพแทสเซียมจะรักษาระดับไว้โดยพบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (Koop & Grieshaber, 2000) เช่นเดียวกับแอมฟีพอด *Gammarus oceanicus* เมื่อนำไปปรับสภาพในความเค็มน้ำ 8 ระดับ คือ 5, 7, 14, 20, 25, 30, 35 และ 41 psu พบว่าจะควบคุมแรงดันออสโมติกภายในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอก (Hyperregulated) ที่ความเค็มน้ำ 5-31.5 psu ส่วนที่ความเค็มสูงกว่า 31.5 psu จะควบคุมแรงดันออสโมติกภายในเลือดให้ต่ำกว่าน้ำภายนอก (Hyporegulated) โดยที่ความเค็ม 31.5 psu เป็น

จุดสมดุล แรงดันออสโมติกภายในเลือดให้เท่ากับน้ำภายนอก (Isoosmotic) อิออนส่วนใหญ่ในเลือด คือ โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และคลอไรด์ มีการเปลี่ยนแปลงตามความเค็มน้ำ ยกเว้นโพแทสเซียมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (Normant et al., 2005) สำหรับปู *Hemigrapsus edwardsii* และ *H. crenulatus* ระยะตัวเต็มวัยซึ่งอาศัยอยู่ในเขตน้ำขึ้นน้ำลง พบว่าสามารถอาศัยอยู่ได้ในน้ำช่วงความเค็มกว้างและควบคุมแรงดันออสโมติกในเลือดให้สูงกว่าน้ำภายนอกได้เป็นอย่างดี (Strong hyper-osmoregulator) (Taylor & Seneviratna, 2005) Neufeld & Cameron (1994b) เปรียบเทียบปู Blue crabs (*Callinectes sapidus*) เมื่อนำไปปรับสภาพในน้ำความเค็ม 2 ppt และ 28 ppt พบว่าหลังลอกคราบ 1 ชั่วโมง อัตราการใช้น้ำ (Drinking rate) เพิ่มขึ้นทั้ง 2 ระดับ แต่ปูที่อยู่ในน้ำความเค็มสูงมีอัตราการใช้น้ำสูงกว่า ซึ่งการใช้น้ำเข้าสู่ร่างกายคิดเป็น 2 ใน 3 ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และพบว่าน้ำเข้าสู่ร่างกายผ่านทาง Midgut gland มากกว่าเหงือก ส่วนปัสสาวะมีการสร้างในอัตราที่ใกล้เคียงกันระหว่าง 0.5-1.0 ml/100 g/h ชี้ให้เห็นว่า ต่อมแอนเทนนัลมีหน้าที่เพียงเล็กน้อยในการควบคุมน้ำในระยะหลังการลอกคราบ

ขณะที่กุ้งก้ามกรามน้ำจืด *Macrobrachium rosenbergii* เมื่ออยู่ในน้ำจืดหรือน้ำความเค็มต่ำ จะรักษาระดับออสโมลาลิตี้ในเลือดให้มีค่า 450 mOsm เมื่อเผชิญกับน้ำความเค็มสูง โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียมมีค่าสูงขึ้นตามออสโมลาลิตี้ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่แคลเซียมยังคงมีระดับสูงไว้ไม่ว่าน้ำภายนอกจะมีความเค็มเท่าใด และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของอิออนในเปลือกพบว่าเมื่ออยู่ในน้ำจืด มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ 25 % ขณะที่มีโซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียมรวมกันน้อยกว่า 2.5 % และเมื่อความเค็มน้ำสูงขึ้นโซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ขณะที่แคลเซียมยังคงมีปริมาณเท่าเดิม เนื่องจากต้องใช้เพื่อควบคุมกระบวนการทางสรีรวิทยา และใช้ในการสร้างเปลือก (Wilder et al., 1998) ส่วนกุ้ง *Palaemon* เมื่อนำไปปรับสภาพจากน้ำจืด (< 0.5 ppt) ไปสู่น้ำทะเล 42 ppt เป็นเวลา 10 วัน พบว่า กุ้ง *Palaemon* ซึ่งโดยปกติอาศัยอยู่ในน้ำทะเลและน้ำกร่อย มีระบบสมดุลเกลือแร่ที่พัฒนาดี (Hyper/hypo-osmotic) โดยสามารถควบคุมโซเดียมและคลอไรด์ให้อยู่ในระดับความเค็มปานกลาง (Freire et al., 2003) เช่นเดียวกับปู Ghost crab *Ocypode quadrata* เมื่อนำไปอยู่ในความเค็ม <1, 12, 22, 32 และ 48 ppt เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วัดออสโมลาลิตี้ของเลือดพบว่า ใกล้เคียงกับปูที่เพิ่งจับมาทดลอง (806-864 mOsm) แสดงว่าปูชนิดนี้มีความสามารถในการควบคุมแรงดันออสโมติก ส่วนโซเดียมจะควบคุมให้ต่ำกว่าน้ำภายนอกมากกว่าสูงกว่าน้ำภายนอก ส่วนโพแทสเซียมในเลือดค่อนข้างคงที่ทุกความเค็ม ขณะที่แมกนีเซียมจะควบคุมให้ต่ำกว่าน้ำภายนอก (Santos & Moreira, 1999)

นอกจากนี้ในปู Blue crabs (*Callinectes sapidus*) พบว่า อัตราการดูดซึมแคลเซียม และทิศทางการเคลื่อนย้ายของแคลเซียมอิออน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำและความ

แตกต่างของความเข้มข้นแคลเซียมระหว่างภายในร่างกายและน้ำภายนอก เมื่ออยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นแคลเซียมสูง (6 mmol/l) แคลเซียมจะมีการไหลเข้า รวมทั้งมีการดูดซึมจากน้ำ และการขับถ่ายไฮโดรเจนอิออน (Apparent H^+ excretion) เพิ่มขึ้น 50 % แต่เมื่อย้ายไปอยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นแคลเซียมต่ำ (0.10 mmol/l) แคลเซียมจะมีการไหลออกในปริมาณมาก ไม่มีการดูดซึมแคลเซียมจากน้ำ ขณะที่การขับถ่ายไฮโดรเจนอิออนยังคงดำเนินต่อไปแต่มีอัตราที่ลดลง ซึ่งปูจะควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมอิสระในเลือดให้มีค่าประมาณ 8 mmol/l เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำภายนอกเท่ากับ 1.4 mmol/l หรือสูงกว่านั้น แต่ความเข้มข้นของแคลเซียมอิสระในเลือดจะลดลงมาอยู่ที่ 5.6 และ 4.6 mmol/l เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำภายนอกเท่ากับ 0.25 และ 0.10 mmol/l ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปู blue crabs (*Callinectes sapidus*) ระยะตัวเต็มวัย เมื่อนำมาปรับสภาพให้อยู่ในน้ำความเค็มต่ำจะมีการรักษาความเข้มข้นของแคลเซียมให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังการลอกคราบ ซึ่งต้องการแคลเซียมปริมาณมากสำหรับการสร้างเปลือกใหม่ และยังพบว่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมในเลือดลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำภายนอก เมื่อพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมในเปลือกปูพบว่ามีค่าเท่ากันตลอดการทดลอง แต่สัดส่วนของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมสูงมาก เมื่อปูอยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นแคลเซียมต่ำ แสดงให้เห็นว่ามีการสะสมแมกนีเซียมแทนที่แคลเซียม เมื่อเกิดภาวะขาดแคลนแคลเซียม (Neufeld & Cameron, 1994)

ความสำคัญของแร่ธาตุในอาหารกุ้ง

แร่ธาตุเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในโครงสร้างเปลือก และเนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่ม (Soft tissues) เช่น กำมะถัน (Sulfer) ในโปรตีน สังกะสี (Zinc) ใน Carboxypeptidase (Metalloprotein) รวมทั้ง เป็นองค์ประกอบร่วม (Cofactor) ในเอนไซม์ หลายชนิด เช่น อัลคาลินฟอสฟาเตส (Alkaline phosphatase) แร่ธาตุที่ละลายได้ดี (Ca, P, Na, K, และ Cl) จะทำหน้าที่ในระบบสมดุลเกลือแร่ ระหว่างร่างกายสัตว์กับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งรักษาสมดุลความเป็นกรด-ด่าง (Acid-base balance) และความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (Membrane potential) นับว่ายังคงมีงานวิจัยน้อยมากที่เกี่ยวกับความต้องการแร่ธาตุ (Dietary mineral requirements) ของครัสเตเชียนที่อาศัยในทะเล ทั้งนี้ Mendes et al. (1997) พบว่าความเข้มข้นของแร่ธาตุและโลหะหนัก ดังนี้คือ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม ทองแดง สังกะสี เหล็ก แคดเมียมและตะกั่ว ในตับ กล้ามเนื้อส่วนท้อง (Abdominal muscle) และเปลือกของกุ้ง *P.californiensis* ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเลี้ยงที่ความหนาแน่น 4, 8 และ10 ตัวต่อตารางเมตร

จากการศึกษาพบว่าสารอนินทรีย์มีความสำคัญต่อการใช้ผสมในอาหารทั้งกึ่งบริสุทธิ์ (Semi-purified diet) และอาหารที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ที่มีแร่ธาตุอุดมสมบูรณ์ (19.5% เถ้า) จะส่งผลให้กุ้ง *P. japonicus* เจริญเติบโตดีมาก และอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งวัยรุ่น *L. vannamei* จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเลี้ยงด้วยอาหารที่ปราศจากการเสริมเกลือแร่ (Mineral supplement) (Castille & Lawrence, 1989 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) อาจเป็นไปได้ว่าในอาหารมีแร่ธาตุไม่เพียงพอต่อความต้องการของครัสเตเชียน ถึงแม้ว่าสัตว์น้ำจะสามารถรับแร่ธาตุบางส่วนจากน้ำที่เลี้ยงก็ตาม

1. แร่ธาตุหลัก (Macro Mineral)

1.1 แคลเซียมและฟอสฟอรัส (Calcium and Phosphorus)

ปลาและกุ้ง สามารถดูดซึมแร่ธาตุบางชนิดจากน้ำ เช่น แคลเซียม อาจจะพบการดูดซึมทั้งหมดหรือบางส่วนจากน้ำ (Desshimaru *et al.*, 1978 อ้างโดย Davis และ Lawrence, 1997) จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแคลเซียมในอาหารเลี้ยงกุ้ง *L. vannamei* (Davis et al., 1993 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) แต่บางครั้งพบว่าสัตว์น้ำอาจมีการขาดแคลเซียมเมื่อนำไปเลี้ยงในน้ำที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำ (Robinson *et al.*, 1984, 1986, 1987 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997)

Perry et al. (2001) พบว่า ชั้นที่มีการสะสมแคลเซียมในโครงสร้างของเปลือกปู Blue crab (*Callinectes sapidus*) ส่วนมากมาจากน้ำภายนอก เป็นส่วนน้อยที่ได้จากการเก็บสะสมไว้ในตัวปู โดยเมื่อให้ปูลอกคราบในน้ำความเค็ม 12 ppt ที่มีการลดระดับแคลเซียม (15 - 136 mg/l) จะมีผลให้อัตราการแข็งตัวของเปลือกช้าลงเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงปูที่น้ำความเค็ม 5, 12 และ 25 ppt ระหว่างแคลเซียมระดับปกติ (54, 139, 281 mg/l) และลดระดับแคลเซียมลง (40, 42, 43 mg/l) พบว่า ปูที่เลี้ยงในน้ำทะเลที่มีการลดระดับแคลเซียมจะมีระยะเวลาที่เปลือกนิ่มนานขึ้น เห็นได้ชัดเจนในปูที่ลอกคราบในน้ำความเค็ม 25 ppt ที่มีระดับแคลเซียมต่ำลง โดยปูจะมีระยะเวลาที่เปลือกนิ่มยาวนานกว่าที่ความเค็ม 5 และ 12 ppt ทั้งที่แคลเซียมระดับปกติและมีการลดระดับแคลเซียม เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำความเค็ม 25 ppt เมื่อลดระดับแคลเซียมลง (43 mg/l) มีความแตกต่างมากกับแคลเซียมระดับปกติ (281 mg/l) ปูจึงต้องมีการปรับตัวเพื่อรักษาระดับของแคลเซียมให้อยู่ในภาวะสมดุล ทำให้รบกวนกระบวนการแข็งตัวของเปลือก แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมมีความสำคัญมากต่อการสร้างเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน

ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณแคลเซียมในอาหารจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ (Interact) ระหว่างสารอาหารอื่น ๆ เช่น ฟอสฟอรัส มากกว่าความต้องการแคลเซียมเพียงอย่างเดียวในอาหาร เช่นที่พบว่าอาหารที่เสริมฟอสฟอรัส 0.93 % (0.77 % EPA; Estimate

available phosphorus) โดยไม่เสริมแคลเซียมเพียงพอสำหรับการเลี้ยงกุ้ง *L. vannamei* ในน้ำความเค็มต่ำ 2 ppt แต่ถ้าเพิ่มการเสริมฟอสฟอรัสและแคลเซียมเป็น 2 % (1.22 % EPA) และ 1 % ตามลำดับพบว่า กุ้งมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าการเสริมฟอสฟอรัสในอาหารขึ้นอยู่กับระดับของแคลเซียมที่มีอยู่ในอาหาร (Cheng et al., 2005) เช่นเดียวกับ ในกุ้ง *P. monodon* ระยะวัยรุ่นการเสริมฟอสฟอรัส 0.5 % ในอาหารโดยไม่เสริมแคลเซียม ทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตดีกว่าเมื่อมีการเสริมแคลเซียมร่วมด้วย (Penaflorida, 1999) ซึ่งสัดส่วนของ แคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่เสริมลงในอาหารต้องพิจารณาถึงปริมาณแร่ธาตุแต่ละตัวที่มีอยู่ในอาหาร การเสริมแคลเซียมมากเกินไปจะมีผลทำให้กุ้งมีความต้องการฟอสฟอรัสมากขึ้น ทำให้ราคาอาหารกุ้งสูงขึ้น และอาจส่งผลต่อคุณภาพของน้ำ เกิดการยับยั้งการนำสารอาหารตัวอื่น ๆ ไปใช้ประโยชน์ (Cheng et al., 2005)

เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ การดูดซึมฟอสฟอรัสของสัตว์น้ำจากน้ำจืดหรือน้ำเค็มโดยทั่วไปยังมีไม่เพียงพอ (Cuzon et al., 2004) ดังนั้นฟอสฟอรัสในอาหารสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ เบื้องต้นพบว่าครัสเตเซียนมีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหาร 1-2 % (Kitabayashi et al., 1971; Deshimaru & Yone, 1978; Kanasawa et al., 1984 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) ซึ่งสูงกว่าปลาซึ่งต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 0.3-0.8% (National Research Council, 1993 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) สำหรับกุ้ง *L. vannamei* พบว่ามีความต้องการฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.35-2 % เมื่อเลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำ (Cheng et al., 2005) สาเหตุที่กุ้งมีความต้องการฟอสฟอรัสสูง เนื่องจากกุ้งจำเป็นต้องใช้ฟอสฟอรัสในการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ Cazon (1982) อ้างโดย Davis & Lawrence (1997) รายงานว่ากุ้งที่ให้หอยแมลงภู่ซึ่งมีฟอสฟอรัสต่ำ 0.7% เป็นอาหารมีผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง สอดคล้องกับการใช้อาหารกึ่งบริสุทธิ์ที่มีระดับฟอสฟอรัส 0.41% และ 0.56% เลี้ยงกุ้ง *L. vannamei* และ *P. japonicus* จะทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง (Civera & Guillanme, 1989 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997)

นอกจากนี้ความต้องการของฟอสฟอรัสในกุ้งยังขึ้นอยู่กับปริมาณแร่ธาตุอื่นในอาหารด้วย เช่น แคลเซียม และโพแทสเซียม (Pan et al., 2005) ดังการทดลองที่ใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัส 0.56 ต่อ 1.10 จะทำให้กุ้งวัยรุ่น *Hormarus americanus* มีการเจริญเติบโตดีหากสัดส่วนเพิ่มเป็น 1.55 หรือมากกว่าจะมีผลทำให้การสร้างเปลือกชั้นเอนโดคิวติเคิลผิดปกติ โดยทั่วไปอัตราส่วน 1 ต่อ 1 มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในอาหารกุ้ง *P. japonicus* (Kitabayashi et al., 1971; Kanazawa et al., 1984 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) การเสริมแคลเซียม 0.34% ของฟอสฟอรัสจะยับยั้งการนำไปใช้ประโยชน์ของฟอสฟอรัสในกุ้ง (Phosphorus availability) ดังนั้นระดับแคลเซียมที่ผสมในอาหารไม่ควรเกิน 2.3 %

สำหรับกุ้งขาว *L. vannamei* ระยะวัยรุ่น การเสริม Calcium phosphate monobasic ในอาหารสำเร็จรูปโดยให้อยู่ในรูปฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.91%, 1.05%, 1.18%, 1.33%, 1.48% และ 1.63% พบว่า การเสริมฟอสฟอรัสในอาหารสำหรับกุ้งขาววัยรุ่นที่เหมาะสม คือ 1.33% (Calcium phosphate monobasic 1.7%) ซึ่งกุ้งมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด (Weight gain) และอัตราการแลกเนื้อ (Food conversion ratio) ต่ำสุด ส่วนปริมาณเถ้า แคลเซียม และฟอสฟอรัสในร่างกายพบว่า สูงขึ้นตามปริมาณการเสริม (Pan et al., 2005)

การกำหนดการดูดซึมของฟอสฟอรัส (Apparent phosphorus availability, APA) จากแหล่งวัตถุดิบหลายชนิดในกุ้งและการสูญเสียหรือเจือจางจากอาหารควรที่จะทำการประเมินแหล่งสารอาหารในเชิงของสารอาหาร เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่ง Davis & Arnold (1994) ใช้โครมิกออกไซด์ (Chromic oxide) เป็นตัวบ่งชี้ (Marker) ในการพิจารณา APA ของ Inorganic phosphorus และผลของการเติมแคลเซียมต่อ APA ในกุ้ง *L. vannamei* โดยในการทดลองใช้ฟอสฟอรัสในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

Calcium phosphate monobasic	46.3%
Calcium phosphate dibasic	19.1%
Calcium phosphate tribasic	9.9 %
Potassium phosphate monobasic	68.1%
Sodium phosphate monobasic	68.2%

พบว่าค่า APA ของอาหารที่ใช้ Sodium phosphate monobasic เป็นแหล่งฟอสฟอรัสจะถูกลดความสามารถลงโดย Calcium lactate (50% APA) แต่ไม่มีปัญหาเมื่อใช้ Calcium carbonate (65.5% APA) หรือ Calcium chloride (68.2% APA)

การใช้ประโยชน์จากแคลเซียมและฟอสฟอรัส จะถูกยับยั้งโดยไฟเตส (Phytase) (Cuzon et al., 2004) เนื่องจากจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำในระบบย่อยอาหารในกุ้ง *P. japonicus* และ *L. vannamei* ซึ่งในกุ้ง *P. japonicus* สามารถพบไฟเตสฟอสฟอรัส (Phytase phosphorus) ได้ถึง 47.3% และ 8.4% ในกุ้ง *L. vannamei* (Civera *et al.*, 1990 อ้างโดย Davis และ Lawrence, 1997) เช่นเดียวกับการเติมไฟเตส 1.5% ในอาหารสำหรับกุ้ง *L. vannamei* จะทำให้ลดการใช้ฟอสฟอรัสและสังกะสี (Davis et al., 1993, อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997)

ทั้งนี้สำหรับกุ้ง *L. vannamei* ระยะโพสลาวา เมื่อศึกษาถึงระดับของฟอสฟอรัส 3 ระดับ (0.4, 0.8 และ 1.2%) ที่เสริมในอาหาร และมาจากแหล่งที่ต่างกัน คือ $CaHPO_4$, Na_2HPO_4 และ NaH_2PO_4 พบว่ามีการเจริญเติบโตและการรอดตายที่ไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณฟอสฟอรัสรวมที่มีการสะสมอยู่ในน้ำ (Total reactive phosphorus accumulation in the water, TRPAW) จะมีค่าสูงขึ้น

เมื่อระดับของฟอสฟอรัสที่เสริมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ $CaHPO_4$ เป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่นำมาเสริม TRPAW จะต่ำกว่าการใช้ Na_2HPO_4 และ NaH_2PO_4 ดังนั้นระดับและแหล่งของฟอสฟอรัสที่จะเลือกใช้ จึงควรคำนึงถึงคุณภาพของน้ำและสิ่งแวดล้อม โดยไม่ให้เกิดผลกระทบกับการเจริญเติบโตของกุ้ง (Velasco et al., 1998) เพราะมีฟอสฟอรัสเพียง 13 % เท่านั้นที่เข้าไปอยู่ในเนื้อเยื่อของกุ้ง ส่วนที่เหลือจะเป็นมลภาวะอยู่ในแหล่งน้ำ (Briggs & Funge-Smith, 1994 อ้างโดย Cheng et al., 2005)

1.2 โซเดียม โพแทสเซียม และคลอไรด์ (Sodium, Potassium and Chloride)

โซเดียม โพแทสเซียม และคลอไรด์ นับว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนทางสรีรวิทยา การเติมโซเดียมและโพแทสเซียม ในอัตราส่วน 40-43 mmol/mmol ลงในน้ำทะเลความเค็ม 30 ppt ทำให้กุ้ง *L. vannamei* ระยะวัยรุ่นมีการเจริญเติบโตดีขึ้น แต่ถ้ามีการเติมโซเดียมและโพแทสเซียมในอัตราส่วนที่สูงถึง 150 mmol/mmol จะทำให้กุ้งตายภายใน 2 สัปดาห์ และถ้าขาดแคลนโพแทสเซียมจะทำให้กุ้งเกิดภาวะไม่อยากกินอาหาร (Anorexia) มีกิจกรรมต่ำ การเจริญเติบโตลดลง และตาย (Zhu et al., 2004) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลร่วมกันระหว่างการเสริมโพแทสเซียมในน้ำ กับเสริมโพแทสเซียมในอาหารสำหรับกุ้ง *L. vannamei* พบว่า การเสริมโพแทสเซียมลงในน้ำ (132, 156, และ332 mg/l) มีผลดีต่อ การเจริญเติบโต, การกินอาหาร, การสะสมสารอาหาร (Nutrient retention) และอัตราการแลกเนื้อ มากกว่าการเสริมโพแทสเซียมในอาหาร โดยให้ผลดีตามปริมาณการเสริมที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณโพแทสเซียมในร่างกายไม่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเสริมโพแทสเซียมลงในน้ำหรืออาหาร ชี้ให้เห็นว่า กุ้ง *L. vannamei* เมื่อเลี้ยงในน้ำความเค็ม 30 ppt และมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำเหมาะสม การเสริมโพแทสเซียมในอาหารไม่มีความจำเป็น (Zhu et al., 2006) สอดคล้องกับการศึกษาของ Roy et al. (2006) ที่พบว่า เมื่อเลี้ยงกุ้ง *L. vannamei* ในน้ำความเค็มต่ำ (4 ppt) กุ้งจะมีน้ำหนักตัว (Individual weight) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) และ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น สูงขึ้นตามความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำที่สูงขึ้น หรือมีสัดส่วนของ โซเดียมต่อโพแทสเซียม ลดลง ซึ่งสัดส่วนของโซเดียมต่อโพแทสเซียม ประมาณ 28 ต่อ 1 จะทำให้กุ้งที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำมีการเจริญเติบโตที่ดี เพราะเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับในน้ำทะเลปกติ ส่วนรายงานของ Sowers et al., (2006) พบว่าความต้องการโพแทสเซียมของกุ้ง *L. vannamei* ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยความเข้มข้นของโพแทสเซียม หรืออัตราส่วนของโซเดียม: โพแทสเซียมในน้ำ โดยกุ้งขาว *L. vannamei* เมื่ออยู่ในสารละลายอิออนผสม (Mixed-ion solution) ที่มีความเข้มข้นอิออนเท่ากับน้ำทะเลเจือจาง (2 ppt) และในน้ำทะเลเทียมที่ความเค็มเดียวกัน ระดับของโพแทสเซียมในเลือดของกุ้งที่อยู่ในสารละลายอิออนผสม ต่ำกว่าเมื่ออยู่ในน้ำทะเลเทียม

1.3 แมกนีเซียม (Magnesium)

มีความสำคัญต่อกุ้งทะเลในแง่เป็นตัวที่ช่วยปรับสมดุลเกลือแร่ภายในร่างกาย ความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ การสร้างเปลือก และการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เป็นแร่ธาตุที่พบปริมาณสูงในน้ำทะเล (1,350 mg/l) โดยทั่วไปแล้วกุ้งและปูที่ดำรงชีวิตอยู่ในทะเลจะพยายามขับแมกนีเซียมออกจากร่างกายเพื่อให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าน้ำภายนอก ดังนั้นกุ้งทะเลที่เลี้ยงในน้ำความเค็มสูงอยู่แล้วจะไม่ขาดแร่ธาตุชนิดนี้ อย่างไรก็ดีพบว่ากุ้ง *L. vannamei* จะมีการเจริญเติบโตดีที่สุดหากมีการเสริมแมกนีเซียม 1.2 g/Kg ในอาหาร แต่จะมีการเจริญเติบโตลดน้อยลงหากมีการเสริมมากเกิน 4 g/Kg สรุปได้ว่าในอาหารควรมีแมกนีเซียมอยู่ในระดับ 0.25-4 g /Kg จะส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของกุ้งทะเล (Davis และ Lawrence, 1997) และแมกนีเซียมยังมีความสัมพันธ์กับแร่ธาตุตัวอื่น เช่น โพแทสเซียม โดยกุ้ง *L. vannamei* ที่ได้รับอาหารที่มีการดึงแมกนีเซียมออกไป จะมีปริมาณของโพแทสเซียมในเปลือกคลุมหัวลดลง และเมื่อให้อาหารที่ดึงโพแทสเซียมออกไป พบว่ามีปริมาณของแมกนีเซียมในตับลดต่ำลง (Davis et al., 1992 อ้างโดย Mendaz et al., 1997) และเมื่อเลี้ยงกุ้งขาว *L. vannamei* ในน้ำความเค็มต่ำ (4 ppt) การเสริมแมกนีเซียมลงในน้ำมีความจำเป็น เนื่องจากเมื่อทดลองเสริมแมกนีเซียมในน้ำด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10-160 mg/l พบว่ากุ้งที่เสริมแมกนีเซียม 10 mg/l มีอัตราการรอดตายต่ำสุด และกุ้งที่อยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมต่ำจะมีการหายใจมากกว่าเมื่ออยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นแมกนีเซียมสูง ถึงแม้ว่าการเจริญเติบโตของกุ้งในแต่ละการทดลองจะไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณแมกนีเซียมในตับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมในน้ำสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเลี้ยง *L. vannamei* ในน้ำความเค็มต่ำสัดส่วนของ แมกนีเซียมต่อแคลเซียม ที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 3.1 ต่อ 1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่พบในน้ำทะเล (Roy et al., 2006)

2. แร่ธาตุรอง (Micro Mineral)

2.1 ทองแดง (Copper)

เนื่องจากทองแดงมีปริมาณต่ำมากในน้ำทะเล จึงทำให้กุ้งได้รับไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อนำไปใช้ในขบวนการทางสรีระเคมี เพื่อก่อให้เกิดการเจริญเติบโตสูงสุด การสร้างเนื้อเยื่อจากการสะสมแร่ธาตุ (Tissue mineralization) และ กิจกรรมของเอนไซม์ (Enzyme activity) อีกทั้งกุ้งต้องใช้ทองแดงเพื่อเป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุเกี่ยวกับหายใจ (Respiratory pigments) เกี่ยวข้องกับการสร้างเลือด (Hematopoiesis) รวมถึงการสังเคราะห์คอลลาเจน (Collagen) และอีแลสติน (Elastin) (Cuzon et al., 2004) หากกุ้งขาดทองแดงจะพบปริมาณทองแดงต่ำในเปลือกส่วนหัวกุ้ง เลือด ตับ และหัวใจ พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้ง L. *vannamei* จะลดลงหากมีปริมาณทองแดงต่ำกว่า 34 mg/kg ในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ (Semi-purified

diets) (Davis & Lawrence, 1997) และในอาหารสำหรับกุ้ง *P. orientalis* ควรมีเสริมทองแดงในปริมาณ 53 mg/ kg (Liu et al., 1990 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997)

ในกุ้ง *P. monodon* ระยะวัยรุ่น ปริมาณของทองแดงที่เหมาะสมสำหรับการเสริมในอาหารคือ 15-21 mg/ kg และเมื่อกุ้งได้รับอาหารที่เสริมทองแดง 10-30 mg/kg จะทำให้มีการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันที่ไม่จำเพาะเจาะจง (Non-specific immune response) (Lee & Shiau, 2002)

2.2 เหล็ก

ธาตุเหล็กมีความสำคัญต่อกระบวนการเผาผลาญไขมัน (Lipid oxidation) การขาดเหล็กในกุ้งไม่ค่อยพบมากนัก แต่หากมีมากเกินไปจะมีผลเสียทำให้การเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเคยพบในกุ้ง *P. japonicus* เนื่องจากไปเพิ่มการเผาผลาญไขมัน และไปลดความเสถียรของกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องเสริม (Davis & Lawrence, 1997)

2.3 ไอโอดีน

โดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยได้ทำการประเมินถึงความจำเป็นของไอโอดีนต่อสรีรวิทยาของกุ้ง การเสริมปริมาณไอโอดีน 1 mg/ kg ในอาหาร จึงน่าที่จะเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของกุ้ง (Davis & Lawrence, 1997)

2.4 แมงกานีส

การเสริมแมงกานีสในอาหารสำหรับกุ้งมีความจำเป็น เนื่องจากปริมาณแมงกานีสในน้ำทะเลมีค่าต่ำมาก (0.01 mg/l) อีกทั้งขบวนการนำแมงกานีสไปใช้ประโยชน์ในร่างกายยังถูกยับยั้งด้วยกรดไฟติก (Phytic acid) การเสริมในอาหารจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา อาการขาดแมงกานีสจะทำให้โตช้า การพัฒนาของเปลือกผิดปกติ ลูกวัยอ่อนตายสูง และอัตราการฟักจะต่ำ (Davis & Lawrence, 1997)

2.5 ซิลีเนียม

ซิลีเนียมเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์กลูตาไทโอนเปอร์ซิเดส (Glutathion peroxidase) ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(Hydrogen peroxide) ไปเป็นน้ำ และลิปิดไฮเปอร์ออกไซด์ (Lipid hydroperoxides) ไปเป็นลิปิดแอลกอฮอล์ (Lipid alcohols) และช่วยป้องกันเซลล์จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ร่วมกับวิตามินอีทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เพื่อป้องกันฟอสโฟลิปิดสายยาวที่ไม่อิ่มตัว (Polyunsaturated phospholipids) ในเยื่อหุ้มเซลล์จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดทีฟ (Peroxidative) อาการขาดซิลีเนียมคือ ทำให้การพัฒนาของเปลือกผิดปกติ พบว่ากุ้ง *L. vannamei* ระยะวัยรุ่นจะโตดีที่สุดหากมีการเสริมซิลีเนียมลงไป 0.2-0.4 mg /kg อย่างไรก็ดีในอาหารสำเร็จรูปจะพบว่ามีปริมาณเพียงพอหากใช้ปลาป่นเป็นส่วนประกอบมากกว่า 15% และควรระมัดระวังเมื่อเสริมซิลีเนียมเกิน 0.3 mg/kg

เนื่องจากมีแนวโน้มเป็นพิษ (Davis & Lawrence, 1997) พบว่าการเสริมซิลีเนียมในอาหารสำหรับกุ้งขาว *L. vannamei* ในปริมาณที่มากเกินไปจะเพิ่มความเป็นพิษของไนไตรต์ต่อกุ้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลหลายประการ เช่นทำให้เกิด CH_3Se^- เข้าไปในวัฏจักรรีดอกซ์ (Redox cycle) และทำให้เกิดการทำลายจากซูเปอร์ออกไซด์และออกซิเดทีฟ หรือเกิดอนุมูลอิสระไปจับกับหรือยับยั้งการทำหน้าที่ของเอนไซม์และโปตีนที่สำคัญ (Wang et al., 2006)

2.6 สังกะสี

สังกะสีเป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น Hydrogenase enzymes, Carbonic anhydrase หรือ Alkaline phosphatase (Davis et al., 1992 อ้างโดย Cuzon et al., 2004) การเสริมสังกะสีในอาหารมีความจำเป็น เนื่องจากไฟเตสในวัตถุดิบอาหารจะลดการนำไปใช้ของสังกะสี อีกทั้งการนำสังกะสีไปใช้ประโยชน์ในร่างกายยังมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับปริมาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate) ปริมาณของสังกะสีในตับ (Hepatopancreatic zinc) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความต้องการสังกะสีเพื่อเสริมลงในอาหาร ซึ่งไฟเตสจะทำให้ปริมาณของสังกะสีในตับลดลง ในกรณีที่มีไฟเตส 1.5% ในอาหารจำเป็น ต้องเสริมสังกะสีถึง 200 mg /kg (Cuzon et al., 2004) แต่ขบวนการสร้างเนื้อเยื่อเป็นไปได้อย่างปกติในกุ้ง *L. vannamei* เมื่อเสริมสังกะสี 33 mg /kg ในอาหารโดยปราศจากไฟเตส (Davis & Lawrence, 1997)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

1. สัตว์ทดลอง

1.1 ลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส 4 (Nauplius 4)

1.2 ลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย 1 (Zoea 1)

1.3 ลูกกุ้งขาวระยะไมซิส 1 (Mysis 1)

1.4 ลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา 1 (Post Larva 1)

2. วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

2.1 น้ำทะเลความเค็มสูงและน้ำจืดสะอาด

2.2 บ่อคอนกรีตขนาด 3 ลูกบาศก์เมตร

2.3 โหลแก้วขนาด 15 ลิตร

2.4 ชุดระบบให้อากาศ

2.5 แก้วสำหรับตักลูกกุ้ง

2.6 กล้องจุลทรรศน์

2.7 สวิงกรองแพลงก์ตอนขนาด 48 ไมครอน

2.8 กระชังขนาด 350, 420, 500 ไมครอน

2.9 ถุงกรองน้ำ ขนาด 2 ไมครอน

2.10 สายยาง

2.11 นอเพลียสอาร์ทีเมีย

2.12 แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$)

2.13 ฟอร์มาลิน

2.14 แร่ธาตุ (โซเดียมไบคาร์บอเนต แมกนีเซียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต)

2.15 เครื่องมือวัดความเค็มน้ำ Hand refractometer

2.16 เครื่อง YSI Incorporated model # 85/10 สำหรับวัดปริมาณออกซิเจนละลาย ค่าความนำไฟฟ้า พีเอช อุณหภูมิและความเค็มน้ำ

2.17 เครื่อง C203 Multiparameter Ion Specifie Meter สำหรับวัดปริมาณไนไตรต์และแอมโมเนีย

2.18 เครื่อง X-ray fluorescent spectrophotometer ED^{2000}

2.19 เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

3. วิธีวิจัย

3.1 การวางแผนการทดลอง

แบ่งเป็น 3 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 ศึกษาผลของการใช้ และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ในการบำบัดน้ำ ทำการทดลองที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ คือ 15, 20, 25 และ 30 ppt การทดลองที่ 2 ทำการอนุบาลกุ้งขาวทั้ง 4 ระยะ ได้แก่ ระยะนอเพลียส 4-6 ระยะซูเอีย 1-3 ระยะไมซิส 1-3 และระยะโพสลาวา 1-10 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นธาตุและสารประกอบรวม 10 ชนิดได้แก่ Ca, Mg, K, Na, Cl, P, S, Cu, Mn และHCO_3^- ในน้ำและในตัวลูกกุ้ง ของแต่ละระยะการพัฒนาการ เมื่อทราบการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุแล้วจึงวางแผนและออกแบบการทดลองที่ 3 เพื่อเติมแร่ธาตุลงไปในน้ำ โดยแบ่งเป็นอีก 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ การเติมแร่ธาตุบางชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละระยะของการพัฒนาการลงไปในระบบการอนุบาล และระบบเดิมที่ไม่มีการเติมแร่ธาตุ (ชุดควบคุม) ทุกการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2 การเตรียมสัตว์ทดลอง

ใช้กุ้งขาววัยอ่อนระยะนอเพลียส 4 ซูเอีย 1 ไมซิส 1 และ โพสลาวา 1 จากฟาร์มเอกชน

3.3 การเตรียมบ่อทดลองและน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้ง

3.3.1 บ่อทดลอง

การทดลองที่ 1 : ใช้โหลแก้วขนาด 15 ลิตร

การทดลองที่ 2 : ใช้บ่อคอนกรีตวงกลมขนาด 3 ลูกบาศก์เมตร ที่ผ่านการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน ตลอดการทดลองทำการควบคุมแสงโดยใช้กระเบื้องปิดปากบ่อ

การทดลองที่ 3 : ใช้ถังไฟเบอร์รูปกรวยขนาด 300 ลิตร ที่ผ่านการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน ตลอดการทดลองทำการควบคุมแสงโดยใช้พลาสติกพรางแสงปิดปากบ่อ

3.3.2 น้ำที่ใช้สำหรับการทดลองที่ 1

ใช้น้ำเค็ม 30 ppt และน้ำจืดจากโรงเพาะฟักภาควิชาวาริชศาสตร์ ผสมให้ได้ความเค็มน้ำ 4 ระดับ คือ 15, 20, 25 และ 30 ppt

3.3.3 น้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งสำหรับการทดลองที่ 2

3.3.3.1 น้ำนาเกลือ

น้ำนาเกลือที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้มาจากนาเกลือ บริเวณ ต. บางปะกง อ.บางปะกง จ. ฉะเชิงเทรา ความเค็มน้ำ 78 ppt มีค่าความนำไฟฟ้า 93 mS พีเอช 7.96 มีองค์ประกอบของโซเดียม 14,570 mg/l คลอรีน 21,210 mg/l แมกนีเซียม 1,280 mg/l กำมะถัน 1,220 mg/l โพแทสเซียม 790 mg/l แคลเซียม 600 mg/l ฟอสฟอรัส 8.47 mg/l อัลคาลินิตี้ 217 mg/l ไบคาร์บอเนต 157 mg/l และคาร์บอเนต 40 mg/l

3.3.3.2 น้ำจืด

น้ำจืดที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้มาจากคลองน้ำจืด บริเวณ อ.บ้านโพธิ์ จ. ฉะเชิงเทรา ความเค็มน้ำ 4 ppt มีค่าความนำไฟฟ้า 4.36 mS พีเอช 8.02 มีองค์ประกอบของโซเดียม 1,480 mg/l คลอรีน 1,770 mg/l แมกนีเซียม 63 mg/l กำมะถัน 17 mg/l โพแทสเซียม 100 mg/l แคลเซียม 105 mg/l ฟอสฟอรัส 45 mg/l อัลคาลินิตี้ 174 mg/l ไบคาร์บอเนต 122 mg/l และคาร์บอเนต 31 mg/l

3.3.3.3 น้ำที่ใช้ในการอนุบาล

เตรียมน้ำความเค็ม 28 ppt ด้วยการผสมน้ำนาเกลือความเค็ม 78 ppt กับน้ำจืดที่ผ่านการบำบัดด้วยคลอรีน

3.3.4 น้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งสำหรับการทดลองที่ 3

3.3.4.1 น้ำทะเล

ใช้น้ำกรองทรายจาก จ. ชลบุรี ความเค็ม 30 ppt มีค่าความนำไฟฟ้า 50 mS พีเอช 8.4 มีองค์ประกอบของโซเดียม 8,340 mg/l คลอรีน 16,980 mg/l แมกนีเซียม 1,030 mg/l กำมะถัน 580 mg/l โพแทสเซียม 400 mg/l แคลเซียม 410 mg/l ฟอสฟอรัส 12.92 mg/l อัลคาลินิตี้ 120 mg/l ไบคาร์บอเนต 90 mg/l และคาร์บอเนต 30 mg/l

3.3.4.2 น้ำจืด

น้ำจืดสำหรับการทดลองที่ 3 ใช้น้ำประปาจาก โรงเพาะเลี้ยงภาควิชาวาริชศาสตร์ ความเค็มน้ำ 0.1 ppt มีค่าความนำไฟฟ้า 180 µS พีเอช 8.1 มีองค์ประกอบของโซเดียม 980 mg/l คลอรีน 1,100 mg/l แมกนีเซียม 120 mg/l กำมะถัน 16 mg/l โพแทสเซียม 100 mg/l แคลเซียม 76 mg/l ฟอสฟอรัส 41 mg/l อัลคาลินิตี้ 32 mg/l ไบคาร์บอเนต 20 mg/l และคาร์บอเนต 10 mg/l

3.3.4.3 น้ำที่ใช้ในการอนุบาล

เตรียมน้ำความเค็ม 28 ppt ด้วยการผสมน้ำเค็ม 30 ppt กับน้ำจืดที่ผ่านการบำบัดด้วยคลอรีน

4. วิธีการทดลอง

4.1 ศึกษาผลของการใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำที่ความเค็ม 4 ระดับ

4.1.1 เตรียมน้ำความเค็ม 4 ระดับ คือ 15, 20, 25 และ 30 ppt ปริมาตร 10 ลิตร ใส่ลงในโหลแก้ว แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ใส่ลงในน้ำ แต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ

4.1.2 วางระบบอุปกรณ์ให้อากาศให้ฟองอากาศกระจายสม่ำเสมอ และเท่ากันทุกโหล โดยตรวจสอบจากค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) คลุมโหลด้วยพลาสติกใส เพื่อป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุจากการระเหยของน้ำ วางโหลไว้บริเวณที่มีแสงส่องสม่ำเสมอ

4.1.3 ชุดการทดลองที่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ เติมแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ 20 ppm ส่วนชุดควบคุมไม่มีการเติม

4.1.4 เก็บตัวอย่างน้ำก่อนการทดลองและสิ้นสุดการทดลอง โดยสิ้นสุดการทดลองเมื่อคลอรีนในน้ำสลายตัวหมด (ประมาณ 2 วัน) นำตัวอย่างน้ำมาวัดหาปริมาณแร่ธาตุแต่ละชนิด โดยใช้ เครื่อง X-ray Fluorescent spectrophotometer Oxford ED^{2000} ตามวิธีการของ Pratoomchat et al. (2002) และวัดค่าออสโมลาลิตี้โดยใช้เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

4.1.5 ปริมาณแร่ธาตุในน้ำ เมื่อใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ นำมาหาค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยวิธี T- test โดยโปรแกรม SPSS

4.2 ศึกษาปริมาณของแร่ธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบการอนุบาลลูกกุ้งขาว

4.2.1 การอนุบาลกุ้งขาววัยอ่อนระยะนอเพลียส 4-6

4.2.1.1 สุ่มตัวอย่างนอเพลียสของกุ้งขาวลงเลี้ยงในบ่ออนุบาลที่ความหนาแน่น 200 ตัว/ลิตร (สาเหตุที่ใช้นอเพลียสระยะที่ 4 มาทำการอนุบาลนั้นเนื่องจากสภาพเป็นจริงของการซื้อขายนอเพลียสจะขายช่วงนอเพลียส 3 เมื่อลำเลียงมาลงบ่ออนุบาลเพียง 24 ชม. ก็จะมีการเปลี่ยนเข้าสู่ระยะซูเอีย)

4.2.1.2 ในระยะนี้ไม่มีการให้อาหารเนื่องจากยังมีถุงไข่แดงอยู่

4.2.1.3 ทำการตรวจสอบการพัฒนาการ (Metamorphosis) ทุกชั่วโมง จนกระทั่งเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ทั้งหมด 100 %

4.2.1.4 ตรวจสอบระยะเวลาที่ลูกกุ้งเริ่มพัฒนาเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 จำนวน 10% จนเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ครบ 100%

4.2.1.5 การรอดตาย ทำการนับจำนวนลูกกุ้งระยะซูเอีย 1 เมื่อลูกกุ้งพัฒนาเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ครบ 100 % เพื่อหาอัตราการรอดตาย

4.2.1.6 วัดขนาดของลูกกุ้งเมื่อเริ่มต้นและเข้าสู่ระยะนอเพลียส 6

4.2.1.7 การตรวจสอบออสโมลาลิตี้ (Osmolality) ของน้ำที่ใช้อนุบาล ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเมื่อเริ่มต้นอนุบาล และเมื่อเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ครบ 100% มาวัดค่าออสโมลาลิตี้โดยใช้เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

4.2.1.8 ความเข้มข้นแร่ธาตุและปริมาณสารอนินทรีย์ที่ทำการตรวจสอบ ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) กำมะถัน (S) ฟอสฟอรัส (P) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) และไบคาร์บอเนต (HCO^-_3) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำและลูกกุ้งเมื่อเริ่มต้นอนุบาล และเมื่อลูกกุ้งมีการพัฒนาเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ครบ 100% ซึ่งการวัดความเข้มข้นแร่ธาตุในตัวลูกกุ้งนั้น จะทำการสุ่มลูกกุ้งแต่ละซ้ำมาจำนวนมากพอให้ได้น้ำหนักแห้งประมาณ 1 กรัม อบที่อุณหภูมิ 70 °C นานประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปย่อยด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 6 N ปรับปริมาตรให้ได้ 1 มิลลิลิตร เก็บไว้ในหลอด eppendroff จากนั้นนำมาวัดหาปริมาณแร่ธาตุแต่ละชนิดโดยใช้ เครื่อง X-ray Fluorescent spectrophotometer Oxford ED^{2000} ตามวิธีการของ Pratoomchat et al. (2002) และตรวจสอบปริมาณไบคาร์บอเนตโดยวิธีการของ Strickland & Parsons (1972)

4.2.2 การอนุบาลกุ้งขาวระยะซูเอีย 1-3

4.2.2.1 สุ่มตัวอย่างลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย 1 ลงเลี้ยงในบ่ออนุบาลที่ความหนาแน่น 200 ตัว/ลิตร

4.2.2.2 การให้อาหารลูกกุ้งระยะซูเอีย ให้สาหร่ายเซลล์เดียว (*Chaetoceros*) เป็นอาหาร โดยให้มีความหนาแน่นของ *Chaetoceros* อยู่ที่ 40,000-50,000 เซลล์/ลิตร ตลอดการอนุบาล

4.2.2.3 ทำการตรวจสอบการพัฒนาการ ทุก 12 ชั่วโมง จนกระทั่งเข้าสู่ระยะไมซิส 1 ทั้งหมด 100 %

4.2.2.4 ตรวจสอบระยะเวลาที่ลูกกุ้งพัฒนาเข้าสู่ระยะไมซิส เช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.4

4.2.2.5 การรอดตาย ทำการนับจำนวนลูกกุ้งระยะไมซิส 1 เมื่อลูกกุ้งพัฒนาเข้าสู่ระยะไมซิส 1 ครบ 100 % เพื่อหาอัตราการรอดตาย

4.2.2.6 วัดขนาดของลูกกุ้งเมื่อเริ่มต้นและเมื่อเข้าสู่ระยะไมซิส 1

4.2.2.7 การตรวจสอบออสโมลาลิตี้ในน้ำที่ใช้อนุบาล โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการให้อาหารทุกวัน (เนื่องจากการให้ *Chaetoceros* เป็นอาหารจะให้ทั้งน้ำที่เพาะขยาย *Chaetoceros* ดังนั้นจึงต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกครั้งที่ปริมาตรน้ำในบ่อมีการเปลี่ยนแปลง) จนลูกกุ้งมีการพัฒนาเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ครบ 100% มาวัดค่าออสโมลาลิตี้โดยใช้เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

4.2.2.8 ปริมาณสารอนินทรีย์และความเข้มข้นแร่ธาตุทำการตรวจสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.8 โดยเก็บตัวอย่างน้ำเช่นเดียวกับการตรวจสอบออสโมลาลิตี้ ส่วนลูกกุ้งเก็บตัวอย่างทุกวัน เวลา 08.00 น.

4.2.3 การอนุบาลกุ้งขาวระยะไมซิส 1-3

4.2.3.1 สุ่มตัวอย่างลูกกุ้งขาวระยะไมซิส 1 ลงเลี้ยงในบ่ออนุบาลที่ความหนาแน่น 150 ตัว/ลิตร

4.2.3.2 การให้อาหารลูกกุ้งระยะไมซิส ให้นอเพลียสอาร์ทีเมียลวกสุกเป็นอาหารปริมาณ 3-4 ตัวต่อลูกกุ้ง 1 ตัว โดยให้ทุก 4 ชั่วโมง

4.2.3.3 ทำการตรวจสอบการพัฒนาการทุก 12 ชั่วโมง จนกระทั่งเข้าสู่ระยะโพสลาวา 1 ทั้งหมด 100 %

4.2.3.4 ตรวจสอบระยะเวลาที่ลูกกุ้งเข้าสู่ระยะโพสลาวา เช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.4

4.2.3.5 การรอดตาย ทำการนับจำนวนลูกกุ้งระยะโพสลาวา 1 เมื่อลูกกุ้งพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา 1 ครบ 100 % เพื่อหาอัตราการรอดตาย

4.2.3.6 วัดขนาดของลูกกุ้งเมื่อเริ่มต้นและเมื่อเข้าสู่ระยะโพสลาวา 1

4.2.3.7 การตรวจสอบออสโมลาลิตี้ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเมื่อเริ่มต้นอนุบาล และจากนั้นเก็บน้ำทุก 12 ชั่วโมง จนกระทั่งลูกกุ้งมีการพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา 1 100% มาวัดค่าออสโมลาลิตี้โดยใช้เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

4.2.3.8 ปริมาณสารอนินทรีย์และความเข้มข้นแร่ธาตุทำการตรวจสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.8 โดยตัวอย่างน้ำตรวจสอบทุก 12 ชั่วโมง ส่วนตัวอย่างลูกกุ้งตรวจสอบทุกวัน

4.2.4 การอนุบาลกุ้งขาวระยะโพสลาวา 1-10

4.2.4.1 สุ่มตัวอย่างลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา 1 ลงเลี้ยงในบ่ออนุบาลที่ความหนาแน่น 150 ตัว/ลิตร ความเค็มน้ำ 24 ppt

4.2.4.2 การให้อาหารลูกกุ้งระยะโพสลาวา ให้นอเพลียสอาร์ทีเมียลวกสุกเป็นอาหาร ปริมาณที่ให้ 8-10 ตัวต่อลูกกุ้ง 1 ตัว โดยให้ทุก 4 ชั่วโมง

4.2.4.3 ในระหว่างทำการอนุบาลเปลี่ยนถ่ายน้ำ 20% วันเว้นวัน และปรับลดความเค็มน้ำจาก 24 ppt ลดเหลือ 8 ppt

4.2.4.4 ทำการตรวจสอบการพัฒนาการทุกวัน จนกระทั่งเข้าสู่ระยะโพสลาวา 10

4.2.4.5 การรอดตาย ทำการนับจำนวนลูกกุ้ง เมื่อลูกกุ้งพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา 10 เพื่อหาอัตราการรอดตาย

4.2.4.6 ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของลูกกุ้งเมื่อเริ่มต้นและเมื่อเข้าสู่ระยะโพสลาวา 10

4.2.4.7 การตรวจสอบออสโมลาลิตี้ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 12 ชั่วโมง ส่วนวันที่มีการถ่ายน้ำจะเก็บน้ำก่อนและหลังการถ่ายน้ำ จนกระทั่งลูกกุ้งมีการพัฒนาเข้าสู่ระยะโพสลาวา 10 มาวัดค่าออสโมลาลิตี้โดยใช้เครื่อง Freezing point osmometer (Slamed 1000)

4.2.4.8 ปริมาณสารอนินทรีย์และความเข้มข้นแร่ธาตุทำการตรวจสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1.8 โดยเก็บตัวอย่างน้ำเช่นเดียวกับการตรวจสอบออสโมลาลิตี้ ส่วนตัวอย่างลูกกุ้งตรวจสอบทุกวัน

4.2.5 การตรวจสอบคุณภาพน้ำ

ในระหว่างการทดลองทำการวัดคุณภาพน้ำทุกวัน ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) พีเอช (pH) ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติของน้ำ (YSI Incorporated model # 85/10) ไนไตรต์ (NO^{-}_{2}) และแอมโมเนีย (NH^{-}_{3}) ด้วยเครื่องมือวัดไนไตรต์และแอมโมเนีย (C203 Multiparameter Ion Specifie Meter) ค่าอัลคาลินิตี้ (Alkalinity) โดยวิธีการไทเทรต

4.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของการทดลอง ได้แก่ ค่าออสโมลาลิตี้ (osmolality) ปริมาณสารอนินทรีย์และปริมาณแร่ธาตุในน้ำ ของแต่ละการทดลอง นำมาหาค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยวิธี T- test โดยโปรแกรม SPSS ส่วนปริมาณแร่ธาตุในลูกกุ้ง นำมาวิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติ ด้วย Analysis of Variance และทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วย Duncan New's Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรม SPSS

หมายเหตุ 1) ปริมาณการให้อาหารลูกกุ้งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในสภาพจริงของฟาร์ม อย่างไรก็ตาม อาจจะต้องมีการปรับบ้างตามความเหมาะสม โดยการปรับจะต้องเหมือนกันทุกการทดลอง

2) การเตรียมน้ำทะเลที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำความเค็มสูงจากนาเกลือแหล่งเดียวกัน มาปรับให้มีความเค็มตามที่ต้องการ โดยในการทดลองจะใช้น้ำที่เตรียมไว้ในบ่อเดียวกัน เพื่อลดความผิดพลาดของปริมาณอิออนในบ่อทดลอง

3) บ่อทดลองขนาด 3 ลูกบาศก์เมตร เป็นบ่อสำหรับการอนุบาลในฟาร์มทั่วไป

4.3 ศึกษาผลของการใช้แร่ธาตุบางชนิดในระบบอนุบาลกุ้งขาว

เมื่อทราบการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในการอนุบาลกุ้งขาวในแต่ละระยะการพัฒนาแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของการใช้แร่ธาตุบางชนิดในระบบการอนุบาลลูกกุ้งขาว ซึ่งการดำเนินการทดลอง การตรวจสอบการพัฒนาการ การรอดตาย การเจริญเติบโต และการตรวจสอบความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำและในลูกกุ้ง จากระยะนอเพลียสถึงระยะโพสลาวา และการตรวจสอบคุณภาพน้ำ เหมือนกับการทดลองที่ 2 ข้อ 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 และ 4.2.5 ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น นำข้อมูลของการทดลอง ได้แก่ % การรอดตาย ระยะเวลาในการพัฒนาการ ขนาดที่เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัว และปริมาณแร่ธาตุ

ในน้ำและในลูกกุ้งของแต่ละการทดลอง นำมาหาค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยวิธี T- test โดยโปรแกรม SPSS

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ

- ชุดการทดลองที่ 1 ไม่มีการเติมแร่ธาตุในระบบการอนุบาล จัดเป็นชุดควบคุม

- ชุดการทดลองที่ 2 เสริมแร่ธาตุบางชนิด ด้วยวิธีการละลายน้ำแล้วใส่ลงในบ่อที่ทำการอนุบาล เพื่อรักษาระดับของแร่ธาตุให้มีความเข้มข้นคงที่ใกล้เคียงกับน้ำเมื่อเริ่มต้นการทดลอง โดยระยะนอเพลียส ถึง ระยะไมซิสใส่แร่ธาตุทุกวัน เวลา 08.00 น. ส่วนระยะโพสลาวาใส่ทุกวันหลังถ่ายน้ำ ปริมาณแร่ธาตุที่ใส่ในลูกกุ้งแต่ละระยะ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แร่ธาตุที่เสริมในการอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียส (mg/l/15 ชม.) ระยะซูเอีย ถึง โพสลาวา (mg/l/วัน)

ระยะลูกกุ้ง	ความเค็มน้ำ (ppt)	ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)	โพแทสเซียม (K)	แมกนีเซียม (Mg)	แคลเซียม (Ca)
N	28	29.25	104.70	61.50	-
Z	28	24.72	-	-	125.04
M	28	25.68	-	408.24	-
P1	24	-	-	-	119.04
P2-3	20	-	29.04	-	48.48
P4	17	-	94.08	-	-
P5	15	-	72.48	-	46.56
P6	13	-	12.72	-	-
P7-8	10	-	59.52	-	-
P9-10	8	-	36.00	-	-

หมายเหตุ 1) แร่ธาตุแต่ละชนิดเตรียมโดยการคำนวณจากสารเคมีต่าง ๆ ดังนี้

- ไบคาร์บอเนต ⟶ โซเดียมไบคาร์บอเนต
- โพแทสเซียม ⟶ โพแทสเซียมคลอไรด์ และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต
- แมกนีเซียม ⟶ แมกนีเซียมคลอไรด์
- แคลเซียม ⟶ แคลเซียมคลอไรด์

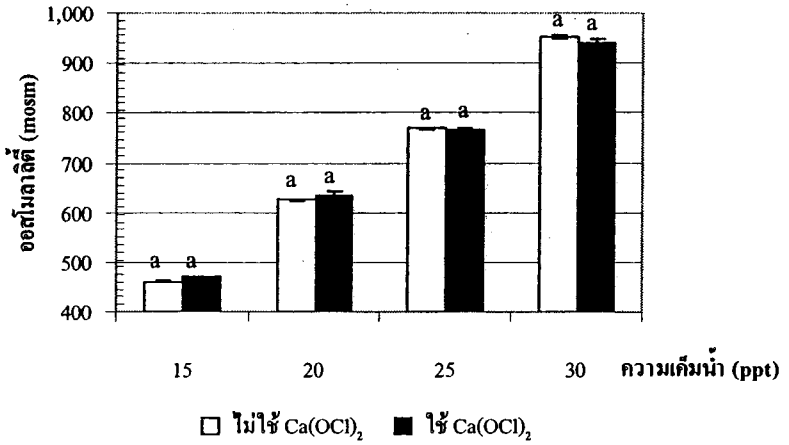
บทที่ 4

ผลการวิจัย

การทดลองที่ 1 ผลของการใช้และไม่ใช้คลอรีนบำบัดน้ำที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ

1. ค่าออสโมลาลิตี้

โดยภาพรวมแล้วการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) ในการบำบัดน้ำไม่มีผลชัดเจนต่อการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นอิออนทั้งหมดในน้ำทุกระดับความเค็ม ($p>0.05$) แต่พบว่าที่ระดับความเค็มน้ำสูงกว่า 25 ppt ความเข้มข้นอิออนมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ระดับความเค็มน้ำ 20 และ 15 ppt ความเข้มข้นอิออนมีค่าสูงขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบออสโมลาลิตี้ในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ

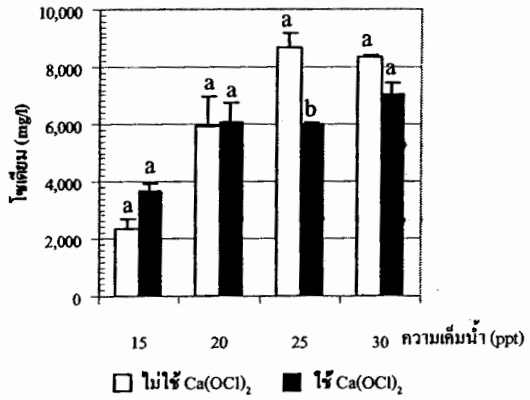
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระดับความเค็มน้ำ

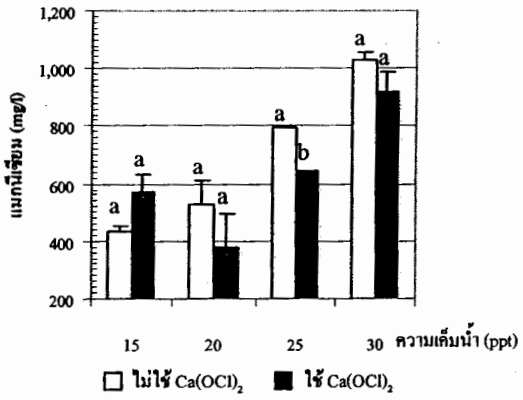
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2. แร่ธาตุ

ส่วนใหญ่แล้วการบำบัดน้ำด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ มีผลทำให้ระดับแร่ธาตุในน้ำลดน้อยลง โดยจะมีผลร่วมกับระดับความเค็มน้ำด้วย กล่าวคือที่ระดับความเค็มน้ำสูง 25 ppt จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมและแมกนีเซียม ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 3 และภาพที่ 4) ขณะที่การลดลงของฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) จะเกิดขึ้นที่ความเค็มน้ำต่ำ 15 ppt (ภาพที่ 5) ส่วนคลอรีน กำมะถัน และแคลเซียม มีความเข้มข้นลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ทุกระดับความเค็มน้ำเมื่อบำบัดด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ (ภาพที่ 6 ถึง 8) และพบว่าแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ มีผลให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำเพิ่มขึ้นในทุกระดับความเค็มน้ำ ยกเว้นที่ระดับความเค็มน้ำ 20 ppt (ภาพที่ 9) แต่ทั้งนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



ภาพที่ 3



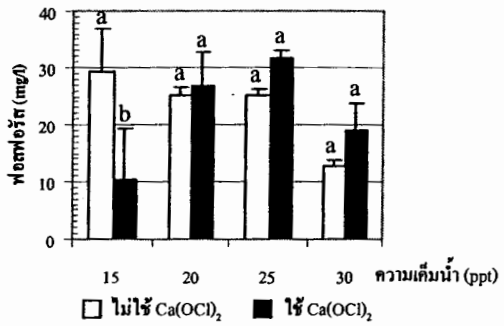
ภาพที่ 4

ภาพที่ 3-4 เปรียบเทียบความเข้มข้นโซเดียม (ภาพที่ 3) และแมกนีเซียม (ภาพที่ 4) ในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ

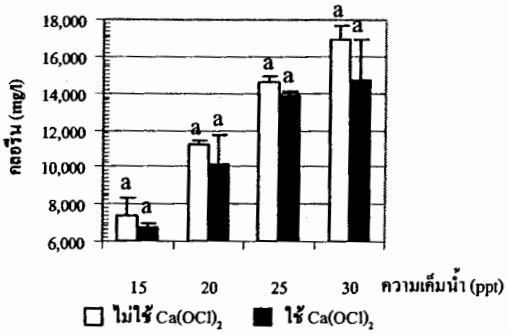
<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระดับความเค็มน้ำ

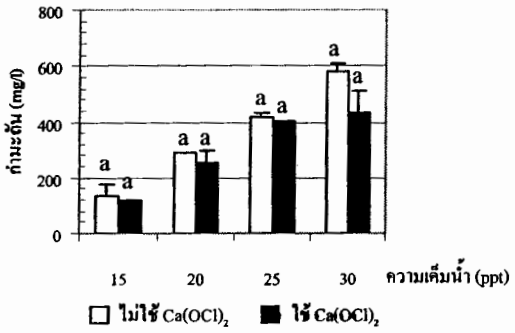
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



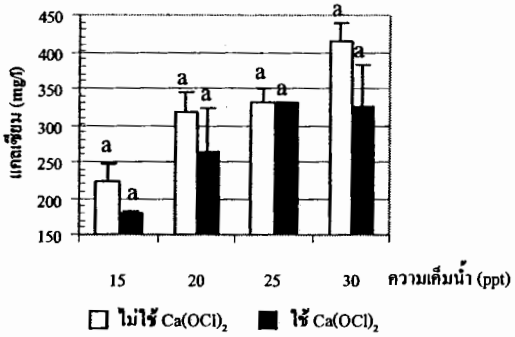
ภาพที่ 5



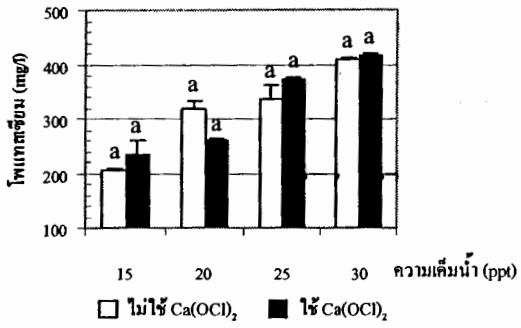
ภาพที่ 6



ภาพที่ 7



ภาพที่ 8



ภาพที่ 9

ภาพที่ 5-9 เปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัส (ภาพที่ 5) คลอรีน (ภาพที่ 6) กำมะถัน (ภาพที่ 7) แคลเซียม (ภาพที่ 8) และโพแทสเซียม (ภาพที่ 9) ในน้ำระหว่างใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($Ca(OCl)_2$) บำบัดน้ำ ที่ความเค็มน้ำ 4 ระดับ

<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระดับความเค็มน้ำ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

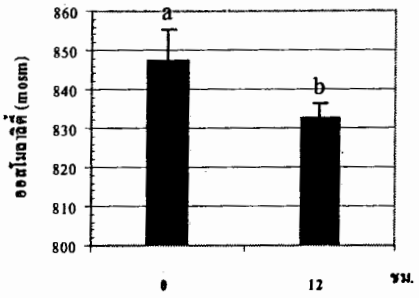
การทดลองที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุและสารประกอบ

1. การเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*)

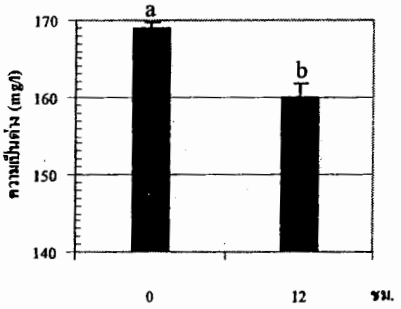
1.1 ระยะนอเพลียส

1.1.1 ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต

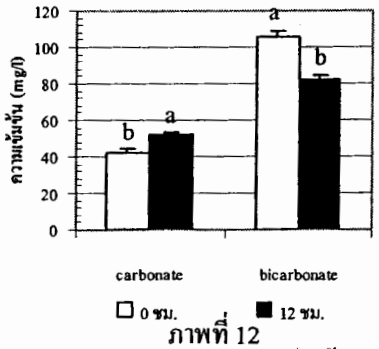
จากการทดลองพบว่าลูกกุ้งระยะนอเพลียส มีการนำอิออนจากน้ำที่ใช้ในการอนุบาลไปใช้ จะเห็นได้จากระดับออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่างและไบคาร์บอเนตในน้ำเมื่ออนุบาลลูกกุ้งขาวผ่านไป 12 ชั่วโมง มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง และไบคาร์บอเนต มีความเข้มข้นลดลง 1.8 %, 5.3 % และ 29.3 % ตามลำดับ (ภาพที่ 10 ถึง 12) ในทางตรงกันข้ามความเข้มข้นของคาร์บอเนตกลับมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 12)โดยมีความเข้มข้นสูงขึ้น 20.2 %



ภาพที่ 10



ภาพที่ 11



ภาพที่ 12

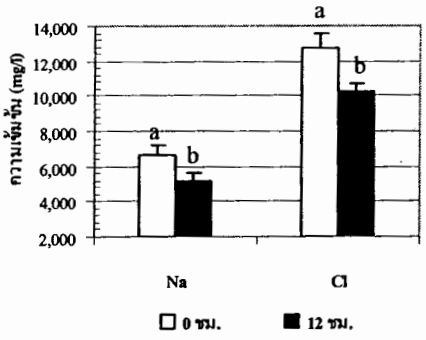
ภาพที่ 10-12 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 10) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 11) คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 12) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

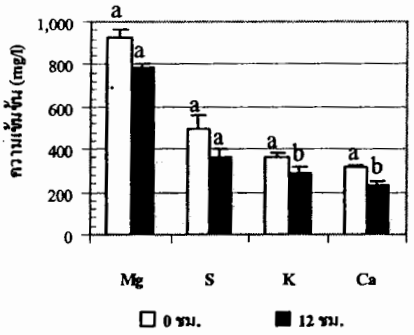
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในช่วง 12 ชั่วโมง
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

1.1.2 แร่ธาตุ

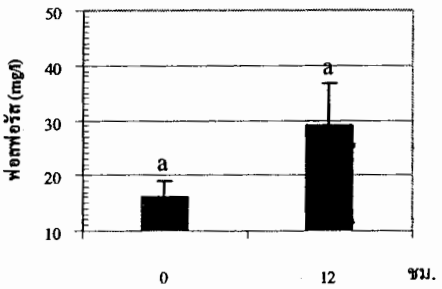
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่าแร่ธาตุทุกชนิดยกเว้นฟอสฟอรัส มีความเข้มข้นลดลง โดยโซเดียม คลอรีน (ภาพที่ 13) โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 14) มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีเปอร์เซ็นต์การลดลง 23.1%, 18.9%, 19.8% และ 34.5% ตามลำดับ ส่วนกำมะถันและแมกนีเซียม มีการลดลงเช่นกันแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) (ภาพที่ 14) ในขณะที่ฟอสฟอรัสมีความเข้มข้นสูงขึ้น (ภาพที่ 15) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$)



ภาพที่ 13



ภาพที่ 14



ภาพที่ 15

ภาพที่ 13-15 การเปลี่ยนแปลงโซเดียมและคลอรีน (ภาพที่ 13) กำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 14) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 15) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียสที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

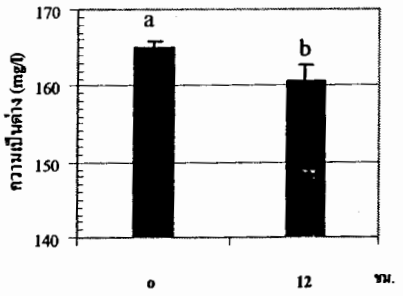
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

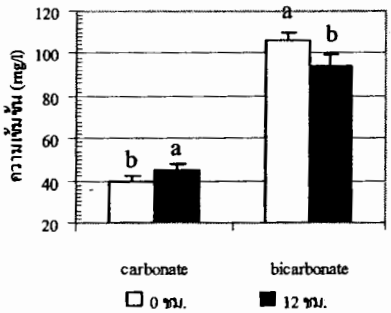
1.2 ระยะซูเอีย

1.2.1 ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต

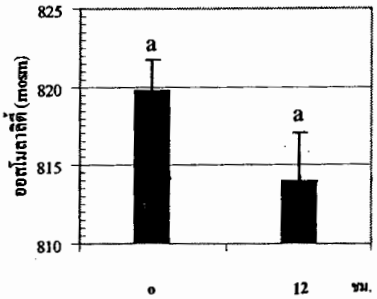
จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่า ความเป็นด่างและไบคาร์บอเนตมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีความเข้มข้นลดลง 2.4 % และ12.3 % ตามลำดับ (ภาพที่ 16 และภาพที่ 17) ในทางกลับกันคาร์บอเนตมีความเข้มข้นสูงขึ้น 13.2 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 17) สำหรับออสโมลาลิตี้มีการลดลงเช่นกันแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 16



ภาพที่ 17



ภาพที่ 18

ภาพที่ 16-18 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (ภาพที่ 16) คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 17) และออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 18) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

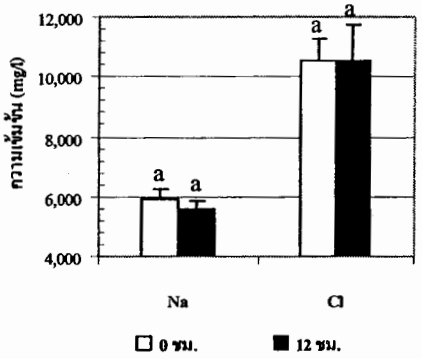
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในช่วง 12 ชั่วโมง

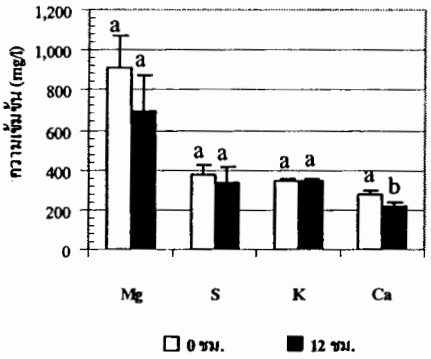
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

1.2.2 แร่ธาตุ

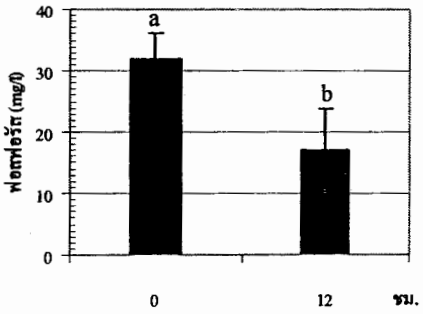
ความเข้มข้นแร่ธาตุในน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะซูเอียเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่าโซเดียม (ภาพที่ 19) กำมะถัน แมกนีเซียมและโพแทสเซียม (ภาพที่ 20) มีความเข้มข้นลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขณะที่แคลเซียม (ภาพที่ 20) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 21) มีค่าลดลง 28.6 % และ 43.7 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนคลอรีนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19



ภาพที่ 20



ภาพที่ 21

ภาพที่ 19-21 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม และคลอรีน (ภาพที่ 19) กำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 20) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 21) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vanniamei*) ระยะซูเอียที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

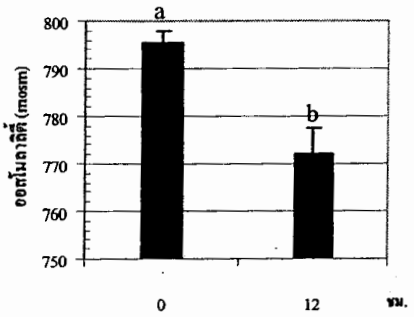
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

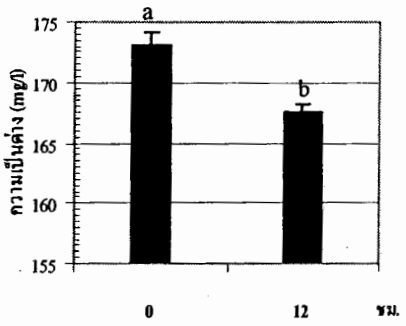
1.3 ระยะไมซิส

1.3.1 ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต

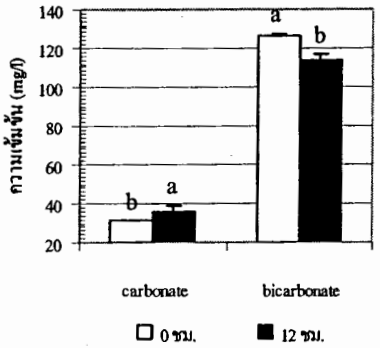
ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะไมซิส เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่า ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง และไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 22 ถึง 24)ในน้ำที่ทำการอนุบาล มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีค่าลดลง 3.0 %, 3.2 % และ 9.9 % ตามลำดับ ในขณะที่คาร์บอเนต (ภาพที่ 24) มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีความเข้มข้นสูงขึ้น 15.3 %



ภาพที่ 22



ภาพที่ 23



ภาพที่ 24

ภาพที่ 22-24 การเปลี่ยนแปลง ออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 22) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 23) คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 24) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

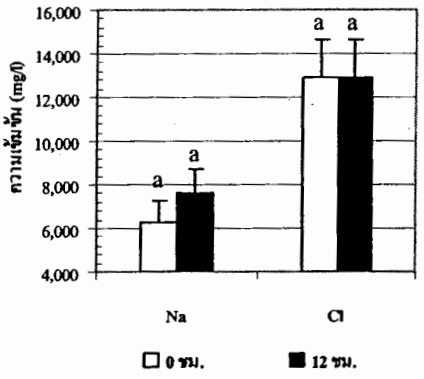
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในช่วง 12 ชั่วโมง

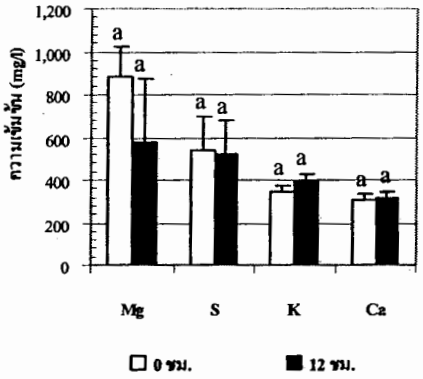
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

1.3.2 แร่ธาตุ

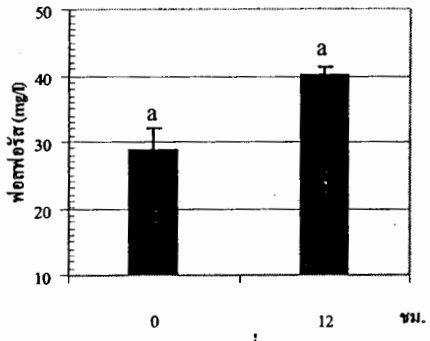
จากการทดลองอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะไมซิสเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่าแร่ธาตุทุกชนิดในน้ำที่ทำการอนุบาลมีการเปลี่ยนแปลงทั้งต่ำและสูงขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) โดยโซเดียม คลอรีน (ภาพที่ 25) โพแทสเซียม แคลเซียม (ภาพที่ 26) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 27) มีความเข้มข้นสูงขึ้น ในขณะที่กำมะถันและแมกนีเซียม (ภาพที่ 26) มีความเข้มข้นลดลง



ภาพที่ 25



ภาพที่ 26



ภาพที่ 27

ภาพที่ 25-27 การเปลี่ยนแปลงโซเดียมและคลอรีน (ภาพที่ 25) กำมะถัน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 26) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 27) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ช่วง 12 ชั่วโมง

<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

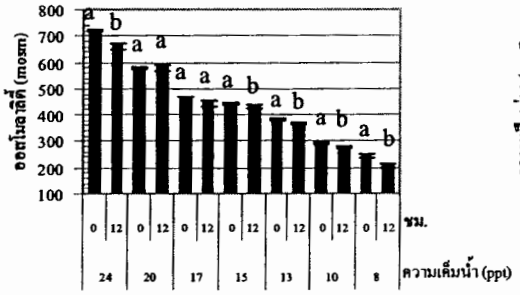
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

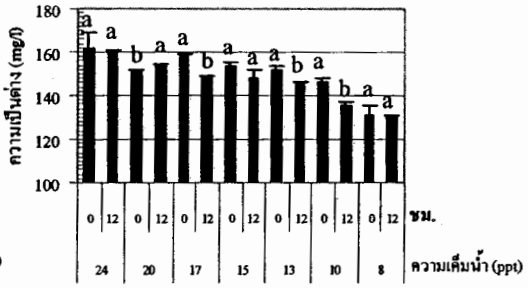
1.4 ระยะโพสลาวา

1.4.1 ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต

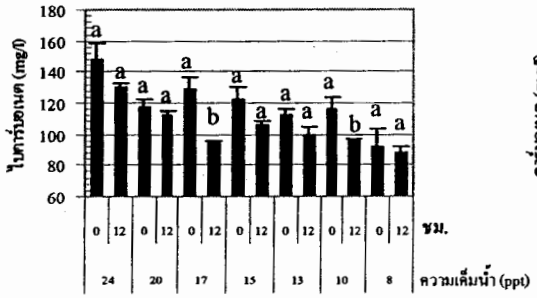
ในลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา เมื่อทำการอนุบาลลูกกุ้งช่วงเวลา 7 วัน โดยมีการปรับลดความเค็มน้ำจาก 24 ppt ลงเหลือ 8 ppt และมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลเมื่อเวลาผ่านไปทุก 12 ชั่วโมง พบว่า ออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 28) และความเป็นด่าง (ภาพที่ 29) นั้นส่วนใหญ่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 30) ส่วนใหญ่มีการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในทางตรงกันข้ามคาร์บอเนตกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ที่ระดับความเค็มน้ำ 24, 20, 17 และ 15 ppt (ภาพที่ 31)



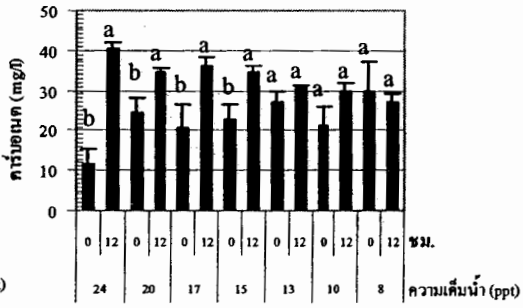
ภาพที่ 28



ภาพที่ 29



ภาพที่ 30



ภาพที่ 31

ภาพที่ 28-31 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 28) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 29) ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 30) และคาร์บอเนต (ภาพที่ 31) ช่วง 12 ชั่วโมงของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วันที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt

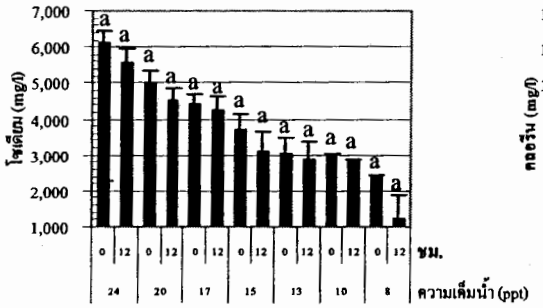
<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบแต่ละช่วงความเค็มน้ำ

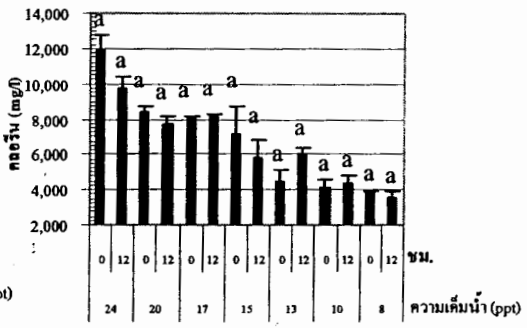
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

1.4.2 แร่ธาตุ

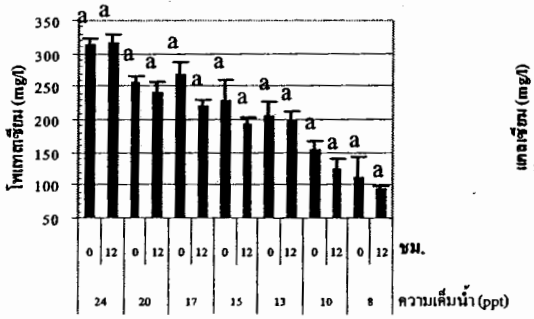
ปริมาณแร่ธาตุส่วนใหญ่ในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ตลอดการอนุบาล ได้แก่โซเดียม (ภาพที่ 32) คลอรีน (ภาพที่ 33) โพแทสเซียม (ภาพที่ 34) แคลเซียม (ภาพที่ 35) กำมะถัน (ภาพที่ 36) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 38) ส่วนแมกนีเซียม (ภาพที่ 37) มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในลูกกุ้งระยะโพสลาวา 5 ที่อนุบาลด้วยน้ำความเค็ม 13 ppt



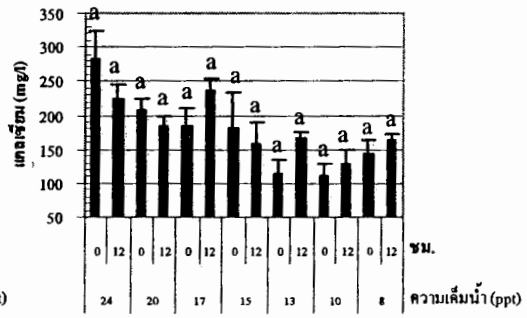
ภาพที่ 32



ภาพที่ 33



ภาพที่ 34

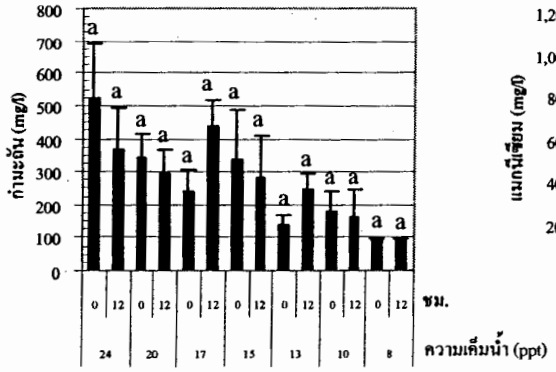


ภาพที่ 35

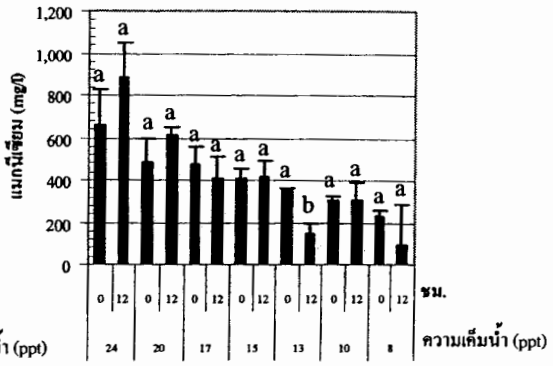
ภาพที่ 32-35 การเปลี่ยนแปลงโซเดียม (ภาพที่ 32) คลอรีน(ภาพที่ 33) โพแทสเซียม (ภาพที่ 34) และแคลเซียม (ภาพที่ 35) ช่วง 12 ชั่วโมง ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt

<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

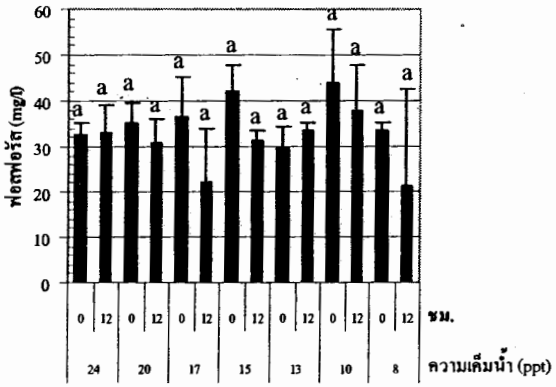
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ และแต่ละระดับความเค็มน้ำ
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 36



ภาพที่ 37



ภาพที่ 38

ภาพที่ 36-38 การเปลี่ยนแปลงกำมะถัน (ภาพที่ 36) แมกนีเซียม (ภาพที่ 47) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 38) ของน้ำ ช่วง 12 ชั่วโมง ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา อายุ 1-7 วัน ที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 24 ถึง 8 ppt

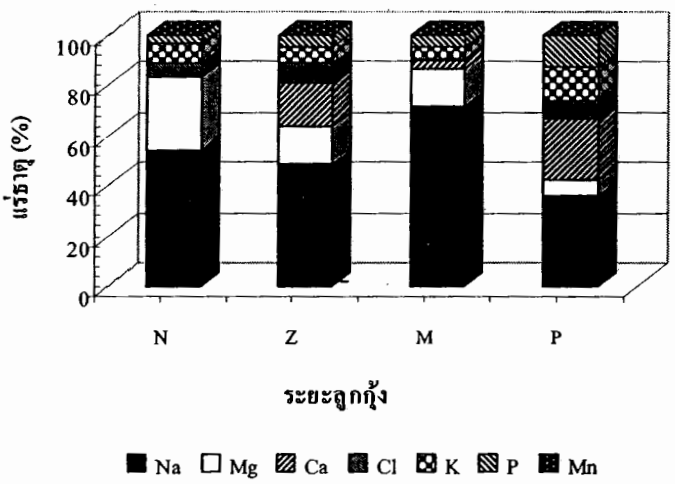
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ และแต่ละระดับความเค็มน้ำ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2. ปริมาณแร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*)

ลูกกุ้งขาวทุกระยะพบว่าโซเดียมเป็นแร่ธาตุที่พบในสัดส่วนมากที่สุด โดยพบสูงสุดในระยะไมซิส (71.7 %) เปรียบเทียบกับระยะอื่น ๆ มีปริมาณโซเดียมเฉลี่ย 46.1 % ส่วนแมกนีเซียมจะพบมากในระยะนอเพลียส และลดลงมาในระยะซูเอียและไมซิสซึ่งมีระดับใกล้เคียงกัน และลดลงมากที่สุดในระยะโพสลาวา ในทางตรงกันข้ามในระยะนอเพลียสจะไม่พบแคลเซียมเลย แต่จะพบในสัดส่วนที่สูงในระยะซูเอียและโพสลาวา สำหรับโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุที่พบในลูกกุ้งทุกระยะ แต่จะพบโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในสัดส่วนที่สูงในระยะโพสลาวา (ภาพที่ 39)



ภาพที่ 39 เปอร์เซ็นต์แร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt

หมายเหตุ -N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

2.1 โพแทสเซียม

ปริมาณโพแทสเซียมที่พบในตัวลูกกุ้งขาวมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ทุกระยะการพัฒนาการ โดยพบว่าในร่างกายลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส ซูเอีย และโพสลาวา มีปริมาณโพแทสเซียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ย 12 mg/g ซึ่งสูงกว่าในระยะไมซิส (9 mg/g) เล็กน้อย และลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส โพสลาวา 3 และ 6 มีปริมาณโพแทสเซียมมากกว่าในระยะไมซิส 1 และ 3 และระยะโพสลาวา 7 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 40)

2.2 โซเดียม

ปริมาณโซเดียมที่พบในลูกกุ้งขาวมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการพัฒนาการ กล่าวคือ ลูกกุ้งในระยะนอเพลียส พบปริมาณโซเดียมในร่างกาย 90 mg/g สูงกว่าในระยะซูเอีย 1 (48 mg/g) และซูเอีย 2 (65 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะซูเอีย 3 จนถึงระยะไมซิส 3 โซเดียมที่พบจะมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นประมาณ 50 % ของระยะซูเอีย 2 ซึ่งปริมาณที่พบใกล้เคียงกันและสูงกว่าในระยะอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) จากนั้นพบว่าปริมาณโซเดียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อีกครั้งในระยะโพสลาวา 1 โดยระยะโพสลาวา นี้ปริมาณโซเดียมที่พบค่อนข้างคงที่ มีค่าเฉลี่ย 30 mg/g และมีปริมาณต่ำที่สุดในระยะโพสลาวา 7 โดยเฉลี่ยมีค่าลดลง70 % จากระยะไมซิส 3 (ภาพที่ 41)

2.3 คลอรีน

ปริมาณคลอรีนในลูกกุ้งขาวพบสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะซูเอีย 1 (19 mg/g) จากนั้นปริมาณจะลดลงต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในลูกกุ้งระยะซูเอีย 2 ถึงระยะไมซิส 2 จนกระทั่งไม่พบเลยในระยะไมซิส 3 และเมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะโพสลาวาจะพบคลอรีนในตัวลูกกุ้งอีกครั้ง และมีปริมาณค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ย 7 mg/g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระยะนอเพลียสและซูเอีย 3 (ภาพที่ 42)

2.4 แมกนีเซียม

ปริมาณแมกนีเซียมในลูกกุ้งขาวพบว่ามีค่าลดลงเมื่อลูกกุ้งมีการพัฒนาการมากขึ้น โดยแมกนีเซียมมีปริมาณสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะนอเพลียส (49 mg/g) จากนั้นมีค่าลดลงประมาณ 70 % เมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ถึง 2 แล้วจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะซูเอีย 3 (44 mg/g) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในลูกกุ้งระยะไมซิสถึงระยะโพสลาวา โดยในระยะไมซิสพบปริมาณแมกนีเซียมเฉลี่ย 27 mg/g และ 5 mg/g ในระยะโพสลาวา ซึ่งปริมาณแมกนีเซียมที่พบในลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวานี้ต่ำกว่าระยะอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 43)

2.5 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส มีปริมาณสูงขึ้นเมื่อลูกกุ้งมีการพัฒนาการมากขึ้น โดยในลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียสมีปริมาณฟอสฟอรัส 5.30 mg/g ต่ำกว่าในระยะอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยมีค่าสูงขึ้น 74 % ในระยะซูเอีย 1 และมีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ในระยะซูเอีย 2 ถึง ไมซิส 3 โดยมีค่าเฉลี่ย 8 mg/g หลังจากนั้นมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างคงที่ในระยะโพสลาวา 1 ถึง 7 โดยมีค่าเฉลี่ย 10.5 mg/g (ภาพที่ 44)

2.6 แคลเซียม

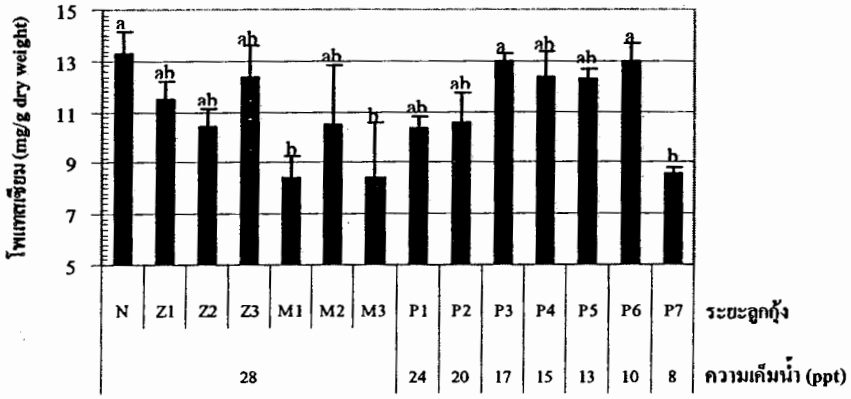
จากการตรวจสอบไม่พบแคลเซียมในลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส แต่จะพบสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะซูเอีย 1 (41 mg/g) และซูเอีย 2 (32 mg/g) แคลเซียมจะลดน้อยลงประมาณ 75 % ในลูกกุ้งระยะซูเอีย 3 ถึงระยะไมซิส 2 และลดลงต่ำกว่า 95 % ในระยะไมซิส 3 เมื่อเปรียบเทียบกับระยะซูเอีย 1 หลังจากนั้นแคลเซียมจะสูงขึ้นอีกครั้งและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในระยะโพสลาวา 1 ถึง 7 โดยมีค่าเฉลี่ย 20 mg/g (ภาพที่ 45)

2.7 แมงกานีส

ปริมาณแมงกานีสในลูกกุ้งขาวแต่ละระยะไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) มีความแปรปรวนสูง และพบในปริมาณต่ำมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ในลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย 3 และระยะไมซิส 1 และ 2 (ภาพที่ 46)

2.8 ทองแดงและกำมะถัน

ไม่พบทองแดงและกำมะถันในลูกกุ้งขาวทุกระยะการพัฒนาการ

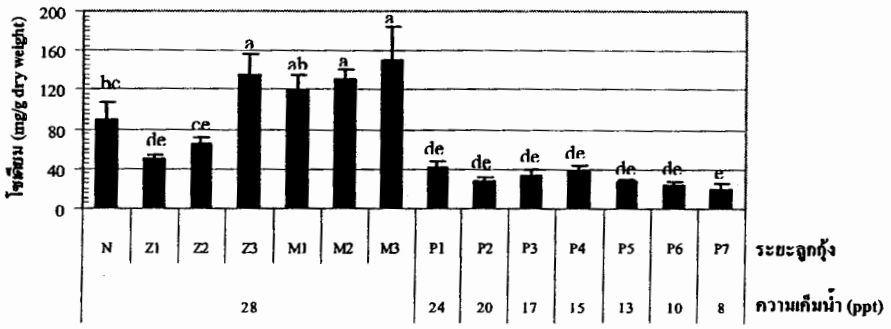


ภาพที่ 40 ปริมาณโพแทสเซียม ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิสและโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt

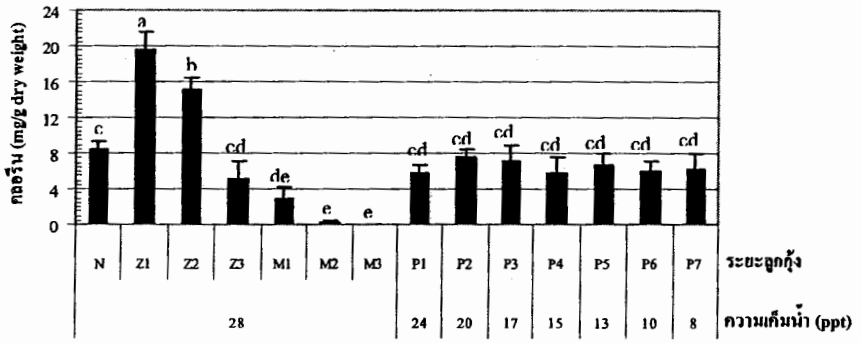
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

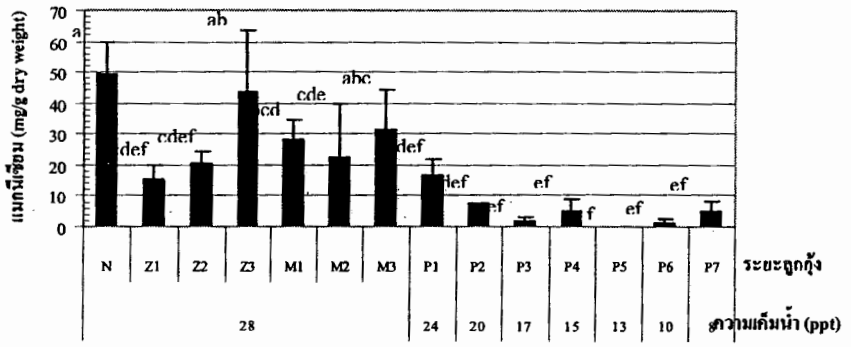
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 41



ภาพที่ 42



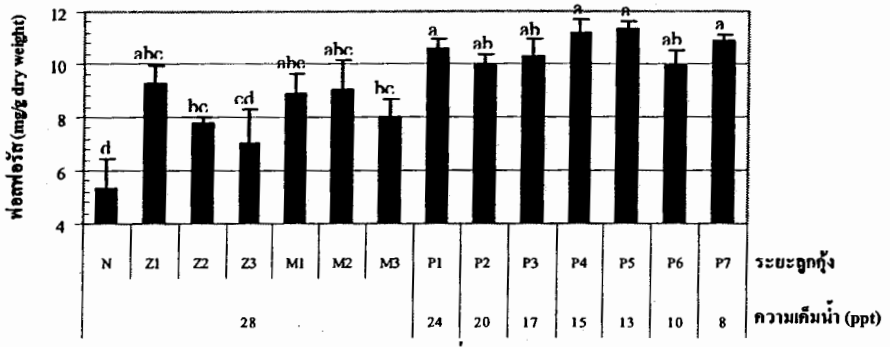
ภาพที่ 43

ภาพที่ 41-43 ปริมาณโซเดียม (ภาพที่ 41) คลอรีน (ภาพที่ 42) และแมกนีเซียม (ภาพที่ 43) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิสและโพสลาวา ภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt

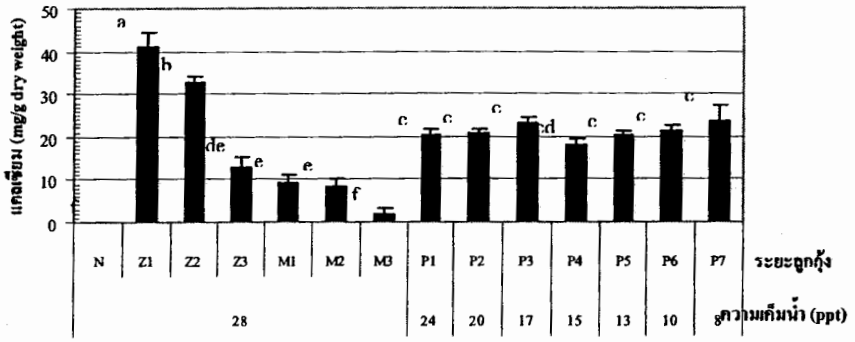
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

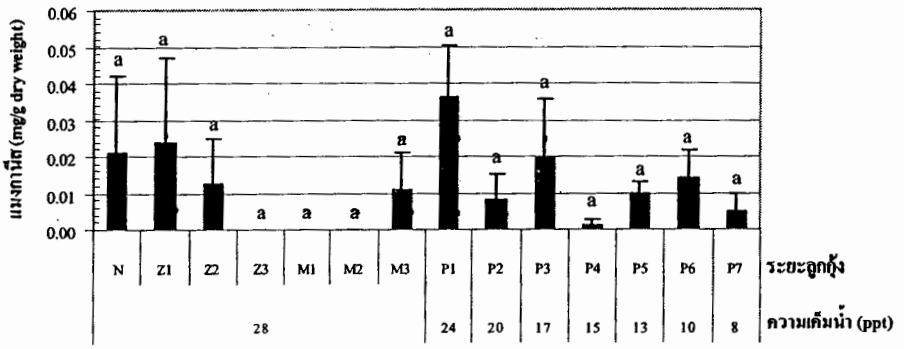
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 44



ภาพที่ 45



ภาพที่ 46

ภาพที่ 44-46 ปริมาณฟอสฟอรัส (ภาพที่ 44) แคลเซียม (ภาพที่ 45) และแมงกานีส (ภาพที่ 46) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิสและโพสลาวาภายใต้ความเค็มน้ำ 28-8 ppt

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

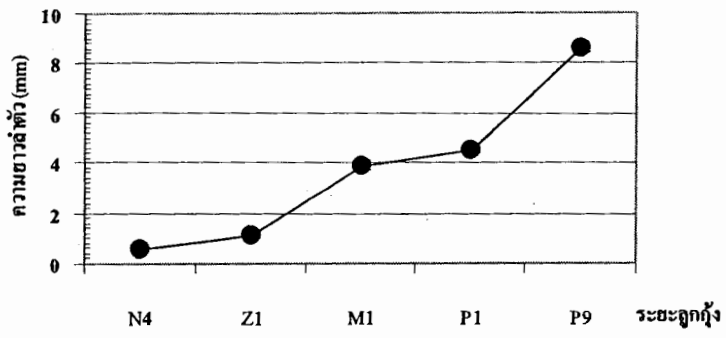
4. การเจริญเติบโต

ลูกกุ้งขาวมีความยาวลำตัว (Total length) เพิ่มขึ้นตามระยะการพัฒนาการ โดยระยะนอเพลียส 4 มีความยาวลำตัวเริ่มต้น 0.56 ± 0.02 มิลลิเมตร หลังจากนั้นเพิ่มขึ้น 33 %, 590 %, 700 % และ 1,425 % เมื่อลูกกุ้งเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 (1.08± 0.03 มิลลิเมตร), ไมซิส 1 (3.86± 0.20 มิลลิเมตร), โพสลาวา 1 (4.51± 0.06 มิลลิเมตร) และโพสลาวา 7 (8.55± 0.13 มิลลิเมตร) ตามลำดับ (ตารางที่ 2 ภาพที่ 47) ขณะที่ลูกกุ้งในระยะโพสลาวา 1 มีน้ำหนักเริ่มต้น 0.63 ± 0.06 มิลลิกรัม เมื่อเข้าสู่ระยะโพสลาวา 7 มีน้ำหนัก 3.65 ± 0.13 มิลลิกรัม (ตารางที่ 2) เพิ่มขึ้น 482 %

ตารางที่ 2 ความยาวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 7 เมื่อทำการอนุบาลที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 28-8 ppt

ระยะลูกกุ้ง	ความยาว (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (มิลลิกรัม)
นอเพลียส 4	0.56 ± 0.02	-
ซูเอีย 1	1.08± 0.03	-
ไมซิส 1	3.86± 0.20	-
โพสลาวา 1	4.51± 0.06	0.63 ± 0.06
โพสลาวา 7	8.55± 0.13	3.65 ± 0.13

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 47 ความยาวลำตัวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 7 เมื่อทำการอนุบาลที่ความหนาแน่น 100 ตัว/ลิตร ภายใต้การลดระดับความเค็มน้ำ 28-8 ppt

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

5. คุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง

จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำในการอนุบาลลูกกุ้งขาวพบว่า ความเค็มน้ำอยู่ในช่วง 28-8 ppt ความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 48-15 ms ความเป็นกรด - ด่าง มีค่า 8.1-8.2 ตลอดการอนุบาล อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 28.3-30.0 องศาเซลเซียส ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่า 4.5-5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 3) ส่วนแอมโมเนียมีค่าไม่สูงกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนไตรต์ มีค่าไม่สูงกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3 คุณภาพน้ำระหว่างการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) (ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน)

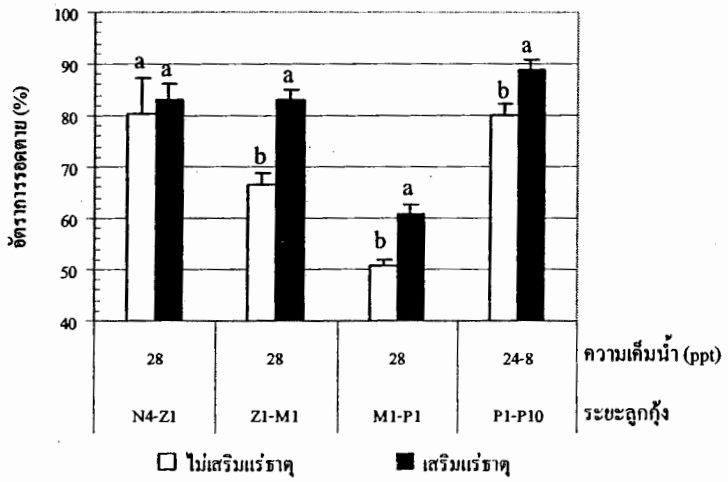
ระยะลูกกุ้ง		ความเค็มน้ำ (ppt)	ความนำไฟฟ้า (mS)	อุณหภูมิ (°C)	ความเป็นกรด - ด่าง	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/l)
นอเพลียส	4	28.6±0.00	48.68±0.11	30.02±0.20	8.12±0.01	4.50±0.09
ซูเอีย	1	28.32±0.05	47.24±0.10	28.92±0.12	8.17±0.00	4.90±0.08
	2	28.23±0.05	46.40±0.09	28.23±0.15	8.13±0.00	5.16±0.12
	3	28.05±0.05	46.56±0.16	28.65±0.25	8.13±0.00	4.77±0.10
ไมซิส	1	27.84±0.04	46.06±0.10	28.47±0.09	8.09±0.00	4.94±0.08
	2	27.67±0.03	46.12±0.09	28.80±0.10	8.11±0.00	5.04±0.11
	3	27.45±0.10	46.11±0.07	29.20±0.22	8.13±0.01	4.80±0.05
โพสลาวา	1	24.47±0.03	41.26±0.11	28.77±0.09	8.13±0.01	4.85±0.04
	2	20.18±0.17	33.20±1.72	28.96±0.16	8.08±0.04	4.94±0.09
	3	17.15±0.05	28.42±0.17	28.95±0.35	8.06±0.09	5.14±0.03
	4	15.20±0.07	26.86±0.18	28.85±0.26	8.17±0.03	5.21±0.13
	5	12.96±0.04	22.97±0.11	28.31±0.16	8.14±0.01	5.35±0.08
	6	9.80±0.00	17.86±0.00	28.45±0.05	8.08±0.02	5.48±0.17
	7	8.08±0.19	14.86±0.39	28.93±0.22	8.13±0.02	5.56±0.09

การทดลองที่ 3 ผลของการเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลลูกกุ้งขาว

จากการทดลองอนุบาลลูกกุ้งขาวด้วยการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล โดยในการเสริมแร่ธาตุนั้น ระยะนอเพลียสเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนต โพแทสเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ ระยะซูเอียเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมคลอไรด์ ระยะไมซิสเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคลอไรด์ และระยะโพสลาวาเสริมโพแทสเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ปรากฏผลดังนี้

1. อัตราการรอดตาย

การเสริมแร่ธาตุมีผลต่ออัตราการรอดตายของลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย ไมซิส และโพสลาวา โดยลูกกุ้งที่มีการเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล มีอัตราการรอดตายสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สำหรับลูกกุ้งระยะนอเพลียสนั้น การเสริมแร่ธาตุมีแนวโน้มทำให้อัตราการรอดตายของลูกกุ้งสูงขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ภาพที่ 48)



ภาพที่ 48 อัตราการรอดตายของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย ไมซิส และโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

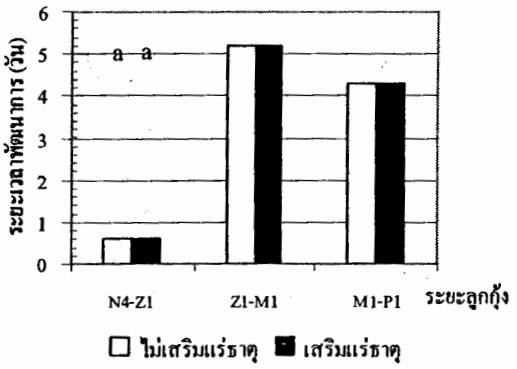
- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะของลูกกุ้ง

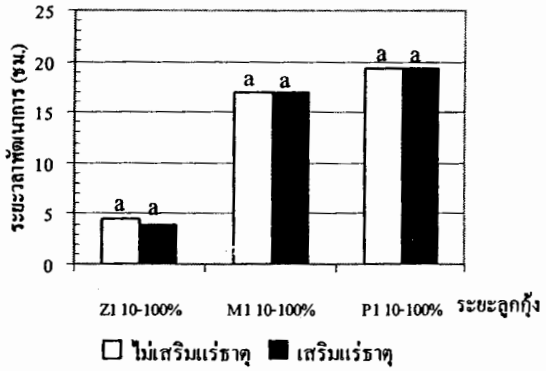
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2. ระยะเวลาพัฒนาการ

การเสริมแร่ธาตุไม่มีผลต่อช่วงเวลาที่ใช้ในการพัฒนาการของลูกกุ้งทุกระยะที่ 100% ($p>0.05$) (ภาพที่ 49) และลูกกุ้งใช้เวลาในการพัฒนาการโดยนับจากเริ่มเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 10 % จนกระทั่งครบ 100 % จากเริ่มเข้าสู่ระยะไมซิส 1 10 % จนกระทั่งครบ 100 % และจากเริ่มเข้าสู่ระยะโพสลาวา 1 10 % จนกระทั่งครบ 100 % (ภาพที่ 50) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เช่นกัน ทั้งชุดการทดลองที่มีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล



ภาพที่ 49



ภาพที่ 50

ภาพที่ 49-50 ระยะเวลาพัฒนาการของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส ซูเอีย และไมซิส (ภาพที่ 49) และช่วงเวลาที่ใช้ในการพัฒนาการเข้าสู่ระยะซูเอีย 1 ไมซิส 1 และโพสลาวา 1 (ภาพที่ 50) เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

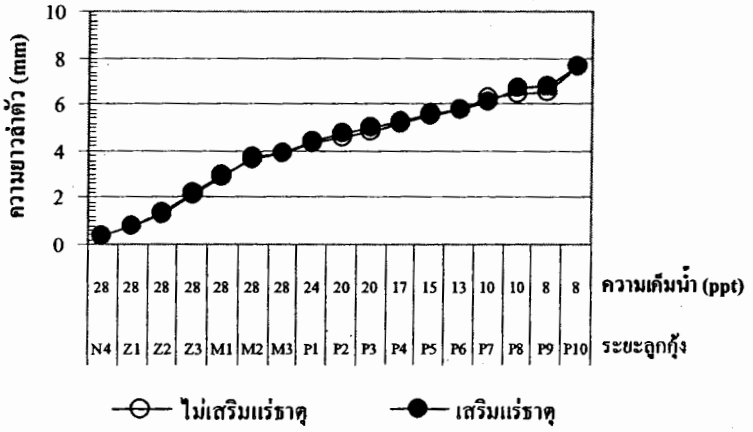
- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะของลูกกุ้ง
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3. การเจริญเติบโต

3.1 ความยาวลำตัว

ลูกกุ้งขาวทั้งที่มีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล มีความยาวลำตัวเพิ่มขึ้นตามระยะการพัฒนาการ โดยในระยะนอเพลียส 4 ลูกกุ้งมีความยาวลำตัวเฉลี่ย 0.37 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นเป็น 0.74 มิลลิเมตร 3.31 มิลลิเมตร 4.44 มิลลิเมตร และ 7.66 มิลลิเมตร ในระยะซูเอีย 1 ไมซิส 1 โพสลาวา 1 และโพสลาวา 10 ตามลำดับ โดยมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการ

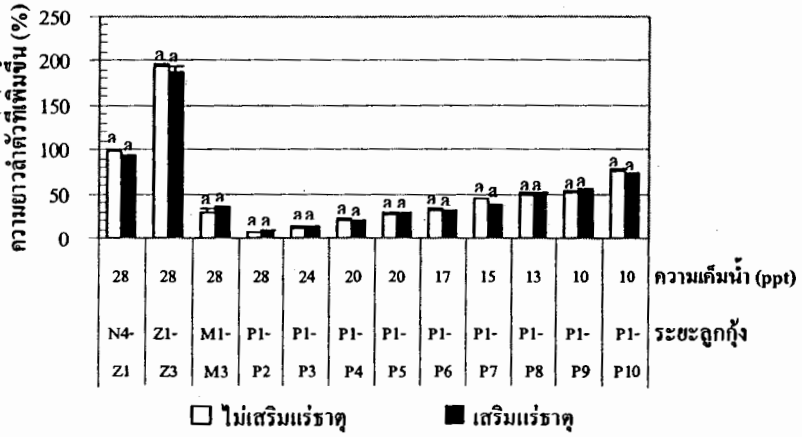
ทดลอง (ภาพที่ 51) และการเสริมแร่ธาตุไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความยาวลำตัวที่เพิ่มขึ้นในลูกกุ้งทุกระยะ ($p>0.05$) (ภาพที่ 52)



ภาพที่ 51 ความยาวลำตัวของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา



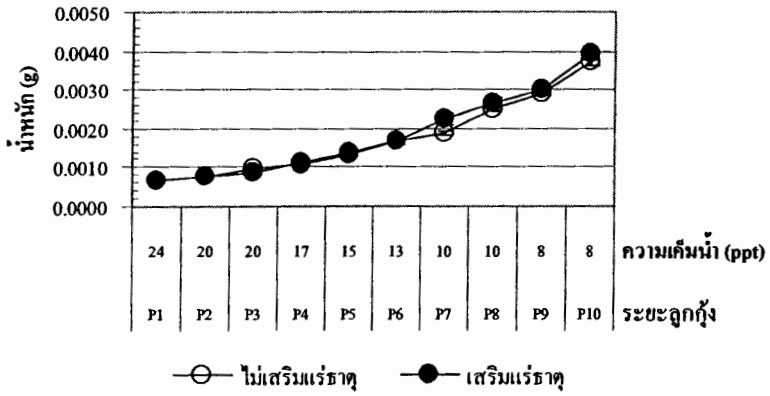
ภาพที่ 52 ความยาวลำตัวที่เพิ่มขึ้นของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในแต่ละระยะตั้งแต่ระยะนอเพลียส ถึงโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะของลูกกุ้ง
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

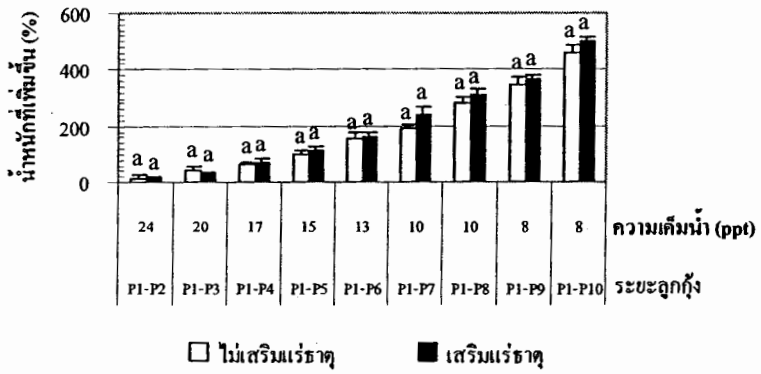
3.2 น้ำหนัก

การอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาช่วงเวลา 10 วัน โดยมีการปรับลดความเค็มน้ำจาก 24 ppt ลดเหลือ 8 ppt พบว่าน้ำหนักของลูกกุ้งที่มีการเสริมแร่ธาตุในการอนุบาล มีแนวโน้มสูงกว่าลูกกุ้งชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุเล็กน้อย ตั้งแต่ระยะโพสลาวา 7 เป็นต้นไป (ภาพที่ 53) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกุ้งกลุ่มที่มีการเสริมแร่ธาตุสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุในระยะโพสลาวา 4 ถึง 10 แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ภาพที่ 54)



ภาพที่ 53 น้ำหนักของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา 1 ถึง 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 54 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา 1 ถึง10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

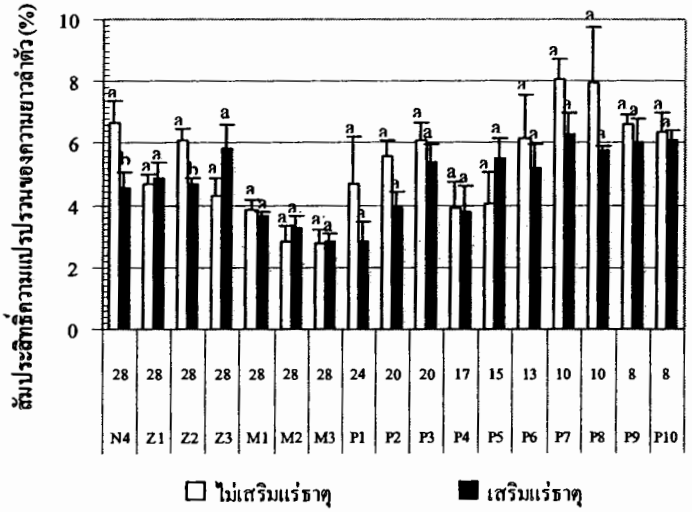
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะของลูกกุ้ง

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4. สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัว

ถึงแม้ว่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัวจะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่การเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลส่วนใหญ่มีผลทำให้สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัวลูกกุ้งมีค่าต่ำกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ เมื่อมีการวิเคราะห์ข้อมูลตรวจสอบทุกระยะย่อยของลูกกุ้งแล้ว พบว่า การเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียส 4 และ ซูเอีย 2 มีผลให้สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัวต่ำกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ภาพที่ 55)



ภาพที่ 55 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความยาวลำตัวลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส 4 ถึงโพสลาวา 10 เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- N = นอเพลียส Z = ซูเอีย M = ไมซิส P = โพสลาวา

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะของลูกกุ้ง

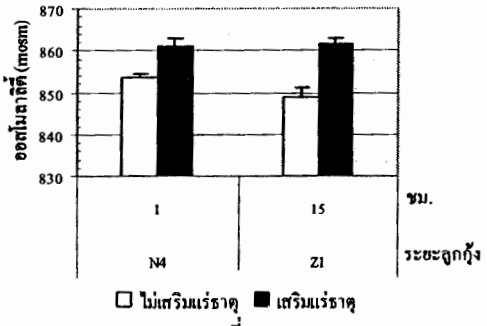
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

5. การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

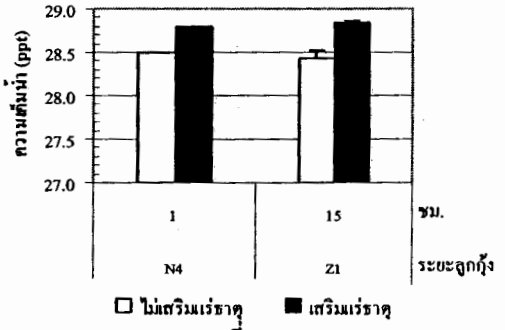
5.1 ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต ความเค็มน้ำ ความนำไฟฟ้า และความเป็นกรด - ด่าง

5.1.1 ระยะนอเพลียส

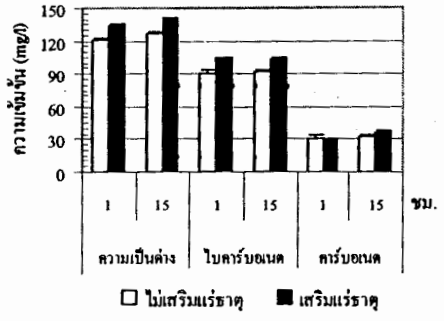
จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส พบว่า ออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 56) และความเค็มน้ำ (ภาพที่ 57) ของน้ำชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุค่อนข้างคงที่ ขณะที่ชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าลดลง ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต (ภาพที่ 58) ค่อนข้างคงที่ แต่คาร์บอเนตของน้ำชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 59) และความเป็นกรด - ด่าง (ภาพที่ 60) มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป ทั้งในน้ำชุดที่มีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ



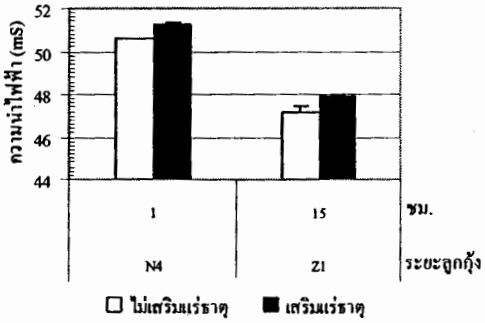
ภาพที่ 56



ภาพที่ 57



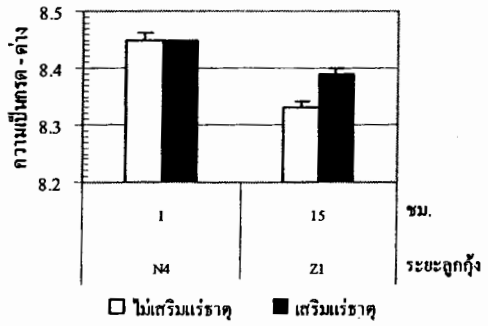
ภาพที่ 58



ภาพที่ 59

ภาพที่ 56-59 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 56) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 57) ความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต (ภาพที่ 58) ความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 59) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

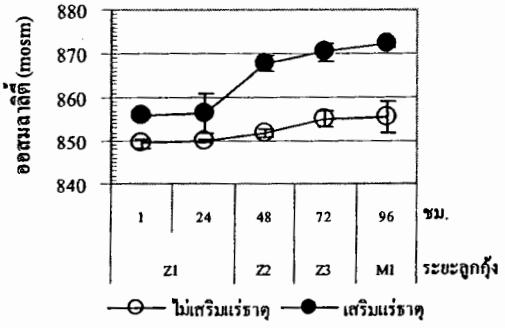


ภาพที่ 60 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด — ด่าง ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

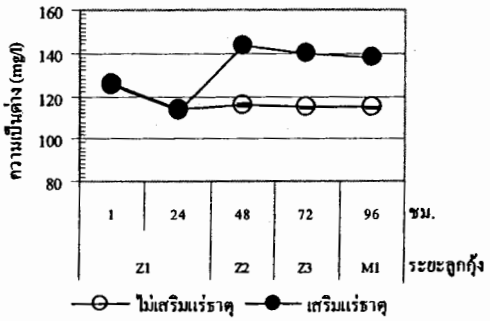
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

5.1.2 ระยะซูเอีย

จากการทดลองอนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอียพบว่า เมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไปประมาณ 96 ชั่วโมง ค่าออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 61) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 62) ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 63) คาร์บอเนต (ภาพที่ 64) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 65) และความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 66) ของน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างต่อเนื่องและรักษาระดับได้ค่อนข้างคงที่ ส่วนความเป็นกรด – ด่างของน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 67)



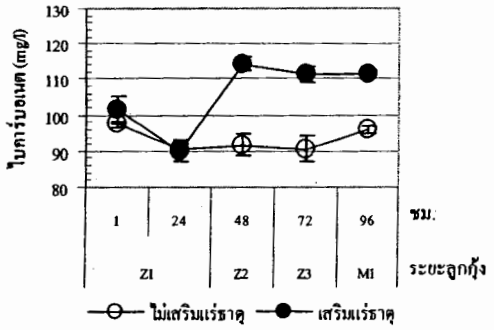
ภาพที่ 61



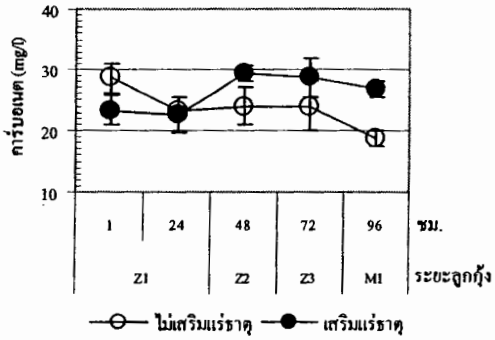
ภาพที่ 62

ภาพที่ 61-62 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 61) และความเป็นด่าง (ภาพที่ 62) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

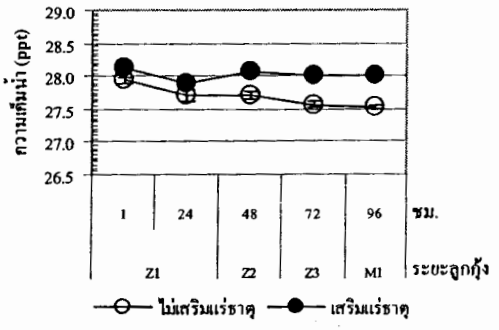
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



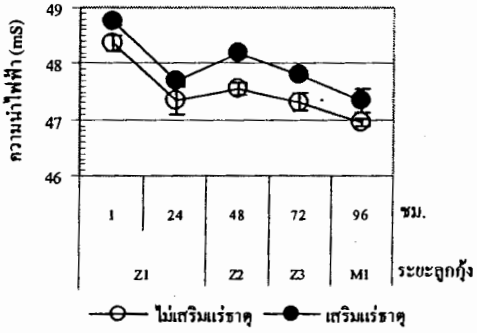
ภาพที่ 63



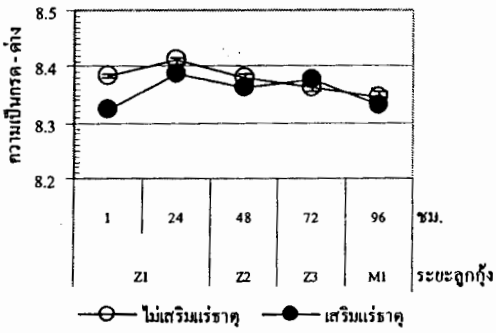
ภาพที่ 64



ภาพที่ 65



ภาพที่ 66



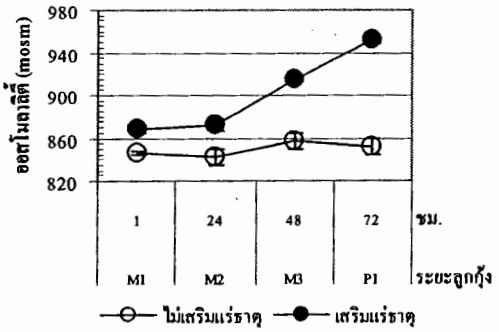
ภาพที่ 67

ภาพที่ 63-67 การเปลี่ยนแปลงไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 63) คาร์บอเนต (ภาพที่ 64) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 65) ความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 66) และความเป็นกรด - ด่าง (ภาพที่ 67) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

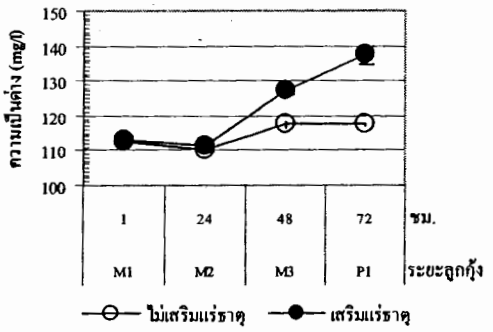
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

5.1.3 ระยะไมซิส

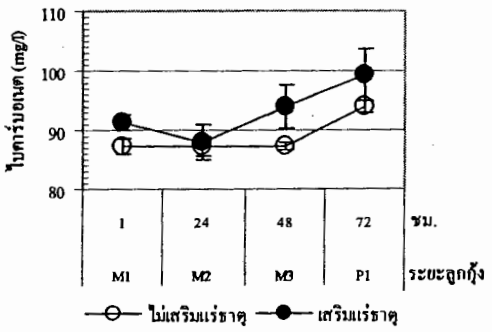
ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะไมซิส พบว่า ออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 68) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 69) ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 70) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 71) และความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 72) ของน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุสูงกว่าน้ำที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุตลอดการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง และความเค็มน้ำจะมีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจนหลังชั่วโมงที่ 48 เป็นต้นไป ส่วนคาร์บอเนต (ภาพที่ 73) ในชั่วโมงที่ 0 ถึง 48 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่ชั่วโมงที่ 72 น้ำที่มีที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุจะมีค่าลดลง และความเป็นกรด - ด่าง ในน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุเล็กน้อยในช่วงแรก แต่มีค่าใกล้เคียงกันในชั่วโมงที่ 48 ถึง 72 0 (ภาพที่ 74)



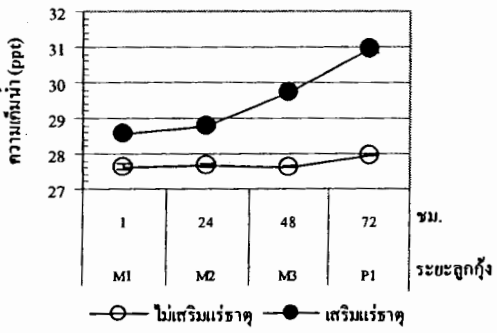
ภาพที่ 68



ภาพที่ 69



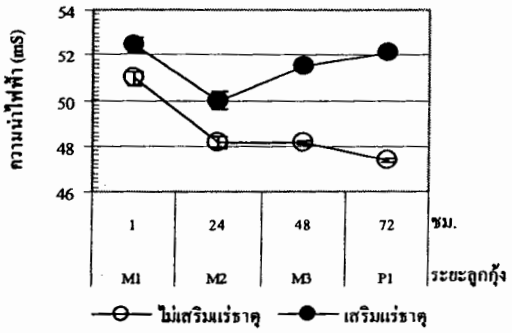
ภาพที่ 70



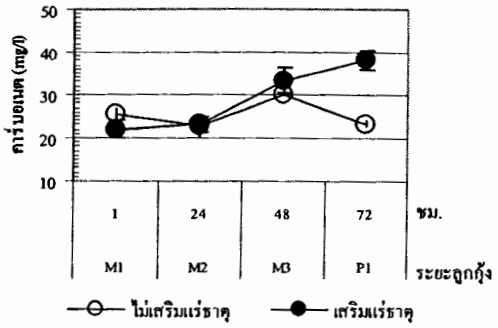
ภาพที่ 71

ภาพที่ 68-71 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 68) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 69) ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 70) และความเค็มน้ำ (ภาพที่ 71) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

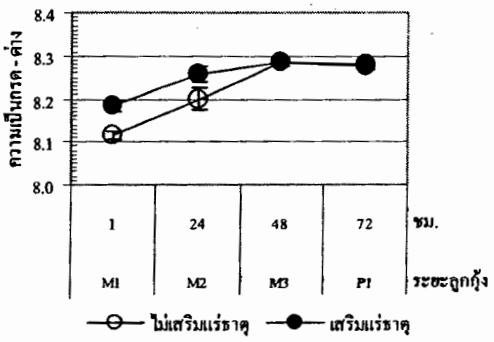
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 72



ภาพที่ 73



ภาพที่ 74

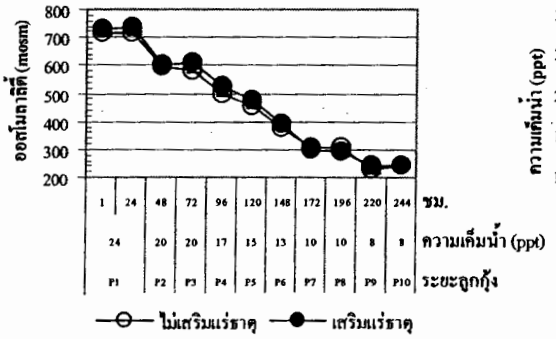
ภาพที่ 72-74 การเปลี่ยนแปลงความน้ำไฟฟ้า (ภาพที่ 72) คาร์บอเนต (ภาพที่ 73) และความเป็นกรด - ด่าง (ภาพที่ 74) ของน้ำความเค็ม 28 ppt ที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

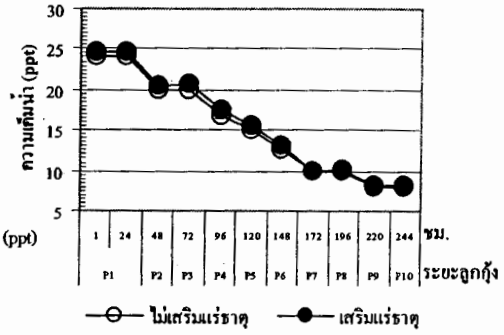
5.1.4 ระยะโพสลาวา

จากการอนุบาลลูกกุ้งระยะโพสลาวาด้วยการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุเป็นเวลา 10 วัน และทำการปรับลดความเค็มน้ำจาก 24 ppt ลดเหลือ 8 ppt พบว่า ออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 75) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 76) และความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 77) มีค่าลดลงตามการปรับลดความเค็มน้ำและใกล้เคียงกันตลอดการอนุบาลทั้ง 2 ชุดการทดลอง ส่วนความเป็นด่าง (ภาพที่ 78) และความเป็นกรด - ด่าง (ภาพที่ 79) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ขณะที่ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 80) ของน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าน้ำที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุช่วงลูกกุ้งระยะโพสลาวา 1 ถึง 3 และตั้งแต่ระยะโพสลาวา 4 เป็นต้นไป ความเป็นด่าง ความเป็นกรด – ด่าง และไบคาร์บอเนตของน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าต่ำกว่าน้ำที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ อย่างไรก็ตามในระยะโพสลาวา 10 ไบคาร์บอเนตมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง สำหรับคาร์บอเนต (ภาพที่ 81) ในน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่า

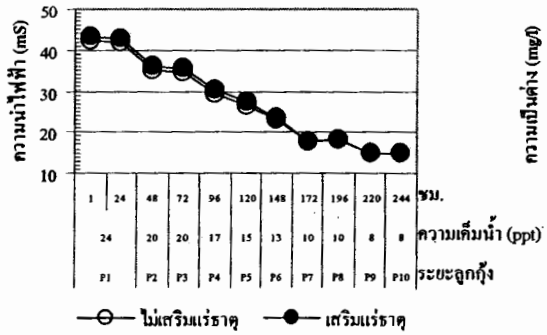
ต่ำกว่าน้ำที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุตลอดการอนุบาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่ระยะโพสลาวา 4 เป็นต้นไปไม่พบคาร์บอเนตเลยในน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุ



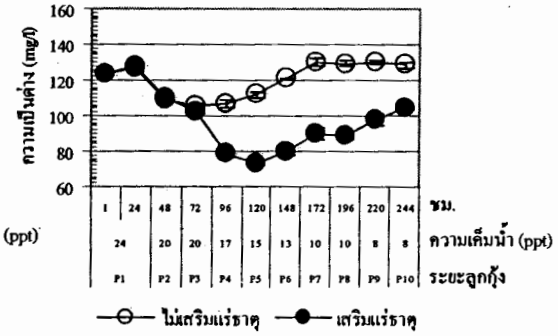
ภาพที่ 75



ภาพที่ 76



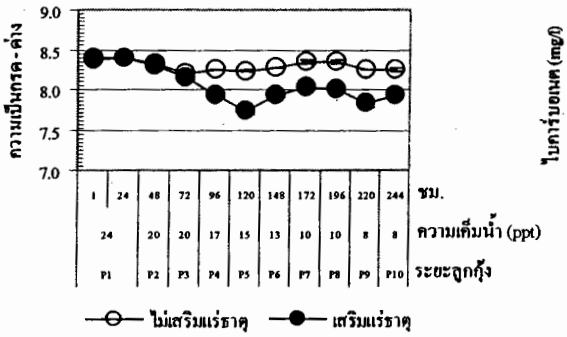
ภาพที่ 77



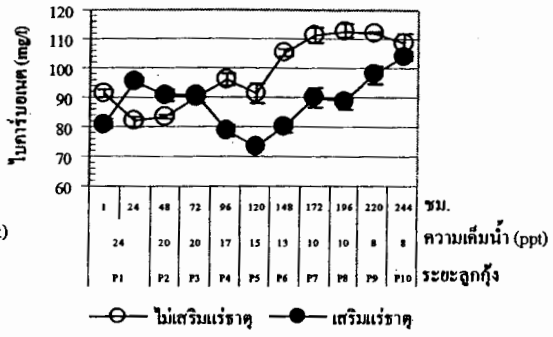
ภาพที่ 78

ภาพที่ 75-78 การเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตี้ (ภาพที่ 75) ความเค็มน้ำ (ภาพที่ 76) ความนำไฟฟ้า (ภาพที่ 77) ความเป็นด่าง (ภาพที่ 78) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

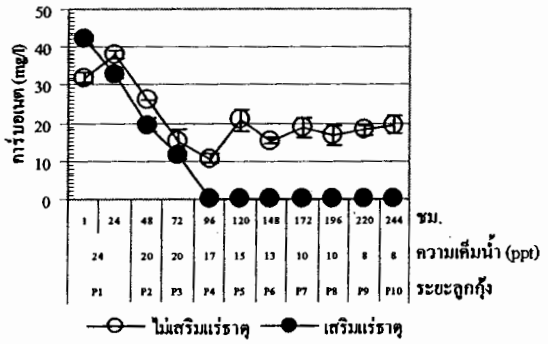
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 79



ภาพที่ 80



ภาพที่ 81

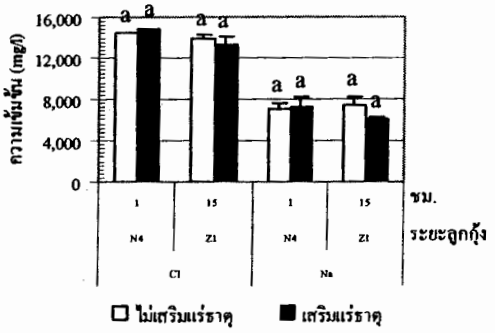
ภาพที่ 79-81 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง (ภาพที่ 79) ไบคาร์บอเนต (ภาพที่ 80) และคาร์บอเนต (ภาพที่ 81) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวาเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

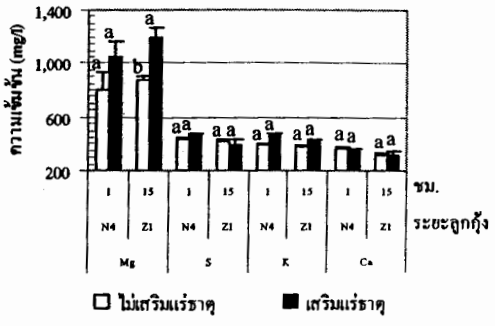
5.2 แร่ธาตุ

5.2.1 ระยะนอเพลียส

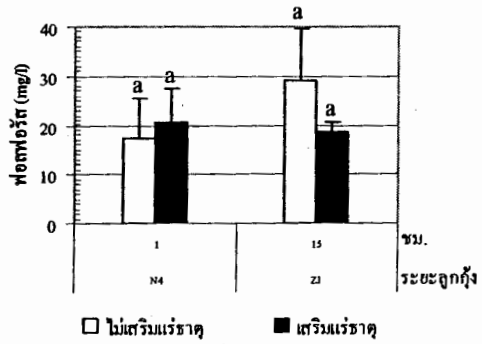
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุของน้ำที่ใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียสเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า คลอรีน และโซเดียม (ภาพที่ 82) กำมะถัน โพแทสเซียม แคลเซียม (ภาพที่ 82) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 84) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่ในชั่วโมงที่ 15 แมกนีเซียม (ภาพที่ 83) ในชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 82



ภาพที่ 83



ภาพที่ 84

ภาพที่ 82-84 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม (ภาพที่ 82) แมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 83) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 84) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

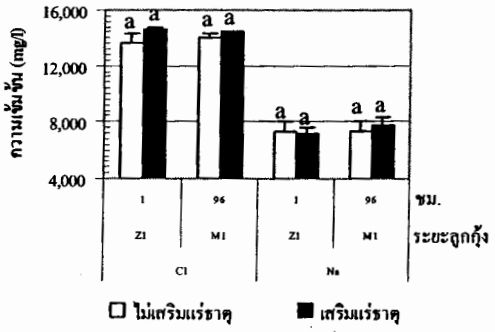
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ในชั่วโมงที่ 1 และ 15 ภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

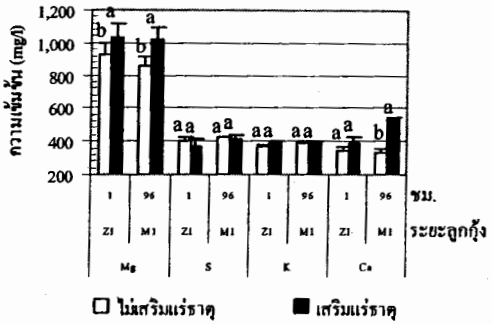
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

5.2.2 ระยะซูเอีย

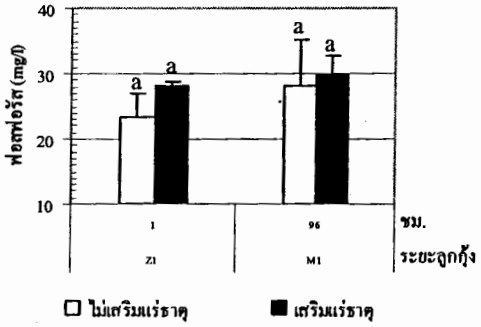
จากการทดลองอนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอียเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล พบว่า เมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไปประมาณ 96 ชั่วโมง คลอรีน โซเดียม (ภาพที่ 85) แมกนีเซียม แคลเซียม (ภาพที่ 86) ในชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่า โดยแมกนีเซียมชั่วโมงที่ 1 และ 96 และแคลเซียมชั่วโมงที่ 96 มีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนการเปลี่ยนแปลงของกำมะถัน และโพแทสเซียม (ภาพที่ 86) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 87) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติทั้ง 2 ชุดการทดลอง ($p>0.05$)



ภาพที่ 85



ภาพที่ 86



ภาพที่ 87

ภาพที่ 85-87 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม (ภาพที่ 85) แมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 86) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 87) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

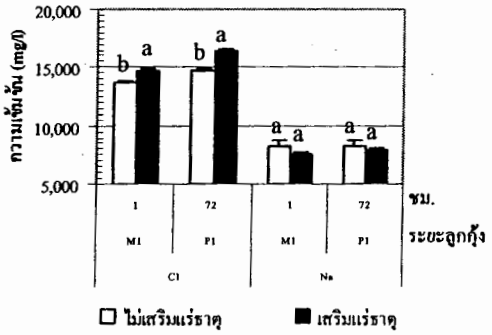
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ในชั่วโมงที่ 1 และ 96 ภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

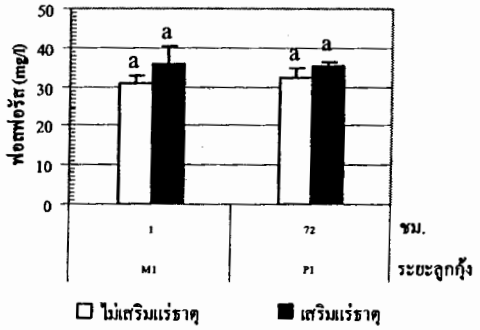
5.2.3 ระยะไมซิส

การเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล พบว่า คลอรีน (ภาพที่ 88) ในชั่วโมงที่ 1 และ 72 และแมกนีเซียม ชั่วโมงที่ 72 (ภาพที่ 89) ในชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขณะที่โซเดียม (ภาพที่ 90) กำมะถัน โพแทสเซียม

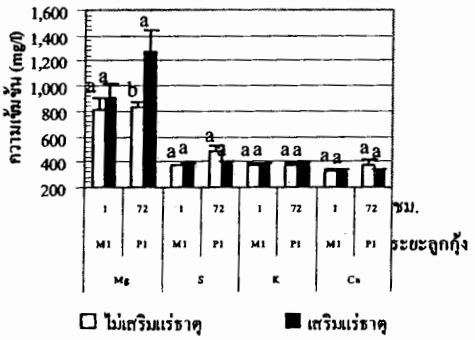
และแคลเซียม (ภาพที่ 90) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 89) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติทั้ง 2 ชุดการทดลอง ($p>0.05$)



ภาพที่ 88



ภาพที่ 89



ภาพที่ 90

ภาพที่ 88-90 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน และโซเดียม (ภาพที่ 88) ฟอสฟอรัส (ภาพที่ 89) แมกนีเซียม กำมะถัน โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 90) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

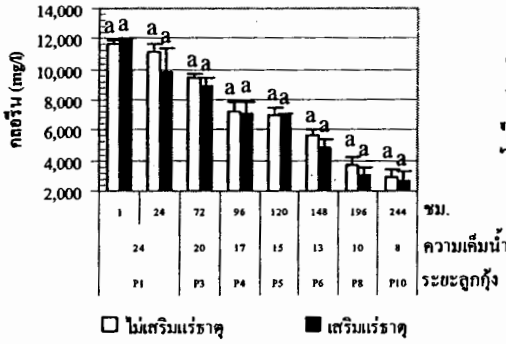
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ในชั่วโมงที่ 1 และ 72 ภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

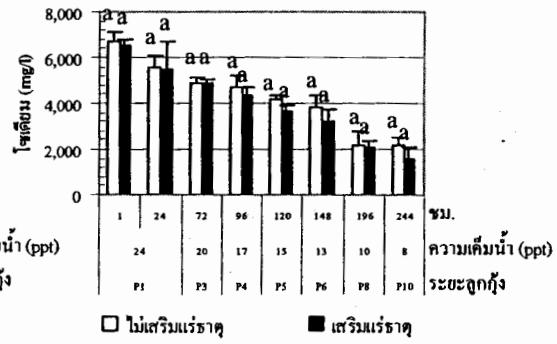
5.2.4 ระยะโพสลาวา

ปริมาณแร่ธาตุในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล เมื่อเวลาผ่านไป 244 ชั่วโมง พบว่า คลอรีน (ภาพที่ 91) โซเดียม (ภาพที่ 92) แมกนีเซียม (ภาพที่ 93) และกำมะถัน (ภาพที่ 94) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

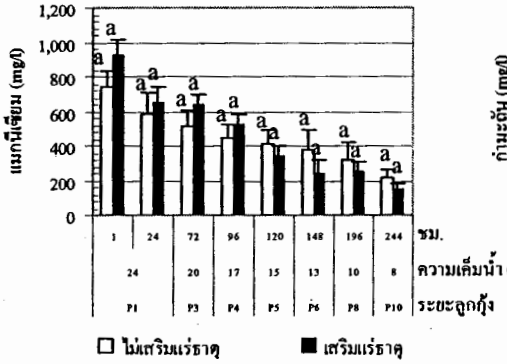
ตลอดการอนุบาลทั้ง 2 ชุดการทดลอง ขณะที่แคลเซียม (ภาพที่ 95) ของชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุตั้งแต่ชั่วโมงที่ 72 ถึง 244 มีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สำหรับโพแทสเซียม (ภาพที่ 96) ของชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่า ชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในชั่วโมงที่ 96 ถึง 244 ส่วนฟอสฟอรัส (ภาพที่ 97) พบว่าในชั่วโมงที่ 72, 96 และ 244 ชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุ มีฟอสฟอรัสสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



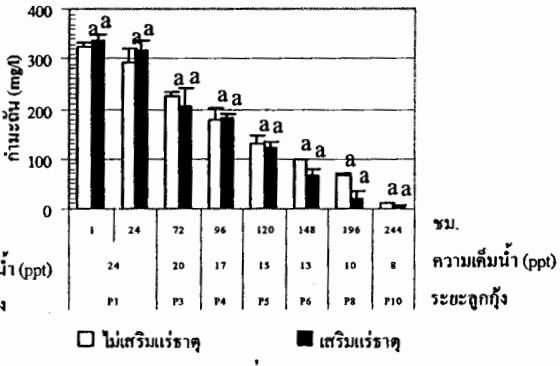
ภาพที่ 91



ภาพที่ 92



ภาพที่ 93



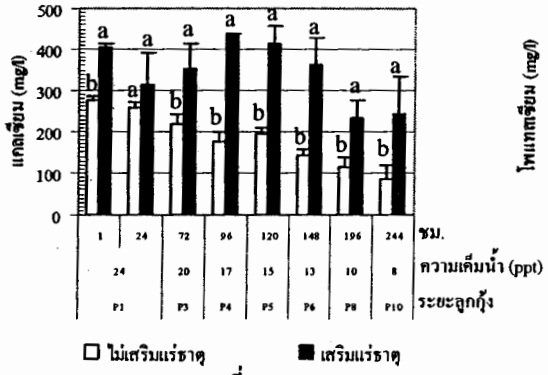
ภาพที่ 94

ภาพที่ 91-94 การเปลี่ยนแปลงคลอรีน (ภาพที่ 91) โซเดียม (ภาพที่ 92) แมกนีเซียม (ภาพที่ 93) และกำมะถัน (ภาพที่ 94) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวาเมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

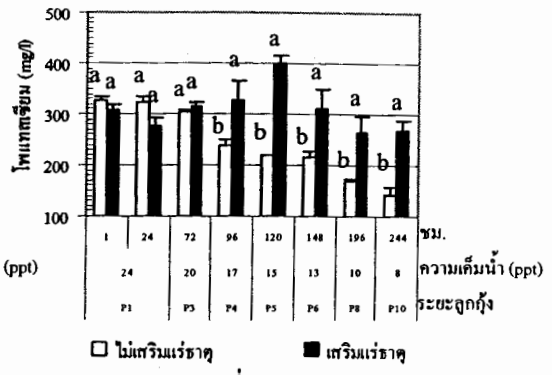
<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะการพัฒนาการ

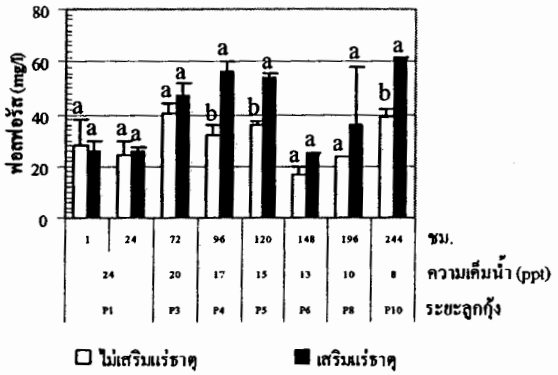
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 95



ภาพที่ 96



ภาพที่ 97

ภาพที่ 95-97 การเปลี่ยนแปลงแคลเซียม (ภาพที่ 95) โพแทสเซียม (ภาพที่ 96) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 97) ของน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบภายในแต่ละระยะการพัฒนาการ

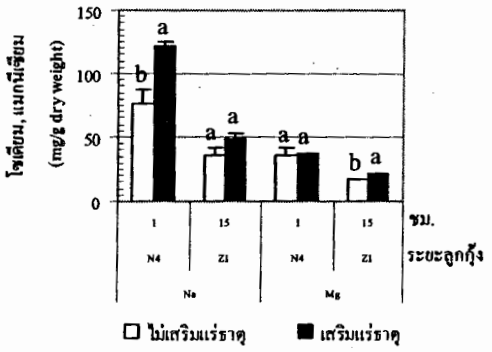
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

6. ปริมาณแร่ธาตุในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

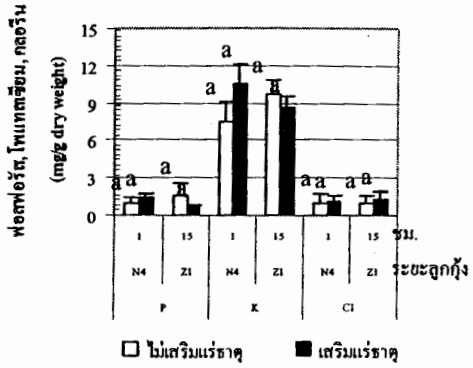
6.1 ระยะนอเพลียส

ปริมาณโซเดียม และแมกนีเซียม (ภาพที่ 98) ในลูกกุ้งระยะนอเพลียสชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุในการอนุบาลมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ โดยเฉพาะปริมาณโซเดียมในระยะนอเพลียส 4 และแมกนีเซียมในระยะซูเอีย 1 มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขณะที่ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และคลอรีน (ภาพที่ 99) มีค่าใกล้เคียงกัน และไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

ทั้ง 2 ชุดการทดลอง ($p>0.05$) และจากการตรวจสอบไม่พบแคลเซียมในลูกกุ้งทั้งชุดที่มีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล



ภาพที่ 98



ภาพที่ 99

ภาพที่ 98-99 ปริมาณโซเดียม และแมกนีเซียม (ภาพที่ 98) ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และคลอรีน (ภาพที่ 99) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะนอเพลียส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

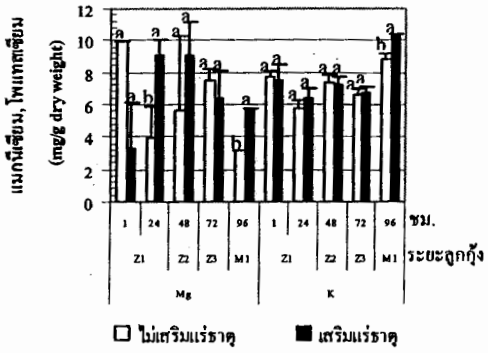
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ในชั่วโมงที่ 1 และ 15 ภายในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ

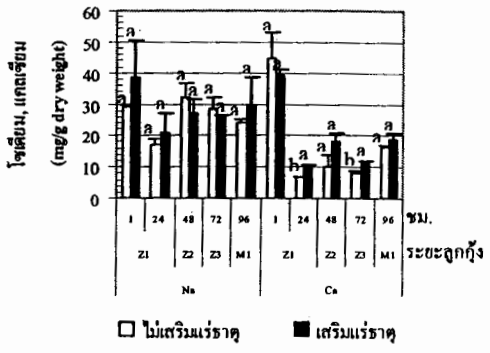
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

6.2 ระยะซูเอีย

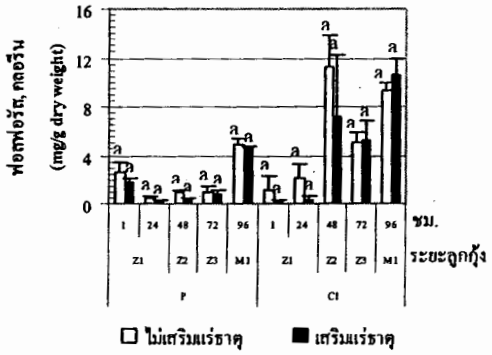
ปริมาณแมกนีเซียม และโพแทสเซียม (ภาพที่ 100) โดยเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่แมกนีเซียม ระยะซูเอีย 1 (ชั่วโมงที่ 24) และไมซิส 1 และโพแทสเซียม ระยะไมซิส 1 ในลูกกุ้งที่มีการเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนแคลเซียม (ภาพที่ 101) พบปริมาณสูงมาก (เฉลี่ย 40 มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง) ในระยะซูเอีย 1 (ชั่วโมงที่ 1) จากนั้นมีค่าลดลง และใกล้เคียงกันจนถึงระยะไมซิส 1 และชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุพบแคลเซียมสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุโดยเฉพาะระยะซูเอีย 1 (ชั่วโมงที่ 24) และระยะซูเอีย 3 ที่พบแคลเซียมสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขณะที่โซเดียม (ภาพที่ 101) ฟอสฟอรัส และคลอรีน (ภาพที่ 102) มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ทั้ง 2 ชุดการทดลอง



ภาพที่ 100



ภาพที่ 101



ภาพที่ 102

ภาพที่ 100-102 ปริมาณแมกนีเซียม และโพแทสเซียม (ภาพที่ 100) โซเดียม และแคลเซียม (ภาพที่ 101) ฟอสฟอรัส และคลอรีน (ภาพที่ 102)ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะซูเอีย เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

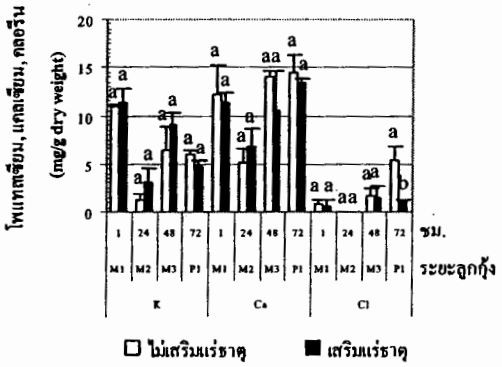
- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ภายในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละระยะการพัฒนาการ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

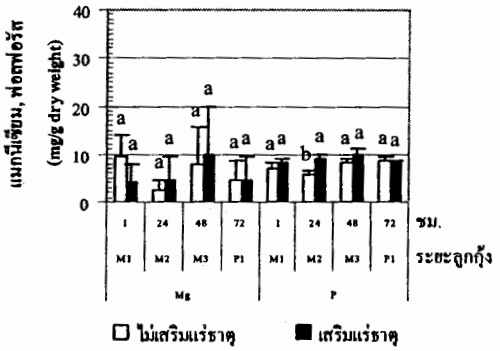
6.3 ระยะไมซิส

โพแทสเซียม และแคลเซียม (ภาพที่ 103) และแมกนีเซียม (ภาพที่ 104) มีค่าใกล้เคียงกันและไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ในทุกระยะการพัฒนาการทั้ง 2 ชุดการทดลอง ส่วนคลอรีน(ภาพที่ 105) พบว่า ระยะโพสลาวา 1 ชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขณะที่ในระยะไมซิส 2 ฟอสฟอรัส (ภาพที่ 104) ของชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุใน

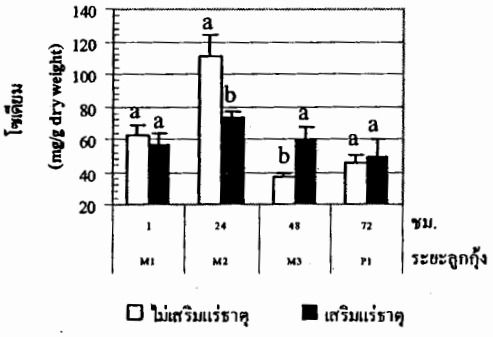
ระบบอนุบาล มีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และโซเดียม (ภาพที่ 105) โดยเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในระยะไมซิส 2 ชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุพบโซเดียมสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในทางกลับกันระยะไมซิส 3 ลูกกุ้งชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีโซเดียมสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 103



ภาพที่ 104



ภาพที่ 105

ภาพที่ 103-105 ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และคลอรีน (ภาพที่ 103) แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 104) และโซเดียม (ภาพที่ 105) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะไมซิส เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

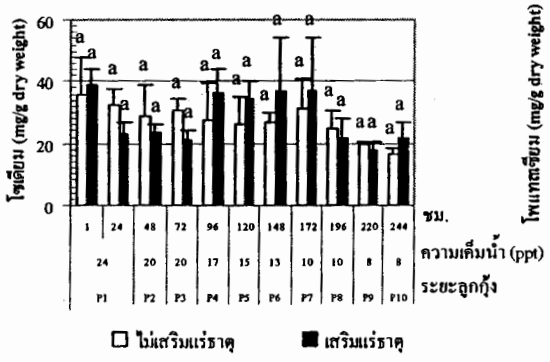
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ภายในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละระยะการพัฒนาการ

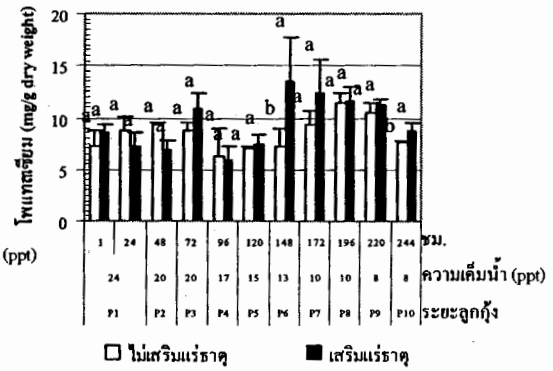
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

6.4 ระยะโพสลาวา

โดยภาพรวมปริมาณแร่ธาตุส่วนใหญ่ในลูกกุ้งระยะโพสลาวาค่อนข้างคงที่ และใกล้เคียงกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง โดยโซเดียม (ภาพที่ 106) มีค่าเฉลี่ย 27.89 มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง สำหรับโพแทสเซียม (ภาพที่ 107) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 108) โดยเฉลี่ยในชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่า โดยพบโพแทสเซียมในชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ที่ระยะโพสลาวา 6 และ 10 ส่วนฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะโพสลาวา 6 และ 7 แตกต่างไปจากแคลเซียม (ภาพที่ 109) ที่พบว่า โดยภาพรวมชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุมีปริมาณแคลเซียมสูงกว่า และมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในระยะโพสลาวา 5 คลอรีน (ภาพที่ 110) โดยภาพรวมมีปริมาณใกล้เคียงกัน ยกเว้นในระยะโพสลาวา 2 และ 5 ชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุพบคลอรีนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขณะที่ระยะโพสลาวา 7 ชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุกลับพบคลอรีนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และแมกนีเซียม (ภาพที่ 111) พบในปริมาณต่ำกว่าแร่ธาตุชนิดอื่น และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ทั้ง 2 ชุดการทดลอง



ภาพที่ 106



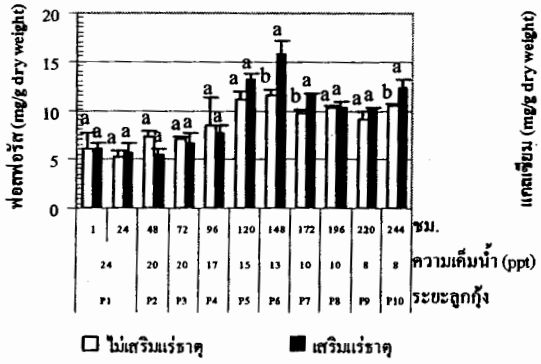
ภาพที่ 107

ภาพที่ 106-107 ปริมาณโซเดียม (ภาพที่ 106) และโพแทสเซียม (ภาพที่ 107) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

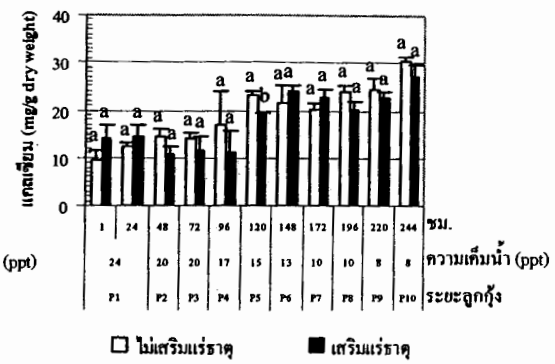
<u>หมายเหตุ</u> - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ภายในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละระยะการพัฒนาการ

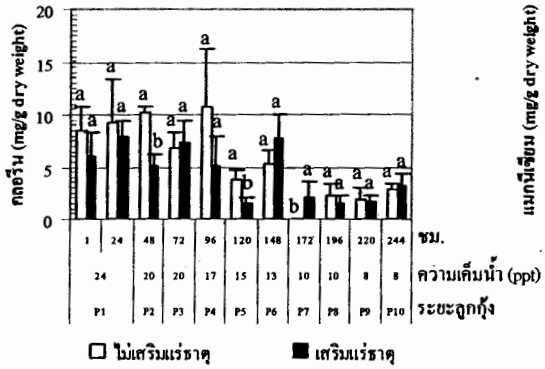
- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



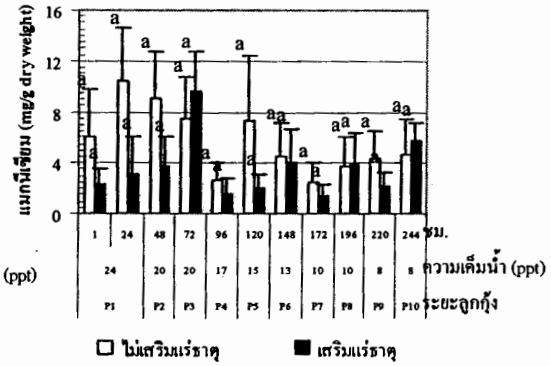
ภาพที่ 108



ภาพที่ 109



ภาพที่ 110



ภาพที่ 111

ภาพที่ 108-111 ปริมาณฟอสฟอรัส (ภาพที่ 108) แคลเซียม (ภาพที่ 109) คลอรีน (ภาพที่ 110) และแมกนีเซียม (ภาพที่ 111) ในลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาล

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

- ค่าทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ ภายในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละระยะการพัฒนาการ

- อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

7. คุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง

จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำในการอนุบาลลูกกุ้งขาวพบว่า อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 28 -31 องศาเซลเซียส และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีค่า 4.7-5.4 มิลลิกรัมต่อลิตร(ตารางที่ 4) ส่วนแอมโมเนียมีค่าไม่สูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนไตรต์ มีค่าไม่สูงกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการอนุบาล

ตารางที่ 4 คุณภาพน้ำระหว่างการอนุบาลลูกกุ้งขาว (*L. vannamei*) เมื่อมีการเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุ

ระยะลูกกุ้ง		อุณหภูมิ (°C)		ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/l)	
		เสริมแร่ธาตุ	ไม่เสริมแร่ธาตุ	เสริมแร่ธาตุ	ไม่เสริมแร่ธาตุ
นอเพลียส	4	30.00±0.82	29.75±0.82	4.84±0.05	4.77±0.03
ซูเอีย	1	29.87±0.19	29.73±0.11	4.75±0.06	4.77±0.05
	2	29.77±0.03	29.63±0.12	4.79±0.09	4.74±0.11
	3	29.47±0.03	29.30±0.15	4.71±0.06	4.72±0.10
ไมซิส	1	31.00±0.00	31.00±0.00	4.83±0.01	4.69±0.09
	2	28.63±0.09	28.23±0.23	4.81±0.06	4.79±0.10
	3	29.03±0.03	28.63±0.03	4.85±0.03	4.75±0.10
โพสลาวา	1	30.03±0.03	29.87±0.03	4.42±0.04	4.54±0.08
	2	29.23±0.03	29.00±0.06	4.79±0.03	4.86±0.04
	3	29.30±0.00	29.13±0.03	4.68±0.05	4.85±0.02
	4	28.63±0.03	28.53±0.03	4.76±0.07	4.93±0.02
	5	28.33±0.03	28.13±0.07	4.81±0.15	4.80±0.05
	6	28.17±0.07	28.00±0.06	4.91±0.04	4.87±0.06
	7	27.77±0.03	28.57±0.03	5.07±0.07	5.14±0.08
	8	27.20±0.00	27.00±0.06	5.33±0.03	5.35±0.09
	9	27.77±0.03	27.60±0.06	5.27±0.12	5.34±0.09
	10	27.83±0.03	27.73±0.09	5.34±0.03	5.37±0.04

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผล

1. การใช้และไม่ใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ

โดยภาพรวมการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการหายไปของอิออน เมื่อใช้กับน้ำความเค็มสูงมากกว่า 25 ppt โดยมีอิทธิพลหลักมาจากโซเดียมและแมกนีเซียม ที่มีค่าลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่ความเค็มน้ำ 25 ppt ชี้ให้เห็นว่าแคลเซียมไฮโปคลอไรด์มีการทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุดังกล่าวทำให้มีการตกตะกอนหรือเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปสารประกอบ ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของโซเดียม และแมกนีเซียมค่อนข้างมากในน้ำความเค็มสูง ๆ ซึ่งอาจจะไปมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การพัฒนาการ และระบบสรีระเคมีภายในร่างกายของลูกกุ้งได้

แคลเซียมไฮโปคลอไรด์มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ สามารถทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ ดังสมการด้านล่าง

$$Ca(OCl)_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2HOCl$$

ซึ่งสภาวะที่พีเอชในน้ำเป็นกรดนั้น แคลเซียมไฮโปคลอไรด์จะแตกตัว ให้แคลเซียมอิออน (Ca^{2+}) และกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) แต่ในสภาวะที่ค่าพีเอชในน้ำเป็นเบส จะแตกตัวให้แคลเซียมอิออน (Ca^{2+}) และไฮโปคลอไรด์อิออน (OCl^-) ไฮโปคลอไรด์อิออนนี้สามารถแตกตัวให้คลอไรด์อิออน (Cl^-) (ชุลีพร พุฒนวล, 2533, Newman, 2004) เนื่องจากในน้ำที่ทำการทดลองมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.2 การเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ในน้ำจึงได้แคลเซียมอิออนและไฮโปคลอไรด์อิออน คลอไรด์อิออนนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับอิออนบวกอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ จึงทำให้ความเข้มข้นของอิออนรวมลดลง โดยเฉพาะโซเดียมและแมกนีเซียมซึ่งมีความเข้มข้นสูงในน้ำ ส่วนแคลเซียมอิออนก็สามารถเกิดปฏิกิริยากับคลอไรด์อิออนในน้ำ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าคลอรีนมีความเข้มข้นลดลง และที่ระดับความเค็มน้ำสูงความเข้มข้นอิออนมีปริมาณมากกว่าที่ระดับความเค็มน้ำต่ำ จึงมีโอกาสทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ได้มากกว่า เห็นได้จากค่าออสโมลาลิตี้ที่มีแนวโน้มลดลงในน้ำความเค็มสูง ถึงแม้จะไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

เนื่องจาก แร่ธาตุต่าง ๆ มีความสำคัญต่อกระบวนการเจริญเติบโต การพัฒนาการ และสรีระเคมีภายในร่างกายของลูกกุ้ง เช่น โซเดียมมีความสำคัญในการรักษาสมดุลออสโมติก (Osmotic balance) ควบคู่ไปกับคลอไรด์ รักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างในร่างกายให้สมดุล

ควบคุมสมดุลของโซเดียมระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ รวมถึงทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกล้ามเนื้อและระบบประสาท แมกนีเซียมเป็นตัวช่วยปรับสมดุลออสโมติกภายในร่างกาย เกี่ยวข้องกับการสร้างเปลือก และการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด แคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเปลือก (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก) ถ้าแร่ธาตุเหล่านี้มีความเข้มข้นหรือสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปอาจไปมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การพัฒนาการและการรอดตายของลูกกุ้งได้ ดังนั้นการใช้น้ำที่มีความเค็มสูงกว่า 25 ppt ที่ผ่านการบำบัดด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ จึงต้องระมัดระวังระดับของโซเดียมและแมกนีเซียมในน้ำด้วย

ขณะที่แคลเซียมไฮโปคลอไรด์จะส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อใช้กับน้ำความเค็มต่ำที่ 15 ppt โดยฟอสฟอรัสนั้นตามรายงานการดูดซึมฟอสฟอรัสจากน้ำของสัตว์น้ำมีในปริมาณที่ต่ำ ส่วนใหญ่สัตว์น้ำจะใช้ฟอสฟอรัสจากอาหาร (Davis & Lawrence, 1997) การลดลงของฟอสฟอรัสน่าจะไม่มีผลกระทบมากนักต่อการเจริญเติบโต การรอดตาย และขบวนการทางสรีระของลูกกุ้ง

2. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแร่ธาตุและสารประกอบ

2.1 ระยะนอเพลียส

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นชัดเจนว่าลูกกุ้งระยะนอเพลียสมีการบริโภคอิออนในน้ำในปริมาณที่มากพอสมควรทีเดียว พิจารณาจากค่าออสโมลาลิตี้ ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในรอบ 12 ชั่วโมง โดยค่าอัลคาลินิตี้ ไบคาร์บอเนต รวมทั้งแร่ธาตุที่ตรวจสอบทุกชนิด ยกเว้นฟอสฟอรัสมีค่าลดลงทั้งหมดโดยเฉพาะอย่างยิ่งโซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม และคลอรีน ดังนั้นในการอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียสนี้ จึงควรระมัดระวังในเรื่องความเข้มข้นของอัลคาลินิตี้ โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม และคลอรีนให้เพียงพอและเหมาะสม เนื่องจากลูกกุ้งทะเลระยะวัยอ่อนมีการลอกคราบบ่อยครั้ง เช่น ลูกกุ้งระยะนอเพลียสจะมีการลอกคราบถึง 6 ครั้ง ในเวลา 45-60 ชั่วโมง (บุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2544) ประกอบกับมีการอนุบาลลูกกุ้งที่ความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงมีการใช้อิออนต่าง ๆ ไปเพื่อการสร้างเปลือก การพัฒนาการ และการเจริญเติบโต

กุ้งขาวเป็นสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน โครงสร้างภายนอกเป็นเปลือกแข็ง การเจริญเติบโตจึงต้องมีการลอกคราบเพื่อถอดเปลือกอันเดิมออก (Inoue et al., 2004) และการสร้างเปลือกใหม่จะมีการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบรองลงมา (Pratoomchat et al., 2002a) ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียม (Ca^{2+}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังสมการด้านล่าง (Perry et al., 2001)

$$Ca^{2+} + HCO_3^- \longleftrightarrow CaCO_3 \downarrow + H^+$$

ส่วนอัลคาลินิตี้ หรือความเป็นด่างของน้ำ เกิดจากไบคาร์บอเนตอิออน (HCO_3^-) และคาร์บอเนตอิออน (CO_3^{2-}) ที่อยู่ในน้ำ และโดยทั่วไปจะพบความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตอิออนสูงกว่าคาร์บอเนตอิออนมาก (Brown et al., 1995) ดังนั้น เมื่อไบคาร์บอเนตในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลให้อัลคาลินิตี้มีการเปลี่ยนแปลงด้วย จะเห็นได้ว่าจากการอนุบาลลูกกุ้งทุกระยะในรอบ 12 ชั่วโมง ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตและอัลคาลินิตี้ในน้ำลดลง

การที่ไบคาร์บอเนตในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียสมีความเข้มข้นลดลง แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งขาวมีการนำไบคาร์บอเนตไปใช้ในการสร้างเปลือก แต่โครงสร้างร่างกายของลูกกุ้งระยะนี้ไม่น่าจะเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเหมือนกับทฤษฎีที่เกิดขึ้นในกุ้งขนาดใหญ่ เพราะว่ามีการใช้แมกนีเซียมในปริมาณมาก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แร่ธาตุในตัวลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียส ที่พบว่าลูกกุ้งต้องการโพแทสเซียม และแมกนีเซียมค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับลูกกุ้งในระยะอื่น ๆ โดยมีความเด่นชัดมากเป็นพิเศษที่ลูกกุ้งระยะนอเพลียสใช้แมกนีเซียมในโครงสร้างแทนแคลเซียมซึ่งไม่พบเลย ก็สอดคล้องกับผลที่หายไปจากน้ำที่ใช้อนุบาลที่ลดลง ถึงแม้ว่าการลดลงของแมกนีเซียมจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ก็ตาม เป็นไปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นแมกนีเซียมในน้ำลดลงเนื่องจากถูกใช้ไปโดยลูกกุ้ง ทำให้สัดส่วนอิออนในน้ำเกิดความไม่สมดุล แมกนีเซียมคาร์บอเนตในน้ำจึงมีการแตกตัวเพื่อให้ได้แมกนีเซียมอิออนมาปรับสมดุลอิออนในน้ำ ทำให้แมกนีเซียมในน้ำลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และการแตกตัวของแมกนีเซียมคาร์บอเนต ก็ได้คาร์บอเนตอิออนด้วย ซึ่งอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คาร์บอเนตในน้ำมีความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป ดังนั้นเพื่อตอบสนองความต้องการที่มีค่อนข้างสูง จึงควรที่จะตรวจสอบความเข้มข้นที่ต้องการอย่างแท้จริงเพื่อตอบสนองความต้องการทางสรีระเคมี และอาจจะเพิ่มผลผลิตได้หากมีการเสริมโพแทสเซียมและแมกนีเซียมในระบบน้ำที่ทำการอนุบาล

จากการที่ลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียสใช้แมกนีเซียมในโครงสร้างแทนแคลเซียมซึ่งไม่พบเลย เช่นเดียวกันกับที่พบในปู Spider crab (*Hyas araneus*) ว่าโครงสร้างลูกปูระยะซูเอียไม่มีการสะสมของแคลเซียม การเจริญเติบโตต้องมีการใช้สารอินทรีย์มากในโครงสร้างของชั้นเอนโดคิวติเคิล (Endocuticle) แต่ในตัวอ่อนระยะเมกาโลปา (Megalopa) และระยะวัยรุ่นโครงสร้างของเปลือกจะมีความแข็งมากกว่าและบางส่วนจะมีการสะสมของแคลเซียม (Anger, 2001) ทั้งนี้ครัสเตเชียนในระยะวัยอ่อน มีโครงสร้างพื้นฐานของเปลือกเหมือนกับครัสเตเชียนตัวเต็มวัย แต่ความบางของเปลือกมากกว่า (Christian & Costlow, 1982 อ้างโดย Freeman, 1993) และเนื่องด้วยการดำรงชีวิตของครัสเตเชียนระยะแพลงก์ตอน หรือลูกกุ้งในระยะนอเพลียสนี้จะอาศัยอยู่บริเวณผิวน้ำ ล่องลอยไปตามกระแสน้ำ ขาว่ายน้ำยังพัฒนาไม่เต็มที่ ดังนั้นถ้าเปลือกมีการสะสมของแร่ธาตุสูง จะทำให้ไม่

สามารถพยุงตัวอยู่ที่บริเวณผิวน้ำได้ จึงจำเป็นต้องมีเปลือกที่บางเพื่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต (Scholtz & Richter, 1995 อ้างโดย Anger, 2001)

ส่วนฟอสฟอรัส พบว่าลูกกุ้งระยะนอเพลียสมีปริมาณฟอสฟอรัสในร่างกายต่ำกว่าระยะอื่นๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากโดยทั่วไปครัสเตเชียนที่เพิ่งฟัก เช่นลูกกุ้งในระยะนอเพลียสยังมีแหล่งอาหาร คือ ถุงไข่แดง (Yolk) อยู่ (Rabalais & Gore, 1985 อ้างโดย Nates & McKenney, 2000) ในถุงไข่แดงนี้ มีลิปิด ซึ่งอยู่ในรูปฟอสโฟลิปิด (Phospholipids) จำนวนมาก เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับตัวอ่อน (Costlow & Bookhout, 1960, 1962; Thessalou-Legaki et al., 1999 อ้างโดย Nates & McKenney, 2000) และเป็นที่ทราบดีว่าฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของสารประกอบฟอสโฟไลปิดที่สำคัญ (Davis & Lawrence, 1997) ดังนั้นในตัวลูกกุ้งจึงมีลิปิดจำนวนมากจากถุงไข่แดง เป็นไปได้ว่าลูกกุ้งมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่เพียงพอแล้ว และโดยทั่วไปก็ไม่มีการใช้ฟอสฟอรัสจากน้ำภายนอก

ในส่วนของโซเดียม คลอรีน ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่ช่วยรักษาสมดุลออสโมติกของเลือด และรักษาสมดุลของกรด-เบส (Pratoomchat et al., 2002a) ถึงแม้ว่าในน้ำจะมีการหายไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในรอบ 12 ชั่วโมงก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาถึงความต้องการโซเดียมและคลอรีนจากปริมาณที่พบในร่างกายลูกกุ้งขาวในระยะนอเพลียสนั้น อยู่ในระดับที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ ชี้ให้เห็นว่า ลูกกุ้งระยะนอเพลียสมีความต้องการโซเดียมและคลอรีนในปริมาณน้อย อีกทั้งลูกกุ้งในระยะนี้มีการอนุบาลที่น้ำความเค็มสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของโซเดียมและคลอรีนสูงอยู่แล้ว จึงไม่น่าพบปัญหาการขาดแคลนโซเดียมและคลอรีนสำหรับลูกกุ้งระยะนอเพลียส

การที่ไม่พบกำมะถันและทองแดงในร่างกายลูกกุ้งระยะนอเพลียสนี้ เป็นไปได้ว่าน่าจะมีปริมาณที่ต่ำมาก ๆ จึงไม่น่าจะมีผลกระทบต่อสรีระเคมีหรือการเจริญเติบโต ขณะที่ปริมาณในน้ำที่ทำการอนุบาลน่าจะมากเกินพอ ส่วนแมงกานีสในร่างกายลูกกุ้งขาวระยะนอเพลียสพบในปริมาณต่ำ ขณะที่ในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งนั้น ตรวจสอบไม่พบแมงกานีส ซึ่งโดยปกติก็พบว่าในน้ำทะเลนั้นมีปริมาณแมงกานีสต่ำมาก (0.00003 mg/l) (Brown et al., 1995) แสดงว่าลูกกุ้งได้รับแมงกานีสเพียงพอต่อความต้องการแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแมงกานีสในระบบอนุบาล

โดยสรุปแล้วในรอบ 12 ชั่วโมงนั้น ควรพิจารณาเสริมสารประกอบเพื่อรักษาระดับไบคาร์บอเนต โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ให้อยู่ในระดับที่มีอยู่โดยทั่วไปในน้ำทะเลหรือให้มากกว่าเล็กน้อย เพื่อชดเชยการหายไปจากการใช้ไปของลูกกุ้งหรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในบ่ออนุบาล

2.2 ระยะซูเอีย

มีความชัดเจนเช่นเดียวกับระยะนอเพลียสซึ่งลูกกุ้งระยะซูเอียมีการใช้ไบคาร์บอเนตและอิออนในน้ำมาก จึงทำให้ค่าอัลคาลินิตี้ และไบคาร์บอเนตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) ในรอบ 12 ชั่วโมง โดยในกลุ่มอิออนลดน้อยลงทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมและฟอสฟอรัส ซึ่งพบว่าในลูกกุ้งระยะซูเอีย 1-2 มีความต้องการแคลเซียม คลอรีน และฟอสฟอรัสในระดับที่สูง เพื่อใช้ในโครงสร้างและขบวนการต่าง ๆ เนื่องจากพบปริมาณที่สูงในร่างกายลูกกุ้งสอดคล้องกับปริมาณที่พบลดลงในน้ำ แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งระยะนี้มีการนำอิออนดังกล่าวไปใช้อย่างมาก อย่างไรก็ตามความต้องการแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดจะลดลงในระยะซูเอีย 3 ชี้ให้เห็นถึงความต้องการที่ลดน้อยลง

ลูกกุ้งระยะซูเอีย มีความต้องการแมกนีเซียมโดยเฉลี่ยน้อยกว่าระยะนอเพลียส แต่มีความต้องการแคลเซียมสูง จะเห็นได้จากข้อมูลที่พบปริมาณของแคลเซียมในลูกกุ้งระยะซูเอียสูงกว่าระยะอื่น ๆ สันนิษฐานได้ว่ากระบวนการสร้างเปลือกของลูกกุ้งระยะซูเอียมีการใช้แคลเซียมเข้ามาในระบบอย่างชัดเจน ซึ่งต่างไปจากระยะนอเพลียสที่พบว่าแมกนีเซียมเป็นแร่ธาตุหลักในโครงสร้างของร่างกาย อย่างไรก็ตามแนวโน้มการใช้แคลเซียมในระยะซูเอีย 3 มีปริมาณลดลงซึ่งบทบาทของแมกนีเซียมจะเข้ามามากขึ้นในระยะนี้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าสัดส่วนของ แมกนีเซียมต่อแคลเซียม ในร่างกายลูกกุ้งระยะซูเอีย 1 ถึง ซูเอีย 3 นั้นจะมีค่าผกผันกัน พบว่าสัดส่วนของแมกนีเซียมต่อแคลเซียม จะมีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 26 ในระยะซูเอีย 1 และลดลงเป็น 1 ต่อ 1.65 และ 1 ต่อ 0.3 ในระยะซูเอีย 2 และซูเอีย 3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมน่าจะเป็นแร่ธาตุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสร้างโครงสร้างร่างกายของลูกกุ้งระยะซูเอีย 1 และซูเอีย 2 อย่างมาก หลังจากนั้นแมกนีเซียมจึงเข้ามามีส่วนร่วมมากยิ่งขึ้น ดังรายงานที่พบว่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมในเนื้อเยื่อต่าง ๆมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกับแคลเซียม ซึ่งสันนิษฐานว่า แมกนีเซียมใช้แทนที่แคลเซียม ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในการสร้างเปลือกของครัสเตเชียนในกุ้งตัวเต็มวัย *P. indicus* (Vijayan & Diwan, 1996) และ *P. monodon* (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก)

เป็นที่ทราบกันดีว่า แร่ธาตุหลักที่สำคัญในการสร้างเปลือก คือ แคลเซียม (Ca^{2+}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (Perry et al., 2001) จากผลการทดลองลูกกุ้งมีการใช้แคลเซียมและไบคาร์บอเนตสูง รวมทั้งมีการหายไปจากน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p< 0.05$) ในรอบ 12 ชั่วโมง จึงเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาในการเสริมแคลเซียมและไบคาร์บอเนตสำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอีย ซึ่งอาจมีส่วนช่วยให้ลูกกุ้งมีพัฒนาการ การเจริญเติบโต และการรอดตายดีขึ้น

สำหรับแมกนีเซียมนั้นลูกกุ้งมีความต้องการในระดับที่ไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการแคลเซียมของลูกกุ้งระยะนี้ รวมทั้งแมกนีเซียมในน้ำมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย และใน

ระยะซูเอียนี้มีการอนุบาลที่น้ำความเค็มสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมค่อนข้างสูงอยู่แล้ว จึงน่าจะเพียงพอต่อความต้องการของลูกกุ้งระยะนี้

ขณะที่ฟอสฟอรัสถึงแม้ว่าจะมีการหายไปจากน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p< 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาในตัวลูกกุ้ง พบว่ามีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะซูเอีย 1-3 ชี้ให้เห็นถึงความต้องการที่ลดลง แสดงว่าการลดลงของฟอสฟอรัสในน้ำที่ทำการอนุบาลน่าจะเกิดจากปัจจัยอื่น กล่าวคือ ปัจจัยที่ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำมีความเข้มข้นลดลงนั้น น่าจะเกิดจากถูกใช้ไปโดยสาหร่ายเซลล์เดียว (*Chaetoceros*) ซึ่งนำมาใช้เป็นอาหารของลูกกุ้งในระยะซูเอียของการทดลองนี้ ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว เพราะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิก โดยพืชต้องการใช้ฟอสฟอรัสในรูปของสารอนินทรีย์ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2541) และโดยทั่วไปฟอสฟอรัสในน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต เช่น $NaHPO_4^-$, $MgHPO_4$ (Kennish, 1999) หรือ HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}, $H_2PO_4^-$ (Brown et al., 1995) เมื่อสารประกอบฟอสเฟตถูกใช้ไปเพื่อกระบวนการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ฟอสฟอรัสหายไปจากน้ำเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป

ในส่วนของคลอรีนพบว่าลูกกุ้งระยะซูเอียมีความต้องการคลอรีนในปริมาณสูงสุดเมื่อเทียบกับระยะอื่น ๆ แต่เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนที่หายไปจากน้ำนั้นพบว่าน้อยมาก เนื่องจากลูกกุ้งระยะนี้อนุบาลที่น้ำความเค็มสูง ซึ่งมีความเข้มข้นของคลอรีนสูง เมื่อมีการใช้ไปเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นในน้ำมากนัก

ตามที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าโซเดียม คลอรีน โพแทสเซียม ทำหน้าที่รักษาสมดุลออสโมติก (Pratoomchat et al., 2002a) พบว่าสัดส่วนของโซเดียมในตัวลูกกุ้งขาวระยะซูเอียนั้นสูงกว่าคลอรีนมาก ซึ่งต่างจากที่พบในเลือดกุ้งกุลาดำ *P. monodon* ระยะตัวเต็มวัย ที่สัดส่วนของโซเดียมจะมากกว่าคลอรีนเล็กน้อยขณะที่ในเปลือกมีค่าใกล้เคียงกัน (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก) ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่พบในตัวลูกกุ้งขาวระยะซูเอีย 1-3 นั้นค่อนข้างคงที่ ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งระยะซูเอียนี้สามารถควบคุมระบบสมดุลออสโมติกในร่างกายไว้ได้ ถึงแม้ว่าเหงือกซึ่งเป็นอวัยวะที่ควบคุมอิออนโมเลกุลเดี่ยว (monovalents) เช่น โซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมอิออน (Potts & Parry 1964) ยังไม่พัฒนาเต็มที่ และจากรายงานของ Bouaricha et al. (1994) พบว่าตุ่มเหงือก (Gill bud) จะพบในซูเอียระยะสุดท้าย แต่ลูกกุ้งก็สามารถควบคุมอิออนต่าง ๆ จากน้ำภายนอกที่เคลื่อนที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางเปลือก หรือโครงสร้างภายนอก (Integument) (Anger, 2001) ซึ่งก็พบเหตุการณ์ที่คล้ายคลึงกันในกุ้ง Thalassinid ghost (*Callianassa jamaicense*) ระยะซูเอีย ซึ่งยังไม่มีเหงือก แต่ก็สามารถควบคุมสมดุลเกลือแร่ภายในร่างกายให้สูงกว่าภายนอก (Hyper-osmoregulation) (Felder et al., 1986 อ้างโดย Taylor & Seneviratna, 2005) เป็นไปได้ว่า

อิออนที่มีขนาดเล็กสามารถผ่านเข้าสู่ภายในร่างกายได้ดีกว่าอิออนขนาดใหญ่ โซเดียมอิออนที่มีขนาดเล็กกว่าคลอไรด์อิออนจึงเข้าสู่ร่างกายลูกกุ้งได้มากกว่า ทำให้พบว่าลูกกุ้งระยะนี้มีปริมาณโซเดียมสูงกว่าคลอรีนมากเฉลี่ยถึง 6 เท่า โดยสัดส่วนของ คลอรีนต่อโซเดียม จะลดลงจากระยะซูเอีย 1 ถึง ซูเอีย 3 ตามลำดับ

จากการตรวจสอบไม่พบกำมะถันและทองแดง เป็นไปได้ว่าน่าจะมีปริมาณที่ต่ำมาก ๆ ในร่างกายกุ้ง ซึ่งน่าจะมากเกินพอในระบบอนุบาล ส่วนแมงกานีสในลูกกุ้งขาวระยะซูเอียพบในปริมาณต่ำและมีความแปรปรวนสูง โดยระยะซูเอีย 2 มีค่าลดลงถึง 50 % จากระยะซูเอีย 1และไม่พบเลยในระยะซูเอีย 3 ชี้ให้เห็นถึงความต้องการที่ลดลง ขณะที่ในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งนั้นตรวจสอบไม่พบแมงกานีส ซึ่งโดยปกติก็พบว่าในน้ำทะเลนั้นมีปริมาณแมงกานีสต่ำมาก (0.00003 mg/l) (Brown et al., 1995) ลูกกุ้งน่าจะได้รับแมงกานีสจากอาหารซึ่งน่าจะเพียงพอต่อความต้องการแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแมงกานีสในระบบอนุบาล

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอิออนดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งในระยะซูเอีย มีความต้องการแร่ธาตุต่าง ไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต และกระบวนการทางสรีรวิทยาต่าง ๆ เช่นเดียวกับกุ้งระยะอื่น ๆ ควรพิจารณาถึงการเสริมแคลเซียมและไบคาร์บอเนตสำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะนี้เนื่องจากมีความต้องการสูง

2.3 ระยะไมซิส

ลูกกุ้งระยะไมซิสมีการใช้อิออนและอัลคาลินิตี้ อยู่ค่อนข้างมากในรอบ 12 ชั่วโมง โดยมีความเด่นชัดเป็นพิเศษในส่วนของไบคาร์บอเนตและแมกนีเซียม ถึงแม้ว่าจะให้ผลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็ตาม โดยไบคาร์บอเนตนั้นมีการหายไปจากน้ำที่ใช้อนุบาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p< 0.05$) ส่งผลให้อัลคาลินิตี้มีค่าลดลงตามไปด้วย ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งมีการใช้ไบคาร์บอเนตไปเพื่อกระบวนการสร้างเปลือก และการเจริญเติบโตสูง

จากข้อมูลพบว่าลูกกุ้งมีความต้องการ แคลเซียม โพแทสเซียม และคลอรีนลดลง โดยในตัวกุ้งปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียม และคลอรีนลดลงอย่างต่อเนื่องจาก ระยะไมซิส 1-ไมซิส 3 ส่งผลให้ แคลเซียม โพแทสเซียม และคลอรีนในน้ำไม่ลดลงแต่อย่างใดในรอบ 12 ชั่วโมง ในทางตรงกันข้าม โซเดียมกลับมีปริมาณที่สูงมากขึ้นตามลำดับจากระยะไมซิส 1 ถึง ไมซิส 3 ซึ่งพบสัดส่วนของ โซเดียมต่อคลอรีน ประมาณ 60 ต่อ 1 แสดงให้เห็นว่าโซเดียมน่าจะมีบทบาทมากขึ้น และพบอีกประเด็นคือ สัดส่วนของ โซเดียมต่อโพแทสเซียม มีค่าสูงมากที่สุดในลูกกุ้งระยะนี้ จึงน่าจะมีกลไกเพื่อควบคุมความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (Membrane potential) ซึ่งสัดส่วน โซเดียมต่อโพแทสเซียม ในลูกกุ้งระยะไมซิสนี้แตกต่างไปอย่างชัดเจนกับที่พบในลูกกุ้งระยะโพสลาวา

สอดคล้องกับที่พบว่าการทำงานของเอนไซม์ Na^+-K^+-ATPase จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อกุ้ง *P. japonicus* อยู่ในระยะไมซิส 2 และ 3 (Bouaricha et al., 1991)

ขณะที่ความต้องการแมกนีเซียมของลูกกุ้งระยะไมซิสนี้ยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพบปริมาณค่อนข้างสูงในร่างกายลูกกุ้ง จากการเปลี่ยนแปลงของแมกนีเซียมและแคลเซียมในร่างกายของลูกกุ้ง แสดงให้เห็นว่าการสร้างเปลือกของลูกกุ้งระยะไมซิส ใช้สัดส่วนแมกนีเซียมมากกว่าแคลเซียม โดยมีสัดส่วน แมกนีเซียมต่อแคลเซียม เฉลี่ย 4 ต่อ 1 ตรงกันข้ามกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระยะซูเอีย ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของลูกกุ้งระยะนี้มีความต้องการแมกนีเซียมสูง การเสริมแมกนีเซียมและไบคาร์บอเนต ในการอนุบาลลูกกุ้งระยะไมซิสนี้เป็นเรื่องที่ต้องพิจารณา เนื่องจากเห็นได้ชัดเจนว่ามีบทบาทสำคัญในการสร้างเปลือก และลูกกุ้งในระยะวัยอ่อนนี้มีวงจรการลอกคราบที่สั้น กุ้งจะต้องมีการสะสมแร่ธาตุอย่างรวดเร็วเพื่อการลอกคราบในแต่ละครั้ง ซึ่งถ้าแร่ธาตุที่จำเป็นต่าง ๆ ไม่เพียงพอแล้ว อาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของลูกกุ้งได้

ขณะที่ความต้องการของฟอสฟอรัสยังคงมีสูงอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันความเข้มข้นในน้ำก็ไม่ได้ลดลงแต่อย่างใด เป็นการชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งในระยะนี้ได้ฟอสฟอรัสจากอาหารเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีพฤติกรรมการกินอาหารแบบกินสัตว์ (Carnivorous) และโดยทั่วไปให้อาร์ทีเมียระยะวัยอ่อนเป็นอาหาร จึงไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำแต่อย่างใด ซึ่งแตกต่างจากระยะซูเอียที่มีพฤติกรรมการกรองกิน

จากการตรวจสอบไม่พบกำมะถันและทองแดง เป็นไปได้ว่าน่าจะมีปริมาณที่ต่ำมาก ๆ ในร่างกายกุ้ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าน่าจะมากเกินพอในระบบอนุบาล ขณะที่แมงกานีสไม่พบเช่นกันในระยะไมซิส 1 และ 2 จากนั้นพบปริมาณที่ต่ำมากในระยะไมซิส 3 แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นเพียงเล็กน้อย ขณะที่ในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งนั้น ตรวจสอบไม่พบแมงกานีส ซึ่งโดยปกติก็พบว่าในน้ำทะเลนั้นมีปริมาณแมงกานีสต่ำมาก (0.00003 mg/l) (Brown et al., 1995) แสดงว่าลูกกุ้งได้รับแมงกานีสเพียงพอต่อความต้องการแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแมงกานีสในระบบอนุบาล

2.4 ระยะโพสลาวา

จากข้อมูลการลดลงของออสโมลาลิตี้ อัลคาลินิตี้ และไบคาร์บอเนตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งระยะโพสลาวามีการนำอิออนในน้ำไปใช้ไม่น้อย และควรที่จะระมัดระวังมากยิ่งขึ้นเมื่อลดความเค็มน้ำลง เพราะความเค็มน้ำที่ต่ำนั้นจะส่งผลกระทบต่อลูกกุ้งโดยตรง มีผลทำให้ลูกกุ้งต้องรักษาระดับเกลือแร่ภายในร่างกายให้คงที่ เพราะจะมีอิทธิพลมาจากการเจือจางโดยน้ำภายนอกที่เข้าสู่ร่างกายกุ้ง ลูกกุ้งจึงต้องมีการใช้อิออนในน้ำอย่างมากเพื่อทำการปรับระบบสมดุล

เกลือแร่ การเสริมอิออนบางชนิดลงไปในน้ำคงเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาเพื่อลดความเครียดให้กับลูกกุ้ง

ลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา 1 -7 มีความต้องการ โซเดียม คลอรีน แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแคลเซียมค่อนข้างคงที่ ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งมีความต้องการแร่ธาตุเหล่านี้ที่ระดับหนึ่ง ๆ ถึงแม้ว่าความเค็มน้ำจะลดลงจากการอนุบาลจากระยะโพสลาวา 1- 7 ก็ตาม จึงเป็นการชี้ให้เห็นว่าต้องระมัดระวังปริมาณแร่ธาตุ 5 ชนิดนี้ด้วยเมื่อทำการลดความเค็มน้ำ เพราะอาจจะไม่เพียงพอสำหรับกุ้งได้

ด้วยโซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียม เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำทะเล ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 3 ใน 4 ของแร่ธาตุที่มีอยู่ในน้ำทะเล (Kennish, 1999) และจัดว่าเป็นแร่ธาตุหลักที่ช่วยรักษาสมดุลออสโมติกของร่างกาย (Pratoomchat et al., 2002a) เพราะปริมาณรวมของแร่ธาตุทั้ง 3 นี้มีมากกว่า 90 % ของแร่ธาตุทั้งหมดในระบบเลือดกุ้ง ขณะที่แคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในกระบวนการสร้างเปลือก และเกี่ยวข้องกับการควบคุมความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (Membrane potential) (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก) ในการอนุบาลซึ่งมีการปรับลดความเค็มน้ำ ส่งผลให้โซเดียม คลอรีน โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมในน้ำมีความเข้มข้นลดลงตามการปรับลดความเค็มน้ำ ลูกกุ้งจึงต้องมีการปรับตัวอย่างมากเพื่อรักษาสมดุลในร่างกายให้คงที่จากข้อมูลในการทดลองนี้

ปริมาณของแมกนีเซียม มีโอกาสไม่เพียงพอต่อความต้องการได้เมื่ออนุบาลลูกกุ้งในน้ำความเค็มต่ำกว่า 13 ppt เนื่องจากมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p< 0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณแมกนีเซียมที่พบในร่างกายลูกกุ้งระยะโพสลาวา 5 ซึ่งมีการอนุบาลที่น้ำความเค็ม 13 ppt ก็พบในปริมาณที่ต่ำมากเช่นกัน แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งมีการปรับตัวได้ดีต่อการลดลงของแมกนีเซียมในน้ำ เนื่องจากลูกกุ้งระยะโพสลาวาพบปริมาณแมกนีเซียมต่ำกว่าระยะอื่น ๆ ขณะที่ระดับของโซเดียม คลอรีน แมกนีเซียม และแคลเซียมในร่างกายลูกกุ้งคงที่ตลอดการอนุบาลที่มีการลดความเค็มน้ำ กุ้งจะแสดงสภาวะเครียดได้เนื่องจากต้องพยายามควบคุมให้อิออนเหล่านี้คงที่ ขณะที่ความเข้มข้นของอิออนลดลงเมื่อลดความเค็มน้ำ สอดคล้องกับเหตุผลที่ว่าเหงือกของสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน จะมีการพัฒนาและทำหน้าที่ได้เมื่อเข้าสู่ระยะเดคาโพดิด (Decapodid stages) หรือระยะโพสลาวา (Felder et al.,1986, Furigo, 1993, อ้างโดย Bouaricha et al., 1994) และเหงือกเป็นอวัยวะที่ควบคุมอิออนโมเลกุลเดี่ยว (Monovalents) เช่น โซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมอิออน (Potts & Parry 1964) ดังนั้นลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาจึงสามารถควบคุมสมดุลของโซเดียมและคลอรีนในร่างกายได้ดี ซึ่งการควบคุมอิออนต่าง ๆ ผ่านทางเหงือกนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ Na^+-K^+-ATPase โดยกิจกรรมของเอนไซม์นี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัตว์ต้องเผชิญกับภาวะ

ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำภายนอก (Bouaricha et al., 1991; Charmantier, 1998) เช่นที่พบในกุ้ง *P. japonicus* ว่าการทำงานของเอนไซม์ Na^+-K^+-ATPase มีพัฒนาการสมบูรณ์ที่สุดเมื่อเข้าสู่ระยะโพสลาวา 5 (Bouaricha et al., 1991) ต่างจากที่พบในครัสเตเชียนระยะตัวเต็มวัย เช่น กุ้ง *P. monodon* ระยะตัวเต็มวัย (Lin et al., 2000) กุ้ง *P. japonicus* (Chen & Chen, 1996) กุ้ง *M. rosenbergii* (Wilder et al., 1998), กุ้ง *Palaemon northropi* และ *P. pandaliformis* (Freire et al., 2003) และแอมฟิปอด *G. oceanicus* (Normant et al., 2005) ที่ปริมาณโซเดียมในเลือดจะแปรผันตามความเค็มน้ำภายนอก

จากข้อมูลที่พบปริมาณแคลเซียมในร่างกายลูกกุ้งระยะโพสลาวาใกล้เคียงกันตลอดการอนุบาล แสดงว่าลูกกุ้งมีความต้องการแคลเซียมในระดับที่คงที่ภายใต้สภาวะความเข้มข้นจำกัดในน้ำ เนื่องจากมีการลดความเค็มน้ำในการอนุบาล ส่งผลให้ลูกกุ้งมีความเครียดได้ เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการนำแคลเซียมจากน้ำมาใช้และหากในอาหารมีแคลเซียมไม่เพียงพอ อาจจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลอกคราบและการรอดตายลดลงได้ และจากการทดลองพบว่าไบคาร์บอเนตในน้ำมีความเข้มข้นลดลง ($p>0.05$) แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งขาวมีการนำไบคาร์บอเนตไปใช้ในการสร้างเปลือก เพราะแคลเซียมและไบคาร์บอเนตนั้น เป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างภายนอกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก)

แหล่งของแคลเซียมที่สำคัญสำหรับสัตว์น้ำ คือ น้ำภายนอก มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มาจากการเก็บสะสมไว้ภายในตัว (Cameron, 1985; Cameron & Wood, 1985 อ้างโดย Perry et al., 2001) ถึงแม้ว่าสัตว์น้ำจะสามารถดูดซึมแคลเซียมทั้งหมดหรือบางส่วนจากน้ำ (Desshimaru et al., 1978 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) แต่พบว่าบางครั้งสัตว์น้ำอาจมีการขาดแคลเซียมได้เมื่อนำไปเลี้ยงในน้ำที่มีแคลเซียมต่ำ (Robinson et al., 1984, 1986, 1987 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) สำหรับแหล่งของไบคาร์บอเนต สัตว์จะได้รับจากน้ำภายนอกเช่นกัน รวมถึงจากกระบวนการหายใจ ซึ่งอัตราการดูดซึมของแคลเซียมและไบคาร์บอเนตจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิออนเหล่านี้ในน้ำ (Greenaway, 1983; Cameron, 1985) ดังนั้นในการอนุบาลที่มีการปรับลดความเค็มน้ำซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมและไบคาร์บอเนตในน้ำลดลง อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมแคลเซียมและไบคาร์บอเนตของลูกกุ้งได้ และการที่ลูกกุ้งระยะโพสลาวามีความต้องการแคลเซียมและไบคาร์บอเนตสูงนั้น เนื่องจากเมื่อตัวอ่อนครัสเตเชียนเข้าสู่ระยะที่มีการดำรงชีวิตที่พื้นท้องน้ำ (Benthic stage) หรือระยะโพสลาวานั้น โครงสร้างเปลือกชั้นเอนโดคิวติเคิลและเอกโซคิวติเคิลจะมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยมีการสะสมของเกลือแคลเซียม ซึ่งการสะสมนี้เกิดขึ้นด้วยการควบคุมของไซโตพลาสมิก ที่อยู่ภายใต้เซลล์เอพิเดอร์มัล (Epidermal cells) แคลเซียมจากภายนอกจะผ่านเข้ามาทางช่องเล็ก ๆ (Pore canals) ของเอพิคิวติเคิล (Epicuticle) ส่วนชั้นเอกโซคิวติ

เคิลจะมีการสะสมของเม็ดสี (Melanin pigment) (Anger, 2001) สอดคล้องกับพฤติกรรมของครัสเตเชียน ที่เมื่อเข้าสู่ระยะที่มีการดำรงชีวิตที่พื้นท้องน้ำ สัตว์จะมีการใช้ชีวิตและอาศัยอยู่ใต้น้ำ การมีโครงสร้างภายนอกที่แข็งแรงขึ้น จะช่วยให้สามารถป้องกันปรสิต หรือสัตว์พื้นทะเลขนาดเล็กที่จะมาล่ามันได้ (Verity & Smetacek, 1996 อ้างโดย Anger, 2001) เช่นเดียวกับ กุ้ง *Penaeus monodon* ระยะตัวเต็มวัย (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก; Cheng & liao ,1986 อ้างโดย Lin et al., 2000) กุ้ง *Palaemon pandaliformis, Macrobrachium potiuna* และ *Macrobrachium olfersii* (Freire et al., 2003), ปู *Ocypode quadrata* (Santos & Moreira, 1999), กุ้ง *Penaeus japonicus* (Chen & Chen, 1996) ที่พบว่าระดับของแคลเซียมและแมกนีเซียมในเลือดของกุ้งคงที่ เมื่อความเค็มน้ำเปลี่ยนแปลงไป แต่ต่างไปจาก แอมฟิปอด *Gammarus oceanicus* (Normant et al., 2005) และปู *Scylla serrata* (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ข) ที่ปริมาณแมกนีเซียมและแคลเซียมในเลือดแปรตามความเค็มน้ำภายนอก

ขณะที่ปริมาณโพแทสเซียมในตัวลูกกุ้งระยะโพสลาวามีความเข้มข้นสูงมากกว่าในระยะไมซิส และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะการพัฒนาการแต่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งระยะโพสลาวาต้องการ โพแทสเซียมในปริมาณที่สูงมากขึ้นตามระยะการพัฒนาการ เนื่องมาจากการลดความเค็มน้ำตลอดการอนุบาล จะส่งผลต่อการลดลงของโพแทสเซียม จึงควรที่จะระมัดระวังเป็นพิเศษว่าปริมาณโพแทสเซียมในน้ำที่ใช้อนุบาลอาจมีน้อยเกินไป ซึ่งมีโอกาสจะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาการ การเจริญเติบโต และการรอดตายของลูกกุ้งได้

การควบคุมความเข้มข้นโพแทสเซียมในร่างกายของลูกกุ้งระยะโพสลาวานี้มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับที่พบในกุ้ง *Macrobrachium rosenbergii* (Wilder et al., 1998), กุ้ง *P. monodon* ระยะตัวเต็มวัย (Lin et al., 2000), แอมฟิปอด *G. oceanicus* (Normant et al., 2005), *G. dueneni* (Sutcliffe, 1971 อ้างโดย Normant et al., 2005), *G. tigrinusi* (Koop & Grieshaber, 2000), ปู *O. quadrata* (Santos & Moreira, 1999) ที่สามารถรักษาระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมภายในร่างกายไว้ได้ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำภายนอก แต่ต่างไปจากในปูทะเลตัวเต็มวัย (*S. serrata*) ที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในเลือดมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเค็มน้ำที่เพิ่มขึ้น (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ข) ซึ่งก็ต้องระมัดระวังมากที่สุดในการอนุบาลที่น้ำความเค็มต่ำกว่า 8 ppt เนื่องจากระดับโพแทสเซียมในร่างกายลดลงอย่างรวดเร็ว จึงน่าจะมีผลบางประการที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว

จะเห็นได้ว่าที่ระดับความเค็มน้ำภายนอกต่ำ ลูกกุ้งต้องใช้พลังงานอย่างมากไปเพื่อกลไกในการรักษาสมดุลของโพแทสเซียม แทนที่จะได้ใช้พลังงานทั้งหมดไปเพื่อการเจริญเติบโต เนื่องจากที่ระดับความเค็มน้ำต่ำ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำก็ลดลง จะมีผลทำให้น้ำ

ภายนอกที่มีความเจือจางแพร่เข้าสู่ร่างกาย และแร่ธาตุต่าง ๆ ในร่างกายก็จะแพร่ออกสู่น้ำภายนอก กุ้งจึงต้องมี กลไกในการขับน้ำออกจากร่างกาย ส่งผลให้กุ้งเพิ่มอัตราการขับปัสสาวะที่มีความเจือจาง ขณะเดียวกันก็จะมีการดูดกลับแร่ธาตุต่าง ๆ ไว้ภายในร่างกาย เช่นที่พบในกุ้ง *P. monodon* เมื่อต้องเผชิญกับน้ำภายนอกที่มีความเค็มต่ำ ต่อมแอนเทนนัล (Antennal gland) จะมีการดูดกลับโพแทสเซียมจากปัสสาวะและขับโซเดียมออกไปแทน เพื่อรักษาระดับของโพแทสเซียมในเลือดให้คงที่ (Lin et al., 2000) การเสริมโพแทสเซียมสำหรับการอนุบาลลูกกุ้งขาวในระยะโพสลาวา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการลดระดับความเค็มน้ำจึงมีความจำเป็น ซึ่งน่าจะช่วยให้ลูกกุ้งมีพัฒนาการและการเจริญเติบโตดีขึ้น

ฟอสฟอรัส นับว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญอย่างต่อเนื่องในการอนุบาลจะเห็นว่าปริมาณของฟอสฟอรัสในลูกกุ้งมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากระยะนอเพลียสถึงระยะโพสลาวา ซึ่งต้องระมัดระวังการขาดฟอสฟอรัสในระยะโพสลาวา เพราะมีแนวโน้มของความต้องการสูงมากกว่าระยะอื่น ๆ ในขณะที่ในน้ำตลอดการอนุบาลมีความเข้มข้นค่อนข้างคงที่ เนื่องจากลูกกุ้งได้รับฟอสฟอรัสจากอาหารเป็นส่วนใหญ่ ฟอสฟอรัสนั้นมีความสำคัญต่อการสร้างเปลือกของครัสเตเชียน รองลงมาจากแคลเซียมและไบคาร์บอเนต โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่มีการสร้างเปลือกใหม่ ๆ (Pratoomchat et al., 2002a) และใช้เพื่อการสังเคราะห์ไคติน (Renaud, 1949 อ้างโดย Luquet & Marin, 2004) รวมถึงเปลือกของลูกกุ้งในระยะโพสลาวานี้จะเริ่มมีความแข็งมากขึ้น และมีการสะสมของแร่ธาตุต่าง ๆ เพิ่มมากกว่าลูกกุ้งในระยะนอเพลียสถึงไมซิส จะเห็นได้จากข้อมูลที่พบว่าปริมาณแคลเซียม และฟอสฟอรัสในตัวของลูกกุ้งระยะนี้สูงกว่าระยะอื่น ๆ ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการสร้างเปลือก และการเจริญเติบโตดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ลูกกุ้งได้รับควรอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการ

มีรายงานว่ากุ้งที่ให้หอยแมลงภู่ซึ่งมีฟอสฟอรัสต่ำ 0.7% เป็นอาหารมีผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง (Cuzon, 1982 อ้างโดย Davis & Lawrence 1997) สอดคล้องกับการใช้อาหารกึ่งบริสุทธิ์ที่มีระดับฟอสฟอรัสต่ำ 0.41 % และ 0.56 % เลี้ยงกุ้ง *P. vannamei* และ *P. japonicus* จะทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง (Civera & Guillanme, 1989 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ การดูดซึมฟอสฟอรัสของสัตว์น้ำจากน้ำจืดหรือน้ำเค็มโดยทั่วไปยังมีไม่เพียงพอ (Kitabayashi et al., 1971; Deshimaru & Yone, 1978; Kanasawa et al., 1984 อ้างโดย Davis & Lawrence, 1997) การเสริมฟอสฟอรัสสำหรับลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาจึงเป็นเรื่องที่ควรพิจารณา แต่เป็นการเสริมในอาหาร ไม่ว่าจะมีการลดความเค็มน้ำหรือไม่ก็ตาม

ขณะที่กำมะถันและทองแดง น่าจะพบในร่างกายกุ้งในปริมาณที่ต่ำมาก ๆ ซึ่งเป็นไปได้ว่าน่าจะมากเกินพอในระบบอนุบาล โดยทั่วไปจะพบทองแดงในปริมาณที่ต่ำมากในโครงสร้างเปลือกหรือกล้ามเนื้อกุ้งขนาดกลาง ถึง ขนาดใหญ่ แต่จะพบมากในระบบเลือด เนื่องจากทองแดงมีความสำคัญในกิจกรรมของเอนไซม์ (Enzyme activity) รวมทั้งเป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุเกี่ยวกับการหายใจ (Liu et al., 1990) ส่วนกำมะถันพบในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำในกุ้งขาวขนาดใหญ่ แต่ในกุ้งวัยอ่อนไม่พบเลยแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นค่อนข้างต่ำมากหรือในน้ำมีมากเกินพอ ถึงแม้ว่ากำมะถันจะมีความเข้มข้นลดลงตามการลดความเค็มน้ำ เนื่องจากพบว่าความเข้มข้นของกำมะถันในน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ปริมาณแมงกานีสในลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาพบในปริมาณต่ำและมีความแปรปรวนสูง ขณะที่ในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งนั้น ตรวจสอบไม่พบแมงกานีส ซึ่งโดยปกติก็พบว่าในน้ำทะเลนั้นมีปริมาณแมงกานีสต่ำมาก (0.00003 mg/l) (Brown et al., 1995) แสดงว่าลูกกุ้งน่าจะได้รับแมงกานีสจากอาหารเพียงพอต่อความต้องการแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแมงกานีสในระบบอนุบาล

โดยสรุปในการอนุบาลลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการลดความเค็มน้ำ ควรจะมีการเสริมไบคาร์บอเนต โพแทสเซียม คลอรีน โซเดียมและแคลเซียมในน้ำและฟอสฟอรัสก็ควรมีการเสริมในอาหาร เพื่อช่วยให้ลูกกุ้งมีการพัฒนาการและการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ลูกกุ้งที่มีคุณภาพและอัตรารอดสูงขึ้น

สำหรับคาร์บอเนตในน้ำมีความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไปในลูกกุ้งทุกระยะ ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำ กลายเป็นกรดคาร์บอนิก และจะมีการแตกตัวออกเป็นไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ดังสมการ

$$CO_2\,(gas) + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3\,(aq) \longleftrightarrow H^+\,(aq) + HCO_3^-\,(aq)$$

$$\updownarrow$$

$$H^+\,(aq) + CO_3^{2-}\,(aq)$$

ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของก๊าซที่ละลายน้ำจะพบปริมาณน้อยมาก (0.23 ml/l) ส่วนมากจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตอิออน และคาร์บอเนตอิออน (50 ml/l) โดยสัดส่วนของไบคาร์บอเนตอิออนสูงกว่าคาร์บอเนตอิออนมาก และคาร์บอเนตในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบ โดย 67 % อยู่ในรูปของแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) มีเพียง 9 % เท่านั้นที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนตอิออนอิสระ (Brown et al., 1995) ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่าความเข้มข้นไบคาร์บอเนตในน้ำลดลง เนื่องจากถูกใช้ไปโดยลูกกุ้ง ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินจากซ้ายไปขวาเพื่อให้กรด

คาร์บอนิกมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นไบคาร์บอเนตมากขึ้น (ตามสมการ) และในปฏิกิริยาดังกล่าวได้คาร์บอเนตด้วย ทำให้คาร์บอเนตในน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป หรืออธิบายได้ด้วยอีกเหตุผล คือ การอนุบาลลูกกุ้งทุกระยะในการทดลองนี้ พีเอชของน้ำที่ทำการอนุบาลมีค่า 8.1-8.2 ตลอดการอนุบาล และที่ระดับพีเอชดังกล่าว ในน้ำโดยทั่วไปความเข้มข้นของคาร์บอเนตจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไบคาร์บอเนตจะเริ่มลดลง (Brown et al., 1995) แสดงให้เห็นว่าลูกกุ้งไม่ได้ใช้ประโยชน์จากคาร์บอเนต

3. การเสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลลูกกุ้งขาว

3.1 ระยะนอเพลียส

จากการทดลองที่ 1 ซึ่งพิจารณาว่าควรเสริมไบคาร์บอเนต โพแทสเซียม และแมกนีเซียมในระบบอนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียส เนื่องจากพบปริมาณแร่ธาตุดังกล่าวในร่างกายลูกกุ้งสูง และมีการลดลงไปจากน้ำที่ทำการอนุบาลมาก จึงได้ทำการเสริมด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต โพแทสเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ ลงไปในน้ำที่ใช้อนุบาลลูกกุ้งระยะนอเพลียส ปรากฏว่า ลูกกุ้งที่ได้รับการเสริมแร่ธาตุมีอัตราการรอดตายของลูกกุ้งสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ถึงแม้ว่าจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนการพัฒนาการ และการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การที่ลูกกุ้งในชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุ มีอัตราการรอดตายที่สูงกว่าเล็กน้อย อาจจะมีข้อได้เปรียบมาจากคุณภาพน้ำช่วง 15 ชั่วโมงของชุดการทดลองที่เสริมแร่ธาตุในการอนุบาลมีการเปลี่ยนแปลงต่ำ กล่าวคือ มีค่าออสโมลาลิตี้ และความเค็มน้ำคงที่ ส่วนความเป็นกรด-ด่าง ลดลงเพียง 0.71 % ขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ออสโมลาลิตี้ลดลง 0.51 % ความเค็มน้ำลดลง 0.25 % และความเป็นกรด — ด่างลดลง 1.42 % ส่วนความนำไฟฟ้ามีการลดลงเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 6 % แสดงว่าลูกกุ้งทั้ง 2 ชุดการทดลองมีการนำอิออนจากน้ำไปใช้ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งคุณภาพน้ำในการอนุบาลนั้นส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาและการเจริญพัฒนาของลูกกุ้ง การที่คุณภาพน้ำในการอนุบาลอยู่ในระดับที่คงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยย่อมส่งผลดีต่อสุขภาพลูกกุ้ง เนื่องจากไม่ต้องสูญเสียพลังงานไปเพื่อรักษาระบบสมดุลต่าง ๆ ในร่างกาย ลูกกุ้งจึงสามารถใช้พลังงานทั้งหมดไปเพื่อการพัฒนาการและการเจริญเติบโต ขณะที่ชุดการทดลองที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ซึ่งพบว่าคุณภาพน้ำมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ลูกกุ้งจึงต้องมีการปรับตัวมากกว่า ซึ่งการปรับตัวจำเป็นต้องใช้พลังงานบางส่วนไปเพื่อการรักษาระบบสมดุลต่าง ๆ หรือถ้าไม่สามารถรักษาระบบสมดุลต่าง ๆ ได้จะส่งผลให้ลูกกุ้งตาย มีผลให้อัตราการรอดตายต่ำลง

การเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในชุดที่เสริมแร่ธาตุนั้น ทำให้ค่าความเป็นด่าง และไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 10 และ 11% ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ที่อาจมีส่วนทำให้ในน้ำมีปริมาณไบคาร์บอเนตมากเกินพอต่อการนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือก อีกทั้งระดับไบคาร์บอเนตที่สูงขึ้นนั้นจะไปมีผลทำให้ระดับความเป็นกรด-ด่าง มีการเปลี่ยนแปลงต่ำในรอบวัน ซึ่งมีผลดีต่อสรีระเคมีภายในร่างกายของลูกกุ้ง ทำให้กระบวนการสร้างเปลือกมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น และยังพบว่าชุดที่เสริมแร่ธาตุความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แมกนีเซียมสูงขึ้น 37 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แมกนีเซียมนับว่ามีความสำคัญต่อลูกกุ้งระยะนอเพลียสมาก จากการทดลองที่ 1 พบว่ามีการใช้ในโครงสร้างแทนแคลเซียมซึ่งไม่พบเลย การเสริมแมกนีเซียมร่วมกับไบคาร์บอเนต ทำให้ระดับของแมกนีเซียมและไบคาร์บอเนตในน้ำที่ทำการอนุบาลสูงขึ้น ลูกกุ้งจึงมีโอกาสสะสมเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะเห็นได้จากการพบปริมาณแมกนีเซียมในร่างกายลูกกุ้งสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อลูกกุ้งสามารถสร้างเปลือกหลังการลอกคราบได้เร็ว ทำให้ลูกกุ้งมีการเจริญพัฒนาและการเจริญเติบโตที่ดี สุขภาพแข็งแรง และส่งผลให้อัตราการรอดตายดีขึ้น

ความเข้มข้นของคลอรีนและโพแทสเซียมในน้ำที่ทำการอนุบาล และในร่างกายลูกกุ้ง พบว่าไม่แตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ขณะที่ความเข้มข้นโซเดียมในน้ำไม่แตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลองเช่นกัน แต่เมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป ชุดที่เสริมแร่ธาตุมีการลดลงของโซเดียมในน้ำมากกว่าและเมื่อพิจารณาในร่างกายลูกกุ้งพบว่า ลูกกุ้งระยะนอเพลียส - 4 ชุดที่เสริมแร่ธาตุมีโซเดียมในร่างกายสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เป็นไปได้ว่าเมื่อมีการเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในน้ำ ย่อมส่งผลให้ความเข้มข้นของโซเดียมสูงขึ้น เกิดการแพร่ของโซเดียมเข้าสู่ร่างกายลูกกุ้ง และลูกกุ้งในระยะนอเพลียสนี้อวัยวะต่าง ๆ เกี่ยวกับการควบคุมระบบสมดุล เช่น เหงือก (Gill) ซึ่งเป็นอวัยวะที่ควบคุมอิออนโมเลกุลเดี่ยว (Monovalents) (Potts & Parry 1964) ยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ ดังรายงานของ Bouaricha et al. (1994) พบว่าในครัสเตเชียนระยะวัยอ่อน ตุ่มเหงือก (Gill bud) จะพบในซูเอียระยะสุดท้าย ดังนั้นการเคลื่อนย้ายโซเดียมจึงทำได้เพียงเล็กน้อยโดยผ่านทางโครงสร้างร่างกาย ทำให้พบระดับของโซเดียมในร่างกายลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่า ทั้งนี้การเคลื่อนย้ายโซเดียมอิออน (Na^+) ยังเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase อีกด้วย (Flik & Haond, 2000) ซึ่งจากการศึกษาในกุ้ง *P. japonicus* ระยะนอเพลียสไม่พบการทำงานของเอนไซม์นี้ (Bouaricha et al., 1991) จึงน่าจะสอดคล้องกับลูกกุ้งขาว *P. vannamei* ระยะนอเพลียสในการทดลองนี้ ต่างไปจากกุ้ง Ghost shrimp (*Lepidophthalmus louisianensis*) ที่พบการทำงานของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase ทันทีหลังจากการฟัก และยังคงมีระดับสูงเมื่อเข้าสู่ระยะวัยอ่อน (Charmantire & Charmantire Daures, 2001)

เนื่องจากโซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมนั้น เป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อระบบสมดุลออสโมติกของเลือด และช่วยรักษาสมดุลของกรด-เบส (Pratoomchat et al., 2002a) โดยทั่วไปสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียนจะพยายามควบคุมให้อยู่ในร่างกายในระดับที่มีความเหมาะสม ถึงแม้สิ่งแวดล้อมภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงไป แต่เนื่องจากลูกกุ้งระยะนอเพลียสนั้นน่าจะมีพฤติกรรมที่แรงดันออสโมติกภายในร่างกายเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) เช่นที่พบในกุ้ง *P. japonicus* ระยะนอเพลียส ถึง ไมซิส (Bouaricha et al., 1991) ส่งผลให้ความเข้มข้นอิออนภายในร่างกายแปรตามน้ำภายนอก อย่างไรก็ตามเหตุการณ์นี้ไม่น่าส่งผลกระทบต่อลูกกุ้ง เพราะลูกกุ้งชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุยังสามารถเจริญเติบโตได้เป็นปกติ และยังมีอัตราการรอดตายสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ

ส่วนแคลเซียมคาดว่าไม่มีความจำเป็นสำหรับลูกกุ้งระยะนอเพลียส เนื่องจากไม่พบเลยในร่างกายของลูกกุ้งทั้ง 2 ชุดการทดลอง เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ที่พบว่าลูกกุ้งระยะนอเพลียสใช้แมกนีเซียมในโครงสร้างแทนแคลเซียม เช่นเดียวกับปู Spider crab (*Hyas araneus*) ที่พบว่า ตัวอ่อนระยะซูเอีย (Zoea) โดยทั่วไปจะมีคิวติเคิลที่ไม่มีการสะสมของแคลเซียม แต่ในตัวอ่อนระยะเมกาโลปา (Megalopa) และระยะวัยรุ่นโครงสร้างของเปลือกจะมีความแข็งมากกว่าและบางส่วนจะมีการสะสมของแคลเซียม (Anger, 2001)

3.2 ระยะซูเอีย

จากการทดลองตอนที่ 1 พิจารณาว่าควรมีการเสริมแคลเซียม และไบคาร์บอเนตสำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะซูเอีย เนื่องจากลูกกุ้งมีการตรวจพบในร่างกายลูกกุ้งสูง และมีการหายไปจากน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในการทดลองที่ 2 นี้จึงมีการเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำที่ทำการอนุบาล พบว่าลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายดีกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนการพัฒนาการ และการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

คุณภาพน้ำน่าจะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ลูกกุ้งชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีอัตราการรอดตายดีกว่า จากการทดลองพบว่า ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง และไบคาร์บอเนต คาร์บอเนตในชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป และมีค่าสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ ขณะที่ความเค็มน้ำ และความเป็นกรด- ด่างของกลุ่มที่มีการเสริมแร่ธาตุสามารถรักษาระดับไว้ได้เมื่อเวลาในการอนุบาลผ่านไป แต่ในกลุ่มที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุมีแนวโน้มลดลง ความนำไฟฟ้ามีการลดลงทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่ชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุมีความนำไฟฟ้าสูงกว่า

จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุ คุณภาพน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ส่งผลให้ลูกกุ้งไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการปรับตัวมากนัก พลังงานส่วนมากจึงสามารถนำไปใช้ในการเมตาบอลิซึม ส่งผลให้ลูกกุ้งมีการเจริญเติบโตดี แข็งแรง อัตราการรอดตายสูงขึ้น ซึ่งถ้าครัสเตเชียนระยะวัยอ่อนเผชิญกับความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออสโมติก (Osmotic stress) จะทำให้การทำหน้าที่หรือโครงสร้างของ เซลล์ หรือเนื้อเยื่อเสียหาย อัตราการเมตาบอลิซึมเปลี่ยนแปลงหรือส่งผลต่อกลไกในระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เช่นที่พบว่า *Homarus gammarus*, *Cancer pagurus*, *Carcinus maenas* และ *Chasmagnathus granuluta* ระยะซูเอีย 1 มีปริมาณไขมันและโปรตีนในร่างกายต่ำลง เมื่อต้องเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ (Torres et al., 2002)

สำหรับไบคาร์บอเนตในน้ำของชุดการทดลองที่เสริมแร่ธาตุพบว่า สูงขึ้น 16 % เช่นเดียวกับความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยสูงขึ้น 59 % เป็นที่ทราบกันดีว่าแคลเซียมและไบคาร์บอเนต เป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างเปลือก รองลงมาคือ แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส (Pratoomchat et al., 2002a) การมีแคลเซียมและไบคาร์บอเนตในน้ำสูง น่าจะมีส่วนช่วยให้ลูกกุ้งสามารถสร้างเปลือกได้รวดเร็ว และมีความสมบูรณ์ของเปลือกสูง และจากปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในร่างกายลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการสร้างเปลือกของลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุสามารถเกิดขึ้นได้ดี จึงทำให้ลูกกุ้งมีสุขภาพดี และมีโอกาสรอดตายสูงขึ้น สอดคล้องกับรายงานในปู *Armases miersii* ระยะซูเอีย เมื่ออนุบาลด้วยน้ำความเค็ม 35-45 ppt ซึ่งมีความเข้มข้นของอิออนสูง พบว่ามีการเจริญเติบโตดีกว่าเมื่ออนุบาลด้วยน้ำความเค็ม 15-25 ppt เนื่องมาจากปูชนิดนี้ในระยะวัยอ่อนแรงดันออสโมติกภายในร่างกายเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำภายนอก (Osmoconformer) ที่ความเค็มน้ำสูง ดังนั้นจึงไม่ต้องสูญเสียพลังงานไปเพื่อการปรับสมดุล พลังงานทั้งหมดใช้สำหรับการเจริญเติบโตเพียงอย่างเดียว (Anger et al., 2000)

สำหรับโซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมในน้ำ มีความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อมีการเสริมแร่ธาตุ แต่ในร่างกายลูกกุ้งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งมีการควบคุมแร่ธาตุเหล่านี้ให้อยู่ในร่างกายที่ความเข้มข้นระดับหนึ่ง ซึ่งอยู่ในระดับที่มีความเหมาะสมต่อร่างกาย ทั้งนี้เนื่องจากแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดนี้ จัดว่าเป็นแร่ธาตุที่รักษาระดับสมดุลออสโมติกภายในร่างกาย (Pratoomchat et al., 2002a) โดยทั่วไปสัตว์จะพยายามควบคุมให้มีความคงที่ถึงแม้ว่า ความเข้มข้นของอิออนภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม และลูกกุ้งในระยะซูเอียนี้ พบกิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase สูงขึ้นกว่าระยะนอเพลียส (Bouaricha et al., 1991) และลูกกุ้งก็สามารถควบคุมอิออนต่าง ๆ จากน้ำภายนอกที่เคลื่อนที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางเปลือก หรือโครงสร้างภายนอก (Integument) (Anger, 2001) จึงมีส่วนช่วยควบคุมสมดุลของอิออนต่าง ๆ ภายในร่างกาย

ได้ เช่นที่พบว่า หลังจากย้าย lobster *H. americanus* ระยะวัยอ่อน (stage 1-3) จากน้ำทะเลปกติ (850 mOsmol/kg) ไปสู่น้ำทะเลที่มีความเจือจาง (500 mOsmol/kg) ค่าออสโมลาลิตี้ของเลือดจะถึงจุดสมดุลใหม่ภายในเวลา 2 ชั่วโมง โดยออสโมลาลิตี้ที่ได้มีค่าสูงกว่าออสโมลาลิตี้ของน้ำทะเลที่มีความเจือจาง 10 – 20 mOsm/l (Charmantier et al., 1988 อ้างโดย Lucu & Devescovi, 1999)

3.3 ระยะไมซิส

ในการทดลองที่ 1 พบว่าลูกกุ้งระยะไมซิส มีความต้องการแมกนีเซียมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพบปริมาณค่อนข้างสูงในร่างกายลูกกุ้ง ทั้งยังพบว่าไบคาร์บอเนตมีการหายไปจากน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) การทดลองที่ 2 นี้จึงเสริมแมกนีเซียมคลอไรด์ และโซเดียมไบคาร์บอเนตในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งระยะไมซิส ผลการทดลองพบว่า ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายดีกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ถึงแม้ว่าการพัฒนาการ และการเจริญเติบโตจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การเสริมแร่ธาตุมีผลให้ออสโมลาลิตี้ ความเป็นด่าง ความเค็มน้ำ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ โดยสูงกว่า 10, 14, 8.3, 9.57 และ 38 % ตามลำดับ ความนำไฟฟ้าของชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่า และค่อนข้างคงที่ ขณะที่ชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุมีการลดลง 7 % ส่วนความเป็นกรด - ด่างมีแนวโน้มสูงขึ้นทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่ชุดที่เสริมแร่ธาตุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า จากข้อมูลคุณภาพน้ำ จะเห็นได้ว่าน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งของชุดการทดลองที่เสริมแร่ธาตุ เอื้อประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตมากกว่า การที่ค่าออสโมลาลิตี้ และความนำไฟฟ้าสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ แสดงให้เห็นว่ามีความเข้มข้นอิออนต่าง ๆ ในน้ำสูงกว่า ดังนั้นลูกกุ้งจึงสามารถนำไปใช้ได้ตลอดการพัฒนาการ โดยไม่ต้องประสบกับภาวะขาดแคลน

จากการที่ความเข้มข้นไบคาร์บอเนตของชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่า ลูกกุ้งจึงสามารถสะสมเข้าสู่ร่างกายได้อย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการสร้างเปลือกหลังการลอกคราบเกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ลูกกุ้งมีความแข็งแรง อีกทั้งระดับไบคาร์บอเนตที่สูงขึ้นนั้นจะไปมีผลทำให้ระดับความเป็นกรด-ด่าง มีการเปลี่ยนแปลงต่ำ จะเห็นได้จาก ชุดที่เสริมแร่ธาตุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ลูกกุ้งจึงไม่ต้องเสียพลังงานไปเพื่อการปรับสมดุลกรด-เบส สามารถนำพลังงานทั้งหมดมาใช้เพื่อการเจริญเติบโต เมื่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการเกิดขึ้นได้ดี ทั้งมีประสิทธิภาพในการสร้างเปลือก ส่งผลให้ลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุมีการรอดตายสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

แมกนีเซียมในน้ำชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ในร่างกายลูกกุ้งไม่แตกต่างกัน แมกนีเซียมจัดเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในกระบวนการ

สร้างเปลือกร่วมกับแคลเซียม และไบคาร์บอเนต (Pratoomchat et al., 2002) และยังมีบทบาทในการควบคุมสมดุลออสโมติก และความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (Membrane potential) (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546ก) ซึ่งจากการทดลองในตอนที่ 1 จะเห็นได้ว่าการสร้างเปลือกของลูกกุ้งระยะไมซิส ใช้สัดส่วนแมกนีเซียมมากกว่าแคลเซียม โดยมีสัดส่วน แมกนีเซียมต่อแคลเซียม เฉลี่ย 4 ต่อ 1 และเนื่องจากลูกกุ้งในระยะวัยอ่อนนี้มีวงจรการลอกคราบที่สั้น กุ้งจะต้องมีการสะสมแร่ธาตุอย่างรวดเร็วเพื่อการลอกคราบในแต่ละครั้ง ดังนั้นการที่ในน้ำมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมสูง ลูกกุ้งจึงมีโอกาสสะสมแร่ธาตุสำหรับสร้างเปลือกได้เร็วกว่าชุดการทดลองที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ทำให้ลูกกุ้งมีความแข็งแรง และกระบวนการสร้างเปลือกมีความสมบูรณ์ ส่งผลให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายสูงกว่าเมื่อไม่เสริมแร่ธาตุในการอนุบาล ส่วนแคลเซียม ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการสร้างเปลือกร่วมกับแมกนีเซียมและไบคาร์บอเนตนั้น เนื่องจากไม่มีการเสริมในการอนุบาลลูกกุ้งระยะไมซิส แคลเซียมจึงมีค่าไม่แตกต่างกันทั้งในน้ำและในร่างกายลูกกุ้งทั้ง 2 ชุดการทดลอง แคลเซียมในระดับดังกล่าวน่าจะมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของลูกกุ้ง จะเห็นได้จากการที่ลูกกุ้งมีการเจริญเติบโต และพัฒนาการที่ดี

สำหรับโซเดียม คลอรีนและโพแทสเซียมที่มีความสำคัญในการรักษาสมดุลออสโมติก (Pratoomchat et al., 2002a) พบว่าโซเดียม และโพแทสเซียมในน้ำที่ทำการอนุบาลและในร่างกายลูกกุ้งไม่แตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ขณะที่ความเข้มข้นคลอรีนในน้ำของชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนในร่างกายลูกกุ้งนั้นโดยภาพรวมไม่แตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง การที่ความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำสูงขึ้น แต่ปริมาณคลอรีนในร่างกายของลูกกุ้งไม่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั้น อาจเนื่องมาจากลูกกุ้งมีการปรับตัวเพื่อรักษาสมดุลของอิออนในร่างกาย คลอรีนก็เป็นอิออนที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลออสโมติก เมื่อน้ำภายนอกมีความเข้มข้นของคลอรีนสูงกว่าระดับปกติมาก ทำให้มีการแพร่ของคลอรีนเข้าสู่ร่างกายของลูกกุ้งมากขึ้น จึงต้องมีกลไกเพื่อกำจัดอิออนส่วนเกินออกจากร่างกาย และลดการแพร่เข้า โดยกลไกการทำงานของเหงือก เพื่อรักษาระดับคลอรีนไว้ให้อยู่ในสภาพสมดุล จึงทำให้ปริมาณคลอรีนที่พบในร่างกายลูกกุ้งไม่เปลี่ยนแปลง ตามความเข้มข้นของคลอรีนภายนอก ดังรายงานในปู *Eriocheir sinensis* ว่ามีเหงือกที่พัฒนา และทำหน้าที่ได้ดีตั้งแต่ซูเอียระยะสุดท้าย (Anger, 2001) เมื่อลูกกุ้งสามารถควบคุมสมดุลออสโมติกภายในร่างกายไว้ได้ จึงมีผลให้ไม่มีปัญหาในการพัฒนาการ และการเจริญเติบโต ดังรายงานในผลการทดลองที่พบว่า การเจริญเติบโตและการพัฒนาการไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับรายงานในปู *Armases miersii* ระยะเมกาโลปา (Megalopa) และระยะเป็นตัวปู (Crab I) พบว่า มีการเจริญเติบโตที่ดีในช่วงความเค็มกว้าง 15-35 ppt เนื่องจากความสามารถควบคุมแรงดันออสโมติกภายในร่างกายให้สูงกว่า

น้ำภายนอก (Hyper-regulation) รวมทั้งมีเหงือกที่ทำหน้าที่ได้ดี และมีเยื่อบุผิวสำหรับการขนส่งขยายขนาดขึ้น (Anger et al., 2000)

3.4 ระยะโพสลาวา

สำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะโพสลาวา จากการทดลองที่ 2 พบแร่ธาตุและสารประกอบที่ควรเสริมกรณีที่มีการปรับลดความเค็มน้ำในการอนุบาล คือ ไบคาร์บอเนต โพแทสเซียม คลอรีน โซเดียม และแคลเซียม แต่สำหรับโซเดียมและคลอรีน ถึงแม้ว่าลูกกุ้งจะมีความต้องการในระดับที่คงที่ อีกทั้งมีค่าลดลงตามการปรับลดความเค็มน้ำ แต่โซเดียมและคลอรีนเป็นแร่ธาตุที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงมีโอกาสน้อยที่ลูกกุ้งจะขาดแคลน ในการทดลองนี้จึงพิจารณาให้มีการเสริม โพแทสเซียม และแคลเซียม เนื่องจากมีความเข้มข้นต่ำในน้ำทะเล และพบปริมาณสูงในร่างกายลูกกุ้ง ชี้ให้เห็นว่ามีความต้องการสูง ซึ่งการเสริมแร่ธาตุดังกล่าวจะแตกต่างกันไปในลูกกุ้งแต่ละระยะ ขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกกุ้งในระยะนั้น ๆ ตามผลการทดลองที่ 2 และจากการเสริมโพแทสเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต ในการอนุบาลลูกกุ้งระยะโพสลาวา 1 ถึง 10 พบว่าทำให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายดีกว่าเมื่อไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ถึงแม้ว่าการเจริญเติบโตจะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การลดความเค็มน้ำมีผลให้ออสโมลาลิตี้ ความเค็มน้ำ และความนำไฟฟ้ามีค่าลดลง ทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีรายงานว่าการลดระดับความเค็มน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปู Shore crab (*Carcinus* maenas) ระยะวัยอ่อนลดลง โดยไม่เพียงแต่ดูดซึมสารอินทรีย์จากอาหารที่ได้รับน้อยลง สัดส่วนที่จะดูดซึมเพื่อสร้างเนื้อเยื่อ (Tissue growth) ยังลดลงด้วย (Anger et al.,1998) และโดยทั่วไปเมื่อสัตว์ต้องเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ กิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase และกิจกรรมของ Ca^{2+} transporter จะสูงขึ้น ทำให้อัตราการเมตาบอลิก (Metabolic rate) เพิ่มขึ้น ต้องมีการปรับสมดุลกรด-เบส และเพิ่มการขับถ่ายของเสีย (Henry & Wheatly, 1992; Piller et al., 1995; Flik & Haond, 2000) แต่เนื่องจากส่วนประกอบของอิออนในน้ำ มีความสำคัญมากกว่าระดับความเค็มน้ำ (Davis et al., 2004) ดังนั้นถึงแม้จะมีการปรับลดความเค็มน้ำ แต่ถ้ามีการเสริมแร่ธาตุที่มีความสำคัญให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ย่อมส่งผลให้ลูกกุ้งลดความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบสมดุลออสโมติก (Osmotic stress) ช่วยให้ลูกกุ้งไม่ต้องสูญเสียพลังงานไปเพื่อปรับระบบสมดุลต่าง ๆ ของร่างกาย ทำให้สามารถใช้พลังงานส่วนใหญ่เพื่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้มีการเจริญเติบโต และการรอดตายที่ดี จะเห็นได้จากผลการทดลองซึ่งชุดที่มีเสริมแร่ธาตุมีอัตราการรอดตายดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากข้อมูลในการทดลองตอนที่ 2 พบว่าลูกกุ้งมีความต้องการแคลเซียมในระดับที่คงที่ภายใต้สภาวะการลดลงของแคลเซียมในน้ำ เนื่องจากมีการลดความเค็มน้ำในการอนุบาล เมื่อทดลองเสริมแคลเซียมลงในน้ำความเค็ม 24, 20 และ 15 ppt ที่ทำการอนุบาลพบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำที่ทำการอนุบาลสูงกว่าชุดที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่เมื่อพิจารณาในร่างกายลูกกุ้งปรากฏว่าปริมาณแคลเซียมไม่มีความแตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง สอดคล้องกับที่พบปู Blue crabs (*Callinectes sapidus*) ระยะตัวเต็มวัย เมื่อนำมาปรับสภาพให้อยู่ในน้ำความเค็มต่ำจะมีการรักษาความเข้มข้นของแคลเซียมให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าโซเดียมหรือคลอไรด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังการลอกคราบ ซึ่งต้องการแคลเซียมปริมาณมากสำหรับการสร้างเปลือกใหม่ (Neufeld & Cameron, 1994a) ถึงแม้ว่าปริมาณแคลเซียมที่พบในร่างกายลูกกุ้งจะไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากลูกกุ้งในระยะวัยอ่อนนี้มีวงจรการลอกคราบที่สั้น กุ้งจะต้องมีการสะสมแร่ธาตุอย่างรวดเร็วเพื่อการลอกคราบในแต่ละครั้ง ดังนั้นการที่ในน้ำมีความเข้มข้นของแคลเซียมสูง ลูกกุ้งจึงมีโอกาสสะสมแร่ธาตุสำหรับสร้างเปลือกได้เร็วกว่าชุดการทดลองที่ไม่เสริมแร่ธาตุ ทำให้ลูกกุ้งมีความแข็งแรง และกระบวนการสร้างเปลือกมีความสมบูรณ์ ส่งผลให้ลูกกุ้งมีอัตราการรอดตายสูงกว่าเมื่อไม่เสริมแร่ธาตุในการอนุบาล และถึงแม้ว่าชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุตั้งแต่ระยะโพสลาวา 4 เป็นต้นไป มีค่าไบคาร์บอเนตต่ำว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ แต่คาดว่าไม่น่าจะมีปัญหาต่อกระบวนการสร้างเปลือกของลูกกุ้ง เพราะค่าไบคาร์บอเนตยังอยู่ในระดับที่สูง และลูกกุ้งไม่มีปัญหาในการเจริญเติบโต เห็นได้จากผลการทดลองที่การเจริญเติบโตไม่มีความแตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง

สำหรับโพแทสเซียมพบว่า มีความเข้มข้นลดลงตามการปรับลดความเค็มน้ำ แต่เมื่อเสริมโพแทสเซียมลงในน้ำความเค็ม 20, 17, 15, 13, 10 และ 8 ppt พบว่าทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำของชุดที่เสริมแร่ธาตุสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ในร่างกายลูกกุ้งพบว่า ส่วนมากไม่มีความแตกต่างกัน ยกเว้นในระยะโพสลาวา 6 และ10 ที่พบว่าชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุมีปริมาณโพแทสเซียมในร่างกายสูงกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เนื่องจากโพแทสเซียมเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญในการควบคุมระบบสมดุลออสโมติกรองลงมาจากโซเดียมและคลอรีน จึงมีการควบคุมให้อยู่ในร่างกายในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม การที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำที่ทำการอนุบาลมีความเข้มข้นลดลง ลูกกุ้งจึงต้องมีกลไกในการใช้พลังงานอย่างมากเพื่อลดการสูญเสียโพแทสเซียมสู่น้ำภายนอก และดึงโพแทสเซียมจากน้ำภายนอกเข้าสู่ร่างกาย การเสริมโพแทสเซียมลงในน้ำจึงช่วยให้ลูกกุ้งลดการใช้พลังงานเพื่อการปรับสมดุลออสโมติก สำหรับความเข้มข้นโซเดียมและคลอรีนในน้ำและในร่างกายลูกกุ้ง พบว่าไม่แตกต่างกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งมีการควบคุมระดับของแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดให้คงที่

ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำภายนอก เนื่องจากแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญในการควบคุมระบบสมดุลออสโมติก (Pratoomchat et al., 2002a) และลูกกุ้งในระยะโพสลาวานี้สามารถควบคุมสมดุลของอิออน ต่าง ๆ ได้ดี เช่นที่พบว่ากุ้ง *P. japonicus* ระยะโพสลาวา กิจกรรมของเอนไซม์ Na^+/K^+-ATPase เพิ่มขึ้นจากระยะโพสลาวา 3 ถึง 4 และมีค่าสูงสุดที่ระยะโพสลาวา 5 ดังนั้นลูกกุ้งจึงมีประสิทธิภาพเต็มที่ในการควบคุมสมดุลอิออนระหว่างร่างกายกับน้ำภายนอก (Osmoregulatory capacity) รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในการควบคุมสมดุลอิออนจาก Osmoconforming มาเป็น Hyper-hyporegulating (Bouaricha et al., 1991) เช่นเดียวกับ Homarid lobsters ระยะโพสลาวา ที่เริ่มมีการปรากฏของเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอิออน (Osmoregulatory tissue) และกิจกรรมของ Na^+/K^+-ATPase จะสูงขึ้นเมื่อเผชิญกับน้ำความเค็มต่ำ รวมทั้งมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มมากขึ้น (Charmantier et al., 2001) และเหงือกของสัตว์กลุ่มครัสเตเชียน มีการพัฒนาและทำหน้าที่ได้เมื่อเข้าสู่ระยะเดคาโพดิด (Decapodid stages) หรือระยะโพสลาวา (Furigo, 1993; Bouaricha et al., 1994) ซึ่งเหงือกเป็นอวัยวะที่ควบคุมอิออนโมเลกุลเดี่ยว (Monovalents) เช่น โซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมอิออน (Potts & Parry 1964) ดังนั้นลูกกุ้งขาวระยะโพสลาวาจึงสามารถควบคุมสมดุลของโซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียมในร่างกายได้ดี

Davis et al. (2004) ได้รายงานว่า น้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาว *L. vannamei* ควรมีสัดส่วนของ แคลเซียมต่อโพแทสเซียม ในน้ำเป็น 1 ต่อ 1 ซึ่งใกล้เคียงกับสัดส่วนของน้ำทะเล และในการทดลองนี้ชุดที่เสริมแร่ธาตุ สัดส่วนโดยเฉลี่ยของ แคลเซียมต่อโพแทสเซียมในน้ำที่ทำการอนุบาลลูกกุ้งมีค่า 1 ต่อ 1 จึงน่าจะเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ช่วยให้ลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุมีอัตราการรอดตายสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

การที่ค่าความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และความเป็นกรด - ด่าง ของชุดที่มีการเสริมแร่ธาตุต่ำกว่าชุดที่ไม่เสริมแร่ธาตุ เนื่องมาจากชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุนั้น ใช้โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต เป็นแหล่งของโพแทสเซียม สำหรับการอนุบาลลูกกุ้งระยะโพสลาวาเมื่อมีการปรับลดความเค็มน้ำเป็น 20, 17, 15, 10 และ 8 ppt ซึ่งโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบถึง 2 ตัว เมื่อละลายน้ำทำให้น้ำมีความเป็นกรดมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำลดลง และในวัฏจักรคาร์บอนนั้นการเปลี่ยนแปลงของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตอิออนขึ้นอยู่กับความเป็นกรด- ด่างของน้ำ ซึ่งถ้าน้ำมีค่าความเป็นกรด- ด่างลดลงจะพบว่าความเข้มข้นของคาร์บอเนตต่ำลง ขณะที่ไบคาร์บอเนตจะสูงขึ้น และเมื่อความเป็นกรด - ด่างต่ำกว่า 8 จะพบเฉพาะไบคาร์บอเนตเท่านั้น (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) ซึ่งจากการทดลองลูกกุ้งระยะโพสลาวา 4 เป็นต้นไป ความเป็นกรด- ด่างของน้ำต่ำกว่า 8 จึงไม่พบคาร์บอเนต

ในน้ำ และเนื่องจากค่าความเป็นด่างของน้ำ มาจากไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตอิออนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อไม่พบคาร์บอเนตในน้ำ ทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำชุดที่เสริมแร่ธาตุมาจากค่าไบคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างของน้ำที่มีการเสริมแร่ธาตุต่ำกว่าน้ำที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ แต่ลูกกุ้งชุดที่เสริมแร่ธาตุก็มีการเจริญเติบโตปกติ และมีอัตราการรอดตายที่ดีกว่า ชี้ให้เห็นว่าลูกกุ้งสามารถปรับตัวกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดังกล่าวได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามหากจะมีการเสริมโพแทสเซียมในการอนุบาลลูกกุ้ง ควรเลือกแหล่งของโพแทสเซียมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ เพราะจะช่วยให้ลูกกุ้งไม่ต้องประสบกับความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำ และไม่ต้องสูญเสียพลังงานไปเพื่อรักษาสมดุลต่าง ๆ ของร่างกาย ซึ่งน่าจะทำให้การเจริญเติบโต และการรอดตายดียิ่งขึ้นไป

สรุปผลการวิจัย

1. การใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรด์บำบัดน้ำ มีผลทำให้ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำลดลงเมื่อใช้กับน้ำความเค็มสูงมากกว่า 25 ppt โดยเฉพาะโซเดียมและแมกนีเซียม

2. ไบคาร์บอเนต เป็นอิออนที่ลูกกุ้งระยะนอเพลียส ซูเอีย และไมซิสมีความต้องการสูง

3. แร่ธาตุที่มีความสำคัญสูงในระบบอนุบาลลูกกุ้งแต่ละระยะ คือ แมกนีเซียม และโพแทสเซียมสำหรับระยะนอเพลียส แคลเซียมสำหรับระยะซูเอีย แมกนีเซียมสำหรับระยะไมซิส และโพแทสเซียมและแคลเซียม สำหรับระยะโพสลาวา

4. อัตราการรอดตายของลูกกุ้งกลุ่มที่เสริมแร่ธาตุทุกระยะ ยกเว้นระยะนอเพลียส สูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

5. ระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาการ และการเจริญเติบโตของลูกกุ้งทั้งกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในระบบอนุบาลทุกระยะ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงผลของสารเคมีบำบัด หรือวิธีการบำบัดน้ำอื่นที่ใช้กันทั่วไป ว่ามีผลทำให้ความเข้มข้นหรือสัดส่วนของแร่ธาตุต่าง ๆ ลดลงไปหรือไม่ เพื่อให้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2. ควรมีการศึกษาถึงแหล่งของแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้เพื่อเสริมลงในระบบอนุบาล ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้ของสัตว์น้ำ ผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในการอนุบาล และต้นทุนในเชิงพาณิชย์

3. นอกจากความต้องการแร่ธาตุแล้ว ควรมีการศึกษาถึงวิตามินที่มีความสำคัญต่อลูกกุ้งขาวแต่ละระยะ เนื่องจากปัจจุบันไม่พบมีงานวิจัยทางด้านนี้

รายการอ้างอิง

คงศักดิ์ เรืองบุญส่ง. (2544). *การอนุบาลกุ้งกุลาดำระยะโพสลาวาด้วยอาร์ทีเมียแช่แข็ง ไรแดงแช่แข็ง อาร์ทีเมียเฟลก และอาหารสำเร็จรูป*. ปัญหาพิเศษปริญญาการศึกษาบัณฑิต, สาขาวาริชศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ชุลีพร พุฒนวล. (2533). *การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟอร์มในน้ำที่ผ่านการเติมคลอรีน*. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา.

บังอร ศรีมุกดา. (2530). *การเพาะกุ้งกุลาดำ*.กรุงเทพฯ: สถานีประมงน้ำกร่อยจังหวัดระยอง กองประมงน้ำกร่อย กรมประมง

บุญรัตน์ ประทุมชาติ. (2544). *เอกสารประกอบการสอนวิชาการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง*. ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี.

บุญรัตน์ ประทุมชาติ, บัลลังก์ เนื่องแสง และถนอมศักดิ์ บุญภักดี. (2546ก). *ผลของการเสริมเกลือแร่ในอาหารและการเปลี่ยนแปลงสรีรเคมีของกุ้งกุลาดำที่เลี้ยงระบบพัฒนา*. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา.

บุญรัตน์ ประทุมชาติ, พิชาญ สว่างวงศ์ และจอร์จ มาชาโค. (2546ข). *ผลของความเค็มน้ำต่อขบวนการลอกคราบและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรเคมีของปูทะเล(Scylla serrata)*. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา.

ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์. (2545). ศาสตร์ของกุ้งขาวลิโทพีเนียสแวนนาไม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. (2540). *การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ลัดดา วงศ์รัตน์. (2543). *คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุพิศ ทองรอด, ลัดดาวรรณ สุขเจริญ, อนันต์ ตันสุตะพานิช, และธีรวัฒน์ จริตงาม. (2542). การเลี้ยงกุ้งกุลาดำวัยอ่อนด้วยอาหารสำเร็จรูปในอัตราความหนาแน่นที่แตกต่างกัน. *วารสารการประมง, 52*(4), 325-336.

อนันต์ ตันสุตะพานิช, สุพิส ทองรอด, ธนัญช์ สังกรธนกิจ และอารี จันทร์นาค. (2540). การพัฒนารูปแบบและวิธีการอนุบาลลูกกุ้งกุลาดำระบบปิด. *วารสารการประมง, 50*(1), 21-28.

Ahearn, G.A., Mandal, P.K. & Mandal, A. (2004). Calcium regulation in crustacean during the molt cycle: a review and update. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 137*, 247-257.

Anger, K. (2001). The Biology of Decapod Crustacean Larvae.In R. Vonk.(Ed) *Crustacean Issue 14* (pp1-419) Netherlands: Grafische Vormgeving Kanters.

Anger, K., Riesebeck, K. & Puschel, C. (2000). Effects of salinity on larval and early juvenile growth of an extremely euryhaline crab species, *Armases miersii* (Decapoda: Grapsidae). *Hydrobiologia, 426*, 161-168.

Anger, K., Spivak, E. & Luppi, T. (1998). Effects of reduce salinities on development and bioenergetics of early larval shore crab, *Carcinus maenas. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 220*, 287-304.

Bouaricha, N., Thuet, P., Charmantier, G., Charmantier-Daures, M. & Trilles, J.P. (1991). Na^+ - K^+ ATPase and carbonic anhydrase activities in larvae, postlarvae and adults of the shrimp *Penaeus japonicus* (Decapoda, Penaeidea). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 100*, 433-437.

Bouaricha, N., Thuet, P., Charmantier-Daures, M., Thuet, P., Trilles, J.P. & Charmantier, G. (1994). Ontogeny of osmoregulatory structures in the shrimp *Penaeus japonicus* (Crustacean, Decapoda). *Biology Bullutin, 186*, 29-40.

Brown, E., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D. & Wright, J. (1995). *Seawater: Its composition, properties and behaviour* (2nd ed.). England: Pergamon.

Burton, R.F. (1995). Cation balance in crustacean haemolymph: relationship to cell membrane potentials and membrane surface charge. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 111*, 125-131.

Cameron, A.N. (1985). Molting in blue crab. *Scientific American, 252(5)*, 76-78

Chang, E.S. (1995). Physiological and biochemical changes during the molt cycle in decapod crustaceans: an overview. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 193*, 1-14.

Charmantier, G. (1998). Ontogeny of osmoregulation in Crustacean: a review. *Journal of Invertebrate Reproduction Development, 33*, 177-190.

Charmantier, G. & Charmantier-Daures, M. (2001). Ontogeny of osmoregulation in Crustacean: The embryonic phase. *American Zoologist, 41*, 1078-1089.

Charmantier, G., Charmantier-Daures, M. & Anger, K. (1998). Ontogeny of osmoregulation in the grapids crab *Armases miersii* (Crustacean, Decapod). *Marine.Ecology Progess Series*, *164*, 285-292.

Charmantier, G., Haond, C., Lignot, J.H. & Charmantier-Daures, M. (2001).Ecophysiological adaptation to salinity throughout a life cycle: a review in Homarid lobster. *Journal of Experimental Biology*, *204*, 967-977.

Charmantier, G., Gimenez, L., Charmantier-Daures, M. & Anger, K. (2002).Ontogeny of osmoregulation, physiological plasticity and larval export strategy in the grapsid crab *Chasmagnathus granulate* (Crustacean, Decapoda). *Marine Ecology Progress Series*, *229*, 185-194.

Chen, J.C., & Chen C.T., (1996) Change of osmotic and electrolyte concentrations in the haemolymph of *Penaeus japonicus* exposed to ambient ammonia. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C, 114*, 35-38

Cheng, K.M., Hu, C.Q., Liu, Y.N., Zheng, S.X. & Qi, X.J. (2005) Effects of dietary calcium, phosphorus and calcium/phosphorus ratio on the growth and tissue mineralization of *Litopenaeus vannamei* reared in low-salinity water. *Aquaculture*, *251*, 472-483.

Coblentz, F.E., Shafer, T.H. & Roer, R.D. (1998). Cuticular proteins from the blue crab alter in vitro calcium carbonate mineralization. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, *121*, 349-360.

Cuzon, G., Lawrence, A., Gaxiola, G., Rosas, C. Guillaume, J. (2004). Nutrition of *Litopenaeus vannamei* rared in tanks or in ponds. *Aquaculture*, *235*, 513-551.

Davis, D.A. & Arnold, C.R. (1994). Estimation of apparent phosphorus availability from inorganic phosphorus sources for *Penaeus vannamei. Aquaculture*, *127*, 245-254.

Davis, D.A. & Lawrence, A.L. (1997). Minerals. In D'Abramo L.R. et al. (Eds.) *Crustacean Nutrition Advances in World aquaculture* Vol.6 (pp.150-1630). Louisiana: Louisiana state university.

Davis, D.A., Samocha, T.M. & Boyd, C.E. (2004). Acclimating Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, to inland, low salinity waters. Southern Regional Aquaculture Center, pp. 8.

Engel, D.W., Brouwer, M. & R. Mercaldo-allen. (2001). Effect of molting and environmental factors on trace metal body-burdens and hemocyanin concentrations in the American lobster, *Homarus americanus*. *Marine Environmental Research*, *52*, 257-269.

Flik, G & Haond C. (2000). Na^{+} and Ca^{2+} pumps in the gills, epipodites and branchiostegites of the European lobster *Homarus gammarus*: effects of dilute sea water. *Journal of Experimental Biology*, *203*, 213-220.

Freeman, J.A. (1993) The crustacean epidermis during larval development. In: Horst, M.N. & Freeman, J.A. (Eds.), *The crustacean integument. morphology and biochemistry*: 193-219. Boca Raton, FL: CRC.

Freier, C.A., Cavassin, F., Rodrigues, E.N., Torres, A.H. & McNamara, J.C. (2003). Adaptive patterns of osmotic and ionic regulation and the invasion of fresh water by the palaemonid shrimps. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, *136*, 771-778.

Furriel, R.P.M., McNamara, J.C. & Leone, F.A. (2000). Characterization of (Na^{+}, K^{+}) -ATPase in gill microsome of the freshwater shrimp *Macrobrachium olfersii*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, *126*, 303-315.

Greenaway, P. (1972). Caicium regulation in the fresh-water crayfish *Austropotamobius pallipes* (Lereboullet). *Journal of Experimental Biology*, *57*, 471-478.

Henry, R.P. & Wheatly, M.G. (1992). Interaction of respiration, ion regulation and acid base balance in every day life of aquatic crustacean. *American Zoologist*, *32*, 407-416.

Inoue, H., Ohira, T., Ozaki, N. & Nagasawa., H. (2004). A novel calcium-binding peptide from cuticle of the crayfish, *Procambarus clarkia*. *Biochemical and Biophysical Reseach Communication*. *318*, 649-654.

Kennish, M.J. (1999). *Practical Handbook of Marine Science*. (2^{nd} ed.). Boca Raton: CRC.

Koop, J.H., & Grieshaber M.K., (2000). The role of ion regulation in the control of the distribution of Gammarus tigrinus (Sexton) in salt-polluted rivers. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, *170*(1), 75-83.

Kumlu, M., Eroldogan, O.T. & Aktas, M. (2000). Effects of temperature and salinity on larval growth, survival and development of *Penaeus semisulcatus*. *Aquaculture, 188*, 167-173.

Lee, M.H. & Shiau,S.Y. (2002). Dietary copper requirement of juvenile grass shrimp, *Penaeus monodon* , and effects on non-specific immune responses. *Fish & Shellfish Immunology*, *13*, 259-270.

Lignot, J.H. & Charmantier, G. (2001). Immunolocalization of Na^+ - K^+ ATPase in the branchial cavity during the early development of the European lobster *Homarus gammarus* (Crustacea, Decapoda). *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, *49*, 1013-1024.

Lignot, J.H., Spanings-Pierrot, C. & Charmantier G. (2000). Osmoregulatory capacity as a tool monitering the physiological condition and the effect of stress in crustaceans. *Aquaculture, 191*, 209-245.

Lin, S.C., Liou, C.H. & Cheng, J.H. (2000). The role of the antennal glands in ion and body volume regulation of cannulated *Penaeus monodon* reared in various salinity conditions. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, *127*, 121-129.

Lovell, R.T. (1989). *Nutrition and feeding fish*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Lovett, D.L. & Felder, D.L. (1990). Ontogenetic changes in enzyme distribution and midgut function in development stage of *Penaeus setiferus* (Crustacean, Decapoda, Penaeidae). *Biology Bullutin*, *178*, 160-174.

Lucu, C. & Devescovi, M. (1999). Osmoregulation and branchial Na^+,K^+-ATPase in the lobster *Homarus gammarus* acclimated to dilute seawater. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *234*, 291-304.

Lucu, C., Devescovi, M., Skaramuca, B. & Kozul, V. (2000). Gill Na^+,K^+-ATPase in the spiny lobster *Palinurus elephas* and other marine osmoconformers adaptiveness of enzymes from osmoconformity to hyperregulation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *163*, 163-178.

Luquet, G. & Marin, F. (2004). Biomineralisations in crustaceans: storage strategies. *Comptes Rendus Palevol*, *3*, 515-534.

Mantel, L.H. (1985). Neurohormonal integration of osmotic and ionic regulation. *American Zoologist*, *25*, 253-263.

Mantel, L.H. & Farmer, L.L. (1983). Osmotic and ionic regulation. In : Mantel, L.H.(Ed.) *The Biology of Crustacean* (Vol.5): Internal Anatomy and Physiological Regulation (pp.53-161). New York: Academic.

Martin, G.G. & Hose, J.E. (1992). Vascular elements and Blood (hemolymp) In: Harrison, F.W. and Humes, A.G.(Eds.), *Microscopic Anatomy of invertebrates 10; Decapod crustacea*, (pp.117-146) . New York: Wiley-liss.

McGraw, W.J. & Scarpa, J. (2004). Mortality of freshwater-acclimated *Litopenaeus vannamei* associated with acclimation rate, habituation period and ionic challenge. *Aquaculture,236*, 285-296.

Mendes, L., Acosta, B., Palacios, E. & Magallon, F. (1997). Effect of stocking densities on trace metal concentration in three tissues of the brown shrimp *Penaeus californiensis*. *Aquaculture, 156*, 21-34.

Nates, S.F. & McKenney Jr., C.L. (2000). Ontogenetic changes in biochemical composition during larval and early postlarval development of *Lepidophthalmus louisianensis* a ghost shrimp with abbreviated development. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B, 127*, 459-468.

Neufeld, D & Cameron, J.N. (1993). Transepithelial movement of calcium in crustacean. *Journal of Experimental Biology, 184*, 1-16.

Neufeld, D & Cameron, J.N. (1994a). Effect of the external concentration of calcium on the postmoult uptake of calcium in blue crabs (*Callinectes sapidus*). *Journal of Experimental Biology, 188*, 1-9.

Neufeld, D & Cameron, J.N. (1994b). Mechanism of the net uptake of water in moulting blue crabs (*Callinectes sapidus*) acclimated to high and low salinity. *Journal of Experimental Biology, 188*, 11-23.

Newman, S.E. (2004). Disinfecting Irrigation water for disease management. In *20th Annual Conference on Pest Management on Ornamentals Society of American Florists* (pp.1-10). California: San Jose.

Normant, M., Kubicka, M., Lapucki, T., Czarnowski, W. & Michalowska, M. (2005). Osmotic and ionic haemolymph concentrations in the Baltic Sea amphipod *Gammarus oceanicus* in relation to water salinity. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 141*, 94-99.

Pan, Q., Chen, X.Y., Li, F., Bi, Y.Z. & Zheng, S.X. (2005). Response of juvenile *Litopenaeus vannamei* to varying levels of calcium phosphate monobasic supplemented to a practical diet. *Aquaculture,248*, 97-102.

Penaflorida, V.D. (1999). Interaction between dietry levels of calcium and phosphorus on growth of juvenile shrimp *Penaeus monodon. Aquaculture, 172*, 281-289.

Pequeux, A. (1995). Osmoregulation in crustacean. *Journal of Crustacean Biology*, 15, 1-60.

Perry, H., Trigg, C., Larsen, K., Freeman, J., Erickson, M. & Henry, R. (2001). Calcium concentration in seawater and exoskeletal calcification in the blue crab *Callinectes sapidus. Aquaculture, 198*, 197-208.

Piller, S.C., Henry, P.D., Doeller, J.E. & Kraus, D.W. (1995). A comparison of the gill physiology of two euryhaline crab species, *Callinectes sapidus* and *Callinectes similes*: energy production, transport-related enzymes and osmoregilation as a function of acclimation salinity. *Journal of Experimental Biology, 189*, 349-358.

Pina, P., Nieves, M., Ramos-Brito, L.,Chavira-Ortega, C.O. & Voltolina, D. (2005). Survival, growth and feed efficiency of *Litopenaeus vannamei* protozoea larvae fed different rations of the diatom *Chaetoceros muelleri. Aquaculture, 249*, 431-437.

Pina, P., Voltolina, D., Nieves, M. & Robles, M. (2006). Survival, development and growth of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* protozoea larvae, fed with monoalgal and mixed diets. *Aquaculture, 253*, 523-530.

Potts, W.T.W. & Parry, G. (1964). Osmotic and ionic regulation in animals.In Kerkut, G.A. (Ed) *International series of monographs on pure and applied biology*, (423pp). Oxford: Pergamon.

Pratoomchat, B.,Sawangwong, P., Pakkong, P. & Machado, J. (2002a). Organic and inorganic variations in haemolymph, epidermal tissue and cuticle over the molt cycle in *Scylla serarta* (Decapoda*). Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 131*, 243-255.

Pratoomchat, B., Sawangwong, P., Guedes, R., Reis, M.D.L. & Machado, J. (2002b). Cuticle ultrastructure changes in the crab *Scylla serrata* over the molt cycle. *Journal of Experimental Zoology, 293*, 414-426.

Rainbow, P.S. (1997). Ecophysiology of trace metal uptake in crustaceans. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 44*, 169-175.

Robertson, J.D. (1960). Osmotic and ionic regulation. *In* T.H. Waterman (Ed), *Physiology of Crustacean Vol.1* (pp. 317-339). New York: Academic.

Roy, L.A., Davis, D.A., Saoud, I.P. & Henry, R.P. (in press). Effects of varying levels of aqueous potassium and magnesium on survival, growth and respiration of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in low salinity waters. *Aquaculture.*

Samocha, T.M., Guajardo, H., Lawrence, L.A., Castille, L.F., Speed, M., McKee, A.D. & Page, K.I. (1998) Asimple stress test for *Penaeus vannamei* postlarvae. *Aquaculture, 165*, 233-242.

Sang, H.M. & Fotedar, R. (2004). Growth, survival, haemolymph osmolality and organosomatic indices of the western king prawn (*Penaeus latisulcatus* Kishinouye, 1896) reared at different salinities. *Aquaculture, 234*, 601-614.

Santos, M.C.F. & Moreira, G.S. (1999). Time course of osmoionic compensations to acute salinity exposure in the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 235*, 91-104.

Scott, Q.L. (2001). Yolk synthesis in the marine shrimp, *Penaeus vannamei. American Zoologist, 41*, 458-464.

Skinner, D.M., Marsh, D.J. & Cook, J.S. (1965). Physiological salt solution for the land crab *Gecarcinus lateralis, Biology Bullutin, 129*, 355-365

Sowers, A.D., Young, S.P., Grosell, M., Browdy, C.L. & Tomasso. J.R. (2006). Haemolymph osmolality and cation concentrations in *Litopenaeus vannamei* during exposure to artificial sea salt or a mixed-ion solution: relationship to potassium flux. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 145*, 176-180.

Soyel, H.I. & Kumlu, M. (2003). The effects of salinity on postlarval growth and survival of *Penaeus semisulcatus* (Decapoda: Penaeidae). *Turkey Journal of Zoology, 27*, 221-225.

Stevenson, J.R. (1985). Integument. In : Bliss, E.D. & Mantel, L.H.(Eds.) *The Biology of*

Crustacean (Vol.9): Integument, pigment and hormonal processes. (p.3). Orlando: Academic.

Strickland, J.D. & Parsons, T.R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis* (2nd ed.). Ottawa: Alger.

Taylor, H. H., & Seneviratna, D. (2005). Ontogeny of salinity tolerance and hyper-osmoregulation by embryos of the intertidal crabs *hemigrapsus edwardsii* and *Hemigrapsus crenulatus* (Decapoda, Grapsidae): Survival of acute hyposaline exposure. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 140*, 495-505.

Torres, G., Gimenez, L. & Anger, K. (2002). Effect of reduced salinity on the biochemical composition (lipid, protein) of zoea 1 decapod crustacean larvae. *Journal of Experimental marine Biology and Ecology, 277*, 43-60.

Torres, G., Anger, K. & Gimenez, L. (2006). Effect of reduced salinity on metamorphosis of a freshwater-tolerant sesarmid crab, *Armases roberti* : Is upstream migration in the megalopa stage constrained by increasing osmotic stress?. *Journal of Experimental marine Biology and Ecology, 338*, 134-139.

Turkmen, G. (2005). The larval development of *Penaeus semisulcatus* (de Hann, 1850) (Decapoda: Penaeidae). *Journal of Fisheries & Aquatic Science, 22*(1-2), 195-199.

Velasco, M., Lawrence, A.L.& Neill, W. H. (1998). Effects of dietary phosphorus level and inorganic source on survival and growth of *Penaeus vannamei* postlarvae in zero-water exchange culture tanks. *Aquatic Living Resources, 11*, 29-33.

Vijayan, K.K. & Diwan, A.D. (1996). Fluctuations in Ca, Mg and P levels in the hemolymph, muscle, midgut gland and exoskeleton during the moult cycle of the Indian White Prown *Penaeus indicus* (Decapods; Penaeidae) *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 114*(1), 91-97.

Wang, W.N., Wang, A.L. & Zhang, Y.J. (2006). Effect of dietary higher level of selenium and nitrite concentration on the cellular defense response of *Penaeus vannamei*. *Aquaculture, 256*, 558-563.

Wheatly, M.G., Zanotto, F.P. & Hubbard, M.G. (2002). Review Calcium homeostasis in crustacean: subcellular Ca dynamics. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B, 132*, 163-178.

Wilder, M.N., Ikuta, K., Atmomarsono, M., Hatta, T. & Komuro, K. (1998). Changes in osmotic and ionic concentrations in the hemolymph of *Macrobrachium rosenbergii* exposed to varying salinities and correlation to ionic and crystalline composition of the cuticle. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 119*, 941-950.

Zanotto, F.P. & Wheatly, M.G. (2003). Calcium balance in crustaceans: nutritional aspects of physiologgical regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 133*, 645-660.

Zare, S. & Greenaway, P. (1998). The effect of moulting and sodium depletion on sodium transport and the activities of Na^+K^+-ATPase, and V-ATPase in freshwater crayfish *Cherax destructor* (Crustacea: Parastacidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 119*, 739-745.

Zhu, C., Dong, S., Wang, F. & Huang, G. (2004). Effects of Na/K ratio in seawater on growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei. Aquaculture, 234*, 485-496.

Zhu, C., Dong, S.L., Wang, F. & Zhang, H.H. (2006). Effects of seawater potassium concentration on the dietary potassium requirement of *Litopenaeus vannamei. Aquaculture, 258*, 543-550