

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่เลี้ยงต่อสรีระเคมีของกุ้งขาว
(*Litopenaeus vannamei*)

Proportional Supplementation of Minerals in Cultured Medium on Physicochemical of
Litopenaeus vannamei shrimp

ผศ.ดร.บุญรัตน์ ประทุมชาติ¹ ผศ.ดร.กระสินธุ์ หังสพฤกษ์² และนายณัฐพล แก้วละเอียด¹

1 ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี

2 คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

รายงานวิจัยงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปี พ.ศ. 2554

29 มี.ค. 2555
301352
04/261

เริ่มบริการ
28 พ.ค. 2555

อภิรักษ์นันทนาการ

การเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว

(*Litopenaeus vannamei*)

บทคัดย่อ

การทดลองเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ความยาวเฉลี่ย 8.9 ± 0.17 cm น้ำหนักเฉลี่ย 9.05 ± 0.18 g ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt (T) โดยคำนึงถึงอัตราส่วนของแร่ธาตุ และกลุ่มควบคุมเชิงลบ (ไม่เสริมแร่ธาตุ, NC) และกลุ่มควบคุมเชิงบวกที่เสริม NaCl (PC) ประเมินความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P และอัตราส่วนของแร่ธาตุเหล่านี้ในเลือด ดับ และเปลือกกุ้งทางสถิติเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า การเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่ใช้เลี้ยงช่วยสนับสนุนให้กุ้งขาวสร้างจุดสมดุลออขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P ในพลาสมาของกุ้งทั้งชุด T, PC และ NC ในแต่ละความเค็มไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ยกเว้นความเข้มข้นของ K และ Cl ในชุด PC มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และ T ที่ความเค็ม 10 ppt ความเข้มข้น Na, K, Mg และ P ในตับของกลุ่ม T และ NC มีค่าต่ำกว่ากลุ่ม PC ($p < 0.05$) K, Mg และ Ca ในโครงสร้างเปลือกของกุ้งกลุ่ม T สูงกว่ากลุ่ม NC ($p < 0.05$) ที่ความเค็ม 10 ppt ส่วนในโครงสร้างเปลือกของกุ้งที่ความเค็ม 20 ppt พบว่า K, Mg และ Ca ในชุด NC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และชุด T ขณะที่ Na และ Mg ในชุด T มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และชุด NC Mg, Ca และ Cl ในเปลือกกุ้งกลุ่ม T สูงกว่ากลุ่ม NC และ PC ($p < 0.05$) ที่ความเค็ม 30 ppt

อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ในพลาสมาและตับของกุ้งชุด T, PC และ NC ในแต่ละความเค็มไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ยกเว้น Na:Mg ในตับชุด T มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และ PC Mg:Ca ในชุด PC มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และชุด T ขณะที่ Ca:P ชุด NC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และชุด T ที่ความเค็ม 10 ppt และ Ca:P ในชุด PC มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และชุด T ที่ความเค็ม 20 ppt ส่วนในเปลือก พบ Na:Mg, Cl:K และ Na:K ในชุด NC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และชุด T และ Cl:Na ในชุด PC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และชุด T Mg:Ca ในชุด NC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และ T ที่ความเค็ม 10 ppt ขณะที่ Na:K ในชุด NC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด PC และ T และ Cl:Na ในชุด T มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และ PC Ca:P ในชุด PC มีค่าต่ำกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และ T ในทางตรงข้าม Cl:K ในชุด PC มีค่าสูงกว่า ($p < 0.05$) ชุด NC และ T ที่ความเค็ม 20 ppt ขณะที่อัตราส่วน Cl:K, Ca:P และ Cl:Na ในชุด NC มีค่าสูงกว่าชุด T ($p < 0.05$) ที่ความเค็ม 30 ppt

Proportional Supplementation of Minerals in Cultured Medium on Physicochemical of *Litopenaeus vannamei* shrimp

Abstract

The proportional supplementation of minerals in culture medium for white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) at size of 8.9 ± 0.17 cm in total length and 9.05 ± 0.18 g were raised in 10, 20 and 30 ppt (**T**) by considering ratio of minerals. No supplementation was negative control (**NC**) while NaCl supplementation for salinity compensation was positive control (**PC**). Concentration and ratios of Ca, Mg, Na, K, Cl and P in plasma (*Pl*), hepatopancreas (*Hep*) and cuticle (*Cut*) of experimental shrimps were statistically evaluated at the end of experiment.

The results indicated that iso-ionic point of *L. vannamei* was efficiently contributed by proportional supplementation of minerals in cultured medium. Concentrations of Na, K, Mg, Ca, Cl and P in *Pl* among **T**, **PC** and **NC** groups in each salinity were not different ($p > 0.05$), except K and Cl of **PC** found higher than those of **NC** and **T** at 10 ppt ($p < 0.05$). Concentrations of Na, K, Mg and P in *Hep* of **T** and **NC** groups were lower than those of **PC** group ($p < 0.05$). K, Mg and Ca content in *Cut* of **T** group showed higher ($p < 0.05$) than those of **NC** group at 10 ppt while K, Mg and Ca content of **NC** group were lower ($p < 0.05$) than those of **PC** and **T** groups but Na and Mg content of **T** group showed higher than those of **PC** and **NC** groups. At 30 ppt, Mg, Ca and Cl in *Cut* of **T** group found higher than those of **NC** and **PC** group ($p < 0.05$).

Ratios of Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na and Cl:K in *Pl* and *Hep* showed not different ($p > 0.05$) among **T**, **PC** and **NC**, except Na:Mg in *Hep* of **T** group found higher ($p < 0.05$) than those of **NC** and **PC** groups, Mg:Ca of **PC** was higher ($p < 0.05$) than those of **NC** and **T** groups while Ca:P of **NC** group was lower than those of **PC** and **T** groups at 10 ppt and Ca:P in **PC** group showed higher than those of **NC** and **T** groups at 20 ppt. In Cuticle, Na:Mg, Cl:K and Na:K of **NC** group indicated lower than those of **PC** and **T** groups and Cl:Na of **PC** group showed lower than those of **NC** and **T** groups, Mg:Ca of **NC** group was lower than those of **PC** and **T** groups at 10 ppt. Na:K of **NC** group was lower than those of **PC** and **T** groups while Cl:Na of **T** group was lower than those of **NC** and **PC** groups and Ca:P of **PC** group was lower than those of **NC** and **T** groups but Cl:K of **PC** group was higher than those of **NC** and **T** groups at 20 ppt. Cl:K, Ca:P and Cl:Na of **NC** showed higher than those of **T** group at 30 ppt.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานในการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
วิธีดำเนินการวิจัย	27
ผลการวิจัย	33
อภิปรายและสรุปผล	44
รายการอ้างอิง	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P ที่พบในน้ำของกุ้งทะเลที่ระดับความเค็มต่าง ๆ.....	24
2 อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P ที่พบในพลาสมาของกุ้งทะเลที่ระดับความเค็มต่าง ๆ.....	25
3 อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่พบในเปลือกกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) และกุ้งกุลาดำ (<i>P. monodon</i>) ที่ความเค็มต่าง ๆ.....	26
4 ระดับความเค็มที่เหมาะสมจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของกุ้งและปริมาณการเสริมแร่ธาตุในระบบเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt.....	28
5 อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่พบในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt.....	29
6 ปริมาณของสารประกอบที่ใช้ในการปรับอัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำที่ทดลองเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt.....	30
7 อัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำและพลาสมาของกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt	38
8 อัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำและพลาสมาของกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt	39

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ดับ (จ-ฉ) และเปลือก (ซ-ช) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวก และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 10 ppt.....	35
2 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ดับ (จ-ฉ) และเปลือก (ซ-ช) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวก และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 20 ppt.....	36
3 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ดับ (จ-ฉ) และเปลือก (ซ-ช) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 30 ppt.....	37
4 ฟีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) อัลคาไลน์ตี (ค) ไนโตรเจน (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจน ละลายในน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10 ppt	41
5 ฟีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) อัลคาไลน์ตี (ค) ไนโตรเจน (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจน ละลายในน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 20 ppt	42
6 ฟีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) อัลคาไลน์ตี (ค) ไนโตรเจน (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจน ละลายในน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (<i>L. vannamei</i>) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 30 ppt	43

การเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนในน้ำที่เลี้ยงต่อสรีระเคมีของกุ้งขาว

(*Litopenaeus vannamei*)

Proportional Supplementation of Minerals in Cultured Medium on Physicochemical of *Litopenaeus vannamei* shrimp

บทนำ

ปัจจุบันกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เป็นสัตว์น้ำที่มีคุณค่าและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ นำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นมูลค่าสูงอย่างต่อเนื่อง แนวโน้มอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งจึงยังคงมีความสำคัญ และเป็นธุรกิจการเกษตรขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนในการผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัจจัยหลักมาจากอาหาร และการเลี้ยงกุ้งที่หนาแน่นมาก จำเป็นที่จะต้องให้ปริมาณแร่ธาตุในน้ำสูงจึงส่งผลต่อการสร้างเปลือก และทำให้เกิดปัญหากุ้งตายคาคราบ เปลือกนึ่ม ตลอดจนการเจริญเติบโตที่ช้า มีอัตราการแลกเนื้อสูง ซึ่งมีผลจากการขาดความสมดุลของออสโมติกในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ, บัลดั้งก์ เนื่องแสง และ ถนอมศักดิ์ บุญภักดี, 2547ก) ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอด อัตราการแลกเนื้อ และความถี่ของการลอกคราบ เนื่องจากน้ำความเค็มต่ำจะมีปริมาณแร่ธาตุที่สำคัญ ๆ ได้แก่ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P ต่ำ ส่งผลให้ปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ มีไม่เพียงพอต่อการรักษาสมดุลของออสโมติก การเก็บสะสมและการนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือก ทำให้ขาดความพร้อมในการลอกคราบและสร้างเปลือกใหม่ กุ้งจึงมีโอกาสเปลือกบางและนึ่ม (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก) และ ภายหลังการลอกคราบ กุ้งมีประสิทธิภาพในการดึงเอาแร่ธาตุมาใช้ในการสร้างเปลือกใหม่ให้แข็งแรงได้ลดลง และอาจจะส่งผลให้กุ้งมีการตายคาคราบเพิ่มสูงขึ้น ขณะเดียวกันกุ้งต้องใช้พลังงานในการรักษาสมดุลของออสโมติกสูงขึ้น ส่งผลให้มีพลังงานเพื่อใช้ในการกระบวนการเจริญเติบโตลดลง ทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตช้า และมีอัตราการแลกเนื้อสูง นอกจากนี้ พบปัญหาในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น กุ้งเป็นตะคริว ลำตัวขาวขุ่น ส่งผลให้มีร่างกายอ่อนแอ ทำให้เชื้อโรคต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในร่างกายหรือภายนอกเริ่มมีความรุนแรงมากขึ้น จนทำให้การเลี้ยงกุ้งไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้น การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ความเค็มต่ำกว่าปกติจึงควรที่จะมีการเติมแร่ธาตุต่าง ๆ ลงในอาหารและในน้ำให้เพียงพอับความต้องการของกุ้ง และการวิจัยในกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) พบว่า กุ้งจะมีโอกาสขาดแร่ธาตุบางชนิดได้เมื่อเลี้ยงในระบบน้ำกึ่งปิดหรือแบบปิด

การเสริมแร่ธาตุในน้ำตามความเหมาะสมขึ้นอยู่กับความเค็มของน้ำที่ใช้เลี้ยง ส่งผลทำให้การเลี้ยงกุ้งมีผลผลิตสูงขึ้น และลดปัญหาการตายคาคราบ และตายหลังจากลอกคราบได้ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ, พิชาญ สว่างวงศ์ และจอร์จ มาซาโด, 2546)

การเติมแร่ธาตุจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของแร่ธาตุที่เหมาะสมด้วย เช่น Ca:P พบว่าต้องมีค่า 0.6:1 จะทำให้กุ้ง *Hormarus americanus* ระยะวัยรุ่นมีการเจริญเติบโตดี แต่หากมีค่าเพิ่มเป็น 1.6:1 หรือมากกว่าจะมีผลทำให้การสร้างเปลือกชั้นเอนโดคิวติเคิล (endocuticle) ผิดปกติ และอัตราส่วน 1:1 จะมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในอาหารกุ้ง *P. japonicus* (Kitabayashi et al., 1971; Deshimaru & Yone, 1978; Kanasawa et al., 1984 cited in Davis & Lawrence, 1997) และการวิจัยในอดีตของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 4 ppt พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของ Na:K อยู่ระหว่าง 28-30:1 แต่หากมีอัตราส่วนเพิ่มเป็น 119:1 ทำให้การเจริญเติบโตและอัตราการรอดต่ำลง (Roy, Davis, Saoud & Henry, 2007b) เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกันระยะโพสลาวาที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 9.1 ppt พบว่า อัตราส่วนของ Na:K มีค่า 43.4:1 ส่งผลให้กุ้งมีอัตราการรอดต่ำกว่าที่ความเค็ม 2.4, 2.6, 3.3 และ 3.7 ppt ซึ่งอัตราส่วนของ Na:K มีค่า 17.5:1, 19.4:1, 24.1:1 และ 23.8:1 ตามลำดับ (Roy, Davis, & Whitis, 2009) ขณะในการเลี้ยงที่ความเค็ม 30 ppt ควรมีอัตราส่วนของ Na:K มีค่า 20:1 จึงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต แต่หากมีปริมาณสูงขึ้น (110.5:1) จะมีผลทำให้กิจกรรมต่าง ๆ และการเจริญเติบโตของกุ้งลดลง (Zhu, Dong, Wang, & Huang, 2004) เพราะว่าอัตราส่วนเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของกุ้ง ซึ่งความเข้าใจเชิงวิทยาศาสตร์ถึงกลไกต่าง ๆ และข้อมูลในด้านนี้ยังมีน้อยมาก งานวิจัยครั้งนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาผลของอัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำใช้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอด อัตราแลกเนื้อ ความถี่ของการลอกคราบ และการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีที่เกิดขึ้นต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการเสริมแร่ธาตุในน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็มต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการเลี้ยงกุ้งทะเลต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ผลของการเสริมแร่ธาตุในการพิจารณาความเข้มข้นของแร่ธาตุจากสรีระเคมี (พลาสมา ดับ และเปลือก) ที่เหมาะสมทางสรีระเคมี โดยคำนึงถึงอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Na:K, Cl:K และ Cl:Na ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt ต่อสรีระเคมีของกุ้งขาว (*L. vannamei*) วัยรุ่น

สมมติฐานของการวิจัย

การเสริมแร่ธาตุที่พิจารณาความเข้มข้นจากน้ำเลี้ยง ต่อความเข้มข้นและอัตราส่วนของแร่ธาตุที่เหมาะสมส่งผลดีต่อสรีระเคมีของกุ้งขาว (*L. vannamei*) วัยรุ่นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดไม่ได้เสริมแร่ธาตุ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ทราบปริมาณความเข้มข้น และอัตราส่วนของแร่ธาตุที่เหมาะสมที่พิจารณาจากน้ำ และสรีระเคมี ต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของกุ้งขาว (*L. vannamei*) เลี้ยงในความเค็มแตกต่างกัน

ขอบเขตของการวิจัย

พิจารณาความเข้มข้นและค่านึงถึงอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Na:K, Cl:K และ Cl:Na จากสรีระเคมี (พลาสมา ดับ และเปลือก) ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt เพื่อใช้ในการเสริมแร่ธาตุบางชนิดในระบบการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่มีขนาดความยาวเฉลี่ย 8.9 ± 0.17 cm และน้ำหนักเฉลี่ย 8.4 ± 0.19 g อายุประมาณ 2 เดือน เลี้ยงในถังไฟเบอร์กลาส ขนาด 250 L ความหนาแน่น 70 ตัว/ตารางเมตร เป็นเวลา 2 เดือน เปรียบเทียบกับชุดควบคุมเชิงลบ (negative control) และชุดควบคุมเชิงบวก (positive control) และชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุเก็บตัวอย่างน้ำ เลือด ดับ และเปลือก เพื่อวิเคราะห์แร่ธาตุ ได้แก่ Ca, Mg, Na, K, Cl และ P ต่อไป

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรักษาสมดุลไอออน

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าไอออนที่เป็นองค์ประกอบของเลือด จะมีความแตกต่างกับน้ำภายนอก (Robertson, 1960) โดยไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของระบบออสโมติก การเปรียบเทียบกันโดยตรงของไอออนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำภายนอกในเลือด และในปัสสาวะมักจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากผลกระทบของโปรตีนที่มีมากถึง 10% ในเลือด มีผลให้น้ำที่เป็นองค์ประกอบของของเหลวทั้ง 3 แหล่งไม่เท่ากัน

ความเข้มข้นของ Na และ Cl ในเลือดมักจะใกล้เคียงกับค่าที่จุดสมดุล เมื่อสัตว์อยู่ในน้ำทะเลและศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบจำนวนเล็กน้อยมักจะถูกนำมาลบด้วย ซึ่งที่จุดสมดุลนี้มักจะทำให้ในเลือดมีค่า Na มากเกินจริง และมี Cl น้อยกว่าค่าจริงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำภายนอก มักจะพบว่า K ในเลือดมีความเข้มข้นมากกว่าในน้ำภายนอก แม้ว่าบางส่วนอาจจะมาจากการปนเปื้อน โดยเซลล์ถ้ามีการนำเลือดมาใช้ในการวิเคราะห์ การรักษาสมดุลของไอออนที่มีประจุ 2 หน่วย (divalent ion) ยังมีความซับซ้อนมากกว่า บางส่วนของ Ca และ Mg จะเกิดพันธะกับโปรตีนหรือไอออนอื่น ๆ และไม่แสดงความเป็นไอออน ตัวอย่างเช่น ปู *Gecarcinus lateralis* มี Ca ในเลือด 22 mmol/L ในขณะที่มีเพียง 8.6 mmol/L ในเลือดที่ผ่านการกรองอย่างละเอียดเพื่อขจัดโปรตีนออกไป นั่นคือมี Ca จับตัวกับโปรตีนถึง 13.4 mmol/L (Skinner, Marsh, & Cook, 1965) Ca ที่เกิดพันธะกับสารอื่นมีประมาณ 10% ของ Ca ทั้งหมดในเลือดของ *Emerita asiatica* (Sitaramaiah & Krishnan, 1966 cited in Mantel & Farmer, 1983) อีกทั้งใน crayfish *Austropotamobius pallipes* มี Ca ที่อยู่ในรูปของไอออนน้อยกว่า 50% ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ ไปเกิดพันธะกับโปรตีน ไอออนของสารอินทรีย์ขนาดเล็กหรือกับสารอนินทรีย์ เช่น SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} และ CO_3^{2-} (Greenway, 1972) ส่วนในกุ้ง *Orconectes limosus* พบว่า มี Ca อยู่ในรูปไอออน 82% และ Mg ก็เช่นเดียวกัน (Andrews, 1976 cited in Mantel & Farmer, 1983) โดยมีรายงานการศึกษาพบว่า ครัสเตเชียนในสกุล *Hyas*, *Lithodes* และ *Dromia* มีความเข้มข้นของ Mg ในร่างกายประมาณ 80% ของ Mg ในน้ำทะเล หรือในปู *Uca* sp. และปู *Ocypode quadrata* มีความเข้มข้นของ Mg ในร่างกายมากกว่า 65% ของ Mg ในน้ำทะเล ส่วนปู *grapsids* พบว่า มีความเข้มข้นของ Mg ในร่างกายประมาณ 20-30% ของน้ำทะเล (Robertson, 1960)

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ในเลือดกุ้งทะเล

กุ้งทะเลมีโครงสร้างแข็งห่อหุ้มอยู่ภายนอกร่างกาย และมีเจริญเติบโตโดยการลอกคราบ ซึ่งของเสียและไนโตรเจนที่ขับถ่ายออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย และยังมีความสำคัญกับคุณสมบัติของเลือด โดยองค์ประกอบของเลือดมีทั้งส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หลัก ๆ ได้แก่

โซเดียม (Na)

โซเดียมนับว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความเข้มข้นสูงมากชนิดหนึ่งในเลือดของครัสเตเชียน แต่จะมีค่าต่ำกว่าน้ำภายนอกเล็กน้อย โดยทำหน้าที่ในการรักษาสมดุลเกลือแร่ (osmotic balance) ควบคู่ไปกับ Cl ซึ่งมี K, Mg และ Ca เป็นตัวช่วยปรับ ซึ่งรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างในร่างกายให้สมดุล และยังทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกล้ามเนื้อและระบบประสาท การควบคุมสมดุลของ Na ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์จะมีความสัมพันธ์กับการทำงานของ Na^+/K^+ -ATPase และ V-ATPase ภายในเหงือก ซึ่งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จะเพิ่มขึ้น 2-3 เท่า เมื่อเกิดการเคลื่อนที่เข้าออกของ Na ในกุ้งน้ำจืด *Cherax destructor* (Zare & Greenway, 1998)

คลอไรด์ (Cl)

คลอไรด์พบในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์สัตว์ สามารถสะสมได้มากกว่า Na และ K มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับ Na เป็นธาตุที่มีการเคลื่อนย้ายเร็วเมื่อน้ำภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง ช่วยรักษาความดันออสโมติก และยังควบคุมการเข้าออกของสารและน้ำภายนอกเซลล์ Cl เกี่ยวข้องกับการเกิดสมดุลของแคตไอออน (cation) และแอนไอออน (anion) โดยอยู่รวมกับ Na ถ้าอยู่ในสภาพสมดุลการแลกเปลี่ยนของ Mg และ S จะเกิดได้ดี ปริมาณของ Cl ในเลือดของครัสเตเชียนจะเท่ากับน้ำทะเลหรือใกล้เคียงกัน จึงไม่มีปัญหาการปรับสมดุลเหมือนไอออนตัวอื่น ๆ Cl ยังมีส่วนกระตุ้นน้ำย่อยอะไมเลส (amylase) ให้ทำงานดีขึ้น รักษาความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยและเป็นส่วนประกอบในน้ำย่อยด้วย (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

แคลเซียม (Ca)

แคลเซียมเป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างภายนอกของครัสเตเชียน ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ตามปกติแล้วจะมีการสะสมไว้ในตับโดยอยู่ในรูปของเกลือแคลเซียมฟอสเฟต (CaPO_4) อาจจะมีการสะสม Ca ในเลือดและที่ส่วนอื่นของร่างกาย โดยเชื่อมกับโปรตีน สัตว์ต้องควบคุมไม่ให้ระดับของ Ca ในเลือดสูงเกินไป จึงต้องทำการขับออก

นอกร่างกาย และนำไปสร้างเปลือก หรือเก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) Ca จะมีการเคลื่อนที่เข้าสู่ร่างกายของครัสเตเชียนในระยะหลังการลอกคราบ และไม่มี การเปลี่ยนแปลงในระยะคราบแข็ง พบว่า มีการเคลื่อนที่ออกสู่น้ำภายนอกในระยะก่อนการลอก คราบ (Zanotto & Wheatly, 2003) เช่นเดียวกับในกุ้ง *P. indicus* ความเข้มข้น Ca ในเนื้อเยื่อเปลือกมี การสะสมสูงที่ระยะก่อนการลอกคราบและระยะคราบแข็ง และจะลดการสะสมหลังการลอกคราบ (Vijayan & Diwan, 1996) นอกจากนี้ Ca ยังทำหน้าที่เกี่ยวกับการจับตัวของเลือด (blood clotting) การหดตัวของกล้ามเนื้อ (muscle contraction) การส่งกระแสประสาท (nerve transmission) ควบคุม สมดุลเกลือแร่ (osmoregulation) และเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ต่าง ๆ (Cheng, Hu, Liu, Zheng, & Qi, 2006) นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทสำหรับการทำงานของฮอร์โมน และสัตว์ ต้องควบคุมไม่ให้ระดับของ Ca ในเลือดสูงเกินไป จึงต้องทำการขับออกนอกร่างกาย นำไปใช้ในการ สร้างเปลือกหรือเก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

โพแทสเซียม (K)

โพแทสเซียมพบอยู่ในเซลล์ของร่างกายและเลือด ซึ่งความเข้มข้นของ K ในเลือด ของครัสเตเชียนอาจสูงหรือต่ำกว่าน้ำทะเลภายนอก (Burton, 1995) ถ้ามี K ในร่างกายมากเกินไปจะ เกิดปัญหาจึงต้องขับออกทางต่อมแอนเทนนัล (Antennal gland) ซึ่งในกุ้ง *P. monodon* เมื่อมีการลด ความเค็มอย่างฉับพลันจาก 45 ppt ไปเป็น 15 ppt จะมีกลไกการรักษาสมดุลเกลือแร่ โดยการทำงานของต่อมแอนเทนนัล สัตว์จะพยายามรักษาความเข้มข้นของ K ไว้และขับ Na ออกมา จึงพบความ เข้มข้นของ Na ในปัสสาวะสูงกว่าในเลือด ขณะที่ K ในปัสสาวะจะต่ำกว่าในเลือด (Lin, Liou, & Cheng, 2000)

แมกนีเซียม (Mg)

ในครัสเตเชียนทั่วไปที่อาศัยอยู่ในน้ำทะเลจะมีความเข้มข้น Mg ภายในร่างกายต่ำกว่า ในน้ำทะเลภายนอก Mg อยู่ในโครงสร้างของร่างกายประมาณ 70% ส่วนอีก 30% พบในเนื้อเยื่อ และเลือด (Burton, 1967, 1973, 1975 cited in Burton, 1995) ในกุ้ง *P. indicus* การเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของ Mg ในเนื้อเยื่อมีแนวโน้มคล้ายกับ Ca สันนิษฐานว่า Mg ใช้แทนที่ Ca ซึ่งเป็นแร่ ธาตุที่สำคัญในกระบวนการสร้างเปลือกของครัสเตเชียน แม้ว่า Mg ในเปลือกของเดคาพอดในระยะ คราบแข็งมีระดับต่ำกว่า 0.55% (Vijayan & Diwan, 1996) ในขณะที่กุ้ง *P. californiensis* มีระดับ Mg ในเปลือกประมาณ 1.25% (Huner et al., 1979 cited in Vijayan & Diwan, 1996)

ฟอสฟอรัส (P)

ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการสร้างเปลือกใหม่ร่วมกับ Ca โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่กุ้งมีการสร้างเปลือกใหม่ (Pratoomchat et al., 2002a) ซึ่ง P ยังเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิกและสารประกอบฟอสโฟไลปิดที่สำคัญในร่างกาย เช่น โคเอนไซม์ NADP และ ATP เป็นต้น ซึ่งอยู่ในบริเวณสมองและระบบประสาท (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

ผลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแร่ธาตุหลักในเลือดกุ้ง

โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และโพแทสเซียม (K)

ความเค็มน้ำภายนอกมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง Na, Cl และ K ในพลาสมา โดยที่ความเค็ม 5 ppt ปริมาณของ Na, Cl และ K มีความเข้มข้นในพลาสมาต่ำที่สุด และมีความเข้มข้นสูงเมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้นโดยมีความเข้มข้นสูงสุดที่ความเค็ม 25 ppt ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของ Na มีค่ามากกว่าธาตุอื่น ๆ โดยที่ปริมาณรวมของธาตุทั้ง 3 มีมากกว่า 90% ของธาตุทั้งหมดในเลือด จึงจัดได้ว่า แร่ธาตุเหล่านี้เป็นตัวช่วยในการรักษาสมดุลเกลือแร่ของเลือด (osmoregulator) คือ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ Na และ Cl ก็จะส่งผลให้สมดุลไอออนของเลือดเปลี่ยนแปลงไปด้วย (Castille & Lawrence, 1981; Mantel & Farmer, 1983 Lignot, Spanings-Pierrot, & Charmantier, 2000) ดังนั้น ปริมาณของแร่ธาตุดังกล่าวจึงเพิ่มขึ้นตามความเค็มน้ำซึ่งสัมพันธ์กับค่าออสโมลาลิตี

เมื่อความเค็มต่ำเลือดสัตว์จะมีปริมาณของ Na, Cl และ K ต่ำด้วย เพราะน้ำภายนอกที่มีความเจือจางจะแพร่เข้าสู่ร่างกาย และแร่ธาตุต่าง ๆ ในร่างกายก็จะแพร่ออกสู่ภายนอก เพื่อที่จะรักษาระดับความเข้มข้นของแร่ธาตุภายในร่างกายให้อยู่ในระดับที่มีความสมดุล สัตว์จึงต้องปรับตัวให้อยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของแร่ธาตุในร่างกายมากกว่าภายนอก จึงต้องมีการดึงพลังงานมาใช้ในการรักษาความเข้มข้นของแร่ธาตุต่าง ๆ โดยกลไกในการขับน้ำออกจากร่างกาย ขณะเดียวกันก็จะดึงแร่ธาตุไว้ในร่างกาย และลดการสูญเสียแร่ธาตุออกจากร่างกายโดยการลดขนาดของเยื่อเลือกผ่านให้เล็กลง และเพิ่มการสะสมปัสสาวะ ปรับระดับแรงดันน้ำ (hydrostatic pressure) ภายในร่างกายให้อยู่ในสภาวะปกติ (Mantel & Farmer, 1983)

ถึงแม้ว่า สัตว์จะมีกลไกต่าง ๆ ในการปรับสมดุลเกลือแร่ดังกล่าว แต่ภายใต้สภาวะความเค็มน้ำต่ำมาก ๆ ทำให้ต้องสูญเสียแร่ธาตุต่าง ๆ ภายในร่างกายออกสู่สิ่งแวดล้อม และต้องรับน้ำภายนอกจากการแพร่เข้ามาตลอดเวลา จึงเป็นเหตุให้มีปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ในเลือดต่ำกว่าที่

ความเค็มน้ำสูง ซึ่งจะทำให้สัตว์เกิดความเครียด ร่างกายอ่อนแอ ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงและอาจจะทำให้อัตราการตายเพิ่มสูงขึ้นได้ (Kirkpatrick & Jones, 1985; Gelin et al., 2001 cited in บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

ค่าออสโมลาลิตี (osmolality) ในพลาสมาของกุ้งขาว (*L. vannamei*) มีค่าปกติประมาณ 573 mOsm/kg ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Castille and Lawrence 1986; Sowers, Young, Grosell, Browdy, and Tomasso (2006) พบว่า ค่าออสโมลาลิตีจะมีค่าลดลงเมื่อความเค็มน้ำลดลงเหมือนกับกุ้งชนิดอื่น ๆ (McFarland & Lee, 1963; Castille & Lawrence, 1981; Ferraris, Parado-Estapa, Ladjia, & Jesus, 1986; Sowers et al., 2006) มีปริมาณของ K ที่ระดับ 10.5 mmol/L เช่นเดียวกับที่พบในกุ้ง *Farfantepenaeus duorarum* (Bursey & Lane, 1971 cited in Sowers et al., 2006) และ *L. setiferus* (McFarland & Lee, 1963; Sowers et al., 2006) มีปริมาณของ Na ที่ระดับ 272.2 mmol/L ซึ่งใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดอื่น ๆ (McFarland & Lee, 1963; Castille & Lawrence, 1981; Sowers et al., 2006) และความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมา มี 10.2 mmol/L เช่นเดียวกับกุ้งชนิดอื่น ๆ ในความเค็มต่ำ (McFarland & Lee, 1963; Ferraris et al., 1986; Sowers et al., 2006) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามความเค็มที่ลดลงเช่นเดียวกับ *L. setiferus* และ *L. aztecus* (McFarland & Lee, 1963; Sowers et al., 2006)

แคลเซียม (Ca)

โดยทั่วไป ครัสเตเชียนเมื่อย้ายจากน้ำความเค็มสูงไปสู่น้ำความเค็มต่ำจะทำให้ค่า pH ของเลือดมีค่าสูงขึ้น (metabolic alkalosis) เนื่องจาก เมื่อความเค็มน้ำต่ำค่า pH จะเปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้าม โดยจะมีค่าต่ำลง คือ มีสภาพเป็นกรดมากขึ้น และคาดว่าจะมีผลทำให้เลือดกึ่งมีสภาพเป็นกรดด้วย สภาพที่เป็นกรดนี้จะส่งผลต่อการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากเปลือกเก่าออกมาในรูปของแคลเซียมไอออน (Ca^{+}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) จึงทำให้มีปริมาณของ Ca และ HCO_3^- ในเลือดสูงขึ้น (Machado et al., 1988 อ้างถึงใน บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) ไม่เพียงแต่ Ca และไบคาร์บอเนต สารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ก็มีการละลายเข้าสู่กระแสเลือดด้วย ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) เพราะสัตว์ต้องทำการปรับสภาพความสมดุลเกลือแร่อย่างมากเมื่อความเค็มน้ำภายนอกมีระดับต่ำหรือสูงเกินไป (osmotic stress) จึงส่งผลให้มีกิจกรรมการใช้พลังงาน และมีการขับถ่ายของเสียซึ่งอยู่ในรูปของแอมโมเนียมากขึ้น ซึ่งพบในครัสเตเชียนหลายชนิด (Rosas et al., 1999) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการ deamination ของกรดอะมิโนอิสระภายในเซลล์เพื่อไปใช้รักษาสมดุลปริมาณของเซลล์ ทำให้ระดับของแอมโมเนียในเลือดสูงขึ้น

ความสำคัญของแร่ธาตุในการเลี้ยงกุ้ง

การเลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทยในแต่ละพื้นที่จะใช้น้ำความเค็มที่แตกต่างกัน ซึ่งในการเลี้ยงกุ้งในลักษณะดังกล่าว ปริมาณของแร่ธาตุจะมีความสำคัญกับการเลี้ยงกุ้งเป็นอย่างมาก หากในน้ำมีปริมาณของแร่ธาตุที่ไม่เหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการลอกคราบ เช่น ลอกคราบไม่ออก ตายคาคราบ ตายหลังลอกคราบ และมีเปลือกบาง เพราะแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในโครงสร้างเปลือก และเนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่ม เช่น S ในโปรตีน Zn ใน Carboxypeptidase (metalloprotein) รวมทั้งเป็นองค์ประกอบของ cofactor และ activators ในเอนไซม์หลายชนิด เช่น alkaline phosphatase แร่ธาตุที่ละลายได้ดี (Ca, P, Na, K และ Cl) จะทำหน้าที่ในระบบ osmoregulation สมดุลเกลือแร่ระหว่างร่างกายสัตว์กับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งบำรุงรักษาความสมดุลความเป็นกรด - ด่าง (acid-base balance) และความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (membrane potential) ซึ่งในปัจจุบันยังคงมีงานวิจัยน้อยมากที่เกี่ยวกับความต้องการแร่ธาตุ (dietary mineral requirement) ของคริสต์เตียนที่อาศัยในทะเล (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ข)

แร่ธาตุหลัก (Macro Minerals)

แคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P)

โดยทั่วไปปลาและกุ้งสามารถดึง Ca จากน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ (Deshimaru et al., 1978 cited in Davis & Lawrence, 1997) จึงไม่จำเป็นต้องเสริม Ca ในอาหารกุ้งขาว (*L. vannamei*) (Davis et al., 1993 cited in Davis & Lawrence, 1997) แต่บางครั้งพบว่า สัตว์น้ำอาจมีการขาด Ca เมื่อนำไปเลี้ยงในน้ำที่มี Ca ต่ำ (Robinson et al., 1984, 1986, 1987 cited in Davis & Lawrence, 1997) ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณ P ต่ำ การดูดซึม P ของสัตว์น้ำจากน้ำจืดหรือน้ำเค็ม โดยทั่วไปยังไม่เพียงพอ ดังนั้น P ในอาหารสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ พบว่า คริสต์เตียนมีความต้องการ P ในอาหาร 1-2% (Kitabayashi et al., 1971; Deshimaru & Yone, 1978; Kanasawa et al., 1984 cited in Davis & Lawrence, 1997) เนื่องจาก กุ้งจำเป็นต้องใช้ P ในการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ จึงมีความต้องการ P สูง

Perry, Trigg, Larsen, Freeman, Erickson, and Henry, (2001) พบว่า ชั้นที่มีการสะสม Ca ในโครงสร้างของเปลือกปู Blue crab (*Callinectes sapidus*) ส่วนมากมาจากน้ำภายนอกเป็น ส่วนน้อยที่ได้จากการเก็บสะสมไว้ในตัวปู โดยเมื่อให้ปูลอกคราบในน้ำความเค็ม 12 ppt ที่มีการลดระดับ Ca (15-136 mg/L) จะมีผลให้อัตราการแข็งตัวของเปลือกช้าลง เมื่อความเข้มข้นของ Ca ในน้ำลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงปูที่น้ำความเค็ม 5, 12 และ 25 ppt ระหว่าง Ca ระดับปกติ

(54, 139, 281 mg/L) และลดระดับ Ca ลง (40, 42, 43 mg/L) พบว่า ปูที่เลี้ยงในน้ำทะเลที่มีการลดระดับ Ca จะมีระยะเวลาที่เปลือกนํ้ามันขึ้น เห็นได้ชัดเจนในปูที่ลอกคราบในน้ำความเค็ม 25 ppt ที่มีระดับ Ca ต่ำลง โดยปูจะมีระยะเวลาที่เปลือกนํ้ามันยาวนานกว่าที่ความเค็ม 5 และ 12 ppt ทั้งที่ Ca ระดับปกติและมีการลดระดับ Ca เนื่องจากความเข้มข้นของ Ca ในน้ำความเค็ม 25 ppt เมื่อลดระดับ Ca ลง (43 mg/L) มีความแตกต่างมากกับ Ca ระดับปกติ (281 mg/L) ปูจึงต้องมีการปรับตัวเพื่อรักษาระดับของ Ca ให้อยู่ในภาวะสมดุล ทำให้รบกวนกระบวนการแข็งตัวของเปลือก แสดงให้เห็นว่า Ca มีความสำคัญมากต่อการสร้างเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน

การใช้ประโยชน์จาก Ca และ P จะถูกยับยั้งโดยไฟเตส (phytase) เนื่องจากจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำในระบบย่อยอาหารของกุ้งขาว (*L. vannamei*) และกุ้ง *P. japonicus* และ ซึ่งในกุ้ง *P. japonicus* สามารถพบไฟเตสฟอสฟอรัส (phytase phosphorus) ได้ถึง 47.3% และ 8.4% ในกุ้งขาว (*L. vannamei*) (Civera et al., 1990 cited in Davis & Lawrence, 1997) เช่นเดียวกัน การเติมไฟเตส 1.5% ในอาหารจะทำให้ลดการใช้ P และ Zn (Davis et al., 1993 cited in Davis & Lawrence, 1997)

การสะสม Ca ในพลาสมาจะมีระดับที่สูงในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่ช่วงความเค็มกว้าง (Ferraris et al., 1986; Tantulo & Fotedar, 2007) และจะมีผลมากกับการลอกคราบของกุ้ง (Parado-Esteva, Ladja, de Jesus, & Ferraris, 1989; Tantulo & Fotedar, 2007) โดยที่ทดลองใช้น้ำความเค็ม 5 และ 35 ppt กุ้งจะมีการรักษาสมดุลความเข้มข้นของ Ca ได้ดี ซึ่งเหมือนกับน้ำในมหาสมุทรที่นำมาเปรียบเทียบการรักษาสมดุลในเวลาต่างกัน (Tantulo & Fotedar, 2007) ซึ่งความเข้มข้นของ Na, K, Mg และ Ca มีความสำคัญมากในพลาสมาของครัสเตเชียน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งของน้ำทะเล โดยที่มี Mg ในพลาสมาต่ำและความเข้มข้นของ K มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไป และความเข้มข้นของ K ในพลาสมาจะมีความสัมพันธ์กันกับ Na และ Mg (Burton, 1967, 1973, 1975 cited in Burton, 1995) ซึ่งในกุ้ง *Homarus gammarus* มีความเข้มข้นของ Na ที่ระดับ 468 mmol/L, K ที่ระดับ 9.0 mmol/L, Mg ที่ระดับ 6.9 mmol/L และ Ca ที่ระดับ 14.1 mmol/L (Taylor & Whiteley, 1989) และพบว่า ใน *C. maenas* มี Ca ในพลาสมาที่เพิ่มขึ้นก่อนการลอกคราบ และจะต่ำลงหลังจากการลอกคราบ (Robertson, 1960; Cheng et al., 2002) และยังพบว่า Ca จะมีการขับออกจากเปลือกและไปสะสมอยู่ที่ ตับ และลำไส้เล็ก (Greenaway, 1985 cited in Cheng et al., 2002) และระดับของ Ca ในพลาสมาในระยะ D2/D3 และ A มีความแตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะ B ของกุ้งขาว (*L. vannamei*) และระดับของ Ca ในพลาสมาจะมีระดับที่สูงในระยะ A (Cheng et al., 2002)

การเพิ่มปริมาณ Ca ในอาหารจะมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ (interact) ระหว่างสารอาหารอื่น ๆ เช่น กุ้งจะต้องการ P มากกว่าความต้องการ Ca เพียงอย่างเดียวในอาหาร เช่น ในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ระยะวัยรุ่นการเสริม P ที่ระดับ 0.5% ในอาหาร โดยที่ไม่มีการเสริม Ca ทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตดีกว่า เมื่อมีการเสริม Ca ร่วมด้วย (Penaflores, 1999) เช่นเดียวกับ กุ้งขาว (*L. vannamei*) การเสริม Ca กับ P และ Ca:P มีผลต่อการเจริญเติบโต การสะสมแร่ธาตุในเนื้อเยื่อที่เลี้ยงในความเค็มต่ำ ซึ่งในน้ำความเค็มต่ำจะมีระดับ Ca ต่ำ โดยระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ 0.77% ฟอสฟอรัสที่สามารถนำมาใช้ได้ (estimated available phosphorus) (0.93% ฟอสฟอรัสรวม) และ 0.5% แคลเซียมรวม (Cheng et al., 2006) แต่อัตราส่วนของ Ca:P ในการเลี้ยงกุ้งยังไม่สามารถอธิบายได้ (Davis et al., 1993 cited in Cheng et al., 2006)

นอกจากนี้ความต้องการของ P ในกุ้งยังขึ้นอยู่กับปริมาณ Ca ในอาหารอีกด้วย ดังการทดลองได้ใช้สัดส่วนระหว่าง Ca และ P อัตราส่วน 0.56:1.10 จะทำให้กุ้ง *Hormarus americanus* มีการเจริญเติบโตดีหากสัดส่วนเพิ่มเป็น 1.55 หรือมากกว่าจะส่งผลทำให้การสร้างเปลือกในชั้นเอนโดคิวติเคิลผิดปกติ โดยทั่วไปอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 1:1 สำหรับใช้ในอาหารของกุ้ง *P. japonicus* (Kitabayashi et al., 1971; Kanazawa et al., 1984 cited in Davis & Lawrence, 1997)

โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และโพแทสเซียม (K)

Na, K และ Cl นับเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา การเติม Na และ K ในอัตราส่วน 40-43 mmol/mmol ในน้ำความเค็ม 30 ppt ทำให้กุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะวัยรุ่นมีการเจริญเติบโตดีขึ้น แต่ถ้ามีการเติม Na และ K ในอัตราส่วนที่สูงถึง 150 mmol/mmol มีผลทำให้กุ้งตายภายใน 2 สัปดาห์ (Zhu et al., 2004) อีกทั้งพบว่า *P. japonicus* มีการเจริญเติบโตดีถ้ามีการเสริม K ในอาหาร 0.9% (Kanazawa et al., 1984 cited in Davis & Lawrence, 1997) เช่นเดียวกับในการเลี้ยงกุ้ง *P. chinensis* ต้องมีการเสริม K ในอาหาร 1% (Liu et al., 1995 cited in Zhu, Dong, Wang, & Zhang, 2006) อีกทั้งในการเลี้ยงกุ้งทะเลความเค็มต่ำ (2-4 ppt) ควรมีปริมาณ K ที่ระดับ 40 mg/L โดยอัตราส่วนของ Na:K ในน้ำทะเลธรรมชาติจะมีค่า 28:1 แต่หากมีอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อการเจริญเติบโต และการรอดตายของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (Roy, Davis, & Saoud, 2006) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ในน้ำความเค็ม 2-4 ppt พบว่า การเสริม K ประมาณ 6.2-40 mg/L สามารถเพิ่มอัตราการรอดของกุ้งจาก 19% ไปเป็น 67% ได้ (McNevin, Boyd, Silapajarn, & Silapajarn, 2004) สอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกันที่มีการเสริม K ลงไปในน้ำความเค็ม 4 ppt ประมาณ 5, 10, 20 และ 40 mg/L พบว่า ที่ระดับ 10, 20 และ 40 mg/L กุ้งมี

น้ำหนักจำเพาะประมาณ 2.7-3.1 g และมีอัตราการรอด 93.3-96.7% ซึ่งสูงกว่าที่ระดับ 5 mg/L (2.4 g และ 23.3%) แต่ไม่มีผลกระทบต่อการสะสม Na, K, Mg และ Ca ในตับ (Roy et al., 2007b)

แมกนีเซียม (Mg)

Mg มีความสำคัญต่อกุ้งทะเลในการปรับสมดุลเกลือแร่ภายในร่างกาย รวมทั้งความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ การสร้างเปลือกและการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เป็นแร่ธาตุที่พบปริมาณสูงในน้ำทะเล (1,350 mg/L) โดยทั่วไปกุ้งและปูที่ดำรงชีวิตอยู่ในทะเลจะพยายามขับ Mg ออกจากร่างกายเพื่อให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าน้ำภายนอก ดังนั้น กุ้งทะเลที่เลี้ยงในน้ำความเค็มสูงจะไม่ขาดแร่ธาตุชนิดนี้ พบว่า กุ้งขาว (*L. vannamei*) จะมีการเจริญเติบโตดีหากมีการเสริม Mg ประมาณ 1.2 g/kg ในอาหาร แต่มีการเจริญเติบโตลดน้อยลงหากมีการเสริมมากเกินไป 4 g/kg สรุปได้ว่าในอาหารควรมี Mg ในระดับ 0.25-4 g/kg จะส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของกุ้งทะเล (Davis & Lawrence, 1997) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ในน้ำความเค็ม 2-4 ppt พบว่า การเสริม Mg ประมาณ 4.6-20 mg/L สามารถเพิ่มอัตราการรอดของกุ้งจาก 19% ไปเป็น 67% ได้ (McNevin et al., 2004) สอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า การเสริม Mg ลงไปในน้ำความเค็ม 4 ppt ประมาณ 10, 20, 40, 80 และ 160 mg/L ไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักจำเพาะของกุ้งได้ แต่อัตราการรอดของกุ้งที่ระดับ 20, 40, 80 และ 160 mg/L มีค่า 90-96.5% ซึ่งสูงกว่าที่ระดับ 10 mg/L (60.2%) และไม่มีผลกระทบต่อการสะสม Na, K และ Ca ในตับ แต่การเสริมที่ระดับ 80 และ 160 mg/L มีการสะสม Mg ในตับสูงขึ้น ประมาณ 0.74 -0.85 mg/g (Roy et al., 2007b)

แร่ธาตุรอง (Micro Mineral)

ทองแดง (Cu)

Cu เป็นแร่ธาตุที่มีปริมาณต่ำมากในน้ำทะเล จึงทำให้กุ้งได้รับไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการทางสรีรเคมีเพื่อการเจริญเติบโตสูงสุด การสร้างเนื้อเยื่อจากการสะสมแร่ธาตุ (tissue mineralization) และกิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) อีกทั้งกุ้งยังต้องใช้ Cu เพื่อเป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (respiratory pigment) หากกุ้งขาด Cu พบว่า มีปริมาณ Cu ต่ำในเปลือกส่วนหัวกุ้ง เลือด ตับ และหัวใจ พบว่า การเจริญเติบโตของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ลดลงหากมีปริมาณ Cu ต่ำกว่า 34 mg/kg ในอาหาร semi-purified diet (Davis & Lawrence, 1997)

ไอโอดีน (I) และแมงกานีส (Mn)

โดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยได้ทำการประเมินถึงความจำเป็นของ I ต่อสรีรวิทยาของกุ้ง การเสริมปริมาณ I ที่ระดับ 1 mg/kg ในอาหารจึงน่าจะเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของกุ้ง ขณะที่ปริมาณ Mn ในน้ำทะเลมีค่าต่ำมาก (0.01 mg/L) อีกทั้งขบวนการนำ Mn ไปใช้ประโยชน์ในร่างกายยังถูกยับยั้งด้วย phytic acid การเสริม Mn ในอาหารจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา อาการขาด Mn จะทำให้โตช้า การพัฒนาของเปลือกผิดปกติ ลูกวัยอ่อนตายสูง และอัตราการฟักจะต่ำ (Davis & Lawrence, 1997)

ซีลีเนียม (Se)

เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์กลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ไปเป็นน้ำ และลิปิดไฮเปอร์ออกไซด์ (lipid alcohols) และป้องกันเซลล์จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดส (peroxidase) ร่วมกับวิตามินอี ทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เพื่อป้องกันฟอสโฟลิปิดสายยาวที่ไม่อิ่มตัว (polyunsaturated phospholipids) ในเยื่อหุ้มเซลล์ (cellular membranes) จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดทิฟ (peroxidative) อาการขาด Se คือ ทำให้พัฒนาการของเปลือกผิดปกติ พบว่า กุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะวัยรุ่นมีการเจริญเติบโตดี หากมีการเสริม Se ในอาหารประมาณ 0.2-0.4 mg/kg แต่ไม่ควรเกิน 0.3 mg/kg เพราะมีแนวโน้มเป็นพิษ (Davis & Lawrence, 1997)

สังกะสี (Zn)

การเสริม Zn ในอาหารมีความจำเป็น เนื่องจากไฟเตสในวัตถุดิบอาหารจะลดการนำไปใช้ของ Zn อีกทั้งการนำ Zn ไปใช้ประโยชน์ในร่างกายยังมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับปริมาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium Phosphate) ปริมาณของ Zn ในตับจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความต้องการ Zn เพื่อเสริมลงในอาหาร ซึ่งไฟเตสจะทำให้ปริมาณของ Zn ในตับลดลง ในกรณีที่มีไฟเตส 1.5% ในอาหารจำเป็นจะต้องเสริม Zn ถึง 200 mg/kg (Cuzon, Lawrence, Gaxiola, Rosas, & Guillaume, 2004) แต่ขบวนการสร้างเนื้อเยื่อเป็นไปได้อย่างปกติในกุ้งขาว (*L. vannamei*) เมื่อมีการเสริม Zn ประมาณ 33 mg/kg ในอาหาร โดยปราศจากไฟเตส (Davis & Lawrence, 1997)

การขนส่งแร่ธาตุในคริสต์เตเซียน

กระบวนการขนส่งแร่ธาตุในคริสต์เตเซียนสามารถจำแนกได้ 2 วิธี (Rainbow, 1997) คือ

การขนส่งแบบใช้พลังงาน (active transport)

ส่วนมากเกิดขึ้นกับแร่ธาตุหลักเช่น Na และ Ca โดยมีการใช้พลังงานในการขนส่งแร่ธาตุต่าง ๆ เข้าสู่เซลล์ เช่น Na ที่มีการเคลื่อนที่เข้า-ออก ผ่านทางเหงือก โดยมีกิจกรรมของเอนไซม์ ATPase ช่วยควบคุมความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในเซลล์กับน้ำทะเลภายนอกโดยควบคุมผ่านช่องเข้า-ออกของ Na

การแพร่ (passive transport)

การขนส่งโดยผ่านตัวกลาง (carrier-mediated transport) ไอออนจะจับกับโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ และเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในไซโตโซล (cytosol) ที่บริเวณนี้ ไอออนจะเปลี่ยนมาจับกับโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์ โดยที่โปรตีนจะถูกดักจับไว้อยู่นอกเซลล์ การเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์ของไอออน จะเกิดขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นภายในเซลล์สูงกว่าภายนอก

การขนส่งโดยผ่านช่องโปรตีน (protein channel) ไอออนของแร่ธาตุจะเคลื่อนที่ผ่านช่องโปรตีนภายในเยื่อหุ้มเซลล์ด้านที่มีขั้ว (hydrophilic cores)

การขนส่งโดยการแพร่ (passive diffusion) ไอออนที่เข้าสู่เซลล์ด้วยวิธีนี้เป็นไอออนที่สามารถละลายในไขมันได้ เพราะจะต้องเคลื่อนที่โดยผ่านชั้นไขมัน (lipid layer) ของเยื่อหุ้มเซลล์

การขนส่งโดยวิธี เอนโดไซโตซิส (endocytosis) กระบวนการนี้เริ่มจากเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการเว้าเข้าไปโดยโอบล้อมไอออนต่าง ๆ ไว้ภายใน จากนั้นไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายเข้าสู่ภายในเซลล์

ผลของความเค็ม การเสริมแร่ธาตุและอัตราส่วนของแร่ธาตุที่มีผลต่อสรีระเคมีของกุ้งทะเล

การเสริมแร่ธาตุกับการเลี้ยงกุ้งมีความจำเป็นมาก เพราะว่าแร่ธาตุที่กุ้งต้องการในบ่อเลี้ยงมีปริมาณไม่เพียงกับความต้องการของกุ้ง เนื่องจาก น้ำที่ใช้เลี้ยงมีความเค็มต่ำและยังมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อยครั้ง ในขณะเดียวกัน อัตราการปล่อยมีความหนาแน่นสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณของแร่ธาตุในบ่อไม่เพียงพอกับความต้อง ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตช้าลง ร่างกายอ่อนแอ และก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ แทรกซ้อนขึ้น ทำให้การเสริมแร่ธาตุเป็นหนทางหนึ่งในการแก้ปัญหาของการเลี้ยงกุ้ง ดังนั้นอัตราส่วนของแร่ธาตุในส่วนต่าง ๆ ต้องเหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็ม ต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง

การเลี้ยงกุ้งในน้ำความเค็มต่ำหรือน้ำกร่อย จะส่งผลต่อ osmo- และ ionic-regulation ในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณไอออนต่ำและมีอัตราส่วนของแร่ธาตุแตกต่างไปจากน้ำทะเล การลดลงของความเค็มจะส่งผลให้ osmo- และ ionic-regulation ลดลงเช่นกัน และความเค็มน้ำยังมีผลต่อความเข้มข้นของแคลเซียมในเลือดและ osmolality (Sowers et al., 2006) และยังมีความสำคัญกับการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง ซึ่งความเค็มน้ำที่แตกต่างกันมีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอด จากงานวิจัยในกุ้ง *P. semisulcatus* ระยะโพสลาวา พบว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มสูงสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตและอัตราการรอดสูงกว่าที่ความเค็มต่ำ เช่น ความยาวของลำตัว (total length) ที่ความเค็ม 35 และ 40 ppt (19.62 และ 20.46 mm) ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ความเค็ม 10 และ 15 ppt (17.12 และ 17.72 mm) และอัตราการรอดที่ความเค็ม 35 และ 40 ppt (13.33 และ 23.0%) มีค่าสูงกว่าที่ความเค็ม 10 และ 15 ppt (2.67 และ 9.33%) และการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันที่ความเค็ม 35 และ 40 ppt มีค่าสูงกว่าที่ความเค็ม 10 และ 15 ppt (0.115, 0.137 และ 0.053, 0.068 mm/day ตามลำดับ) (Soyel & Kumlu, 2003) เห็นได้ชัดเจนว่า การเลี้ยงกุ้ง *P. semisulcatus* ในน้ำความเค็ม 10-15 ppt จะส่งผลให้อัตราการรอดของกุ้งต่ำ เช่นเดียวกับกุ้ง *P. indicus* (Kumlu & Jones, 1995; Soyel & Kumlu, 2003) และ *P. monodon* (Cawthorne et al., 1983 cited in Soyel & Kumlu, 2003) แสดงว่ากุ้งที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำจะอยู่ในสภาวะเครียด และอีกเหตุผลหนึ่ง คือ กุ้งระยะโพสลาวามีประสิทธิภาพในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมต่ำ ดังนั้นความเค็ม 30 ppt จึงมีความเหมาะสมสำหรับกุ้งระยะโพสลาวา (Soyel & Kumlu, 2003) และประมาณ 30-35 ppt ในกุ้งชนิดอื่น ๆ (Kumlu, Eroldogan, & Aktas, 2000; Soyel & Kumlu, 2003) และพบว่า ที่ความเค็ม 17 ppt กุ้งมีน้ำหนักตัวสูงกว่ากุ้งที่เลี้ยงในความเค็ม 3 และ 32 ppt และมีอัตราการรอดต่ำสุดที่ความเค็ม 3 ppt (Li, Cnen, Zeng, Chen, Yu, Lai, & Qin, 2007)

จากการทดลองของ Sang and Fotedar (2004) พบว่า *P. latissulcatus* เลี้ยงในน้ำความเค็ม 34 ppt มีน้ำหนักตัว ความยาวของลำตัว และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ สูงกว่าที่เลี้ยงในความเค็ม 10, 22 และ 46 ppt และมีอัตราการรอดสูงสุดที่ความเค็ม 22 ppt ส่วนอัตราการแลกเนื้อ พบว่า มีค่าต่ำสุดที่มีการเลี้ยงในความเค็ม 22 และ 34 ppt จึงกล่าวได้ว่าช่วงความเค็ม 22-34 ppt เหมาะสมสำหรับกุ้งชนิดนี้ ในขณะที่ความเค็ม 15-25 ppt เหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546; Ferraris et al., 1986; Chen, Lin, Ting, & Lin, 1995; Sang & Fotedar, 2004) ความเค็ม 20-30 ppt เหมาะสมสำหรับกุ้ง *P. chinensis* (Chen et al., 1995; Sang & Fotedar, 2004) และความเค็ม 30 ppt เหมาะสมสำหรับกุ้ง *P. esculentus* (O' Brien, 1994; Sang &

Fotedar, 2004) และความเค็ม 20 ppt เหมาะสมสำหรับกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่มีอัตราการรอดของกุ้งมากที่สุด แต่น้ำความเค็ม 33-40 ppt เหมาะสมทั้งด้านการเจริญเติบโตและอัตราการรอด นอกจากความเค็มแล้วอุณหภูมิก็มีความสำคัญในด้านนี้ด้วย คือ ที่อุณหภูมิต่ำกุ้งจะมีกิจกรรมน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง เช่น อุณหภูมิ 20 °C กุ้งจะทำกิจกรรมและกินอาหารต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C (Ponce-Palafox, Martinez-Palacios, & Ross, 1997) และหากกุ้งอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิเหมาะสม ก็สามารถทนต่อระดับความเค็มน้ำได้ช่วงกว้างขึ้น (Bartlett et al., 1990 cited in Ponce-Palafox et al., 1997)

การเสริมแร่ธาตุและอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้ง

การเสริมแร่ธาตุลงไปในการเลี้ยงกุ้งจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการ และจะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของกุ้ง เช่น การเสริม K ประมาณ 76% ที่พบในน้ำทะเล (255 mg/L ถึง 30 g/L) และอัตราส่วนของ Na:K ให้น้อยกว่า 39:1 (Prangnell & Fotedar, 2005) และงานวิจัยของ Prangnell and Fotedar, (2009) พบว่า การเลี้ยงกุ้ง *P. latisulcatus* ใช้น้ำจากทะเลสาบความเค็ม 32 ppt และเสริม K ประมาณ 80% และ 100% ของ K ที่พบในน้ำทะเล และอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, และ Cl:Na มีค่าเท่ากัน (2.8:1, 5.2:1 และ 1.8:1) ยกเว้น Na:K และ Cl:K ที่ระดับ 80% และ 100% มีค่า 30.8:1, 23.9:1 และ 56.7:1, 44.1:1 ตามลำดับ ส่งผลให้กุ้งมีอัตราการรอดประมาณ 71-78% ขณะที่ในชุดควบคุมอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Cl:Na, Na:K และ Cl:K มีค่า 2.8:1, 5.2:1, 1.8:1, 111.5:1 และ 206.5:1 ตามลำดับ ส่งผลให้กุ้งตายภายใน 11 วัน ซึ่งการเสริม K และ Mg ในปริมาณและอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้กุ้งระยะโพสลาว่ามีอัตราการรอดและสามารถปรับสภาพตัวได้ดีที่ความเค็มต่ำ (McGraw, Davis, Teichert-Coddington, & Rouse, 2002; McGraw & Scarpa, 2003; Saoud, Davis, & Rouse, 2003; Davis, Boyd, & Rouse, 2005; Boyd, Thunjai, & Boonyaratpalin, 2002) และสภาวะการขาด K เป็นผลให้เกิดการตายในไม่ช้าของกุ้ง *Americamysis bahia* (Douglas & Horne, 1997; Pillard et al., 2000, 2002 cited in Prangnell & Fotedar, 2009) ซึ่งการเสริม K ประมาณ 6.2-40 mg/L และ Mg ประมาณ 4.6-20 mg/L ใช้น้ำร่วมกับ muriat of potash และ potassium-magnesium sulfate ประมาณ 20 mg/L สามารถเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น (McNevin et al., 2004) และการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่น้ำความเค็ม 3 ppt จำเป็นที่จะต้องเสริม K ประมาณ 5.9-40 mg/L จึงจะเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของกุ้ง (Collins & Russell, 2003 cited in Shakeeb-Ur-Rahman, Jain, Reddy, Kumar, & Raju, 2005) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Whetstone, Treece, Browdy, and Stokes (2002) กล่าวว่า ควรเสริม Ca, Cl, Mg, K, Na และ SO_4 ปริมาณ 100, 2,000, 100, 100, 2,000 และ 500 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำสุดของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) และในการเสริมเฉพาะ K เพียงอย่างเดียวลงไปน้ำ ยังสามารถ

เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งขาว (*L. vannamei*) อย่างไรก็ดีตาม อัตราการรอดของกุ้งยังขึ้นอยู่กับอายุและความเข้มข้นของ Na, Cl, K, Mg และ SO_4 อีกด้วย (Davis, Saoud, McGraw, & Rouse, 2002) เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา (PL₁₈ และ PL₂₈) ที่ ความเค็ม 0.7 ppt พบว่า เมื่อเสริม K ในปริมาณ 1 mg/L ส่งผลให้อัตราการรอดของลูกกุ้งเพิ่มสูงขึ้น (McGraw & Scarpa, 2003)

การเสริมความเข้มข้นของ K เข้าไปในน้ำจะส่งผลให้อัตราการรอดและน้ำหนักตัวของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในระยะโพสลาวาเพิ่มสูงขึ้นที่ความเค็ม 4 ppt โดยอัตราส่วนของ Na:K มีค่า 29-30:1 และยังมีผลต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิต แต่หากมีปริมาณความเข้มข้นของ K ต่ำและอัตราส่วนของ Na:K เพิ่มสูงขึ้น (119:1) จะทำให้การเจริญเติบโตและอัตราการรอดต่ำลง (Roy et al., 2007b, 2006) ขณะที่รายงานการวิจัยของ Zhu et al. (2004) กล่าวว่า อัตราส่วนของ Na:K มีค่า 20:1 ถึงจะเหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 30 ppt แต่หากมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น (110.5:1) จะมีผลทำให้กิจกรรมต่าง ๆ และการเจริญเติบโตของกุ้งลดลง และงานวิจัยของ Roy, Davis, and Whitis (2009) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา ซึ่งใช้น้ำจากทะเลสาบความเค็ม 9.1 ppt และมีอัตราส่วนของ Na:K ประมาณ 43.4:1 พบว่า มีอัตราการรอดต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 2.4, 2.6, 3.3 และ 3.7 ppt ซึ่งมีอัตราส่วนของ Na:K ประมาณ 17.5:1, 19.4:1, 24.1:1 และ 23.8:1 ตามลำดับ และทุกความเค็มที่กล่าวมาอัตราการรอดของกุ้งไม่แตกต่างกัน และยังกล่าวอีกว่าในน้ำที่ความเค็ม 9.1 ppt อาจจะมีปริมาณของแร่ธาตุหรืออัตราส่วนบางตัวที่ไม่เหมาะสม เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้ง *P. latissulcatus* ที่ความเค็ม 32 ppt พบว่า เมื่อเสริม K จะส่งผลให้กุ้งมีอัตราการรอดสูงถึง 100% และความเข้มข้นของ K ในพลาสมาจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากเดิมลงไป 4 ชั่วโมง ส่วนความเข้มข้นของ Na ในพลาสมา มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าออกซิโมลาติต์ตลอด 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ Mg แต่ความเข้มข้นของ Ca จะมีค่าคงที่ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งในน้ำความเค็มต่ำหากขาด K จะทำให้กุ้งลดการดูดซึมแร่ธาตุเข้าสู่ร่างกาย เมื่ออยู่ในสภาวะอย่างนี้นาน ๆ จะทำให้หน้าที่การรักษาสสมดุลของกุ้งล้มเหลวลง (Prangnell & Fotadar, 2006a) และยังมีผลต่อการตายของไมซีส *Americamysid bahia* (Douglas & Horne, 1997; Pillard et al., 2000, 2002 cited in Prangnell & Fotadar, 2009) เพราะทั้ง K และ Mg มีส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตและทำหน้าที่ควบคุมสมดุลเกลือแร่ของครัสเตเชียน โดยเฉพาะ K จะเป็นไอออนบวกที่มีความสำคัญภายในเซลล์ และกิจกรรมของ Na^+/K^+ -ATPase (Mantel & Farmer, 1983) ส่วน Mg มีหน้าที่ในกระบวนการเผาผลาญไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต และมีส่วนร่วมร่วมกับกิจกรรมของเอนไซม์ (Davis & Lawrence, 1997)

การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำหากมีการเสริมแร่ธาตุบางชนิด สามารถช่วยให้กุ้งมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดเพิ่มสูงขึ้นได้ เช่นงานวิจัยของ Davis et al. (2005) รายงานว่า การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา ที่ความเค็ม 4 ppt โดยการเสริมด้วย KCl, MgCl₂ และ KCl ควบคู่กับ MgCl₂ ลงไปในน้ำ พบว่า สามารถเพิ่มอัตราการรอดของกุ้งให้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่การเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน แต่หากดูในภาพรวมพบว่า การเสริม KCl มีแนวโน้มที่จะส่งผลดีทั้งการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ในขณะที่การเสริม MgCl₂ กลับมีผลดีเฉพาะอัตราการรอด และในทางกลับกันหากเสริมเฉพาะ NaCl ลงในน้ำ จะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของกุ้ง ถึงแม้ว่าในน้ำทะเลจะมี NaCl ก็ตาม (Cawthorne et al., 1983 cited in Saoud et al., 2003; Davis, Samocha, & Boyd, 2004) แต่ในทางกลับกัน Na กับ Cl มีส่วนสำคัญต่อความสมดุลเกลือแร่ (Parado-Esteva et al., 1987 cited in Saoud et al., 2003; Castille & Lawrence, 1981; Ferraris et al., 1986) เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 4 ppt เมื่อเสริม K และ Mg ลงในน้ำสามารถที่จะเพิ่มอัตราการรอดของกุ้งให้สูงขึ้น (Davis et al., 2004, 2005; Saoud et al., 2003) งานวิจัยของ Sowers, Gatlin, Young, Isely, Browdy, and Tomasso (2005) พบว่า อัตราการรอดของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำ (2 ppt) ซึ่งเตรียมจากน้ำทะเลปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งที่เลี้ยงในน้ำทะเลเทียมที่มีความเค็มเท่ากัน แต่มีปริมาณและอัตราส่วนของ Na, K, Ca และ Mg แตกต่างกัน พบว่า อัตราการรอดของกุ้งที่เลี้ยงในน้ำที่เตรียมจากทะเลเทียมสูงกว่าในชุดน้ำทะเลปกติ

ความเข้มข้นของ Ca, Mg และ K มีผลต่อสรีระเคมีของกุ้ง และมีความสำคัญมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Na, Cl และ SO₄ ที่ทำหน้าที่ในการปรับความเค็มและแรงดันออสโมติก ถึงแม้ว่า Na และ K จะเป็นตัวหลักที่ใช้ในการควบคุมระบบสมดุลเกลือแร่ แต่ K, Mg และ Ca ก็มีส่วนสำคัญ ในกิจกรรมทางเคมีภายในร่างกายของกุ้ง Davis et al. (2004) นอกจากนี้ อัตราส่วนของไอออนหลักๆ ก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยมีรายงานการวิจัยกล่าวว่า อัตราส่วนของ Na:K มีส่วนสำคัญต่ออัตราการรอดของกุ้ง (Saoud et al., 2003; Zhu et al., 2004) และการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 30 ppt หากอัตราส่วนของ Na:K ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้กุ้งมีกิจกรรมและการกินอาหารลดลงทำให้มีผลกระทบต่อ การเจริญเติบโต (Zhu et al., 2004) สอดคล้องกับ Roy et al. (2007b) พบว่า การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา ที่ความเค็ม 4 ppt และเสริม K ในปริมาณที่แตกต่างกัน สามารถทำให้อัตราการรอดและน้ำหนักตัวของกุ้งแตกต่างกัน แสดงว่าการเสริม K เข้าไป ส่งผลให้อัตราส่วนของ Na:K เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของ Na:K มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ในขณะที่การเสริม Mg ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโต แต่มีผลต่อการสะสมในตับ ขณะที่ K ไม่ส่งผลมากนัก คือ เมื่อในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของ Mg เพิ่ม

สูงขึ้น ส่งผลให้มีสะสมในตับเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งให้เห็นว่า หากปริมาณความเข้มข้นของ Mg ที่สะสมอยู่ในตับมีปริมาณต่ำ เป็นเพราะปริมาณแร่ธาตุไม่เพียงพอกับความต้องการทางสรีรวิทยาของกุ้ง และยังส่งผลให้กุ้งอยู่ในสภาวะเครียด และยังมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการรอดของกุ้งต่ำลง

ผลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K ในน้ำ ต่อการเจริญเติบโต ในความเค็มต่าง ๆ

จากการตรวจสอบเอกสารการวิจัยของกุ้งหลายชนิดที่เลี้ยงในความเค็มต่าง ๆ กัน พอสรุปรายละเอียดได้ดัง ตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากุ้งแต่ละชนิดมีระดับความต้องการความเค็มของการเลี้ยงที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อปริมาณแร่ธาตุและสัดส่วนของแร่ธาตุที่อยู่ในน้ำด้วย

การศึกษาอัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในน้ำของระบบการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็มต่าง ๆ พบว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 4-5 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 3.1-4.4:1, 8.1-9.9:1, 21.5-28:1, 1.5:1 และ 31:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และ Roy et al. (2007b) กล่าวว่า การเลี้ยงกุ้งในบริเวณน้ำจืดจะต้องมีการเสริมแร่ธาตุเพื่อรักษาระดับของ Mg และ K ตลอดเวลาจึงจะทำให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการรอดตายของกุ้ง โดยที่ความเค็ม 4 ppt จะต้องคงอัตราส่วนของ Na:K ประมาณ 28:1 และ Mg จะช่วยให้กุ้งมีสุขภาพที่ดี พบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca เท่ากับ 3.1:1 ทำให้การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำมีอัตราการรอดตายที่ดี และเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น 20-25 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 4.8-5.2:1, 5.9-7.6:1, 15.3-15.8:1, 1.6-1.8:1 และ 24.3-27.8:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และ บุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ซึ่งเป็นช่วงความเค็มที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของกุ้งขาว (*L. vannamei*) เนื่องจากมีสถานะ iso-osmotic point แสดงให้เห็นว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำจำเป็นต้องเสริมแร่ธาตุบางชนิดลงไปเพื่อที่จะให้มีอัตราส่วนของแร่ธาตุให้มีความเหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง เช่น อัตราส่วนของ Mg:Ca และ Na:K ที่ความเค็ม 4-5 ppt มีค่าน้อยกว่าประมาณ 1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเค็ม 20-25 ppt ส่วนในน้ำที่ความเค็ม 30-35 ppt มีอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 4.2-5.2:1, 5.9-6.4:1, 17-21.2:1, 1.4-1.7:1 และ 30-30.7:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ 2551) และจากรายงานของ Zhu et al. (2004) กล่าวว่า ที่ความเค็ม 30 ppt อัตราส่วนของ Na:K ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตมีค่า 20:1 และหากมีสูงถึง 27.9:1 ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตต่ำลง ดังนั้น การเจริญเติบโตของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ดีต้องมีปริมาณของ K อยู่มาก เพราะหากมีปริมาณของ K มากหรือมีอัตราส่วนของ Na:K ต่ำจะส่งผลทำให้การเจริญเติบโตและการกินอาหาร

มีประสิทธิภาพที่ดีด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Shakeeb-Ur-Rahman et al. (2005) กล่าวว่า มีความจำเป็นในการเสริม K ลงไปในน้ำ เพราะจะมีผลต่อการเจริญเติบโตและการรอดตายของกุ้งกุลาดำ

(*P. monodon*) และกุ้งขาว (*L. vannamei*) (Saoud et al., 2003; Davis et al., 2005)

อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในน้ำการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่ความเค็มน้ำต่าง ๆ พบว่า น้ำทะเลที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 5 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 2.8-3.1:1, 5.1-5.4:1, 22.3-29.9:1, 1.9-2.2:1 และ 44.5-55.4:1 (Lin et al., 2000; Tantulo & Fotedar, 2007) และที่ความเค็ม 25 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 3:1, 4:1, 10:3, 1.7:1 และ 43.5:1 ตามลำดับ (Lin et al., 2000) (ตารางที่ 1) พบว่า ในน้ำความเค็ม 5 ppt มีปริมาณของ K ต่ำทำให้อัตราส่วนของ Na:K มีค่าสูงกว่าประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับความเค็ม 25 ppt ขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 5 ppt ควรมีการปรับอัตราส่วนของ Na:K ลดลงเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tantulo and Fotedar (2007) กล่าวว่า น้ำใต้ดินจะมี K ต่ำ ส่งผลให้เมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้น การตายของกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ก็เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Shakeeb-Ur-Rahman et al. (2005) กล่าวว่า การตายของกุ้งไม่เกี่ยวข้องกับการเป็นโรคแต่จะมีผลกับความเค็มน้ำ และพบว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 2.7 ppt ในบ่อดินแบบหนาแน่น การเสริม K ในอาหารปริมาณ 3% ส่งผลให้ปริมาณของ K ในเลือดมีระดับสูงกว่าชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุ 1% และพบว่า ที่ความเค็ม 5 ppt ปริมาณ Na, Cl และ K ในพลาสมาจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าในน้ำความเค็มอื่น ๆ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ (2546) พบว่า ปริมาณของ Na, Cl และ K ในพลาสมาปูทะเล (*S. serrata*) มีความเข้มข้นต่ำสุดที่ความเค็ม 5 ppt และสูงสุดที่ความเค็ม 25 ppt จึงอาจจะกล่าวได้ว่าในการเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำจำเป็นต้องเสริม K ลงไปเพื่อที่จะทำให้มีอัตราส่วนของ Na:K ไม่มากจนเกินไป

ผลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K ในพลาสมาของกุ้งทะเล

อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในพลาสมาของกุ้งขาว (*L. vannamei*) พบว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่างกันย่อมส่งผลต่อปริมาณแร่ธาตุ และอัตราส่วนของแร่ธาตุในพลาสมา โดยการเลี้ยงที่ความเค็ม 5 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.4:1, 51.1:1, 28.5:1, 0.8:1 และ 20.9:1 ตามลำดับ ส่วนที่ความเค็ม 25 ppt อัตราส่วนของดังกล่าว มีค่า 0.2:1, 74.0:1, 26.8:1, 0.8:1 และ 20.2:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และใกล้เคียงกับรายงานของ Cheng et al. (2002) ที่อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ

Cl:K มีค่า 0.3:1, 36.7:1, 25.7:3, 1.2:1 และ 29.7:1 ตามลำดับ น่าจะเป็นการบ่งชี้ได้ว่า การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 5 ppt หรือต่ำกว่านี้จำเป็นต้องมีการเสริมแร่ธาตุลงไปในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของ Mg:Ca ที่ความเค็มต่ำมีค่ามากกว่าความเค็ม 25 ppt ประมาณ 1 เท่า และความเค็ม 30-35 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.3-0.5:1, 58.9-73.6:1, 23.9-27.2:1, 0.8:1 และ 19.1-20.2:1 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และพบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเค็มเมื่อเปรียบเทียบกับความเค็ม 25 ppt ประมาณ 1 เท่า เห็นได้ว่า ในน้ำที่ความเค็มต่ำหรือสูงกว่า 25 ppt ยังมีปริมาณของ Ca ต่ำ ชี้ชัดได้ว่า กุ้งที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำน่าจะยังขาดแคลน Ca อยู่ จึงสมควรที่จะเสริมแร่ธาตุลงไปในน้ำเพื่อที่จะทำให้กุ้งมีโอกาสนำไปสร้างสมดุลได้ดีขึ้น ขณะที่สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ (2551) ได้มีการเสนอแนะว่า ความเค็มที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) คาดว่าอยู่ในช่วงความเค็ม 20-35 ppt เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของออสโมลาลิตีและแร่ธาตุส่วนใหญ่ในระบบเลือด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีค่อนข้างต่ำหรือควบคุมได้ดี จึงส่งผลให้สามารถนำพลังงานไปใช้ในการดำรงชีวิต และการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเค็มต่ำกว่า 20 ppt ควรที่จะตระหนักถึงการเสริมแร่ธาตุบางชนิดในน้ำหรืออาหารตามความเหมาะสม และที่ความเค็มมากกว่า 35 ppt จำเป็นต้องเจือจางน้ำเพื่อให้ความเข้มข้นของแร่ธาตุบางชนิดต่ำลง

อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในพลาสมาของกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) พบว่า ในพลาสมาของกุ้งที่ความเค็ม 5 ppt มีอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.2:1, 37.2:1, 21.7:1, 1.5:1 และ 33.4:1 ตามลำดับ (Lin et al., 2000) และที่ความเค็ม 10-20 ppt อัตราส่วนของแร่ธาตุดังกล่าวมีค่า 0.5-0.8:1, 14.1-23.8:1, 17-20:1, 1.3-1.5:1 และ 25.2-26:1 ตามลำดับ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก) ส่วนความเค็ม 25-30 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.2-0.6:1, 17.8-24.7:1, 19-21.5:1, 1.5:1 และ 28.4-33:1 ตามลำดับ (Lin et al., 2000 และ บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก) (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเค็ม น้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในพลาสมายังคงใกล้เคียงกันตลอดช่วงความเค็ม หรือกล่าวได้ว่า กุ้งต้องพยายามรักษาอัตราส่วนของแร่ธาตุให้คงที่ตลอดเวลา ถึงแม้ความเค็มจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเป็นเช่นนั้น การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำ การเสริมแร่ธาตุในระบบเลี้ยงอาจจะไม่มีผลกระทบกับอัตราส่วนของแร่ธาตุที่มีอยู่ในพลาสมาของกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*)

ผลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K ในเปลือกของกุ้งทะเล

อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในเปลือกของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็มต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนของแร่ธาตุในโครงสร้างเปลือกของกุ้งในช่วงความเค็ม 5-20 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.07-0.09:1, 1.3-1.7:1, 0.9-1.1:1, 1.8-2.3:1 และ 1.8-2.2:1 ตามลำดับ และที่ความเค็ม 25 ppt อัตราส่วนดังกล่าวมีค่า 0.09:1, 1.7:1, 1.4:1, 2.1:1 และ 2.9:1 ตามลำดับ ซึ่งที่ความเค็มต่ำอัตราส่วนของ Na:K มีค่าต่ำกว่าที่ความเค็ม 25 ppt น่าจะมีผลมาจากความเข้มข้นของ Na มีมากกว่าการเพิ่มขึ้นของ K ในน้ำและพลาสมา จึงบ่งชี้ให้เห็นว่าในการเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำ จำเป็นจะต้องมีการพิจารณาความเข้มข้นของ K เพื่อที่จะเสริมลงไปให้น้ำ เป็นการปรับอัตราส่วนให้เหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง และที่ความเค็ม 30 ppt มีอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.08:1, 2.4:1, 2.1:1, 1.4:1 และ 3.0:1 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า อัตราส่วนของ Na:K มีค่ามากกว่าที่ความเค็ม 25 ppt ประมาณ 1 เท่า เนื่องจาก เมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้นปริมาณของ Na ในน้ำและพลาสมาเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้กุ้งต้องขับ Na เข้ามาในโครงสร้างเปลือกมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนได้เพิ่มสูงขึ้น และในขณะเดียวกันส่งผลต่ออัตราส่วนของ Cl:Na ให้ลดต่ำลงประมาณ 1 เท่า ส่วนที่ความเค็ม 35 ppt มีอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.09:1, 1.2:1, 1.0:1, 2.1:1 และ 2.2:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) (ตารางที่ 3) เช่นเดียวกับที่ระดับความเค็มต่ำโดยมีอัตราส่วนของ Na:K ต่ำกว่าความเค็ม 25 ppt ความเข้มข้นของ Na มีค่าลดต่ำลงที่ความเค็ม 35 ppt จึงส่งผลให้อัตราส่วนลดต่ำลงเช่นกัน อาจจะเนื่องมาจากความเข้มข้นของ Na มีมากจนเกินไป ส่งผลให้กุ้งต้องพยายามที่จะขับ Na ออกไปนอกร่างกายเพื่อที่จะรักษาสมดุลของแร่ธาตุให้เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่า กุ้งพยายามรักษาสมดุลอัตราส่วนของแร่ธาตุให้เหมาะสมถึงแม้ความเค็มน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงไป แสดงให้เห็นว่า ความจำเป็นในการสร้างเปลือกโดยใช้แร่ธาตุตามอัตราส่วนดังกล่าวนี้ยังคงมีความจำเป็นและสำคัญ ดังนั้น เมื่อมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อสรีระเคมีและทำให้กุ้งต้องพยายามควบคุมอัตราส่วนในพลาสมาไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักซึ่งต้องมีการใช้พลังงานในการควบคุม จึงมีผลกระทบต่ออัตราส่วนในโครงสร้างเปลือกด้วย ดังนั้น การเสริมแร่ธาตุบางชนิดลงไปให้น้ำอาจจะมีผลดีกับโครงสร้างเปลือกของกุ้งได้

อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในเปลือกของกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่ความเค็มต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนของแร่ธาตุในโครงสร้างเปลือกของกุ้งที่ความเค็ม 10 ppt อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.03 :1, 1.0:1, 1.3:1, 0.6:1 และ 0.8:1 ตามลำดับ และที่ความเค็ม 20 ppt อัตราส่วนดังกล่าวมีค่า 0.03 :1, 1.2:1, 1.2:1, 1.0:1 และ 1.2:1 ตามลำดับ เช่นเดียวกับ

ความเค็ม 30 ppt ที่อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K มีค่า 0.03 :1, 0.8:1, 1.0:1, 0.8:1 และ 0.8:1 ตามลำดับ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก) เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของแร่ธาตุดังกล่าว พบว่า ที่ความเค็ม 20 ppt อัตราส่วนของ Cl:Na และ Cl:K มีค่าสูงกว่าความเค็ม 10 ppt ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อความเค็มน้ำสูงขึ้น ความเข้มข้นของ Na และ Cl ในน้ำและพลาสมา มีมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้กุ้งต้องขับ Na และ Cl เข้ามาในโครงสร้างเปลือกมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนเพิ่มสูงขึ้นและมีผลกระทบต่ออัตราส่วนของ Cl:K ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่ในขณะที่ความเค็ม 30 ppt อัตราส่วนของ Na:Mg, Na:K, Cl:Na และ Cl:K กลับมีค่าต่ำลง อาจจะเนื่องมาจากที่ความเค็มสูงมากปริมาณของ Na และ Cl ในน้ำและพลาสมามีปริมาณที่มากจนเกินไป จำเป็นที่กุ้งจะจึงต้องขับแร่ธาตุเหล่านี้ออกนอกร่างกาย ส่งผลให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำลง เพื่อที่จะรักษาสมดุลของแร่ธาตุให้เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่า กุ้งพยายามรักษาสมดุลอัตราส่วนของแร่ธาตุให้เหมาะสม ถึงแม้ความเค็มน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กุ้งพยายามที่จะควบคุมอัตราส่วนของแร่ธาตุเหล่านี้ให้คงที่ หรือให้มีเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดอยู่ตลอดช่วงความเค็ม เพราะว่าปริมาณของอัตราส่วนของแร่ธาตุทั้งหมดนี้ มีความเหมาะสมกับกระบวนการสร้างเปลือกของกุ้ง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P ที่พบในน้ำของการเลี้ยงกุ้งทะเลที่ความเค็มต่าง ๆ

ชนิดของกุ้ง	ความเค็ม (ppt)	อัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำ						เอกสารอ้างอิง
		Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K	
<i>L. vannamei</i>	5	21.8:1 (2,146:99)	4.1:1 (280:68)	7.7:1 (2,146:280)	2.7:1 (68:26)	1.4:1 (3,021:2,146)	30.7:1 (3,021:99)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
	10	13.8:1 (3,072:222)	6.8:1 (519:76)	5.9:1 (3,072:519)	3.3:1 (76:23)	1.1:1 (3,298:3,072)	14.8:1 (3,298:222)	"
	15	11.2:1 (3,213:288)	7.0:1 (716:103)	4.5:1 (3,213:716)	2.7:1 (103:37)	1.1:1 (3,460:3,213)	12.0:1 (3,460:288)	"
	15	30.9:1 (4,830:156)	-	-	-	1.6:1 (8,050:4,830)	51.6:1 (8,058:156)	Roy et al. (2007a)
	20	15.6:1 (4,808:309)	5.2:1 (814:157)	5.9:1 (4,808:814)	4.5:1 (157:35)	1.6:1 (7,513:4,808)	24.3:1 (7,513:309)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
	25	15.3:1 (5,427:355)	4.6:1 (1,022:222)	5.3:1 (5,427:1022)	7.7:1 (222:29)	1.8:1 (9,901:5,427)	27.9:1 (9,901:355)	"
	30	17.7:1 (6,451:365)	4.3:1 (1,121:263)	5.8:1 (6,451:1,121)	12.9:1 (263:20)	1.7:1 (11,214:6,451)	30.7:1 (11,214:365)	"
	30	28:1 (11,500:409)	-	-	-	1.5:1 (17,500:11,500)	42.7:1 (17,500:409)	Roy et al. (2007a)
	34	28:1 (10,500:380)	3.4:1 (1,350:400)	7.7:1 (10,500:1,350)	-	-	-	Goldberg, (1963) อ้างโดย Roy et al. (2006)
	35	21.3:1 (8,615:405)	5.2:1 (1,350:258)	6.4:1 (8,615:1,350)	15.8:1 (258:16)	1.4:1 (12,167:8,615)	30.0:1 (12,167:405)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
<i>P. monodon</i>	5	29.9:1 (1,288:43)	2.9:1 (240:84)	5.4:1 (1,288:240)	-	1.8:1 (2,380:1,288)	55.4:1 (2,380:43)	Lin et al. (2000)
	5	-	3.1:1 (284:91)	5.4:1 (1,536:284)	-	2.2:1 (3,328:1,536)	-	Tantulo and Fotedar (2007)
	25	10.3:1 (3,059:296)	3:1 (1,824:600)	4.1:1 (7,613:1,824)	-	1.7:1 (12,880:7,613)	43.5:1 (12,880:296)	Lin et al. (2000)
<i>M. japonicus</i>	20	74.5:1 (2,983:40)	4.8:1 (1,312:275)	2.3:1 (2,983:1,312)	-	-	-	Pan et al. (2006)
	32	27.8:1 (10,760:387)	4.3:1 (1,794:413)	5.9:1 (10,760:1,794)	-	-	-	"
<i>P. latisulcatus</i>	32	23.9:1 (9,306:390)	3.1:1 (1,126:355)	8.3:1 (9,306:1,126)	-	1.9:1 (17,359:9,306)	44.5:1 (17,359:390)	Prangnell and Fotedar (2006a)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ (mg/L)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่พบในปลาสมของกุ้งทะเลที่มีความเค็มต่าง ๆ

ชนิดของกุ้ง	ความเค็ม (ppt)	อัตราส่วนของแร่ธาตุในปลา						เอกสารอ้างอิง
		Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K	
<i>L. vannamei</i>	5	40.1:1 (7,820:195)	-	-	-	1.2:1 (9,450:7,820)	48.5:1 (9,450:195)	Roy et al. (2007a)
	5	28.1:1 (10,265:365)	0.4:1 (226:612)	45.5:1 (10,265:226)	3.5:1 (612:176)	0.7:1 (7,621:10,265)	20.9:1 (7,621:365)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
	10	25.1:1 (9,850:392)	0.4:1 (300:720)	32.8:1 (9,850:300)	3.9:1 (720:184)	0.8:1 (8,062:9,850)	20.5:1 (8,062:392)	"
	15	22.3:1 (9,445:423)	0.3:1 (181:715)	52.3:1 (9,445:181)	3.8:1 (715:191)	0.9:1 (8,165:9,445)	19.3:1 (8,165:423)	"
	15	34.2:1 (7,360:214)	-	-	-	1.2:1 (9,450:7,820)	42.5:1 (9,100:214)	Roy et al. (2007a)
	20	28.0:1 (11,317:404)	0.1:1 (96:654)	117.3:1 (11,317:96)	3.9:1 (654:168)	0.7:1 (8,451:11,317)	20.9:1 (8,451:404)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
	25	25.2:1 (11,576:459)	0.1:1 (96:676)	120.5:1 (11,576:96)	4.1:1 (676:164)	0.8:1 (9,246:11,576)	20.1:1 (9,246:459)	"
	25	25.7:1 (8,089:315)	0.3:1 (220:674)	36.7:1 (8,089:220)	-	1.2:1 (9,358:8,089)	29.7:1 (9,359:315)	Cheng et al. (2002)
	30	44.4:1 (7,820:176)	-	-	-	1.3:1 (10,150:7,820)	57.6:1 (10,150:176)	Roy et al. (2007a)
	30	24.9:1 (12,814:514)	0.2:1 (162:650)	79.2:1 (12,814:162)	4.0:1 (650:162)	0.8:1 (9,766:12,814)	19.0:1 (9,766:514)	สว่างพงษ์ และบุญรัตน์ (2551)
	35	27.2:1 (13,179:484)	0.4:1 (266:595)	49.6:1 (13,179:266)	3.8:1 (595:155)	0.8:1 (10,071:13,179)	20.8:1 (10,071:484)	"
<i>P. monodon</i>	5	21.7:1 (6,509:300)	0.2:1 (175:1096)	37.2:1 (6,509:175)	-	1.5:1 (10,010:6,509)	33.4:1 (10,010:300)	Lin et al. (2000)
	10	20.0:1 (6,440:316)	0.8:1 (456:560)	14.1:1 (6,440:456)	-	1.3:1 (8,225:6,440)	26.0:1 (8,225:316)	บุญรัตน์ และคณะ (2547ก)
	20	17.0:1 (6,555:382)	0.5:1 (276:536)	23.8:1 (6,555:276)	-	1.5:1 (9,625:6,555)	25.2:1 (9,625:382)	"
	25	21.5:1 (7,291:339)	0.2:1 (295:1304)	24.7:1 (7,291:295)	-	1.5:1 (11,235:7,291)	33.0:1 (11,235:339)	Lin et al. (2000)
	30	19.0:1 (7,245:382)	0.6:1 (408:692)	17.8:1 (7,245:408)	-	1.5:1 (10,850:7,245)	28.4:1 (10,850:382)	บุญรัตน์ และคณะ (2547ก)
<i>P. latissulCatus</i>	32	-	0.2:1 (138:594)	65.3:1 (9,008:138)	-	-	-	Prangnell and Fotedar (2006b)

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ (mg/L)

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่พบในเปลือกกุ้งขาว (*L. vannamei*) และกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่ความเค็มต่าง ๆ

ชนิดของกุ้ง	ความเค็ม (ppt)	อัตราส่วนของแร่ธาตุในเปลือก						เอกสารอ้างอิง
		Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K	
<i>L. vannamei</i>	5	1.1:1 (15:14)	0.07:1 (9:133)	1.7:1 (15:9)	22.4:1 (133:6)	1.9:1 (29:15)	2.2:1 (29:14)	สว่างพงษ์ สมมาตร (2552)
	10	0.9:1 (16:17)	0.09:1 (12:134)	1.3:1 (16:12)	20.8:1 (134:6)	1.9:1 (30:16)	1.8:1 (30:17)	"
	15	1.1:1 (16:14)	0.09:1 (12:136)	1.4:1 (16:12)	19.5:1 (136:7)	1.8:1 (29:16)	2.0:1 (29:14)	"
	20	1.0:1 (14:14)	0.09:1 (11:131)	1.2:1 (14:11)	18.3:1 (131:7)	2.0:1 (27:14)	2.0:1 (27:14)	"
	25	1.4:1 (20:14)	0.09:1 (12:129)	1.7:1 (20:12)	21.4:1 (129:6)	2.0:1 (39:20)	2.9:1 (39:14)	"
	30	2.0:1 (26:13)	0.08:1 (11:132)	2.4:1 (26:11)	26.4:1 (132:5)	1.4:1 (36:26)	2.9:1 (36:13)	"
	35	1.0:1 (15:15)	0.09:1 (12:133)	1.2:1 (15:12)	23.5:1 (133:6)	2.1:1 (32:15)	2.2:1 (32:15)	"
<i>P. monodon</i>	10	1.3:1 (5:4)	0.03:1 (5:154)	1.0:1 (5:5)	22:1 (154:7)	0.6:1 (3:5)	0.8:1 (3:4)	บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ (2547ก)
	20	1.2:1 (6:5)	0.03:1 (5:153)	1.2:1 (6:5)	21.9:1 (153:7)	1.0:1 (6:6)	1.2:1 (6:5)	"
	30	1.0:1 (4:4)	0.03:1 (5:145)	0.8:1 (4:5)	16.1:1 (145:9)	0.8:1 (3:4)	0.8:1 (3:4)	"

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บ คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ (mg/g)

วิธีการวิจัย

การรวบรวมและการเตรียมกุ้งขาวที่ใช้ในการทดลอง

รวบรวมกุ้งจากบ่อเลี้ยงระบบพัฒนาที่มีลักษณะแข็งแรง สมบูรณ์เต็มที่ อายุ 2 เดือน ขนาดความยาวเฉลี่ย 8.9 ± 0.19 cm และน้ำหนักเฉลี่ย 9.7 ± 0.18 g มาทำการปรับสภาพภายในบ่อพัก โดยจะปรับความเค็มให้ได้ 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 ppt วิธีปรับความเค็มน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งจากความเค็ม 30 ppt ลงให้ได้ความเค็มที่ต้องการ โดยจะปรับความเค็มลงวันละ 5 ppt เมื่อได้ความเค็มตามที่ต้องการแล้วเลี้ยงกุ้งในบ่อพักอีก 7 วัน จึงนำกุ้งไปใช้ในการทดลอง

การเตรียมถังและน้ำที่ใช้ในการเลี้ยง

ล้างและแช่ถังไฟเบอร์กลาสขนาด 250 L ด้วยคลอรีน (Ca(OCL)_2) ระดับความเข้มข้น 50-100 ppm ทิ้งไว้ 1 คืน แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งหนึ่ง และเตรียมน้ำทะเลให้ได้ความเค็มที่ต้องการ (10, 20 และ 30 ppt) แล้วให้อากาศตลอดเวลา

การวางแผนการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design - CRD) และแบ่งออกเป็น 9 ชุดการทดลอง ที่ความเค็มน้ำ 10, 20 และ 30 ppt ที่มีการเสริมแร่ธาตุและไม่มีการเสริมแร่ธาตุทุกความเค็ม (negative control) และการเสริม NaCl เพียงอย่างเดียวเพื่อให้ได้ระดับความเค็มใกล้เคียงกับชุดที่เสริมแร่ธาตุ (positive control) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยพิจารณาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุแต่ละชนิดในทางสรีระเคมีของพลาสมา ดับ และเปลือก เมื่อทราบระดับความเค็มที่เหมาะสมของแต่ละอวัยวะแล้วจึงนำความเข้มข้นของ Mg, Ca, Na, K และ Cl ตามระดับความเค็มที่เหมาะสมในแต่ละอวัยวะและน้ำ มาคำนวณระดับความเข้มข้นของแร่ธาตุโดยเฉลี่ยที่ควรมีอยู่ในน้ำซึ่งได้พิจารณาจากพลาสมา เปลือก และดับ โดยคูณด้วยแฟกเตอร์ 2:1:1 ตามลำดับ (ตารางที่ 4) และมีการตรวจสอบอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Na:K, Cl:K และ Cl:Na (ตารางที่ 5)

การพิจารณาในพลาสมาและเปลือกจะพิจารณา Mg, Ca, Na, K และ Cl ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นที่สูงสุดที่กุ้งขาวสามารถควบคุมระดับความเข้มข้นไว้ได้ ก่อนที่จะลดระดับความเข้มข้นลง ยกเว้น Ca ในพลาสมาจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยตรงกลางในช่วงความเค็ม 2.8-50 ppt เนื่องจากตลอดช่วงความเค็มนี้ Ca ในพลาสมาจะมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงต่ำ ซึ่ง

ตารางที่ 4 ระดับความเค็มที่เหมาะสมจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของกุ้งและปริมาณการเสริมแร่ธาตุในระบบเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

แร่ธาตุ	ความเข้มข้นที่ 1 (mg/L)	ความเข้มข้นที่ 2 (mg/L)			ความเข้มข้นที่ 3 (mg/L)		
		ความเค็ม (ppt)			ความเค็ม (ppt)		
		10	20	30	10	20	30
Na	6,822	3,072	4,808	6,451	3,750	2,014	371
Mg	1,084	519	814	1,270	565	270	-
Cl	10,229	3,298	7,513	11,214	6,930	2,716	-
Ca	210	76	157	263	134	53	-
K	310	222	309	365	88	1	-

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่ 1 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมทางสรีระเคมีของกุ้ง

ความเข้มข้นที่ 2 เป็นค่าความเข้มข้นของแร่ธาตุแต่ละชนิดที่มีในน้ำทะเลปกติที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

ความเข้มข้นที่ 3 เป็นค่าความเข้มข้นของแร่ธาตุที่ต้องเสริมลงในน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ถือว่าเป็นช่วงความเค็มที่มีค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมกับความต้องการ และ Cl ในปลาสมจะพิจารณาจากจุด iso-ionic point (ความเค็ม 25 ppt)

การพิจารณาในฉบับจะพิจารณา Mg, Ca, Na, K และ Cl ที่ช่วงความเค็มที่มีค่าความเข้มข้นของแร่ธาตุแต่ละชนิดคงที่ตลอดหรือมีการเปลี่ยนแปลงต่ำ ซึ่งถือได้ว่าเป็นช่วงความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมกับความต้องการของกุ้งขาว (*L. vannamei*) และนำมาหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแร่ธาตุนั้น ๆ แต่ละชนิดต่อไป

การเติมแร่ธาตุ

การเติมแร่ธาตุดำเนินการโดยละลายสารประกอบ ได้แก่ NaCl, MgCl₂, CaCl₂ และ KCl ในปริมาณต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 6) ในน้ำทะเลแต่ละความเค็ม และแบ่งการเติมแร่ธาตุออกเป็น 10 ครั้ง โดยจะเติมวันละ 1 ครั้ง ติดต่อกัน 2 วัน และจะเว้น 1 วัน ซึ่งจะใช้เวลาในการเติมแร่ธาตุประมาณ 14 วัน เพื่อที่จะให้กุ้งได้ปรับสภาพต่อปริมาณแร่ธาตุที่เติมลงไป ในน้ำ และน้ำที่ใช้ละลายสารประกอบจะใช้น้ำจากถังการทดลองเพื่อรักษาปริมาณน้ำให้มีระดับคงที่ตลอด

ตารางที่ 5 อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่พบในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้ง ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

ความเค็ม (ppt)	การทดลอง	Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K
10	ชุดควบคุมเชิงลบ	15.4:1 (3,781:219)	3.5:1 (531:177)	7.1:1 (3,781:531)	2.2:1 (177:79)	17.4:1 (3,404:219)	0.9:1 (3,404:3,781)
	ชุดควบคุมเชิงบวก	58.2:1 (12,581:216)	2.7:1 (517:194)	24.3:1 (12,581:517)	3.2:1 (194:63)	40.6:1 (8,804:216)	0.7:1 (8,804:12,581)
	ชุดเสริมแร่ธาตุ	15.6:1 (4,810:319)	3.0:1 (702:231)	6.9:1 (4,810:702)	3.0:1 (231:51)	24.5:1 (7,456:319)	1.6:1 (7,456:4,810)
20	ชุดควบคุมเชิงลบ	17.1:1 (4,992:269)	3.3:1 (717:220)	7.1:1 (4,992:717)	2.4:1 (220:93)	24.3:1 (7,053:269)	1.4:1 (7,053:4,992)
	ชุดควบคุมเชิงบวก	17.1:1 (5,093:289)	3.0:1 (687:253)	7.7:1 (5,093:687)	2.8:1 (253:94)	24.8:1 (7,086:289)	1.4:1 (7,086:5,093)
	ชุดเสริมแร่ธาตุ	16.2:1 (5,659:369)	3.5:1 (927:270)	6.2:1 (5,659:927)	3.0:1 (270:93)	25.9:1 (9,236:369)	1.6:1 (9,236:5,659)
30 *	ชุดควบคุม	18.3:1 (7,269:397)	3.4:1 (1,031:80)	7.5:1 (7,269:1,031)	3.9:1 (307:80)	29.9:1 (11,606:397)	1.6:1 (11,606:7,269)
	ชุดเสริมแร่ธาตุ	20.0:1 (7,543:381)	3.5:1 (1,157:71)	6.5:1 (7,543:1,157)	4.7:1 (332:71)	32.3:1 (11,983:381)	1.6:1 (11,983:7,543)

หมายเหตุ ชุดควบคุมเชิงลบ คือ ชุดการทดลองที่ไม่มีการเสริมแร่ธาตุ (negative control)

ชุดควบคุมเชิงบวก คือ ชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุเพื่อปรับระดับความเค็มใกล้เคียงกับชุดที่เสริมแร่ธาตุ (positive control)

ชุดเสริมแร่ธาตุ คือ ชุดการทดลองที่มีการเสริมแร่ธาตุ

ตัวเลขในวงเล็บ คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ (mg/L)

* ความเค็ม 30 ppt เนื่องจากชุดควบคุมเชิงบวก และชุดเสริมแร่ธาตุ ใช้ปริมาณแร่ธาตุในการทดลองเท่ากันจึงรวมเข้าด้วยกันเป็นชุดเสริมแร่ธาตุ

ตารางที่ 6 ปริมาณของสารประกอบที่ใช้ในการปรับอัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำที่ทดลองเลี้ยง
กุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

แร่ธาตุ	ปริมาณ (g/L)		
	ความเค็ม 10 ppt	ความเค็ม 20 ppt	ความเค็ม 30 ppt
MgCl ₂	4.79	2.29	-
CaCl ₂	0.37	0.15	-
NaCl	9.52	5.11	0.94
KCl	0.17	-	-

การตรวจสอบคุณภาพน้ำ

ตรวจสอบคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงก่อนเริ่มการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง
ระยะเวลา 2 เดือน โดยวิเคราะห์ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ และอุณหภูมิ ด้วยเครื่อง YSI
model 85/10 วิเคราะห์ค่าพีเอช ด้วยเครื่อง pH Meter รุ่น D-21 และวิเคราะห์ค่าไนไตรท์ แอมโมเนีย
ความเป็นด่าง ด้วยเครื่อง Multiparameter specific ion meter รุ่น C203

การเก็บตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 6 ครั้ง จากบริเวณกลางบ่อเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุโดย
จะเริ่มเก็บช่วงก่อนการทดลอง (ครั้งที่ 1) เมื่อมีการเติมแร่ธาตุครบ (ครั้งที่ 2) และหลังจากนั้นจะเก็บ
ทุก ๆ 15 วัน จนครบจำนวน 2 เดือน

การเก็บตัวอย่างเลือด การเตรียมพลาสมา เปลือก และตับ การวัดปริมาณของแร่ธาตุ
ในพลาสมา เปลือก และตับ

การเก็บตัวอย่างเลือด

หลังจากเลี้ยงกุ้งจนครบ 3 เดือน สุ่มตัวอย่างกุ้งแต่ละชุดการทดลองมาเก็บตัวอย่าง
เลือด โดยมีวิธีดังนี้

ก. หลังจากงดอาหารเป็นเวลา 1 วัน จึงคัดเลือกกุ้งที่มีระยะลอกคราบ Do มาจำนวน
เท่า ๆ กัน (5 ตัวอย่าง / ซ้ำ) ในแต่ละการทดลอง

ข. คัดเลือกกุ้งโดยใช้เข็ม เบอร์ 26 Tuberculin ขนาด 1.0 ml บริเวณโคนขาเดินคู่ที่ 5

ค. นำเลือดเก็บไว้ในหลอดการทดลองขนาด 1.5 ml โดยผสม 30 % tri-sodium citrate เพื่อป้องกันไม่ให้เลือดแข็งตัว (anticoagulant) ลงไปในอัตราส่วน 1:1 (ใช้เลือด 0.7 ml: 30 % tri- sodium citrate 0.7 ml) เขย่าให้เข้ากัน

การเตรียมพลาสมา

ก. นำเลือดกึ่งที่ผสม 30% tri-sodium citrate ไปปั่นเพื่อให้ตกตะกอนด้วยเครื่อง micro centrifuge เพื่อให้ตกตะกอนรวมตัวกันที่ก้นหลอดด้วยแรงเหวี่ยง 14,000 g ที่ อุณหภูมิ 4°C นาน 20-25 นาที

ข. ดูดของเหลวส่วนบน (supernatant) ซึ่งก็คือพลาสมาปริมาตร 1 ml เก็บไว้ใน eppendroff ใหม่เพื่อใช้เป็นตัวอย่างวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ ต่อไป

การเตรียมตัวอย่างเปลือก และดับ

นำตัวอย่างกึ่งที่เก็บเลือดแล้ว มาแกะเปลือกกึ่งแต่ละตัวของแต่ละการทดลอง การทดลองละ 6 ตัว นำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ยิ่งยวด (deionized water) 2 รอบ นำเปลือกที่ล้างแล้วไปอบในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเปลือกที่อบแล้วซึ่งน้ำหนักรอบแรก แล้วนำไปอบต่ออีก 2 ชั่วโมง นำกลับมาชั่งน้ำหนักอีก จนได้น้ำหนักแห้งคงที่ จึงนำเปลือกกึ่งแต่ละตัวที่อบแห้ง แล้วมาบดในโกร่งบด (ceramic mortar) ให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงตาถี่ขนาด 150 µm ให้ได้ปริมาณ 1g เพื่อการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ ต่อไป โดยเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (deccicator) ส่วนดับจะแยกมาจากกึ่งแต่ละตัวของแต่ละการทดลอง การทดลองละ 6 ตัว ไปอบในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3-5 วัน นำมาย่อยด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 6 N แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุต่อไป

การวัดปริมาณของแร่ธาตุในพลาสมา ดับ และเปลือก

นำตัวอย่างทั้ง 3 ประเภทมาใส่ cup โดยด้านล่างหุ้มด้วย prolene film แล้วนำไปวัดปริมาณของ Na, Ca, K, Mg, P และ Cl ด้วยเครื่อง X-ray fluorescent spectrophotometer Oxford ED²⁰⁰⁰ ตามวิธีการของ Pratoomchat et al. (2002b) จะได้ปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นมีหน่วยเป็น mg/L ส่วนดับและเปลือกจะมีหน่วยเป็น mg/g

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของแต่ละการทดลอง ได้แก่ การเจริญเติบโต การรอดตาย ความถี่ของการลอกคราบ อัตราการแลกเนื้อ ปริมาณของแร่ธาตุในน้ำ พลาสมา ดับ และเปลือกของกุ้ง มาหาความแตกต่างทางสถิติด้วยการวิเคราะห์หาความแปรปรวน (analysis of variance) และนำมาหาความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้วิธี Duncan's New multiple range test ด้วยโปรแกรม SPSS for windows version 11.5 (License code 30025 36098 54100 85475 59009 9625)

ผลการวิจัย

ทำการทดลองเสริมและไม่เสริมแร่ธาตุในน้ำเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) โดยการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมทางสรีระเคมี และคำนึงถึงอัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt โดยชุดควบคุมเชิงลบ (ไม่มีการเสริมแร่ธาตุทุกความเค็ม, negative control) และชุดเสริม NaCl (เพื่อปรับความเค็มให้ใกล้เคียงกับชุดที่เสริมแร่ธาตุ, positive control) และชุดทดลอง (มีการเสริมแร่ธาตุ) ซึ่งพิจารณาความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca และ Cl ในพลาสมาและเปลือกที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแร่ธาตุที่สูงสุดที่กุ้งสามารถควบคุมได้ ก่อนที่จะลดระดับความเข้มข้นลง ยกเว้น Ca ในพลาสมาจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของช่วงความเค็มทั้งหมด และ Cl ในพลาสมาจะพิจารณาจากจุด iso-ionic point ส่วนการพิจารณาความเข้มข้นของแร่ธาตุแต่ละชนิดในตับ จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแร่ธาตุในช่วงความเค็มที่มีค่าคงที่ตลอดหรือมีการเปลี่ยนแปลงต่ำ โดยการเติม NaCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$ และ KCl มีผลต่อสรีระเคมีของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ดังต่อไปนี้

ความเข้มข้นและอัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำ

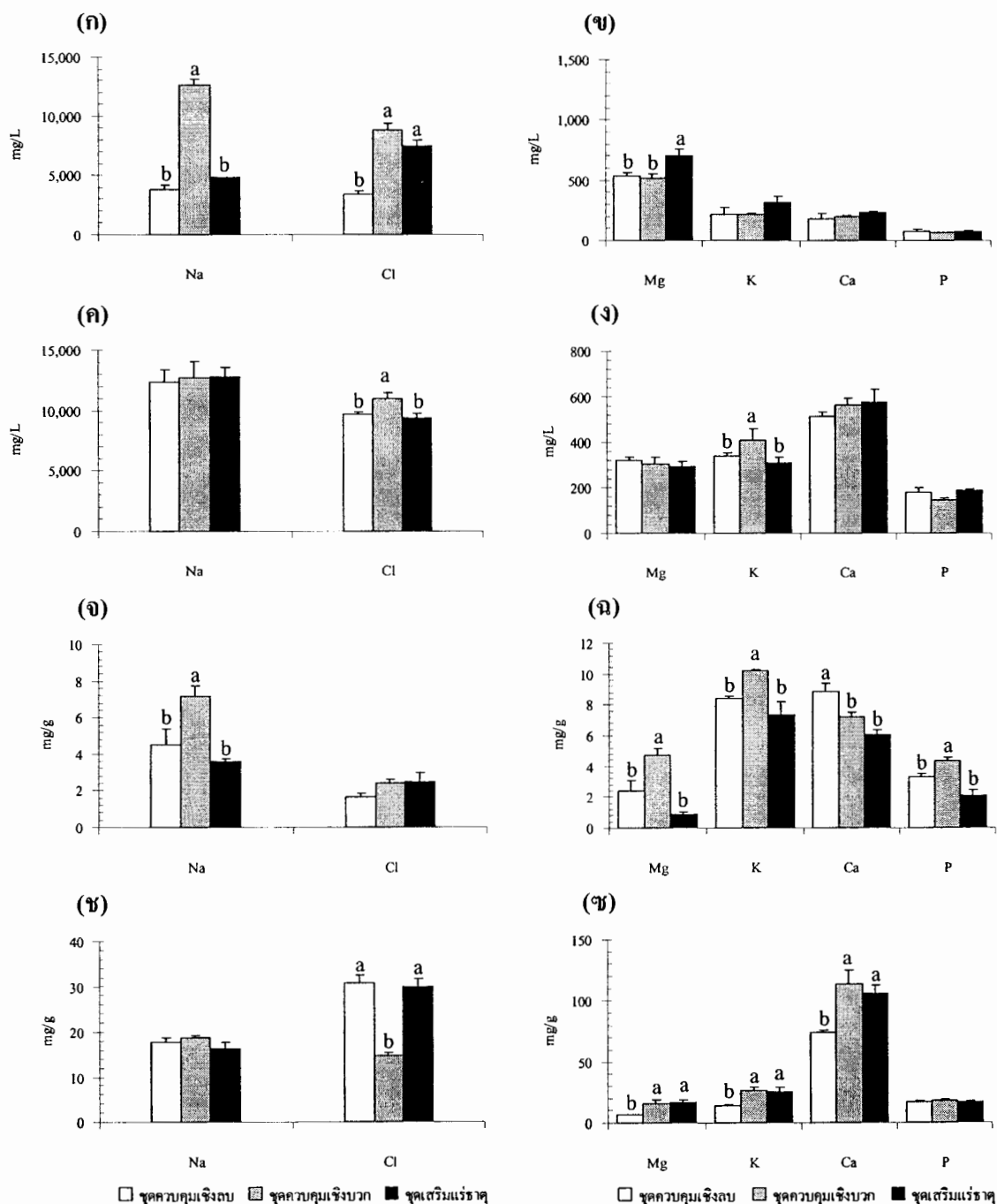
ความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มภายในน้ำทั้ง 3 ระดับความเค็ม (ภาพที่ 1ก-ข 2ก-ข 3ก-ข) พบว่า ส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้น Na ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ และความเข้มข้น Cl ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ และ Mg ที่ความเค็ม 10 ppt กับ Mg และ Cl ที่ความเค็ม 20 ppt ชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดควบคุมเชิงบวก ขณะที่อัตราส่วนของ Na:Mg, Na:K และ Cl:K ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ และ Cl:Na ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดควบคุมเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ยกเว้น Mg:Ca และ Ca:P ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าไม่แตกต่างกันที่ความเค็ม 10 ppt และพบว่า ทุกชุดการทดลองภายในความเค็ม 20 และ 30 ppt มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 7)

ความเข้มข้นและอัตราส่วนของแร่ธาตุในพลาสมา ตับ และเปลือก

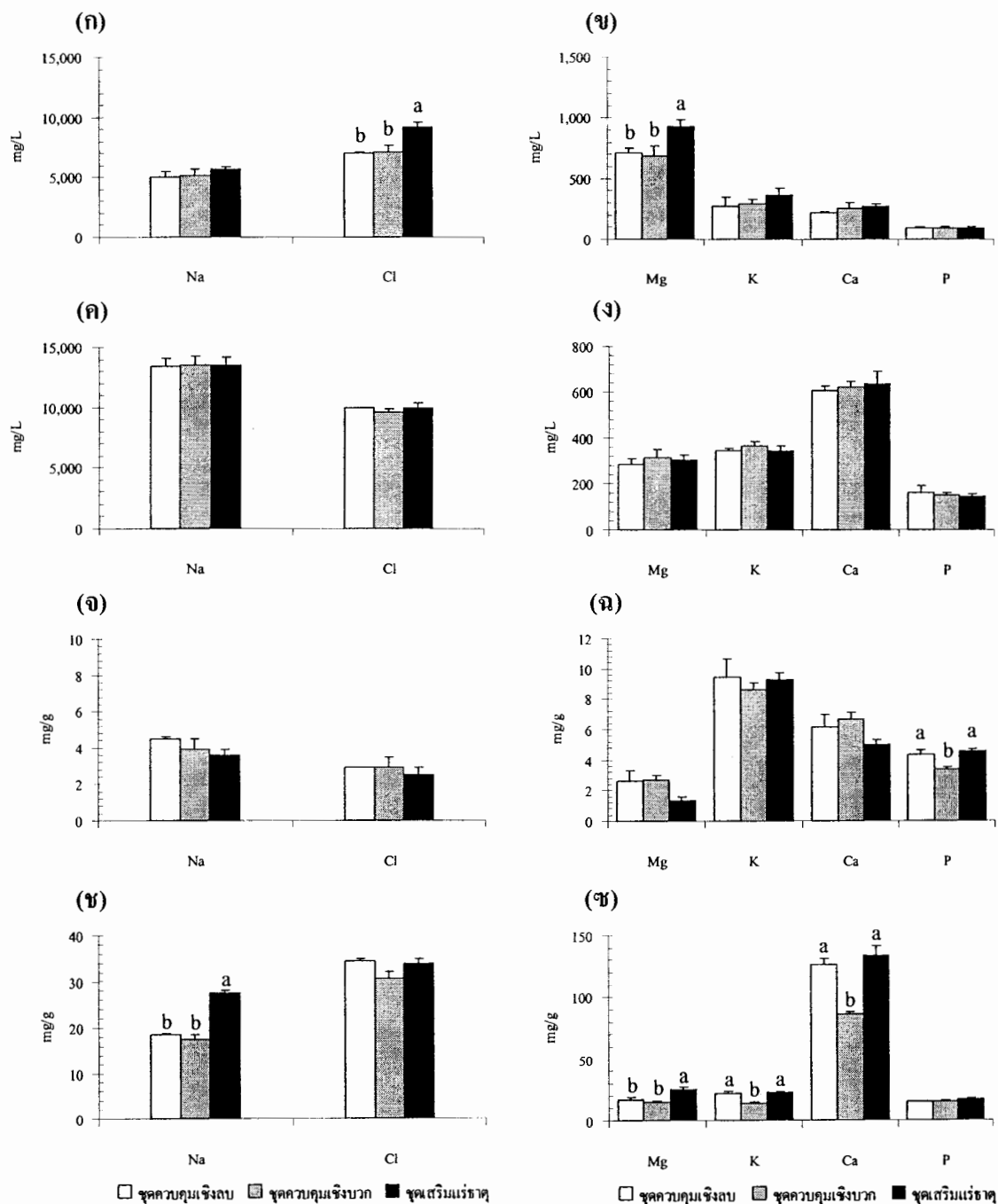
ความเข้มข้นของ Na, K, Mg, Ca, Cl และ P ในพลาสมาที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt (ภาพที่ 1ค-ง 2ค-ง และ 3ค-ง) พบว่า ความเข้มข้นดังกล่าวทั้ง 3 ชุดการทดลองในแต่ละ

ละความเค็มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้นความเข้มข้นของ K และ Cl ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ppt ขณะที่ในฉบับ (ภาพที่ 1จ-ค, 2จ-ค และ 3จ-ค) พบว่า ความเข้มข้นของ Na, K, Mg และ P ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ ในทางกลับกัน Ca ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ppt และ P ชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 20 ppt ส่วนในเปลือก (ภาพที่ 1ข-ค, 2ข-ค และ 3ข-ค) พบว่า K, Mg และ Ca ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ และ Cl ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ppt ขณะที่ Na และ Mg ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดควบคุมเชิงบวก และในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของ K และ Ca ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 20 ppt ขณะที่ความเค็ม 30 ppt พบว่า Mg, Ca และ Cl ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

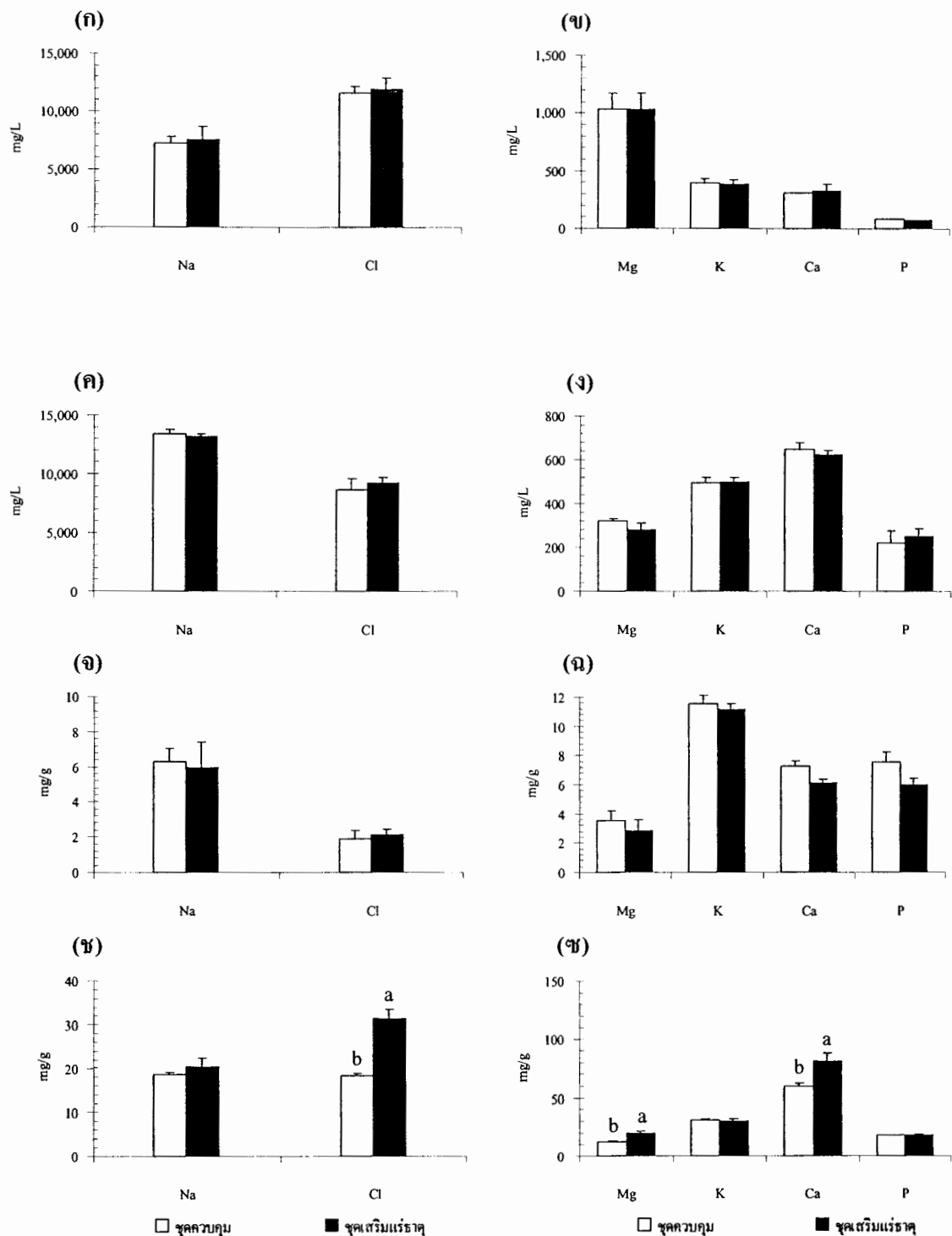
อัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ในพลาสมาและตับ ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt พบว่า อัตราส่วนดังกล่าวทั้ง 3 ชุดการทดลองแต่ละความเค็มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้น Na:Mg ในตับชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดควบคุมเชิงบวก และ Mg:Ca ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ ขณะที่ Ca:P ชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ppt และ Ca:P ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 20 ppt ส่วนในเปลือก พบ Na:Mg, Cl:K และ Na:K ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ และ Cl:Na ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ ส่วนที่อัตราส่วนของ Mg:Ca ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุที่ความเค็ม 10 ppt ขณะที่อัตราส่วนของ Na:K ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ และ Cl:Na ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดควบคุมเชิงบวก และ Ca:P ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ ในทางตรงข้าม Cl:K ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมเชิงลบและชุดเสริมแร่ธาตุ ที่ความเค็ม 20 ppt ขณะที่อัตราส่วนของ Cl:K, Ca:P และ Cl:Na ในชุดควบคุมมีค่าสูงกว่าชุดเสริมแร่ธาตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ที่ความเค็ม 30 ppt (ตารางที่ 8)



ภาพที่ 1 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ตับ (จ-ฉ) และ
 เป็ด (ช-ซ) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวก
 และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 10 ppt (Mean $\pm$ SE, $p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ตับ (จ-ฉ) และเปลือก (ช-ซ) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวก และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 20 ppt (Mean $\pm$ SE, $p < 0.05$)



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของ Na, Cl, Mg, K, Ca และ P ในน้ำ (ก-ข) พลาสมา (ค-ง) ตับ (จ-ด) และ
 เป็ลือก (ซ-ช) ของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวก
 และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลา 60 วัน ที่ความเค็ม 30 ppt (Mean $\pm$ SE, $p < 0.05$)

ตารางที่ 7 อัตราส่วนของแร่ธาตุในน้ำและพลาสมาของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

แหล่ง	ความเค็ม (ppt)	ชุดการทดลอง	Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K
น้ำ	10	ชุดควบคุมเชิงลบ	15.39:1 ^b	3.46:1	7.10:1 ^b	2.17:1	0.92:1 ^b	17.35:1 ^b
		ชุดควบคุมเชิงบวก	47.14:1 ^a	2.68:1	24.57:1 ^a	3.20:1	0.70:1 ^b	33.12:1 ^a
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	15.59:1 ^b	3.02:1	6.95:1 ^b	3.00:1	1.55:1 ^a	24.47:1 ^b
	20	ชุดควบคุมเชิงลบ	17.12:1	3.27:1	7.06:1	2.39:1	1.45:1	24.35:1
		ชุดควบคุมเชิงบวก	17.12:1	2.96:1	7.73:1	2.83:1	1.40:1	24.83:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	16.19:1	3.45:1	6.18:1	2.99:1	1.64:1	25.86:1
	30	ชุดควบคุม	18.30:1	3.37:1	7.46:1	3.85:1	1.63:1	29.85:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	19.96:1	3.11:1	7.32:1	4.67:1	1.63:1	32.25:1
พลาสมา	10	ชุดควบคุมเชิงลบ	36.33:1	0.56:1	39.00:1	3.30:1	0.80:1	28.71:1
		ชุดควบคุมเชิงบวก	31.74:1	0.44:1	40.40:1	5.01:1	0.89:1	28.16:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	41.45:1	0.46:1	44.16:1	3.47:1	0.73:1	30.44:1
	20	ชุดควบคุมเชิงลบ	38.88:1	0.50:1	48.75:1	3.30:1	0.75:1	28.92:1
		ชุดควบคุมเชิงบวก	37.27:1	0.44:1	43.96:1	5.01:1	0.71:1	26.19:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	39.54:1	0.46:1	46.26:1	3.47:1	0.74:1	29.03:1
	30	ชุดควบคุม	27.37:1	0.50:1	42.13:1	3.44:1	0.66:1	18.02:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	26.40:1	0.45:1	47.80:1	2.59:1	0.69:1	18.65:1

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในตารางหมายถึงให้ผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ค่าสถิติเปรียบเทียบภายในแหล่งและที่ความเค็มเดียวกัน

ตารางที่ 8 อัตราส่วนของแร่ธาตุในตับและเปลือกของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10, 20 และ 30 ppt

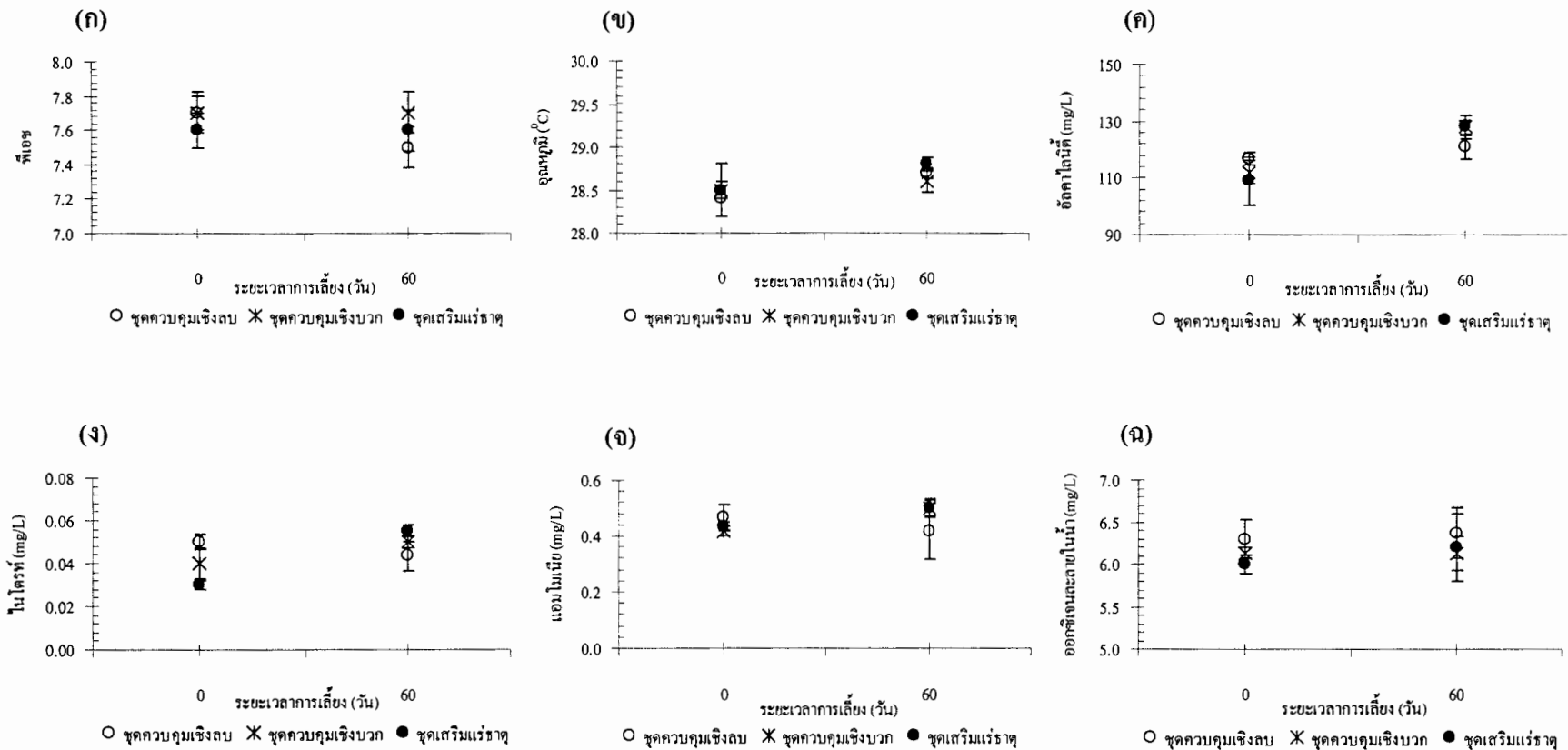
แหล่ง	ความเค็ม (ppt)	การทดลอง	Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K
ตับ	10	ชุดควบคุมเชิงลบ	0.52:1	0.27:1 ^b	2.05:1 ^b	2.65:1 ^{ab}	0.40:1	0.19:1
		ชุดควบคุมเชิงบวก	0.70:1	0.65:1 ^a	1.54:1 ^b	1.66:1 ^b	0.34:1	0.24:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	0.51:1	0.15:1 ^b	4.10:1 ^a	3.04:1 ^a	0.70:1	0.34:1
	20	ชุดควบคุมเชิงลบ	0.49:1	0.43:1	1.99:1	1.41:1 ^b	0.65:1	0.32:1
		ชุดควบคุมเชิงบวก	0.45:1	0.41:1	1.43:1	2.02:1 ^a	0.75:1	0.34:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	0.39:1	0.27:1	2.93:1	1.10:1 ^b	0.73:1	0.27:1
	30	ชุดควบคุม	0.55:1	0.50:1	1.84:1	0.96:1	0.32:1	0.16:1
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	0.53:1	0.47:1	2.79:1	1.04:1	0.41:1	0.19:1
เปลือก	10	ชุดควบคุมเชิงลบ	1.27:1 ^b	0.08:1 ^b	2.91:1 ^a	4.57:1	1.73:1 ^a	2.20:1 ^a
		ชุดควบคุมเชิงบวก	0.73:1 ^a	0.15:1 ^a	1.20:1 ^b	6.31:1	0.78:1 ^b	0.58:1 ^b
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	0.70:1 ^a	0.16:1 ^a	1.01:1 ^b	6.43:1	1.85:1 ^a	1.29:1 ^b
	20	ชุดควบคุมเชิงลบ	0.86:1 ^b	0.13:1	1.15:1	8.67:1 ^a	1.86:1 ^b	1.60:1 ^b
		ชุดควบคุมเชิงบวก	1.20:1 ^a	0.18:1	1.16:1	5.87:1 ^b	1.76:1 ^a	2.15:1 ^a
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	1.25:1 ^a	0.19:1	1.12:1	7.97:1 ^a	1.23:1 ^b	1.54:1 ^b
	30	ชุดควบคุม	0.61:1	0.21:1	1.55:1 ^b	3.46:1 ^b	0.98:1 ^b	0.59:1 ^b
		ชุดเสริมแร่ธาตุ	0.67:1	0.25:1	1.01:1 ^a	4.49:1 ^a	1.58:1 ^a	1.04:1 ^a

หมายเหตุ อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในตารางหมายถึงให้ผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

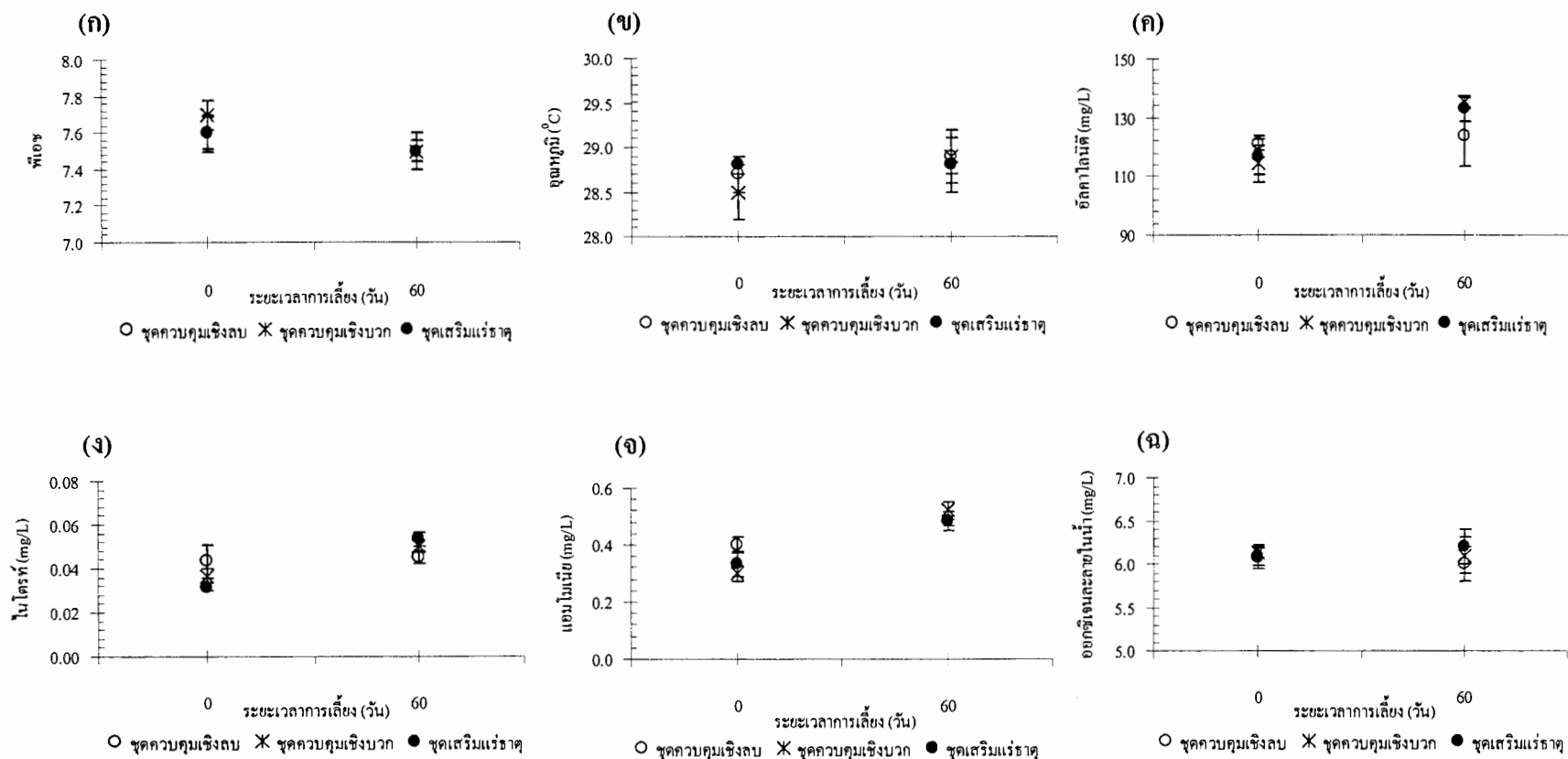
ค่าสถิติเปรียบเทียบภายในแหล่งและที่ความเค็มเดียวกัน

คุณภาพน้ำ

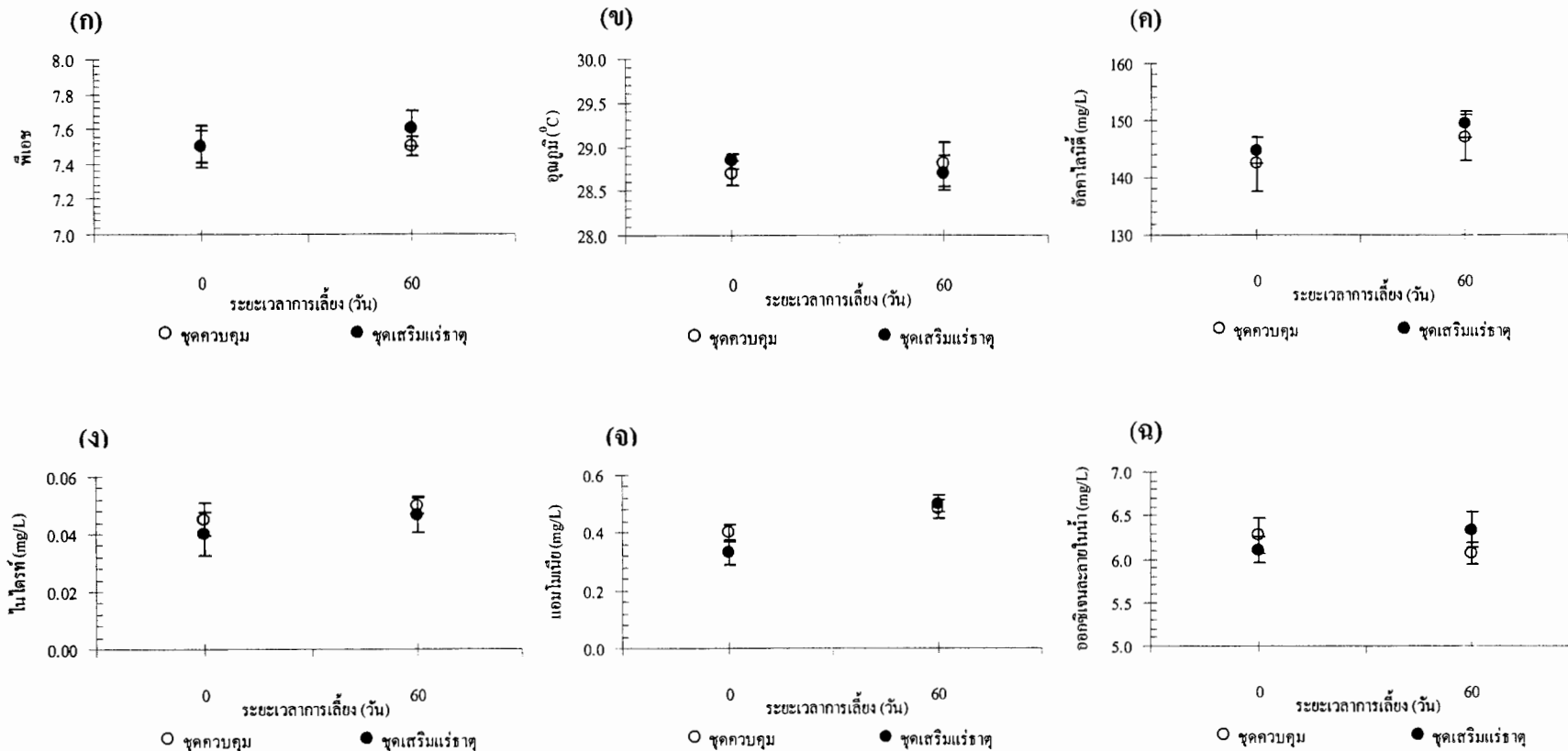
คุณภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งที่ความเค็ม 10 และ 20 ppt พบว่า ค่าเฉลี่ยของพีเอชในชุดควบคุมเชิงลบมีค่า 7.6 และ 7.5 ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่า 7.7 และ 7.6 และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 7.6 (ภาพที่ 4ก และ 5ก) อุณหภูมิในชุดควบคุมเชิงลบมีค่า 28.6 และ 28.8 °C ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่า 28.6 และ 28.7 °C และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 28.7 และ 28.8 °C (ภาพที่ 4ข และ 5ข) อัลคาไลน์ดีในชุดควบคุมเชิงลบที่ค่า 118.9 และ 122.5 mg/L ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่า 120 และ 124.8 mg/L และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 118.5 และ 124.8 mg/L (ภาพที่ 4ค และ 5ค) ไนโตรท์ในชุดควบคุมเชิงลบมีค่า 0.047 และ 0.044 mg/L ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่า 0.045 และ 0.043 mg/L และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 0.043 mg/L (ภาพที่ 4ง และ 5ง) แอมโมเนียในชุดควบคุมเชิงลบมีค่า 0.44 mg/L ในชุดควบคุมเชิงบวกมีค่า 0.46 และ 0.41 mg/L และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 0.47 และ 0.41 mg/L (ภาพที่ 4จ และ 5จ) ออกซิเจนละลายในน้ำในชุดควบคุมเชิงลบมีค่า 6.3 และ 6.0 mg/L และ 6.1 mg/L ทั้งในชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ (ภาพที่ 4ฉ และ 5ฉ) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขณะที่ความเค็ม 30 ppt พบว่า ค่าเฉลี่ยของพีเอช มีค่า 7.5 และ 7.6 ในชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุ ตามลำดับ (ภาพที่ 6ก) อุณหภูมิมีค่า 28.8 °C ทั้งในชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุ (ภาพที่ 6ข) อัลคาไลน์ดีในชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 144.7 และ 147.0 mg/L ตามลำดับ (ภาพที่ 6ค) ไนโตรท์ในชุดควบคุมมีค่า 0.048 mg/L และในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 0.043 mg/L (ภาพที่ 6ง) แอมโมเนียมีค่า 0.44 และ 0.42 mg/L ในชุดควบคุม และชุดเสริมแร่ธาตุ ตามลำดับ (ภาพที่ 6จ) ขณะที่ออกซิเจนละลายในน้ำมีค่า 6.2 mg/L ทั้งชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุ (ภาพที่ 6ฉ) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



ภาพที่ 4 พีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) อัลคาไลน์ (ค) ไนโตร (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจนละลายในน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมเชิงลบ ชุดควบคุมเชิงบวกและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 10 ppt (Mean $\pm$ SE)



ภาพที่ 5 พีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) ออกซิเจนละลายน้ำ (ค) ไนโตรเจน (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจนละลายน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุม เจริญเติบโต ชุดควบคุมเครียดและชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาเลี้ยง 60 วัน ที่ความเค็ม 20 ppt (Mean ± SE)



ภาพที่ 6 พีเอช (ก) อุณหภูมิ (ข) อัลคาไลน์ (ค) ไนโตร (ง) แอมโมเนีย (จ) และออกซิเจนละลายในน้ำ (ฉ) ในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุม และชุดเสริมแร่ธาตุ ระยะเวลาดูแล 60 วัน ที่ความเค็ม 30 ppt (Mean $\pm$ SE)

อภิปรายและสรุปผล

ผลของการเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนที่ความเค็ม 10 ppt

โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และ โพแทสเซียม (K)

Na และ Cl นับว่าเป็นองค์ประกอบหลักถึง 91% ในพลาสมา และทำหน้าที่ในการควบคุมระบบ osmoregulation (Tantulo & Fotadar, 2006) พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่ในโครงสร้างเปลือกมีค่าไม่แตกต่างเช่นกัน ซึ่งให้เห็นว่า การเสริมแร่ธาตุบางชนิดไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุลไอออนภายในร่างกาย และสามารถควบคุมความเข้มข้นของ Na ในโครงสร้างเปลือกได้ในระดับปกติ ขณะที่การเสริม NaCl ส่งผลให้ความเข้มข้นของ Na ในตับ (7.2 mg/g) สูงกว่าชุดเสริมแร่ธาตุ (4.5 mg/g) และชุดควบคุม (3.6 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าการเสริม NaCl มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้งและอาจจะไปรบกวนสภาวะสมดุลไอออนภายในร่างกาย เป็นไปได้ว่า กุ้งพยายามขับ Na ออกนอกร่างกาย แต่ไม่เพียงพอจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มข้นของ Na ในตับให้สูงขึ้น และน่าจะใช้ในการปรับอัตราส่วนของแร่ธาตุบางชนิดให้เกิดความเหมาะสมอีกด้วย ในขณะที่ ชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุกึ่งยังคงควบคุมความเข้มข้นของ Na ได้อย่างปกติ แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุบางชนิดไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีและระบบสมดุลไอออนภายในร่างกาย โดยชุดเสริมแร่ธาตุจะมีความเข้มข้นของ Na ในน้ำเพิ่มสูงขึ้นควบคู่ไปกับแร่ธาตุชนิดอื่น ๆ จึงไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ (2551) พบว่า กุ้งขาว (*L. vanamei*) จะเพิ่มขึ้นระดับความเข้มข้นของ Na ในพลาสมาเมื่อความเค็มสูงกว่า 15 ppt และรักษาระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 20-50 ppt ขณะที่ในตับมีระดับคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 2.8-45 ppt ส่วนในเปลือกกุ้งจะควบคุมระดับให้คงที่ในช่วงความเค็ม 10-20 ppt และลดระดับความเข้มข้นลงเมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งยังมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt ซึ่งความเข้มข้นของ Na ในพลาสมา มีค่า 10,257 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และพบว่าในตับ (11.6 mg/g) มีค่าสูงกว่า และเปลือก (13.5 mg/g) (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) มีค่าต่ำกว่าการทดลองครั้งนี้

Cl พบในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์สัตว์ มีส่วนกระตุ้นน้ำย่อยอะไมเลส (amylase) ให้ทำงานดีขึ้น รักษาความเป็นกรด-ด่างของน้ำย่อยและเป็นส่วนประกอบในน้ำย่อยด้วย (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) จากการทดลองพบว่า ในพลาสมาของกุ้งชุดเสริม NaCl (11,046 mg/L) มีค่าสูงกว่าชุดเสริมแร่ธาตุ (9,387 mg/L) และชุดควบคุม (9,687 mg/L) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า ในชุดเสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุลไอออนภายในร่างกาย และกุ้งยังคงอยู่ใน

สภาวะปกติเช่นเดียวกับชุดควบคุม ขณะที่การควบคุมความเข้มข้นของ Cl ในโครงสร้างเปลือกเป็นไปตามปกติ และมีความแตกต่างกันระหว่างชุดควบคุม (30.6 mg/g) และชุดเสริมแร่ธาตุ (29.9 mg/g) ขณะที่ชุดเสริม NaCl มีค่า 14.6 mg/g ซึ่งต่ำกว่าทั้ง 2 กลุ่มแรกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการสะสมในตับทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างกัน แสดงว่า การเสริม NaCl มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง เห็นได้ชัดเจนจากกุ้งมีระดับความเข้มข้นของ Cl ในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของ Na เข้าสู่ระบบเลือดสูงเกินไปทำให้กุ้งจำเป็นต้องดึงเอา Cl จากเปลือกไปช่วยในการรักษาสมดุลไอออนให้กลับสู่สภาวะปกติ และเป็นไปได้ว่า จะใช้ในการปรับอัตราส่วนของแร่ธาตุบางชนิดให้มีความเหมาะสมด้วย จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของ Cl ในเปลือกลดลงซึ่งอาจจะส่งผลให้กระบวนการสร้างเปลือกผิดปกติได้ ถึงแม้ว่าการเสริมแร่ธาตุยังส่งผลให้ความเข้มข้นของ Cl ในน้ำเพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ Cl ในชุดเสริมแร่ธาตุจะควบคู่ไปกับแร่ธาตุชนิดอื่น ๆ จึงไม่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมสมดุลในเลือดและตับ แต่กลับส่งผลดีต่อโครงสร้างเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งพยายามรักษาระดับของ Cl ในพลาสมาให้คงที่ตลอดช่วงความเค็ม 10-20 ppt และเพิ่มระดับเมื่อความเค็มน้ำสูงขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และในตับมีระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 10-50 ppt เช่นเดียวกับเปลือกจะมีระดับคงที่ในช่วงความเค็ม 5-35 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกันที่ความเค็ม 20 ppt โดยความเข้มข้นของ Cl ในพลาสมามีค่า 8,451 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และในเปลือกมีค่า 27.5 mg/g ส่วนในตับพบความเข้มข้นของ Cl มีค่า 0.7 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าที่พบในการทดลองครั้งนี้

K ในพลาสมา พบว่า กุ้งในชุดเสริม NaCl (490 mg/L) มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมมีค่า 310 mg/L และชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 342 mg/L อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมความเข้มข้นของ K ในพลาสมา ซึ่งกุ้งยังอยู่ในสภาวะปกติและสามารถรักษาสมดุลไอออนภายในร่างกายได้ดี ยกเว้นการเสริม NaCl ที่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง และอาจไปรบกวนการสร้างสภาวะไอออนใหม่ภายในร่างกายและไปมีผลกระทบต่ออัตราส่วนของแร่ธาตุส่งผลให้กุ้งเพิ่มระดับความเข้มข้นของ K ในพลาสมาสูงขึ้น เป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ K จะใช้ในการปรับอัตราส่วนของ Na:K ให้มีความเหมาะสม เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ K ในโครงสร้างเปลือกที่มีระดับเพิ่มสูงขึ้นในชุดเสริม NaCl มีค่า 25.2 mg/g และชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 26.4 mg/g ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (14.1 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการเสริม NaCl อาจจะไปรบกวนประสิทธิภาพการใช้ K ในตับ ทำให้กุ้งจำเป็นต้องเพิ่มการสะสม K สูงขึ้น พบว่า ชุดเสริม NaCl (10.2 mg/g) มีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (8.7 mg/g) และชุดเสริมแร่ธาตุ (7.5 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเสริมแร่ธาตุยังส่งผลให้ความเข้มข้นของ K ในน้ำเพิ่มขึ้นและควบคู่ไปกับแร่ธาตุชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดเสริมแร่ธาตุจึงไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง สอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งจะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ K ในพลาสมาอยู่ในระดับคงที่

ตลอดช่วงความเค็ม 2.8-20 ppt และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับที่พบในตับ ขณะที่ในเปลือกพบว่า เมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงกว่า 10 ppt กุ้งจะลดระดับความเข้มข้นลงและรักษาระดับคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 15-50 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ขณะที่การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vanamei*) ความเค็ม 20 ppt พบว่า ความเข้มข้นของ K ในพลาสมา มีค่า 404 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ซึ่งสูงกว่าการทดลองในครั้งนี้เช่นเดียวกับในตับและเปลือกมีค่า 12.3 และ 13.8 mg/g ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) มีค่าต่ำกว่าการทดลองนี้

แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และ ฟอสฟอรัส (P)

Ca เป็นแร่ธาตุหลักที่สำคัญในการสร้างเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (Pratoomchat et al., 2002b) และมีความสำคัญในการสร้างเนื้อเยื่อ ระบบประสาท และในระบบ osmoregulation (Lovell, 1989) จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ Ca ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่า กุ้งอยู่ในสภาวะสมดุลปกติของ Ca ในระบบเลือดและการเสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง แต่กลับส่งผลดีต่อระบบในโครงสร้างเปลือก เนื่องจากความเข้มข้นของ Ca ในชุดเสริม NaCl (105.8 mg/g) และชุดเสริมแร่ธาตุ (113.3 mg/g) มีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (74 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของการใช้ Ca ในโครงสร้างเปลือก ส่วนในชุดควบคุมกุ้งจะพยายามรักษาความเข้มข้นของ Ca ให้อยู่ในระดับปกติ แต่ในตับกลับมีการสะสมเพิ่มสูงขึ้น เป็นไปได้ว่า กลไกการนำ Ca ไปใช้ได้ไม่ดี จึงจำเป็นต้องสะสม Ca ไว้ในตับหรือไว้ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ เมื่อขาดแคลน พบว่า ชุดควบคุม (8.9 mg/g) มีค่าสูงกว่าชุดเสริม NaCl และชุดเสริมแร่ธาตุ (7.2 และ 6 mg/g ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการเสริมแร่ธาตุกลับมีความเข้มข้นของ Ca ในตับลดลง อาจส่งผลมาจากการเสริมแร่ธาตุทำให้กลไกในการเคลื่อนที่ของ Ca เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือกได้ดี ทำให้มีระดับความเข้มข้นในตับลดลง เพราะ Ca เป็นแร่ธาตุที่สำคัญในการสร้างเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (Pratoomchat et al., 2002b) ซึ่งกุ้งขาว (*L. vanamei*) จะพยายามรักษาความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมาให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 2.8-50 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับในโครงสร้างเปลือก แต่กุ้งจะลดระดับความเข้มข้นของ Ca ลงเมื่อความเค็มสูงกว่า 40 ppt ส่วนในตับจะลดระดับลงเมื่อความเค็มสูงกว่า 20 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vanamei*) ที่ความเค็ม 20 ppt พบว่า ความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมา มีค่า 654 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ส่วนตับและเปลือกมีค่า 8.5 และ 131 mg/g ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) เช่นเดียวกับรายงานการวิจัยของ บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ (2546) กล่าวว่า กุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) จะควบคุมระดับความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมาไม่ให้สูงมากเกินไป จึงจำเป็นต้องขับ Ca ออกนอกร่างกายและนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือกหรือ

เก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ โดยกึ่งพยายามรักษาระดับความเข้มข้น Ca ให้อยู่ในช่วง 520-640 mg/L (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก)

Mg นับว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ (Pratoomchat et al., 2002b) และยังมีความจำเป็นต่อกึ่งทะเลในแง่เป็นตัวช่วยปรับสมดุลไอออนภายในร่างกาย (Mantel & Farmer, 1983) จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ Mg ในพลาสมาทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุไม่ไปรบกวนสถานะสมดุลไอออนภายในร่างกายและกึ่งอยู่ในสภาวะปกติ แต่กลับส่งผลดีต่อโครงสร้างเปลือก พบว่าในชุดเสริม NaCl (16.4 mg/g) และชุดเสริมแร่ธาตุ (17 mg/g) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (6.2 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็นไปได้ว่าการเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนสามารถทำให้กึ่งยอมรับความเข้มข้นของ Mg ในเปลือกได้เพิ่มขึ้น และไม่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมในดับ ซึ่งกึ่งสามารถควบคุมระดับความเข้มข้นได้ปกติ โดยพบว่า ชุดเสริม NaCl พบ Mg เท่ากับ 4.7 mg/g ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (2.4 mg/g) และชุดเสริมแร่ธาตุ (0.9 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าการเสริม NaCl ส่งผลต่อสภาวะสมดุลภายในดับ และอาจจะมีผลกระทบต่ออัตราส่วนของแร่ธาตุ ทำให้กึ่งจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มข้นของ Mg ในดับให้สูงขึ้นเพื่อปรับสมดุลให้กลับสู่สภาวะปกติและใช้ในการปรับอัตราส่วนให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งในการเสริมแร่ธาตุยังส่งผลให้ความเข้มข้นของ Mg ที่เพิ่มสูงขึ้นแต่ควบคู่ไปกับแร่ธาตุชนิดอื่น ๆ จึงส่งผลดีต่อโครงสร้างเปลือก เห็นได้ชัดจากงานวิจัยในกึ่งชนิดเดียวกัน พบว่า ปกติกึ่งพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ Mg ในพลาสมาจะมีความเข้มข้นคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 2.8-45 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ขณะที่ในดับและเปลือกมีระดับคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 2.8-35 ppt และเพิ่มสูงขึ้นช่วงความเค็ม 35-45 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ขณะที่งานวิจัยในกึ่งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt พบว่า Mg ในพลาสมา (96 mg/L) (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการทดลองครั้งนี้ เช่นเดียวกับในดับ (2.7 mg/g) ขณะที่ Mg ในเปลือกมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งนี้ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และงานวิจัยในกึ่งกุลาคำ (*P. monodon*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt พบว่าความเข้มข้นของ Mg ในพลาสมามีค่า 291 mg/L (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก)

ปริมาณความเข้มข้นของ P กึ่งจะได้รับมาจากอาหารเป็นหลัก ซึ่งมีความสำคัญต่อการผลิตพลังงาน เป็นส่วนประกอบของ nucleic acid, phospholipids phosphoprotein, ATP, กิจกรรมของเอนไซม์ (Lovell, 1989) มีส่วนร่วมกับ Ca ในโครงสร้างเปลือก ยังมีความสัมพันธ์กับ alkaline phosphatase และมีส่วนช่วยระบบ osmoregulation (Lovett, Towle, & Fairs, 1994; Cheng et al, 2006) ซึ่งความเข้มข้นของ P ในพลาสมา พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่ากึ่งยังรักษาความเข้มข้นของ P ได้ดีถึงแม้การเสริมแร่ธาตุก็ตาม ขณะที่ในโครงสร้างเปลือกมีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นในดับที่มีผลกระทบจากการเสริมแร่ธาตุ โดยเฉพาะการเสริม NaCl ทำให้กึ่งมีการสะสม P เท่ากับ 4.4 mg/g ซึ่งสูงกว่าชุดทดลองและชุดเสริมแร่ธาตุ (3.3 และ 2.1 mg/g ตามลำดับ)

แสดงว่า การเสริม NaCl ไปปรับกวนต่อระบบควบคุมและอัตราส่วนของแร่ธาตุภายในตับจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความเข้มข้นของ P ให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการปรับสมดุลไอออน ขณะที่ชุดเสริมแร่ธาตุก็จะลดระดับความเข้มข้นเพื่อปรับอัตราส่วนของ Ca:P ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุหลายชนิดแต่ไม่มีผลกระทบต่อการสะสม P ในพลาสมาและเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งจะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ P ในพลาสมาให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดความเค็ม 10-20 ppt และจะลดระดับลงเมื่อความเค็มเพิ่มสูงขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับระดับความเข้มข้นในเปลือก ขณะที่ในตับจะคงที่ตลอดในช่วง 10-30 ppt และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเค็มน้ำเพิ่มขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกันเลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt พบว่า ความเข้มข้นของ P ในพลาสมามีค่า 168 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ส่วนในตับ (5.2 mg/g) มีค่าสูงกว่าและในเปลือกมีค่า 7.2 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้และสอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) พบว่า กุ้งพยายามรักษา P ในพลาสมาให้อยู่ในช่วง 520-640 mg/L (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ในพลาสมา ของกุ้งทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่า กุ้งสามารถควบคุมอัตราส่วนของแร่ธาตุได้ดี ถึงแม้จะมีการเสริมแร่ธาตุหลายชนิดหรือเฉพาะ NaCl ก็ตาม เป็นไปได้ว่ากุ้งไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมอย่างไร ก็จะพยายามควบคุมระดับอัตราส่วนของแร่ธาตุให้อยู่ในสภาวะปกติเสมอ และอาจมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะต่าง ๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับที่พบในพลาสมากุ้งขาว (*L. vannamei*) ในชุดควบคุมที่ความเค็ม 20 ppt แต่ให้ผลแตกต่างกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt โดยอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:K และ Ca:P มีค่า 0.1:1, 117.3:1, 28.0:1, 20.9:1 และ 3.9:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551)

อัตราส่วนของแร่ธาตุในตับพบว่า ทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นอัตราส่วนของ Mg:Ca ในชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 0.7:1 ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (0.3:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (0.2:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่อัตราส่วนของ Ca:P ในชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 1.7:1 ซึ่งต่ำกว่าชุดเสริมแร่ธาตุ (3.0:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ชุดควบคุมและชุดเสริม NaCl มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการเสริม NaCl ส่งผลให้กุ้งมีการสะสม Mg และ P เพิ่มขึ้น ขณะที่ Ca กลับมีค่าลดลง เนื่องจากกุ้งมีกลไกในการเคลื่อนย้าย Ca จากตับไปสูงโครงสร้างเปลือกได้ดีขึ้น ทำให้อัตราส่วนของ Mg:Ca ในชุดเสริม NaCl มีค่า 0.7:1 ซึ่งสูงกว่าชุดเสริมแร่ธาตุ (0.2:1) และชุดควบคุม (0.3:1) และ Ca:P ในชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 1.7:1 ซึ่งต่ำกว่าชุดเสริมแร่ธาตุ (3.0:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่อัตราส่วนของ Na:Mg ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 4.1:1 ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (2.1:1) และชุดเสริม NaCl (1.5:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเสริมแร่ธาตุส่งผลทำให้กุ้ง

ลดระดับความเข้มข้นของ Mg เพื่อควบคุมปริมาณให้เหมาะสมกับความต้องการแต่จะไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุล จึงทำให้อัตราส่วนของ Na:Mg เพิ่มสูงขึ้น และยังส่งผลให้อัตราส่วนบางชนิดมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่ความเค็ม 20 ppt ยกเว้นอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg และ Ca:P มีค่า 0.4:1, 2.0:1 และ 1.4:1 ตามลำดับ และมีค่าใกล้เคียงกันกับที่พบในตับของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 20 ppt ยกเว้น Na:K, Cl:K และ Ca:P มีค่า 0.9:1, 0.06:1 และ 1.63:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552)

ส่วนในเปลือกพบว่า อัตราส่วนของ Ca:P ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่อัตราส่วนของ Mg:Ca ในชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 0.15:1 และชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าเท่ากับ 0.16:1 ซึ่งสูงกว่ากับชุดควบคุม (0.08:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากกุ้งเมื่อได้รับการเสริมแร่ธาตุหลายชนิด หรือว่าเฉพาะ NaCl ก็ตาม สามารถดึงเอา Mg และ Ca มาสะสมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญกับโครงสร้างเปลือก จึงส่งผลให้อัตราส่วนของ Mg:Ca มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่กลับส่งผลให้อัตราส่วนของ Na:Mg ในชุดเสริม NaCl มีค่า 1.2:1 และชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 1.0:1 ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (2.9:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับอัตราส่วนของ Na:K และ Cl:K ที่ชุดเสริม NaCl และชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าเท่ากับ 0.7:1, 0.6:1 และ 0.7:1, 1.3:1 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม (1.3:1 และ 2.2:1 ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากกุ้งดึง Cl จากโครงสร้างเปลือกไปช่วยในการรักษาสมดุลไอออนภายในระบบเลือดสูงขึ้น ทำให้ Cl ในโครงสร้างเปลือกลดลง ในขณะที่ Na ยังคงอยู่ในสภาวะปกติ และกุ้งพยายามเพิ่ม K ให้สูงขึ้นด้วยเพื่อใช้ในการปรับอัตราส่วนของ Na:K ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้อัตราส่วนของดังกล่าวมีค่าต่ำลง และส่งผลต่ออัตราส่วนของ Cl:Na ในชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 0.8:1 ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม (1.7:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (1.8:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า การเสริมแร่ธาตุสามารถลดและเพิ่มอัตราส่วนของแร่ธาตุบางชนิดในโครงสร้างเปลือกได้ดีขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่ความเค็ม 20 ppt อีกด้วย ขณะที่การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 20 ppt พบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca มีค่าใกล้เคียงกันการทดลองในครั้งนี้ ขณะที่ Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P มีค่า 1.2:1, 1.0:1, 2.0:1, 2.0:1 และ 18.3:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งสูงกว่าการทดลองในครั้งนี้

ผลของการเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนที่ความเค็ม 20 ppt

โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และ โพแทสเซียม (K)

ปริมาณความเข้มข้นของ Na และ K ในพลาสมาพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่ในตับมีค่าไม่แตกต่างเช่นกัน แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุลไอออนภายในร่างกาย แต่กลับส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างเปลือกโดยเฉพาะชุดเสริมแร่ธาตุ เนื่องจากกุ้ง

สามารถนำเอา Na ไปใช้ในโครงสร้างเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้พบค่าสูงถึง 27.6 mg/g ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (18.5 mg/g) และชุดเสริม NaCl (17.6 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความเข้มข้นของ K ในโครงสร้างเปลือกกุ้งชุดเสริมแร่ธาตุสามารถควบคุมได้ปกติเช่นเดียวกับชุดควบคุมมีค่า 21.7 และ 22.2 mg/g ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดเสริม NaCl (14.4 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า การเสริม NaCl น่าจะไปมีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง ส่งผลให้กุ้งมีการสะสม K ในโครงสร้างเปลือกต่ำลง และเป็นไปได้ว่า การลดลงของ K จะเป็นการปรับอัตราส่วนของ Na:K ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างเปลือก เห็นได้ชัดจากงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งจะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ Na และ K ในพลาสมาให้คงที่ในช่วงความเค็ม 20-25 ppt และมีระดับเพิ่มขึ้นเมื่อความเค็มน้ำสูงขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ขณะที่ Na และ K ในตับเมื่อความเค็มสูงกว่า 20 ppt กุ้งจะลดระดับลงและรักษาคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 30-50 ppt ส่วนในเปลือกมีระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 5-45 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็ม 25 ppt ซึ่งความเข้มข้นของ Na และ K ในพลาสมามีค่า 13,087 และ 378 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับ K ในตับมีค่า 10.4 mg/g ขณะที่ Na ในตับมีค่าสูงกว่า (6.4 mg/g) ส่วน K และ Na ในเปลือกมีค่า 13.7 และ 19.5 mg/g ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้

ปริมาณความเข้มข้นของ Cl พบว่า ในพลาสมา ตับ และเปลือก ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง และกุ้งสามารถสร้างสภาวะสมดุลได้ดีภายในระบบร่างกายถึงแม้จะมีการเสริมแร่ธาตุหลายชนิดหรือ NaCl เพียงชนิดเดียว ขณะที่งานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกันพบว่า ระดับความเข้มข้นของ Cl ในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้น (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ส่วนในตับและเปลือกมีระดับให้คงในช่วงความเค็ม 5-40 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 25 ppt พบว่า Cl ในพลาสมามีค่า 9,246 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับโครงสร้างเปลือกมีค่า 39.3 mg/g ขณะที่ในตับมีค่า 0.6 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้

แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และฟอสฟอรัส (P)

ปริมาณความเข้มข้นของ Ca และ Mg ในพลาสมาพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่ในตับมีค่าไม่แตกต่างเช่นกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุไม่ไปรบกวนสภาวะสมดุลไอออนภายในร่างกายและระบบควบคุมภายในตับ สอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งจะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมาให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 5-50 ppt ส่วน Mg กุ้งจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามความเค็มน้ำจากความเค็ม 15 ppt เป็นต้นไป (สว่างพงษ์

สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และ Ca ในตับเมื่อความเค็มสูงกว่า 15 ppt จะมีระดับลดลงและคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 25 ppt เป็นต้นไป ขณะที่ Mg จะมีระดับคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 5-50 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับกุ้งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt พบว่า ความเข้มข้นของ Ca ในพลาสมา มีค่า 676 mg/L ยกเว้น Mg ที่มีค่า 96 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ซึ่งต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้ เช่นเดียวกับ Ca ในตับมีค่า 3.7 mg/g ขณะที่ Mg ในตับมีค่า 1.5 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองครั้งนี้ และสอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) พบว่า กุ้งพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ Ca ในระบบเลือดให้มีค่าคงที่ในช่วง 520-640 mg/L (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก)

ในโครงสร้างเปลือกของกุ้งในชุดเสริมแร่ธาตุ พบว่า Mg มีค่า 25.1 mg/g แสดงให้เห็นว่า กุ้งสามารถนำ Mg ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (16.6 mg/g) และชุดเสริม NaCl (15.3 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ความเข้มข้นของ Ca กุ้งยังรักษาระดับได้ปกติ โดยในชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุ มีค่าเท่ากับ 126.5 และ 134.4 mg/g ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดเสริม NaCl (86.6 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า การเสริม NaCl น่าจะไปมีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง ทำให้กุ้งไม่สามารถนำเอา Ca ไปใช้ในกระบวนการสร้างเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้มีการสะสม Ca ต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ Ca และ Mg ในโครงสร้างเปลือกมีระดับคงที่ตลอดช่วงความเค็ม 5-50 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในความเค็ม 25 ppt พบว่า Ca ในเปลือกมีค่า 129.3 mg/g ขณะที่ Mg มีค่า 11.6 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้

ปริมาณความเข้มข้นของ P ในพลาสมา ตับ และเปลือกพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นในชุดที่การเสริม NaCl อาจไปรบกวนระบบควบคุมภายในตับ ทำให้ P (3.3 mg/g) มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุมีค่า 4.4 และ 4.6 mg/g ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเป็นไปได้ว่า การเสริม NaCl มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ P ในตับทำให้กุ้งมีการสะสม P ต่ำลงในขณะที่ชุดเสริมแร่ธาตุส่งผลดีต่อการรักษาระดับได้ตามปกติ หมายความว่า การเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนไม่มีผลกระทบต่อสรีระเคมีของกุ้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของในกุ้งชนิดเดียวกัน พบว่า กุ้งจะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของ P ในพลาสมาให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 5-50 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร และ บุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และในตับจะมีระดับคงที่ตลอดในช่วงความเค็ม 10-30 ppt และเพิ่มระดับสูงขึ้นเมื่อความเค็มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่เปลือกมีค่าคงที่ในช่วง 10-20 ppt (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) และมีค่าใกล้เคียงกับกุ้งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงที่ความเค็ม 25 ppt พบว่า ความเข้มข้นของ P ในพลาสมา มีค่า 164 mg/L (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) ขณะที่ในตับมีค่าต่ำกว่าและเปลือก (4.6 และ 17 mg/g ตามลำดับ) (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) มีค่าสูงกว่าการทดลองในครั้งนี้ และงานวิจัยในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) พบว่า กุ้ง

รักษาความเข้มข้นของ P ในพลาสมาให้อยู่ในช่วง 155-186 mg/L (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ก)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ Na:K, Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:Na และ Cl:K ในพลาสมาและตับของกุ้งทั้ง 3 ชุดการทดลองส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้น Ca:P ในตับชุดเสริม NaCl มีค่าเท่ากับ 2:1 ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (1.4:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (1.1:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ เนื่องจากการเสริม NaCl ส่งผลให้กุ้งมีประสิทธิภาพการใช้ P ในตับลดลง ทำให้อัตราส่วนของ Ca:P มีค่าต่ำลงเช่นกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนและเฉพาะ NaCl ไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุลในระบบเลือดและตับ แต่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับสภาวะนั้น ๆ และรายงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกันที่ความเค็ม 25 ppt พบว่า อัตราส่วนของ Cl:Na ในพลาสมามีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในครั้งนี้ ยกเว้น Mg:Ca, Na:K, Cl:K, Na:Mg และ Ca:P โดยมีค่า 0.1:1, 120.5:1, 25.2:1, 20.1:1 และ 4.1:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้งชนิดเดียวกันที่ความเค็ม 25 ppt พบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K และ Cl:Na ในพลาสมามีค่าแตกต่างกับการทดลองในครั้งนี้ โดยมีค่า 0.3:1, 36.7:1, 25.7:1 และ 1.2:1 ตามลำดับ ยกเว้น Cl:K ที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในครั้งนี้ (Cheng et al., 2002) ส่วนในตับพบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองครั้งนี้ ขณะที่ Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P โดยมีค่า 4.2:1, 0.6:1, 0.09:1, 0.06:1 และ 0.5:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งมีค่าแตกต่างกับการทดลองในครั้งนี้

ส่วนโครงสร้างเปลือกพบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca และ Na:Mg ของกุ้งทั้ง 3 ชุดการทดลองไม่แตกต่างกัน ขณะที่ Cl:Na ในชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าเท่ากับ 1.2:1 ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม (1.8:1) และชุดเสริม NaCl (1.9:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และอัตราส่วนของ Na:K ในชุดควบคุม (0.9:1) มีค่าต่ำกว่าชุดเสริม NaCl (1.2:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (1.2:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการเสริม NaCl จึงทำให้กุ้งมีการสะสม Na และ K ต่ำลง และยังส่งผลต่ออัตราส่วนของ Cl:K ในชุดเสริม NaCl (2.2:1) มีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (1.6:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (1.5:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่อัตราส่วนของ Ca:P ในชุดเสริม NaCl (5.9:1) มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม (8.0:1) และชุดเสริมแร่ธาตุ (8.7:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เกิดจากการที่กุ้งสะสม Ca ในเปลือกต่ำทำให้อัตราส่วนมีค่าต่ำเช่นกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมอัตราส่วนของแร่ธาตุ และกุ้งสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแร่ธาตุให้มีความเหมาะสมกับความต้องการได้ และงานวิจัยในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 25 ppt พบว่า อัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P ในเปลือกมีค่าแตกต่างไปจากการทดลองในครั้งนี้ โดยมีค่า 0.09:1, 1.7:1, 1.4:1, 2.0:1, 2.9:1 และ 21.4:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552)

ผลของการเสริมแร่ธาตุตามอัตราส่วนที่ความเค็ม 30 ppt

โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และ โพแทสเซียม (K)

ปริมาณความเข้มข้นของ Na, Cl และ K ในพลาสมา ดับ และเปลือก พบว่าชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุหรือไม่เสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสถานะสมดุลของ Na, และ K ทั้ง 3 อวัยวะ ขณะที่ Cl มีการสะสมในเปลือกเพิ่มสูงขึ้นในชุดเสริมแร่ธาตุ (31.1 mg/g) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (18.2 mg/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่า การเสริมแร่ธาตุส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างเปลือก เพราะกุ้งสามารถดึงเอา Cl ไปใช้ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และอาจจะส่งผลให้กุ้งสามารถปรับอัตราส่วนบางชนิดให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกัน ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 30 ppt พบว่า Na, Cl และ K ในพลาสมามีค่า 12,161, 9,766 และ 514 mg/L ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับ Na ในตับมีค่า 6.7 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ขณะที่ในตับมีความเข้มข้นของ Cl และ K (5.8 และ 5.8 mg/g ตามลำดับ) มีค่าต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้ ส่วนในโครงสร้างเปลือก พบว่า Na และ Cl มีค่าสูงกว่า (25.7 และ 36.2 mg/g ตามลำดับ) และ K มีค่า 12.6 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าที่พบในการทดลองครั้งนี้

แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และฟอสฟอรัส (P)

ปริมาณความเข้มข้นของ Ca, Mg และ P ในพลาสมา ดับ และเปลือก พบว่า ชุดควบคุมและชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่า การเสริมแร่ธาตุหรือไม่เสริมแร่ธาตุไม่มีผลกระทบต่อสถานะสมดุลของ Ca, Mg และ P ทั้ง 3 อวัยวะ ยกเว้น Ca และ Mg มีการสะสมในเปลือกสูงขึ้นโดยชุดเสริมแร่ธาตุมีค่าเท่ากับ 91.8 และ 20.2 mg/g ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (60.3 และ 12.2 mg/g ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั้นหมายความว่า การเสริมแร่ธาตุส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างเปลือก เนื่องจากกุ้งสามารถดึงเอา Ca และ Mg ไปใช้ได้มีประสิทธิภาพ และอาจจะส่งผลทำให้อัตราส่วนของแร่ธาตุบางชนิดมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น เพราะ Ca เป็น แร่ธาตุหลักที่สำคัญในการสร้างเปลือกของสัตว์ในกลุ่มครัสเตเชียน (Pratoomchat et al., 2002b) ขณะที่ Mg เป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ (Pratoomchat et al., 2002b) และยังมีความจำเป็นต่อกุ้งทะเลในแง่เป็นตัวช่วยปรับสมดุลไอออนภายในร่างกาย (Mentel & Farmer, 1983) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในกุ้งชนิดเดียวกันที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 30 ppt พบว่า Na, Cl และ K ในพลาสมามีค่า 12,161, 9,766 และ 514 mg/L ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) เช่นเดียวกับ Na ในตับมีค่าเท่ากับ 6.7 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ขณะที่ Cl และ K ในตับมีค่าต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้ (5.8 และ 5.8 mg/g ตามลำดับ) ส่วนโครงสร้างเปลือกพบว่า Na

และ Cl มีค่าสูงกว่า (25.7 และ 36.2 mg/g ตามลำดับ) และ K มีค่า 12.6 mg/g (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) ซึ่งต่ำกว่าการทดลองในครั้งนี้

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Ca:P, Cl:K, Na:K และ Cl:Na ในปลาสดตามลำดับ และเปลือกของกุ้งหัดควบคุมและหัดเสริมแร่ธาตุ พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นอัตราส่วนของ Cl:K, Ca:P และ Cl:Na ในเปลือกที่หัดควบคุม มีค่าเท่ากับ 0.6:1, 3.5:1 และ 1:1 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าหัดเสริมแร่ธาตุ (1:1, 4.5:1 และ 1.6:1 ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติขณะที่อัตราส่วนของ Na:Mg ที่หัดควบคุมมีค่าเท่ากับ 1.6:1 ซึ่งสูงกว่าหัดเสริมแร่ธาตุ (1:1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องมาจากการเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วนทำให้กุ้งยอมรับ Cl, Mg และ Ca ได้สูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน แสดงว่าการเสริมแร่ธาตุไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการควบคุมอัตราส่วนในปลาสดและดัก แต่กลับส่งผลดีต่ออัตราส่วนในโครงสร้างเปลือก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในปลาสดกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็ม 30 ppt ยกเว้นอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg และ Ca:P มีค่า 0.2:1, 79.2:1 และ 4.0:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ, 2551) และในดักให้ผลแตกต่างกันกับการทดลองในครั้งนี้ โดยอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K, และ Ca:P มีค่า 1.3:1, 2.6:1, 1.2:1, 0.08:1, 0.09:1 และ 0.2:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552) เช่นเดียวกับในโครงสร้างเปลือกอัตราส่วนของ Mg:Ca, Na:Mg, Na:K, Cl:Na, Cl:K และ Ca:P มีค่า 0.08:1, 2.4:1, 2.0:1, 1.4:1, 2.9:1 และ 26.4:1 ตามลำดับ (สว่างพงษ์ สมมาตร, 2552)

สรุปผลการวิจัย

1. การเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วน จำเป็นต่อการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็มต่ำกว่า 10 ppt ขณะที่ความเค็มสูงน่าจะมีการเสริมแร่ธาตุบางชนิดลงไปเพื่อให้มีอัตราส่วนของแร่ธาตุที่เหมาะสมกับความต้องการทางสรีระเคมีของกุ้งขาว (*L. vannamei*)
2. การเสริมแร่ธาตุโดยคำนึงถึงอัตราส่วน ในระบบการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในน้ำความเค็มต่ำมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

ข้อเสนอแนะ

1. การเสริมแร่ธาตุในระบบน้ำเพื่อใช้เลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ควรพิจารณาอัตราส่วนที่เหมาะสมกับความต้องการของกุ้ง เพื่อกุ้งได้นำแร่ธาตุไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. การเสริมแร่ธาตุลงในน้ำนั้น มีผลทำให้ความเค็มน้ำสูงขึ้นได้ พื้นที่เลี้ยงกุ้งที่มีเขตติดต่อกับควรต้องระมัดระวังผลกระทบของความเค็มต่อระบบการเกษตรอื่น ๆ และควรต้องมีบ่อเก็บกักน้ำภายในฟาร์ม

รายการอ้างอิง

- ชลอ ถิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์ราชกุล. (2547). อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 206 หน้า.
- บุญรัตน์ ประทุมชาติ. (2545). เอกสารประกอบการสอนวิชาการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง. ภาควิชาวาริชศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา. 524 หน้า.
- บุญรัตน์ ประทุมชาติ บัลลังก์ เนื่องแสง และณอมศักดิ์ บุญศักดิ์. (2547ก). ผลของการเสริมเกลือแร่ในอาหารและการเปลี่ยนแปลงสรีระเคมีของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ที่เลี้ยงระบบพัฒนา. ภาควิชาวาริชศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา. 64 หน้า
- บุญรัตน์ ประทุมชาติ พิชายู สว่างวงศ์ และจอร์จ มาซาโด. (2546). ผลของความเค็มน้ำต่อขบวนการลอกคราบและการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของปูทะเล. (*Scylla serrata*). รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา. 78 หน้า.
- บุญรัตน์ ประทุมชาติ พิชายู สว่างวงศ์ และจอร์จ มาซาโด. (2547ข). ผลของความเค็มน้ำต่อขบวนการลอกคราบและการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีของปูม้า (*Portunus pelagicus*) ในรอบวงจรการลอกคราบ. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา. 78 หน้า
- สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ. (2551). ผลของความเค็มน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงออสโมลาลิตีในเลือด และความเข้มข้นของแร่ธาตุ 9 ชนิดในพลาสมาของกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*). ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 (หน้า 109-118). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สว่างพงษ์ สมมาตร. (2552). ผลของความเค็มน้ำต่อสรีระเคมีและการเสริมแร่ธาตุบางชนิดในระบบการเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เจริญพาณิชย์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สาขาวิชาวาริชศาสตร์, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยบูรพา. 74 หน้า
- ธานินทร์ คำสี. (2543). ผลของความเค็มน้ำต่อการลอกคราบของปูทะเล (*Scylla* sp.). ปัญหาพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาวาริชศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา. 41 หน้า
- Boyd, C. E., Thunjai, T., & Boonyaratpalin, M. (2002). Dissolved salts in waters for inland, low-salinity shrimp culture. *Global Aquaculture Advocate*, 5, 40-45.
- Burton, R. F. (1995). Cation balance in crustacean haemolymph : relationship to cell membrane potentials and membrane surface charge. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 111(A), 125-131.
- Carvalho, P. S. M. (1992). Bioenergetica do camarao-sete-barbas *Xiphopenaeus kroyeri* (Heller, 1862). Avaliacao do metabolismo, excrecao de amonia e calorimetria. Master of

Science dissertation, University of Sao Paulo, IOUSP, Sao Paulo, Brazil, 206 pp.

- Castille, F.L., and Lawrence, A.L., (1981). The effect of salinity on the osmotic, sodium and chloride concentrations in the hemolymph of euryhaline shrimp of the genus *Penaeus*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 68(A), 75-80.
- Chen, J. C., & Lin, J. L. (1994). Osmolality and Chloride Concentration in the hemolymph of sub adult *Penaeus Chinensis* subjected to different salinity levels. *Aquacul*, 125, 167-174.
- Chen, J. C., Lin, M. N., Ting, Y. Y., & Lin, J. N. (1995). Survival, haemolymph osmolality and tissue water of *Penaeus chinensis* juvenile acclimated to different salinity and temperature levels. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 110(3), 253-258.
- Cheng, K., Hu, C., Liu, Y., Zheng, S., and Qi, X. (2006). 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.
- Cheng, W., Liub, C. H., Yan, D. F., & Chen, J. C. (2002). Hemolymph oxyhemocyanin, protein, osmolality and electrolyte levels of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* in relation to size and molt stage. *Aquaculture*, 211, 325-339.
- Cooper, A. R., & Morris, S. (1997). Osmotic and ionic regulation by *Leptograpsus variegatus* during hyposaline exposure and in response to emersion. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 214, 263-282.
- Cuzon, G., Lawrence, A., Gaxiola, G., Rosas, C., & Guillaume, J. (2004). Nutrition of *Litopenaeus vannamei* reared in tanks or in ponds. *Aquaculture*, 235, 513-551.
- Davis, D. A., & Lawrence, A. L. (1997). Minerals. In *Crustacean Nutrition Advances in World, Aquaculture*, vol 6, D' Abramo L. R., Conklin, D. E., and Akiyama, D. M. (Eds.) (p. 150-163). The World Aquaculture Society, the United States of America.
- Davis, D. A., Boyd, C. E., & Rouse, D. B. (2005). Effects of potassium, magnesium and age on growth and survival of *Litopenaeus vannamei* post-larvae reared in inland low salinity well waters in west Alabama. *World Aquaculture Society*, 36, 416-419.
- 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*, (SRAC), Publication, No. 2601.

- Davis, D. A., Saoud, I. P., McGraw, W. J., & Rouse, D. B. (2002). Considerations for *Litopenaeus vannamei* reared in inland low salinity waters. In: Cruz-Suárez, L. E., Rique-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Gaxiola-Cortés, M. G., Simoes, N. (Eds.) (p. 73-90) Avances en Nutrición Acuicola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuicola. 3 al 6 de Septiembre del 2002.
- Fa-yi, L., He-fang, L., Hui-liang, W., De-hai, L., & Yu-chuan, T. (1995). Requirements of shrimp *Penaeus chinensis* o'sbeck for potassium, sodium, magnesium and iodine. *Oceanology, Chinese Academy of Sciences*, 13(2), 141-146.
- Ferraris, R. P., Parado-Esteva, F. D., Ladja, J. M., & de Jesus, E. G. (1986). Effect of salinity on the osmotic, chloride, total protein and calcium concentrations in the hemolymph of the prawn *Penaeus monodon* (Fabricius). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 83(A), 701-708.
- Greenaway, P. (1972). Calcium regulation in the fresh-water crayfish *Austropotamobius pallipes* (Lereboullet). *Journal of Experimental Biology*, 57, 471-478.
- Kinsey, S. T., & Lee, B. C. (2003). The effect of rapid salinity change on in vivo arginine kinase flux in the juvenile blue crab *Callinectes sapidus*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 135(B), 521-531.
- 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.
- Kumlu, M., & Jones D.A. (1995). Salinity tolerance of hatchery-reared post-larvae of *Penaeus indicus* H. Milne Edwards originating from India. *Aquaculture*, 130, 287-296.
- Kurmaly, K., Yule, A. B., & Jones, D. A. (1989). An energy budget for the larvae of *Penaeus monodon* (Fabricius). *Aquaculture*, 81, 13-25.
- Lee, P. G., & Lawrence, A. L. (1997). Digestibility. In: *Crustacean Nutrition, Advances in World Aquaculture*, vol. 6, D'Abramo, L.R., Conklin, D.E., Akiyama, D.M. (Eds.) (p. 194-260). World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA.
- Lemos, D., & Phan, V. N. (2001). Energy partitioning into growth, respiration, excretion and exuvia during larval development of the shrimp *Farfantepenaeus paulensis*. *Aquaculture*, 199, 131-143.

- Li, E., Chen, L., Zeng, C., Chen, X., Yu, N., Lai, Q., & Qin, J. G. (2007). Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities. *Aquaculture*, 265, 385-390.
- Li, E., Chen, L., Zeng, C., Chen, X., Yu, N., Lai, Q., & Qin, J. G. (2008). Comparison of digestive and antioxidant enzymes activities, haemolymph oxyhemocyanin contents and hepatopancreas histology of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at various salinities. *Aquaculture*, 274, 80-86.
- Lignot, J. H., Spanings-Pierrot, C., & Charmantier, G. (2000). Osmoregulatory capacity as a tool In monitoring the physiological condition and the effect of stress in crustacean. *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*, 127(A), 121-129.
- Lin, Y. C., & Chen, J. C. (2001). Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 259, 109-119.
- Logan, D. T., & Epifanio, C. E. (1978). A laboratory energy balance for the larvae and juveniles of the American lobster *Homarus americanus*. *Marine Biology*, 47, 381-389.
- Lovell, R.T. (1989). *Nutrition and Feeding of Fish*. Van Nostrand Reinhold, New York. 260 pp.
- Lovett, D. L., Verzi, M. P., Clifford, P. D., & Borst, D. W. (2001). Hemolymph levels of Methyl farnesoate increase in response to osmotic stress in the green crab *Carcinus maenas*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 128(A), 299-306.
- Lovett, D., Towle, D., & Fairs, J. (1994). Salinity-sensitive alkaline phosphatase activity in gills of the blue crab, *Callinectes sapidus* Rathbun. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 109(B), 163-173.
- Mananes, Lopes A. A., Meligeni, C. D., & Goldemberg, A. L. (2002). Response to environmental salinity of $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ATPase activity in individual gills of the euryhaline crab *Cyryograpsus angulatus*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 274, 75-85.
- Mantel, L. H., & Farmer, L. L. (1983). Osmotic and ionic regulation. In : *The Biology of Crustacea*, vol 5, Internal anatomy and Physiological regulation, Mantel, L.H. (ed) (p. 53-61). Academic Press, New York.

- McFarland, W. N., & Lee, B. D. (1963). Osmotic and ionic concentrations of penaeidean shrimps of the Texas coast. *Bulletin of Marine Science*, 13, 391-417.
- McGraw, W. J., Davis, D. A. Teichert-Coddington, D., & Rouse, D. B. (2002). Acclimation of *Litopenaeus vannamei* postlarvae to low salinity: Influence of age, salinity endpoint, and rate of salinity reduction. *Journal of the World Aquaculture Society*, 337(1), 8-84.
- McGraw, W. J., & Scarpa, J. (2003). Minimum environmental potassium for survival of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) in freshwater. *Journal of Shellfish Research*, 22, 263-267.
- McNevin A. A., Boyd, C. E., Silapajarn, O., & Silapajarn, K. (2004) Ionic supplementation of pond waters for inland culture of marine shrimp. *Journal of the World Aquaculture Society*, 35, 460-467.
- O' Brien, C.J. (1994). The effects of temperature and salinity on growth and survival of juvenile tiger prawns *Penaeus esculentus* (Haswell). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 183(1), 133-145.
- Pan, L. Q., Luan, Z. H., & Jin, C. X. (2006). Effects of Na^+/K^+ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratios in saline groundwaters on Na^+-K^+ -ATPase activity, survival and growth of *Marsupenaeus japonicus* postlarvae. *Aquaculture*, 261, 1396-1402.
- Pan, L.Q., Ling-Xu, Jiang, Jing-Jing, Lu-Qing, Pan, M., Ling-Xu, Jiang, Jing-Jing, & Miao. (2005). Effects of salinity and ph on immune parameters of the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Shellfish Research*, 24(4), 1223-1227.
- Parado-Esteva, F.D., Ladja, J.M., de Jesus, E.G., & Ferraris, R.P., (1989). Effect of salinity on hemolymph calcium concentration during the molt cycle of the prawn *Penaeus monodon*. *Marine Biology*, 102(2), 189-193.
- Penaflorida, V. D. (1999). Interaction between dietary levels of calcium and phosphorus on growth of juvenile shrimp *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 172, 281-289.
- 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.
- Ponce-Palafox, J., Martinez-Palacios, C. A., & Ross, L. G. (1997). The effects of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp, *Penaeus vannamei*, Boone, 1931. *Aquaculture*, 157, 107-115.

- Potts, W. T. W., & Parry, G. (1964). Osmotic and ionic regulation in animals: In *international series of monographs on pure and applied biology*, Kerkut, G.A. (Ed.) (p. 423) Pergamon press, Oxford.
- Prangnell, D. I., & Fotadar, R. (2005). The effect of potassium concentration in inland saline water on the growth and survival of the western king shrimp, *Penaeus latisulcatus* Kishinouye, 1896. *Journal of Applied Aquaculture*, 17(2), 19-34.
- Prangnell, D. I., & Fotadar, R. (2006a). Effect of sudden salinity change on *Penaeus latisulcatus* Kishinouye osmoregulation, ionoregulation and condition in inland saline water and potassium-fortified inland saline water. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 145(A), 449-457.
- Prangnell, D. I., & Fotadar, R. (2006b). The growth and survival of western king prawns, *Penaeus latisulcatus* Kishinouye, in potassium-fortified inland saline water. *Aquaculture*, 259, 234-242.
- Prangnell, D. I., & Fotadar, R. (2009). Effect of sudden change in potassium concentration on *Penaeus latisulcatus* Kishinouye survival, osmolality and health in inland saline water cultures. *Hydrobiologia*, 626, 145-153.
- Pratoomchat, B., Sawangwong, P., Guedes, R., Reis, M. D. L., & Machado, J. (2002a). Cuticle ultrastructure changes in the crab *Scylla serrata* over the molt cycle. *Journal of Experimental Zoology*, 293(4), 414-426.
- Pratoomchat, B., Sawangwong, P., Pakkong, P., & Machado, J. (2002b). Organic and inorganic compound variations in hemolymph, epidermal tissue and cuticle over the molt cycle in *Scylla serrata*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 131(A), 243-255.
- 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). Academic Press, New York.
- Roy, L. A., Davis D. A., & Saoud, I. P. (2006). Effects of lecithin and cholesterol supplementation to practical diets for *Litopenaeus vannamei* reared in low salinity waters. *Aquaculture*, 257, 446-452.

- Roy, L. A., Davis, D. A., Saoud, I. P., & Henry, R. P. (2007a). Branchial carbonic anhydrase activity and ninhydrin positive substances in the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, acclimated to low and high salinities. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 147(A), 404-411.
- Roy, L. A., Davis, D. A., Saoud, I. P., & Henry, R. P. (2007b). 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*, 262, 461-469.
- Roy, L. A., Davis, D. A., & Whitis, G. N. (2009). Pond-to-pond variability in post-larval shrimp, *Litopenaeus vannamei*, survival and growth in inland low-salinity waters of west Alabama. *Aquaculture Research*, 1-7.
- Rosas, C., Martinez, E., Gaxiola, G., Brito, R., Sanchez, A., & Soto, L. A. (1999). The effect of dissolved oxygen and salinity on oxygen consumption, ammonia excretion and osmotic pressure of *Penaeus setiferus* (Linnaeus) Juveniles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 234, 41-57.
- Sang, H. M., & Fotedar, R. (2004). Growth, survival, haemolymph osmolality and organosomatic indices of the western king prawn (*Penaeus latisulcatus* Kishinouye, 896) 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.
- Saoud, I. P., Davis, D. A., & Rouse, D. B. (2003). Suitability studies of inland well waters for *Litopenaeus vannamei* culture. *Aquaculture*, 217, 373-383.
- Shiau, S. Y., & Hsieh, J. F. (2001). Dietary potassium requirement of juvenile grass shrimp *Penaeus monodon*. *Fisheries Science*, 67, 592-595.
- Shakeeb-Ur-Rahman, Jain, A. K., Reddy, A. K., Kumar, G., and Raju, K. D. (2005). Ionic manipulation of inland saline groundwater for enhancing survival and growth of *Penaeus monodon* (Fabricius). *Aquaculture Research*, 36(12), 1149-1156.
- Skinner, D. M., Marsh, D. J., & Cook, J. S. (1965). Physiological salt solution for the land crab *Gecarcinus lateralis*, *Biological Bulletin*, 129, 355-365.

- Sowers, A. D., Young, S. P., Grosell, M., Browdy, C. L., & Tomasso, J. R. (2006). Hemolymph 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*, 145(A), 176-180.
- Sowers A. D., Gatlin, D. M., Young, S. P., Isely, J. J., Browdy, C. L., & Tomasso, J. R. (2005). Responses of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in water containing low concentrations of total dissolved solids. *Aquaculture Research*, 36, 819-823.
- Soyel, H. U., & Kumlu, M., (2003). The Effects of Salinity on Postlarval Growth and Survival of *Penaeus semisulcatus* (Decapoda: Penaeidae). *Turkish Journal of Zoology*, 27, 221-225.
- Tantulo, U., & Fotedar, R. (2006). Comparison of growth, osmoregulatory capacity, ionic regulation and organosomatic indices of black tiger prawn (*Penaeus monodon* Fabricius, 1798) juveniles reared in potassium fortified inland saline water and ocean water at different salinities. *Aquaculture*, 258, 594-605.
- Tantulo, U., & Fotedar, R. (2007). Osmo and ionic regulation of black tiger prawn (*Penaeus monodon* Fabricius 1798) juveniles exposed to K^+ deficient inland saline water at different salinities. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 146(A), 208-214.
- Taylor, E. W., & Whiteley, N.M. (1989). Oxygen transport and acid-base balance in the haemolymph of the lobster, *Homarus gammarus*, during aerial exposure and resubmersion. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 144, 417-436.
- Towle, D.W. (1981). Role of $Na^+/K^+-ATPase$ in ionic regulation by marine and estuarine animals. *Marine Biology*, 2, 107-122.
- Vijayan , K. K., & Diwan, A. D. (1996). Fluctuations in Ca, Mg, and P Level in the hemolymph, muscle, midgut gland and exoskeleton during the moult cycle of the Indian White rawns, *Penaeus indicus*. (Decapods penaeidae). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 14(A), 91-97.
- Villarreal, H., Hinojosa, P., & Naranjo, J. (1994). Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus vannamei* postlarvae. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 108(A), 331-336.

- Wang, W. N., Wang, A. L., Wang, D. M., Wang, L., Liu, Y., & Sun, R. Y. (2003). Calcium, phosphorus and adenylate levels and $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ activities of prawn, *Macrobrachium nipponense*, during the moult cycle. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 134, 297-305.
- Whetstone, J. M., Treece, G. D., Browdy, C. L., & Stokes, A. D. (2002). Opportunities and constraints in Marine Shrimp Farming. *Southern Regional Aquaculture Center. Publication*, 2600, 8 pp.
- Zanotto, F. P., & Wheatly, M. G. (2003). Calcium balance in crustaceans: nutritional aspects of physiological regulation. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 133(A), 645-660.
- Zare, S., & Greenway, P. (1998). The effect of moulting and sodium depletion on sodium transport and the activities of $\text{Na}^+\text{/K}^+\text{-ATPase}$, and V-ATPase in freshwater crayfish *Cherax destructor* (Crustacea: Parastacidae). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 119(A), 39-745.
- 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., Wang, F., & Zhang, H. (2006). Effects of seawater potassium concentration on the dietary potassium requirement of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 258, 543-550.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสภามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ประจำปี 2554 และได้รับการเอื้อเฟื้อสถานที่จาก
ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา