เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรักษาสมดุลไอออน

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

ความเข้มข้นของ Na และ Cl ในเลือดมักจะใกล้เคียงกับค่าที่จุดสมดุล เมื่อสัตว์อยู่ในน้ำทะเลและศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบจำนวนเล็กน้อยมักจะถูกนำมานับด้วย ซึ่งที่จุดสมดุลนี้มักจะทำให้ในเลือดมีค่า Na มากเกินจริง และมี Cl น้อยกว่าค่าจริงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำภายนอก มักจะพบว่า K ในเลือดมีความเข้มข้นมากกว่าในน้ำภายนอก แม้ว่าบางส่วนอาจจะมาจากการปนเปื้อน โดยเซลล์ ถ้ามีการนำเลือดมาใช้ในการวิเคราะห์ การรักษาสมดุลของไอออนที่มีประจุ 2 หน่วย (divalent ion) ยิ่งมีความซับซ้อนมากกว่า 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^{2-}_4, HCO^{-}_3, PO^{3-}_4 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 ซึ่งของเสียและไนโตรเจนที่ขับถ่ายออกมามักจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย และยังมีความสำคัญกับคุณสมบัติของเลือด โดยองค์ประกอบของเลือดมีทั้งส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หลัก ๆ ได้แก่

โซเดียม (Na)

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

คลอไรด์ (Cl)

คลอไรด์พบในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์สัตว์ สามารถสะสมได้มากกว่า Na และ K มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับ Na เป็นธาตุที่มีการเคลื่อนย้ายเร็วเมื่อน้ำภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง ช่วยรักษาความดันออสโมติก และยังควบคุมการเข้าออกของสารและน้ำภายนอกเซลล์ Cl เกี่ยวข้องกับการเกิดสมดุลของแคทไอออน (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 ($CaCO_3$) ตามปกติ แล้วจะมีการสะสมไว้ในตับโดยอยู่ในรูปของเกลือแคลเซียมฟอสเฟต ($CaPO_4$) อาจจะมีการสะสม Ca ในเลือดและที่ส่วนอื่นของร่างกายโดยเชื่อมกับโปรตีน สัตว์ต้องควบคุมไม่ให้ระดับของ Ca ในเลือดสูงเกินไป จึงต้องทำการขับออก

นอกร่างกาย และนำไปสร้างเปลือก หรือเก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546) Ca จะมีการเคลื่อนที่เข้าสู่ร่างกายของครัสเตเชียนในระยะหลังการลอกคราบ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระยะคราบแข็ง พบว่า มีการเคลื่อนที่ออกสู่น้ำภายนอกในระยะก่อนการลอกคราบ (Zanotto & Wheatly, 2003) เช่นเดียวกับในกุ้ง *P. indicus* ความเข้มข้น Ca ในเนื้อเยื่อเปลือกมีการสะสมสูงที่ระยะก่อนการลอกคราบและระยะคราบแข็ง และจะลดการสะสมหลังการลอกคราบ (Vijayan & Diwan, 1996) นอกจากนี้ Ca ยังทำหน้าที่เกี่ยวกับการจับตัวของเลือด (blood clotting) การหดตัวของกล้ามเนื้อ (muscle contraction) การส่งกระแสประสาท (nerve transmission) ควบคุมสมดุลเกลือแร่ (osmoregulation) และเป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์ต่าง ๆ (Cheng, Hu, Liu, Zheng, & Qi, 2006) นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทสำหรับการทำงานของฮอร์โมน และสัตว์ต้องควบคุมไม่ให้ระดับของ Ca ในเลือดสูงเกินไป จึงต้องทำการขับออกนอกร่างกาย นำไปใช้ในการสร้างเปลือกหรือเก็บสะสมไว้ในอวัยวะต่าง ๆ (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

โพแทสเซียม (K)

โพแทสเซียมพบอยู่ในเซลล์ของร่างกายและเลือด ซึ่งความเข้มข้นของ K ในเลือดของครัสเตเชียนอาจสูงหรือต่ำกว่าน้ำทะเลภายนอก (Burton, 1995) ถ้ามี K ในร่างกายมากเกินไปจะเกิดปัญหาจึงต้องขับออกทางต่อมแอนเทนนัล (Antennal gland) ซึ่งในกุ้ง *P. monodon* เมื่อมีการลดความเค็มอย่างฉับพลันจาก 45 ppt ไปเป็น 15 ppt จะมีกลไกการรักษาสมดุลเกลือแร่ โดยการทำงานของต่อมแอนเทนนัล สัตว์จะพยายามรักษาความเข้มข้นของ K ไว้ และขับ Na ออกมา จึงพบความเข้มข้นของ Na ในปัสสาวะสูงกว่าในเลือด ขณะที่ K ในปัสสาวะจะต่ำกว่าในเลือด (Lin, Liou, & Cheng, 2000)

แมกนีเซียม (Mg)

ในครัสเตเชียนทั่วไปที่อาศัยอยู่ในน้ำทะเลจะมีความเข้มข้น Mg ภายในร่างกายต่ำกว่าในน้ำทะเลภายนอก Mg อยู่ในโครงสร้างของร่างกายประมาณ 70% ส่วนอีก 30% พบในเนื้อเยื่อและเลือด (Burton, 1967, 1973, 1975 cited in Burton , 1995) ในกุ้ง *P. indicus* การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Mg ในเนื้อเยื่อมีแนวโน้มคล้ายกับ Ca สันนิษฐานว่า Mg ใช้แทนที่ Ca ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในกระบวนการสร้างเปลือกของครัสเตเชียน แม้ว่า Mg ในเปลือกของเดคาพอดในระยะคราบแข็งมีระดับต่ำกว่า 0.55% (Vijiyan & 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 ยังเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิก และสารประกอบฟอสโฟไลปิดที่สำคัญในร่างกาย เช่น โคเอนไซม์ NADP และ ATP เป็นต้น ซึ่งอยู่ในบริเวณสมองและระบบประสาท (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2546)

ผลของความเค็มน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแร่ธาตุหลักในเลือดกุ้ง

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

ความเค็มน้ำภายนอกมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง Na, Cl และ K ในพลาสมา โดยที่ความเค็ม 5 ppt ปริมาณของ Na, Cl และ K มีความเข้มข้นในพลาสมาต่ำที่สุด และมีความเข้มข้นสูงเมื่อความเค็มน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยมีความเข้มข้นสูงสุดที่ความเค็ม 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 ปริมาณของแร่ธาตุดังกล่าวจึงเพิ่มขึ้นตามความเค็มน้ำซึ่งสัมพันธ์กับค่าออสโมลาลิตี้

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

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

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

ค่าออสโมลาลิตี้ (osmolality) ในพลาสมาของกุ้งขาว (*L. vannamei*) มีค่าปกติประมาณ 573 mOsm/kg ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Castille and Lawrence 1986; Sowers, Young, Grosell, Browdy, and Tomasso (2006) พบว่า ค่าออสโมลาลิตี้จะมีค่าลดลงเมื่อความค็มน้ำลดลงเหมือนกับกุ้งชนิดอื่น ๆ (McFarland & Lee, 1963; Castille & Lawrence, 1981; Ferraris, Parado-Estepa, Ladja, & Jesus, 1986; Sowers et al., 2006) มีปริมาณของ K ที่ระดับ 10.5 mmol/L เช่นเดียวกันกับที่พบในกุ้ง *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 ในพลาสมามี 10.2 mmol/L เช่นเดียวกับกุ้งชนิดอื่น ๆ ในความเค็มต่ำ (McFarland & Lee, 1963; Ferraris et al., 1986; Sowers et al., 2006) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามความเค็มที่ลดลงเช่นเดียวกันกับ *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 และคาดว่าน่าจะมีผลทำให้เลือดกุ้งมีสภาพเป็นกรดด้วย 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 Carboxypepidase (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) ของครัสเตเชียนที่อาศัยในทะเล (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ, 2547ข)

แร่ธาตุหลัก (Macro Minerals)

แคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P)

โดยทั่วไปปลาและกุ้งสามารถดึง Ca จากน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ (Desshimaru 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 ของสัตว์น้ำจากน้ำจืดหรือน้ำเค็มโดยทั่วไปยังไม่เพียงพอ ดังนั้น P ในอาหารสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ พบว่า ครัสเตเชียนมีความต้องการ 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*) ส่วนมากมาจากน้ำภายนอก เป็นส่วนน้อยที่ได้จากการเก็บสะสมไว้ในตัวปู 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 จะมีระยะเวลาที่เปลือกนิ่มนานขึ้น เห็นได้ชัดเจนในปูที่ลอกคราบในน้ำความเค็ม 25 ppt ที่มีระดับ Ca ต่ำลง โดยปูจะมีระยะเวลาที่เปลือกนิ่มยาวนานกว่าที่ความเค็ม 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-Estepa, 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 ในพลาสมาต่ำ และความเข้มข้นของ 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 และA 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 (Penaflorida, 1999) เช่นเดียวกับกุ้งขาว (*L. vannamei*) การเสริม Ca กับ P และ Ca:P มีผลต่อการเจริญเติบโต การสะสมแร่ธาตุในเนื้อเยื่อกุ้งที่เลี้ยงในความเค็มต่ำ 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 แต่มีการเจริญเติบโตลดน้อยลงหากมีการเสริมมากเกิน 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 จึงทำให้กุ้งได้รับไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการทางสรีระเคมีเพื่อการเจริญเติบโตสูงสุด การสร้างเนื้อเยื่อจากการสะสมแร่ธาตุ (tissue mineralization) และกิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) อีกทั้งกุ้งยังต้องใช้ Cu เพื่อเป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่เกี่ยวก้องกับการหายใจ (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)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ - 8 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 245680
เลขเรียกหนังสือ

ไอโอดีน (I) และแมงกานีส (Mn)

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

ซิลิเนียม (Se)

เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์กลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ไปเป็นน้ำ และลิปิดไฮเปอร์ออกไซด์ (lipid alcohols) และป้องกันเซลล์จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดส (peroxidase) ร่วมกับไวตามินอี ทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เพื่อป้องกันฟอสโฟลิปิดสายยาวที่ไม่อิ่มตัว (polyunsaturated phospholipids) ในเยื่อหุ้มเซลล์ (cellular membranes) จากการทำลายของเปอร์ออกซิเดทีฟ (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 ในอาหารโดยปราศจากไฟเตส (Davis & Lawrence, 1997)

การขนส่งแร่ธาตุในครัสเตเชียน

กระบวนการขนส่งแร่ธาตุในครัสเตเชียนสามารถจำแนกได้ 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 เอนโดไซโตสีส (endocytosis) กระบวนการนี้เริ่มจากเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการเว้าเข้าไปโดยโอบล้อมไอออนต่าง ๆ ไว้ภายใน จากนั้นไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายเข้าสู่ภายในเซลล์

ผลของความเค็ม การเสริมแร่ธาตุและอัตราส่วนของแร่ธาตุที่มีผลต่อสรีระเคมีของกุ้งทะเล

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ผลของการเปลี่ยแปลงความเค็ม ต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง

การเลี้ยงกุ้งในน้ำความเค็มต่ำหรือน้ำกร่อย จะส่งผลต่อ osmo- และ ionic-regulation ในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณไอออนต่ำและมีอัตราส่วนของแร่ธาตุแตกต่างไปจากน้ำทะเล การลดลงของความเค็มจะส่งผลให้ osmo- และ ionic-regulation ลดลงเช่นกัน และความเค็มน้ำยังมีผลต่อความเข้มข้นของแคทไอออนในเลือดและ 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 และ17.72 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 กุ้งระยะโพสลาวามีประสิทธิภาพในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมช้า 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. latisulcatus* เลี้ยงในน้ำความเค็ม 34 ppt มีน้ำหนักตัว ความยาวของลำตัว และอัตราการเจริญเจิบโตจำเพาะ 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-Palafor et al., 1997)

การเสริมแร่ธาตุและอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้ง

การเสริมแร่ธาตุลงไปในน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการ และจะไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การดำรงชีวิตของกุ้ง เช่น ควรเสริม 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 ในปริมาณและอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้กุ้งระยะโพสลาวามีอัตราการรอดและสามารถปรับสภาพตัวได้ดีที่ความเค็มต่ำ (McGraw, Davis, Teichert-Coddington, & Rouse, 2002; McGraw & Scarpa, 2003; Saoud, Davis, & Rouse, 2003; Davis, Boyd, & Rouse, 2005; Boyd, Thunjai, & Boonyaratpalin, 2002) และสภาวะการขาด K เป็นผลให้เกิดการตายในไมซิสของกุ้ง *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 ใช้ร่วมกับ 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) สอดคล้องกับงานการวิจัยของ 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 เพียงอย่างเดียวลงไปในน้ำ ยังสามารถ

เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งขาว (*L. vannamei*) อย่างไรก็ตาม อัตราการรอดของกุ้งยังขึ้นอยู่กับอายุและความเข้มข้นของ Na, Cl, K, Mg และ SO_4^- อีกด้วย (Davis, Saoud, McGraw, & Rouse, 2002) เช่นเดียวกับงานวิจัยในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา (PL_{18} และ PL_{28}) 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. latisulcatus* ที่ความเค็ม 32 ppt พบว่าเมื่อเสริม K จะส่งผลให้กุ้งมีอัตราการรอดสูงถึง 100% และความเข้มข้นของ K ในพลาสมาจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากเติมลงไป 4 ชั่วโมง ส่วนความเข้มข้นของ Na ในพลาสมามีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าออสโมลาลิตี้ตลอด 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับความเข้มข้นของ Mg แต่ความเข้มข้นของ Ca จะมีค่าคงที่ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งในน้ำความเค็มต่ำหากขาด K จะทำให้กุ้งลดการดูดซึมแร่ธาตุเข้าสู่ร่างกาย เมื่ออยู่ในสภาวะอย่างนี้นาน ๆ จะทำให้หน้าที่การรักษาสมดุลของกุ้งล้มเหลวลง (Prangnell & Fotedar, 2006a) และยังส่งผลต่อการตายของไมซีส *Americamysid bahia* (Douglas & Horne, 1997; Pillard et al., 2000, 2002 cited in Prangnell & Fotedar, 2009) เพราะทั้ง K และ Mg มีส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตและทำหน้าที่ควบคุมสมดุลเกลือแร่ของครัสเตเชียน โดยเฉพาะ K จะเป็นไอออนบวกที่มีความสำคัญภายในเซลล์ และกิจกรรมของ Na^+/K^+-ATPase (Mantel & Farmer, 1983) ส่วน Mg มีหน้าที่ในกระบวนการเผาผลาญไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต และมีส่วนร่วมกับกิจกรรมของเอมไซม์ (Davis & Lawrence, 1997)

การเลี้ยงกุ้งที่ความเค็มต่ำหากมีการเสริมแร่ธาตุบางชนิด สามารถช่วยให้กุ้งมีการเจริญเติบโตและอัตรารอดเพิ่มสูงขึ้นได้ เช่นงานวิจัยของ Davis et al. (2005) รายงานว่า การเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ระยะโพสลาวา ที่ความเค็ม 4 ppt โดยการเสริมด้วย KCl, $MgCl_2$ และ KCl ควบคู่กับ $MgCl_2$ลงไปในน้ำ พบว่า สามารถเพิ่มอัตราการรอดของกุ้งให้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่การเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน แต่หากดูในภาพรวมพบว่า การเสริม KCl มีแนวโน้มที่จะส่งผลดีทั้งการเจริญเติบโตและอัตราการรอด ในขณะที่การเสริม $MgCl_2$ กลับมีผลดีเฉพาะอัตราการรอด และในทางกลับกันหากเสริมเฉพาะ NaCl ลงในน้ำ จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ถึงแม้ว่าในน้ำทะเลจะมี NaCl ก็ตาม (Cawthorne et al., 1983 cited in Saoud et al., 2003; Davis, Samocha, & Boyd, 2004) แต่ในทางกลับกัน Na กับ Cl มีส่วนสำคัญต่อความสมดุลเกลือแร่ (Parado-Estepa 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) ขณะที่งานวิจัยของ Sowers, Gatlin,Young, Isely, Browdy, and Tomasso (2005) พบว่าอัตราการรอดของกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำ (2 ppt) ซึ่งเตรียมจากน้ำทะเลปกติเมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งที่เลี้ยงในน้ำทะเลเทียมที่มีความเค็มเท่ากัน แต่มีปริมาณและอัตราส่วนของ Na, K, Ca และ Mg แตกต่างกัน พบว่า อัตราการรอดของกุ้งที่เลี้ยงในน้ำที่เตรียมจากทะเลเทียมสูงกว่าในชุดน้ำทะเลปกติ

ความเข้มข้นของ Ca, Mg และ K มีผลต่อสรีระเคมีของกุ้ง และมีความสำคัญมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Na, Cl และ SO_4^- ที่ทำหน้าที่ในการปรับความเค็มและแรงดันออสโมติก ถึงแม้ว่า Na และ K จะเป็นตัวหลักที่ใช้ในการควบคุมระบบสมดุลเกลือแร่ แต่ K, Mg และ Ca ก็มีส่วนสำคัญในกิจกรรมทางเคมีภายในร่างกายของกุ้ง 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 ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้กุ้งมีกิจกรรมและการกินอาหารลดลงทำให้มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโต (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 ไม่ส่งผลมากหนัก คือ เมื่อในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของ Mg เพิ่ม

สูงขึ้น ส่งผลให้มีสะสมในตับเพิ่มขึ้นเช่นกัน ชี้ให้เห็นว่า หากปริมาณความเข้มข้นของ Mg ที่สะสมอยู่ในตับมีปริมาณต่ำ เป็นเพราะปริมาณแร่ธาตุมีไม่เพียงพอกับความต้องการทางสรีรวิทยาของกุ้ง และยังส่งผลให้กุ้งอยู่ในสภาวะเครียด และยังมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการรอดของกุ้งต่ำลง

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

จากการตรวจสอบเอกสารการวิจัยของกุ้งหลายชนิดที่เลี้ยงในความเค็มน้ำต่าง ๆ กัน พอสรุปรายละเอียดได้ดัง ตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากุ้งแต่ละชนิดมีระดับความต้องการความเค็มของการเลี้ยงที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลผลต่อปริมาณแร่ธาตุและสัดส่วนของแร่ธาตุที่อยู่ในน้ำด้วย

การศึกษาอัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในน้ำของระบบการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ที่ความเค็มน้ำต่าง 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*) เนื่องจากมีสภาวะ 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, 1.4-1.7:1และ 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 ขณะที่ สว่างพงษ์ สมมาตร และบุญรัตน์ ประทุมชาติ (2551) ได้มีการเสนอแนะว่า ความเค็มที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) คาดว่าอยู่ในช่วงความเค็ม 20-35 ppt เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของออสโมลาลิตี้และแร่ธาตุส่วนใหญ่ในระบบเลือด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีระเคมีค่อนข้างต่ำหรือควบคุมได้ดี 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 เมื่อความเค็มน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร อัตราส่วนของแร่ธาตุที่พบในพลาสมายังคงใกล้เคียงกันตลอดช่วงความเค็ม หรือกล่าวได้ว่า กุ้งต้องพยายามรักษาอัตราส่วนของแร่ธาตุให้คงที่ตลอดเวลา ถึงแม้ความเค็มจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเป็นเช่นนี้ 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 เพื่อที่จะเสริมลงไปในน้ำ 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 ความจำเป็นในการสร้างเปลือกโดยใช้แร่ธาตุตามอัตราส่วนดังกล่าวนั้นยังคงมีความจำเป็นและสำคัญ ดังนั้น เมื่อมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อสรีระเคมีและทำให้กุ้งต้องพยายามควบคุมอัตราส่วนในพลาสมาไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักซึ่งต้องมีการใช้พลังงานในการควบคุม จึงมีผลกระทบต่ออัตราส่วนในโครงสร้างเปลือกด้วย ดังนั้น การเสริมแร่ธาตุบางชนิดลงไปในน้ำอาจจะมีผลดีกับโครงสร้างเปลือกของกุ้งได้

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 ชี้ให้เห็นว่าเมื่อความเค็มน้ำสูงขึ้น ความเข้มข้นของ Na และ Cl ในน้ำและพลาสมามีมากขึ้นเช่นกัน 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 จำเป็นที่กุ้งจะจึงต้องขับแร่ธาตุเหล่านี้ออ้กนอกร่างกาย ส่งผลทำให้อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำลง 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	
L. vannamei	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)
P. monodon	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)
M. japonicus	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)	-	-	-	”
P. latisulcatus	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)

<u>หมายเหตุ</u> ตัวเลขในวงเล็บ คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ (mg/L)

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

ชนิดของกุ้ง	ความเค็ม (ppt)	อัตราส่วนของแร่ธาตุในพลาสมา						เอกสารอ้างอิง
		Na:K	Mg:Ca	Na:Mg	Ca:P	Cl:Na	Cl:K	
L. vannamei	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)	”
P. monodon	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)
P. latisulCatus	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	
L. vannamei	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)	”
P. monodon	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)